



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. УРАЛЕННИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



МАТЕРИАЛЫ

XVIII ВСЕРОССИЙСКОЙ
МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ

(МКПУ — 2025)

ТОМ 2

УПРАВЛЕНИЕ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ

ТУЛА, 15 — 20 СЕНТЯБРЯ 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
ПИШ «Тульская инженерная школа «Интеллектуальные
оборонные системы»
ФГБУН «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова» РАН
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

НПО Специальных материалов
Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ
ФАУ Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского

XVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ–2025)

(15 сентября – 20 сентября 2025 г.)

Том 2

***УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ (УРСС – 2025)***

Тула
Издательство ТулГУ
2025

УДК 681.516.73(062)

ББК 32.965я431

У67

Редакционная коллегия

академик РАН И.А. Каляев – ответственный редактор
академик РАН Д. А. Новиков; канд. техн. наук А.П. Кухаренко; академик РАН И.В. Бычков; д-р техн. наук В.М. Вишневский; член-корр. РАН А.А. Галяев; д-р техн. наук В.С. Заборовский; д-р техн. наук А.И. Каляев; канд. техн. наук Я.С. Коровин; д-р техн. наук В.В. Кореньков; член-корр. РАН Н.В. Кузнецов; д-р техн. наук И.И. Левин; д-р техн. наук Ю.Л. Леохин; д-р техн. наук Э.В. Мельник; член-корр. РАН В.И. Некоркин; д-р техн. наук К.Е. Самуилов; д-р техн. наук П.О. Скобелев; член-корр. РАН Р.Л. Смелянский; д-р техн. наук А.А. Сычугов; д-р техн. наук В.В. Топорков; д-р техн. наук И.В. Фуртат; член-корр. РАН А.Г. Ченцов; д-р техн. наук М.В. Щербаков

У67 XVIII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2025) : материалы мультиконференции (Тула, 15 сентября – 20 сентября 2025 г.) : в 4 т. Т. 2. Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС – 2025) / под ред. академика РАН И.А. Каляев. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2025. — 361 с.

ISBN 978-5-7679-5716-3

ISBN 978-5-7679-5710-1 (Т. 2)

В Томе 2 материалов XVIII Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2025 представлены материалы докладов локальной научно-технической конференции «Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС – 2025)».

УДК 681.516.73(062)

ББК 32.965я431

ISBN 978-5-7679-5716-3

ISBN 978-5-7679-5710-1 (Т. 2)

© Авторы тезисов, 2025

© Издательство ТулГУ, 2025

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблемы управления актуальны практически для всех сфер человеческой деятельности. Создание и развитие современных авиационно-космических комплексов, робототехнических, мехатронных и транспортных систем, распределенных и сетевых структур, автоматизированных производств, социально-экономических систем и т.д., работающих в условиях неопределенности и комплексного воздействия множества факторов, включая человеческий, требует решения сложных задач управления такими системами. Поэтому основной целью XVIII Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2025) является объединение усилий российских ученых для решения актуальных научно-технических проблем в области теории и процессов управления, а также их практического использования в ключевых отраслях экономики России.

Проведение XVIII Всероссийской мультikonференции по проблемам управления позволит:

- российским ученым и специалистам представить широкой научной общественности результаты своих фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в области теории и систем управления;
- выявить основные направления фундаментальных и прикладных исследований по проблемам управления, обсудить сценарные прогнозы их дальнейшего развития;
- обеспечить обмен научными результатами между различными научными школами России;
- передать молодым ученым накопленные современной наукой знания в области теоретических и практических аспектов процессов управления;
- выработать рекомендации по повышению интеллектуализации и конкурентоспособности создаваемых в России образцов техники;
- обсудить проблемы образования и подготовки кадров высшей квалификации в области теории и процессов управления;
- издать материалы и лучшие доклады участников конференции для ознакомления широкой научной общественности и повышения уровня подготовки специалистов в высшей школе в данной предметной области.

Научная программа конференции объединяет широкий круг тематических направлений в рамках пяти локальных научно-технических конференций:

– **Робототехника и мехатроника (РиМ-2025)**, председатель Программного комитета – академик РАН Ф.Л. Черноусько, сопредседатель – академик РАН И.А. Каляев;

– **Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС-2025)**, председатель Программного комитета – академик РАН И.А. Каляев, сопредседатель – академик РАН Д.А. Новиков;

– **Управление аэрокосмическими системами (УАКС-2025)**, председатель Программного комитета – академик РАН С.Ю. Желтов, сопредседатель – член-корреспондент РАН К.И. Сыпало;

– **Управление в перспективных наземных транспортных системах (УПНТС-2025)**, председатель Программного комитета – член-корреспондент РАН В.М. Приходько, сопредседатель – член-корреспондент РАН Г.О. Котиев;

– **IV Всероссийская научно-техническая конференция им. Д.В. Коноплева «Перспективы создания и применения высокоточного оружия» (ПСВО-2025)**, председатель Программного комитета – член-корреспондент РАН Е.Н. Семашкин, сопредседатель – д-р техн. наук О.А. Кравченко.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 15 |
| РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ | 16 |
| <i>Бабилов В.Г., Галяев А.А.</i> О ПОСТРОЕНИИ И СВОЙСТВАХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СЕ- ТОК ДЛЯ ДИАГРАММЫ СЛОЖНОСТИ | 17 |
| <i>Бобцов А.А., Маргун А.А.</i> СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕО ПРЕДЕЛЕННЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ | 24 |
| <i>Гежа В.Н., Губанов А.В., Козицин И.В.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СОЦИ- АЛЬНОЙ СЕТИ В SCARDO-МОДЕЛИ | 34 |
| <i>Гисин В.Б.</i> УСРЕДНЕННЫЙ КОНСЕНСУС В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИ- СТЕМАХ С ВИЗАНТИЙСКИМИ УЗЛАМИ | 37 |
| <i>Горбанёва О.И., Иванов М.А., Угольницкий Г.А.</i> КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ | 39 |
| <i>Дивеев А.И., Софронова Е.А.</i> ЗАДАЧА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ СХЕМЫ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ | 46 |
| <i>Котюков А.М., Павлова Н.Г.</i> О РАВНОВЕСИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ РЫНОЧНОЙ МО- ДЕЛИ ТИПА АЛЛЕНА | 49 |
| <i>Кузнецов О.П.</i> НОВЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ НУМЕРАЦИИ ВЕРШИН НЕОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА | 52 |

| | |
|--|-----|
| Лазарев А.А. МЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ РАСПИСАНИЙ $1 r_j L_{max}$ | 55 |
| Лобачев М.Ю., Буркин И.М., Кудряшова Е.В., Кузнецов Н.В., Курков И.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФАЗО- ВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ | 63 |
| Лутовинова Н.А. ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ТОЧНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗА- ДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ СУММАРНОЙ ЗАДЕРЖКИ | 68 |
| Мингазов Д.Р. УПРАВЛЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫМИ СИСТЕМАМИ С ФИКСИРОВАННЫМ ВРЕМЕНЕМ СХОДИМОСТИ НА ОС- НОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОТОКОЛА ЛОКАЛЬНОГО ГОЛО- СОВАНИЯ | 71 |
| Никаноров С.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕОНТЬ- ЕВА С УПРАВЛЕНИЕМ | 85 |
| Пузанов И.И., Положенцев А.А. К ВОПРОСУ О МОДИФИЦИРОВАННОЙ СХЕМЕ УПРАВЛЕ- НИЯ ПЕРЕХОДАМИ В ПРОДУКЦИОННЫХ БАЗАХ ЗНА- НИЙ | 88 |
| Рей А.С. КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО РИСКА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЕГО СТРУКТУРЫ | 91 |
| Рыжов М.С. МОДЕЛИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ | 94 |
| Сметанина В.Д. ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В РАСПРЕ- ДЕЛЕННЫХ МУЛЬТИАГЕННЫХ СИСТЕМАХ | 100 |
| Фуртат И.Б., Вражеский С.А., Гуцин П.А. ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРЕМА О КРУГАХ ГЕРШГОРИНА И ДИ- ВЕРГЕНТНЫЙ МЕТОД В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ | 108 |

| | |
|--|-----|
| <i>Хлебников М.В.</i> СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ | 118 |
| <i>Хлытчиев А.Д., Козицин И.В.</i> КОНСИСТЕНТНОСТЬ ЭПИСТЕМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ АРГУМЕНТОВ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ | 121 |
| <i>Ченцов А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А.</i> РАЗДЕЛЬНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ МАРШРУТИЗАЦИИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДЕКОМПОЗИЦИИ | 124 |
| <i>Широкий А.А.</i> УЧЕТ СТРУКТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РИСКАМИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРЫ | 128 |
| РАЗДЕЛ 2. ПРОБЛЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ | 131 |
| <i>Арсеньев Д.Г., Баскаков Д.Е.</i> ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ. МЕТРИКИ ПРОДУКТА | 132 |
| <i>Арсеньев Д.Г., Гебель Е.С., Шкодырев В.П.</i> УМНЫЕ ФАБРИКИ: ЦИФРОВИЗАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ | 139 |
| <i>Арсеньев Д.Г., Шкодырев В.П.</i> КОГНИТИВНАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ | 142 |

| | |
|--|-----|
| <i>Герасимова А.П., Мальцев А.С.</i> ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЕБ-ПРИЛО- ЖЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «БЫСТРО- ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ» ЦКП «СКИФ» | 146 |
| <i>Григас С.Э., Литовченко Д.Ц., Терехов Ю.Е.</i> АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СЕТЬЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ПРО- СТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНА- ЛОВ В РЕЖИМЕ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКА- ЦИИ | 157 |
| <i>Дранко О.И., Резчиков А.Ф.</i> СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИ- ТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ | 160 |
| <i>Колесов Н.В., Тюльников В.С., Грузликов А.М., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М.</i> МНОГОПУТЕВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ С УПОРЯ- ДОЧИВАНИЕМ СООБЩЕНИЙ | 163 |
| <i>Куклин Е.В., Потехин В.В., Шибалов А.И.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШИМИ ДАННЫМИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕ- МАХ | 167 |
| <i>Мальгина С.А., Шабуров В.М., Панкратова Е.В., Блинова О.В.</i> ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРИ- НЯТИИ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ НАУЧНО-ИССЛЕ- ДОВАТЕЛЬСКИМИ РАБОТАМИ | 171 |
| <i>Орда-Жигулина М.В., Родина А.А., Орда-Жигулина Д.В.</i> МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ КОМПО- НЕНТОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ МОНИ- ТОРИНГА | 174 |
| <i>Охтилев М.Ю., Соколов Б.В.</i> МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ | 178 |

| | |
|--|-----|
| <i>Рафик А., Мельник Я.Э., Лищенко Е.В., Волощук В.И.</i> ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ЛОГИСТИКИ | 181 |
| <i>Сеимов М.С., Филиппов Г.С., Чернецов Р.А.</i> ПРИЁМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ЦИФРОВЫХ И АНАЛОГОВЫХ ДАТЧИКОВ НА ПЛАТФОРМЕ «PHYSICAL COMPUTING» С ОТКРЫТЫМ ПРОГРАММНЫМ КОДОМ | 185 |
| <i>Тарасова Е.Ю.</i> ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАДАЧАМИ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ВРЕМЕННОГО ЗАПАСА | 188 |
| <i>Трефилов П.М.</i> ИНТЕГРАЦИЯ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ | 191 |
| <i>Фархадов М.П., Давыдов Е.Ю., Павлов С.В., Блинова О.В.</i> УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ ПРОЕКТАМИ: ПЕРЕХОД ОТ ЛОКАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДОКУМЕНТАЦИИ К РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИНТЕРАКТИВНЫМ СИСТЕМАМ | 193 |
| <i>Хохловский В.Н., Диб А., Скогликов И.А.</i> АНАЛИЗ SCADA-ПРИЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ | 197 |
| РАЗДЕЛ 3. ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ | 200 |
| <i>Диченко А.А., Сорокин Д.А.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАЗМЕЩЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПЛИС РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ | 201 |
| <i>Клименко А.Б.</i> МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ РЕСУРСНОЙ СТОИМОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ | 204 |

| | |
|--|------------|
| Клименко А.Б., Ельмекеев М.А. АНАЛИЗ РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭВОЛЮЦИОН- НЫХ ПРИНЦИПОВ ЛАМАРКА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ | 207 |
| Коваленко В.Б., Сорокин Д.А. УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ДАННЫХ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ | 210 |
| Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Толмачева М.В., Тюльников В.С. ПЛАНИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ НЕТОЧНО ИЗВЕСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНОСТЯХ ЗАДАЧ | 213 |
| Кузнецова И.Ю., Дордопуло А.А. ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ К ТРЕ- БОВАНИЯМ КОМПЛЕКСА ВЫСОКОУРОВНЕВОГО СИН- ТЕЗА «ТЕСЕЙ» | 217 |
| Левин И.И., Семерников Е.А. ПРИМЕНЕНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ- НЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАН- ЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ | 220 |
| Левин И.И., Дордопуло А.И., Гудков В.А., Гуленок А.А., Кузнецова И.Ю. УПРАВЛЕНИЕ СТРАТЕГИЯМИ ВЫСОКОУРОВНЕВОГО СИНТЕЗА ДЛЯ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ РЕКОНФИГУРИРУ- ЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ | 223 |
| Левин И.И., Дудников Е.А. УПРАВЛЕНИЕ СРЕДСТВАМИ СЖАТИЯ ДАННЫХ В ТЕМПЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА РВС | 226 |

| | |
|---|-----|
| <i>Левин И.И., Доронченко Ю.И., Сорокин Д.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ- НЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ | 229 |
| <i>Михайлов Д.В., Чекина М.Д.</i> УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДА ЯКОБИ ПОСРЕДСТВОМ АВТОПОДСТАНОВКИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИС- ЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ | 233 |
| <i>Подопригора А.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ PAGERANK НА РВС | 236 |
| <i>Титенко Е.А.</i> МУЛЬТИКОНВЕЙЕРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БИТОВЫХ ПОТО- КОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕ- МАХ | 239 |
| <i>Топорков В.В., Емельянов Д.М., Булхак А.Н.</i> ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ВЫПОЛНЕ- НИЕМ НАУКОЕМКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА МУЛЬТИОБЛАЧ- НЫХ ПЛАТФОРМАХ В МОДЕЛИ «ПОТОК РАБОТ КАК СЕР- ВИС» | 245 |
| РАЗДЕЛ 4. ПРОБЛЕМЫ СЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕ- МАХ | 248 |
| <i>Амелин К.С., Архипов И.С., Граничин О.Н., Киселев В.А., Чернов А.О.</i> ЧАСТИЧНО-ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУП- ПОЙ РОБОТОВ ИЗ ЕДИНОГО ЦЕНТРА | 249 |
| <i>Баринков А.А.</i> УНИФИЦИРОВАННАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РЕСУРСОЭФФЕК- ТИВНОСТИ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ FANET | 252 |
| <i>Безбородова Ж.В., Галин Р.Р.</i> АДАПТИВНЫЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ: МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ | 255 |

| | |
|--|-----|
| <i>Белоконов И.В., Синицын Л.И., Шафран С.В., Ломака И.А., Елисов Н.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАНО-СПУТНИКАМИ НАУЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МИССИИ САМСАТ-ИОНОСФЕРА | 260 |
| <i>Бодунков Н.Е., Гиренко Д.С., Ким Н.В., Ляпин Н.А., Удалова Н.В.</i> ОЦЕНКА СХОДСТВА ПО СОСТАВУ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ НАБЛЮДАЕМЫХ СЦЕН В ЗАДАЧЕ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ | 263 |
| <i>Венец В.И., Мещеряков Р.В.</i> КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ | 266 |
| <i>Горшенин И.А., Марков С.В., Фандеев А.Г.</i> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ОБЛАЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ | 269 |
| <i>Захаров В.В., Соколов Б.В.</i> ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВЫХ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ | 272 |
| <i>Капустян С.Г.</i> ИНФРАСТРУКТУРА ТУМАННЫХ И КРАЕВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ | 275 |
| <i>Кулагин К.А., Даукаев Р.О., Ярыгин А.А.</i> РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ UWB-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ | 278 |
| <i>Подвесовский А.Г., Мамченко М.В.</i> МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ЕЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ | 281 |

| | |
|---|-----|
| <i>Подвесовский А.Г., Хадорич Д.Д., Шелепина О.Д., Захарова А.А.</i> | |
| ПРОГРАММНАЯ ПОДДЕРЖКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНА ТРАНСПОРТИРОВКИ РАЗНОРОДНЫХ ГРУЗОВ В БЕСПИ- ЛОТНОЙ АВИАТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ ПО КРИТЕ- РИЮ МИНИМУМА ВРЕМЕНИ | 284 |
| <i>Саломатин А.А.</i> | |
| ПОСТРОЕНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ БАС С ИНТЕРВАЛЬ- НЫМ ОЦЕНИВАНИЕМ ПРОГНОЗНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕ- СКИХ ИНДИКАТОРОВ | 290 |
| <i>Су Дандань, Неусыпин К.А., Ли Фу</i> | |
| ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИЗБЕГАНИЯ ПРЕПЯТ- СТВИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ | 293 |
| <i>Тельминов О.А.</i> | |
| ОСОБЕННОСТИ НЕЙРОПОДОБНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МНО- ГОАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ В РАСПРЕДЕ- ЛЕННЫХ СИСТЕМАХ | 296 |
| <i>Филонов А.А., Подвесовский А.Г., Захарова А.А.</i> | |
| ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНФИГУРИРОВАНИЯ ГРУППЫ ТРАНСПОРТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬ- НЫХ АППАРАТОВ В ВИДЕ МОДЕЛИ ДВУСТОРОННЕГО МАТЧИНГА | 299 |
| <i>Хрипунов С.П.</i> | |
| ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В СИСТЕМЕ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ | 305 |
| <i>Широков А.С.</i> | |
| МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ МЕЖДУ РОБОТАМИ ГРУППЫ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ПЛОДОВОГО САДА | 308 |

| | |
|--|------------|
| РАЗДЕЛ 5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО И СЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ | 311 |
| <i>Анцев А.В., Каравдин Л.А., Янов Е.С.</i> ВИБРАЦИОННАЯ ЦИФРОВАЯ ТЕНЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА: ОТ МОНИТОРИНГА ДО ПРЕДИКТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ | 312 |
| <i>Байбулатов А.А., Бывайков М.Е., Полетыкин А.Г.</i> О ЗАДАЧЕ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ | 315 |
| <i>Бычков И.В., Еделев А.В., Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СРЕДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ | 318 |
| <i>Гайворонский А.И., Кочкаров А.А.</i> ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ ПЛАТЕЖНОЙ СИСТЕМЫ | 321 |
| <i>Джафаров Э.И., Цыганов В.В.</i> АДАПТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ КОНТРОЛЯ ЗАТРАТ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ | 325 |
| <i>Закирзянов Р.М.</i> К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ | 328 |
| <i>Марьясин О.Ю., Плохотнюк А.Н.</i> УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГООБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ | 331 |
| <i>Мусатова Е.Г., Лазарев А.А.</i> ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА | 335 |
| <i>Петренко С.А., Ступин Д.Д.</i> ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ | 338 |

| | |
|---|------------|
| <i>Русаков К.Д., Тевяшов Г.К.</i> МНОГОЗАДАЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПОДСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА, ДИАМЕТРА И ФОРМЫ ИКРИНОК | 344 |
| <i>Храменков В.А., Дмитричев А.С., Некоркин В.И.</i> МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ В МНОГОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСЕТИ | 347 |
| <i>Щербаков М.В., Раюшкин Э.С., Сафонова Е.В.</i> ГРАФОВЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ | 350 |
| АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ | 355 |

ВВЕДЕНИЕ

Том 2 материалов XVIII Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2025) включает тезисы докладов локальной научно-технической конференции «Управление в распределенных и сетевых системах» (УРСС-2025).

В пленарных и секционных докладах, представленных на локальной конференции УРСС-2025, рассмотрены теоретические и практические задачи управления в распределенных, сетевых и киберфизических системах, сенсорных сетях, в распределенных вычислительных и робототехнических комплексах, а также вопросы их практического использования в промышленных, производственных и инфраструктурных системах различного назначения.

Доклады, представленные на локальную конференцию УРСС-2025, сгруппированы по пяти секциям:

- Теоретические основы управления в распределенных и сетевых системах;
- Проблемы распределенного управления в киберфизических системах и сенсорных сетях;
- Проблемы управления и диспетчирования ресурсов в распределенных вычислительных системах;
- Проблемы сетевого управления в распределенных робототехнических системах;
- Прикладные задачи управления в распределенных и сетевых системах.

Доклады, вопросы и обсуждения, которые будут проведены на научно-технической конференции «Управление в распределенных и сетевых системах» (УРСС-2025), будут способствовать развитию и укреплению связей между различными научными школами, академической и вузовской науки, а также предприятиями и организациями реального сектора экономики, выявить перспективные направления научных исследований и разработок, внедрение которых обеспечат научный и технологический суверенитет страны.

Программный комитет УРСС-2025

РАЗДЕЛ 1

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ**

О ПОСТРОЕНИИ И СВОЙСТВАХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СЕТОК ДЛЯ ДИАГРАММЫ СЛОЖНОСТИ*

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Критерии обнаружения сигналов

Классификация сигналов – ключевая задача в автоматизации анализа данных, и ее применение продолжает расширяться с развитием искусственного интеллекта (AI) и интернета вещей (IoT). Множество прикладных задач физики и техники, биологии и медицины связано с обнаружением и классификацией слабых сигналов, детектируемых на фоне естественного шума. Классификация сигналов может быть осуществлена на основании набора значений информационных характеристик. При этом необходимо учитывать, что информационные характеристики чувствительны к типу шума. Использование информационных характеристик для решения задач статистической физики, классификации медицинских анализов (например, в целях изучения текстуры изображений гистопатологии молочной железы) и др. имеет долгую историю. Уже в 1999 году в работе [1] для количественного описания сложности двумерных узоров была введена мера сложности, основанная на среднем приросте информации.

В статье [2] поднимаются вопросы, связанные с разработкой общей меры сложности — или закономерности, или структуры — для двумерных систем. Такие задачи возникают, например, при исследовании поровностей в геологии.

Работа [3] посвящена исследованию возможности классификации текстур посредством двумерных порядковых паттернов, в частности посредством диаграммы статистической сложности. В [4] авторы подтверждают, что диаграмма статистической сложности является популярным инструментом для различения стохастических сигналов (шума) от детерминированного хаоса (в англоязычной литературе встречается термин для этого инструмента – complexity–entropy (CE) plane). Однако авторами статьи было обнаружено, что как высокоразмерные детерминированные временные ряды, так и стохастические суррогатные данные (шумы) могут быть расположены в одной и той же области диаграммы, и их представления показывают очень похожее поведение для различных сиг-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00134).

нально-шумовых смесей или даже типов сигналов. Поэтому классификация этих данных по их положению в плоскости диаграммы может оказаться сложной или даже вводящей в заблуждение.

В работах [5] было установлено, что одним из лучших критериев для задачи обнаружения слабого сигнала в белом шуме является статистическая сложность на основе полной вариации меры со знаком:

$$C_{TV}(p) = -\frac{1}{4 \log_2 N} \left(\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \right) \left(\sum_{i=1}^N \left| p_i - \frac{1}{N} \right| \right)^2,$$

где p_i – нормированный энергетический спектр, N – размер спектрального ряда.

Надо отметить, что статистическая сложность C_{TV} состоит из произведения двух информационных характеристик, информационной энтропии S и дисбаланса D_{TV} :

$$S(p) = -\frac{1}{\log_2 N} \left(\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \right),$$

$$D_{TV}(p) = TV^2(P, 1/N) = \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^N \left| p_i - \frac{1}{N} \right| \right)^2 \quad (1),$$

а $TV(P, 1/N)$ вычисляется относительно равномерного распределения N отсчетов спектра.

Дополнительно к уже известным информационным характеристикам следует добавить к исследованию свойств, так называемый, спектральный дисбаланс D_S , вычисляемый относительно упорядоченного спектра одного окна наблюдения, и спектральную сложность C_S [6] на его основе:

$$D_S(p) = \frac{1}{4} \left(\sum_{k=1}^N \left| p_k + \frac{1}{N \cdot K_N} \ln \frac{k}{N+1} \right| \right)^2,$$

$$C_S(p) = -\frac{1}{4 \log_2 N} \left(\sum_{k=1}^N p_k \log_2 p_k \right) \left(\sum_{k=1}^N \left| p_k + \frac{1}{N \cdot K_N} \ln \frac{k}{N+1} \right| \right)^2,$$

где K_N – нормировочный множитель, близкий к единице и зависящий от N .

Построение метрических сеток

В целях удобства изложения материала повторим и расширим некоторые важные определения, сформулированные в работе [7].

Определение 1. Сигнал, который состоит из d синусоидальных сигналов равной амплитуды, будем называть d -сигналом, а отдельные частоты этого сигнала будем называть дискретами. Тогда спектр этого сигнала будет иметь вид

$$A_d = \sum_{i=1}^d A_0 \exp(-j2\pi f_i T), \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда единичного отсчета спектра, f_i – частота i -го отсчета (Гц), T – временной интервал сигнала в секундах.

Пример спектра и упорядоченного спектра d -сигнала приведены на рисунке 1.

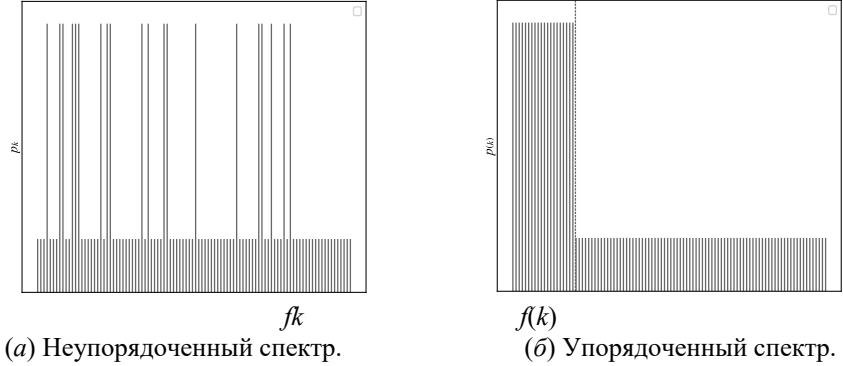


Рис. 1. Энергетический спектр d -сигнала в равномерном шуме ($d = 20$, $N = 100$).

Замечание 1. Частоты d -дискрет f_i и размер окна T , где окном будем называть временной интервал сигнала, для которого производится дискретное преобразование Фурье (ДПФ), таковы, что выполняется следующее условие: $\forall f_i: f_i T = r_i$, где $r_i \in \mathbb{N}$, $r_i < N/2$.

Смысл выражения $r_i \in \mathbb{N}$ заключается в том, что целое количество периодов r_i соответствующей i -й d -дискреты спектра должно укладываться во временное окно T сигнально-шумовой смеси.

Определение 2. Энергетической долей q сигнала будем называть отношение энергии сигнала к сумме энергий сигнала и шума в сигнально-шумовой смеси, соответственно $1 - q$ означает энергетическую долю шума. Отношение сигнал/шум определим как

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{q}{1 - q} \right).$$

Сигналы при отсутствии шума, когда $q = 1$ будем называть «чистыми».

Наконец, сформулируем определения равномерной метрической сетки, белой и голубой сеток, а также сформулируем и докажем леммы

об аналитических оценках метрических сеток для диаграмм статистической и спектральной сложности.

Определение 3. Равномерной сеткой будем называть метрическую двумерную разметку, по которой можно оценивать количество дискрет в спектре сигнала, а также определять отношение сигнал-шум на диаграммах информационной энтропии и статистической или спектральной сложности в условиях равномерного шума (соответственно метрическую сетку в условиях белого шума будем называть белой, и т. д. по цвету или типу шума (помехи)).

Далее в работе подробнее раскрывается понятие сетки. В этом контексте сетка это приближенное взаимно-однозначное отображение кортежа таких информационных характеристик сигнально-шумовой смеси как информационная энтропия и статистическая (спектральная) сложность и кортежа таких характеристик как дискретность (количество дискрет в спектре d -сигнала) и отношение сигнал/шум.

Прежде чем приступим к анализу возможностей метрических сеток сформулируем задачи исследования.

Задача 1 [Белая сетка для статистической сложности]. Оценить зависимости значений $C_{TV}(q, d, N)$ и энтропии $S(q, d, N)$ для d дискрет в спектре d -сигнала и для различных уровней сигнала в белом шуме (q – энергетическая доля сигнала в сигнально-шумовой смеси).

Лемма 1 [Белая сетка для диаграммы C_{TV}]. Приближенные оценки статистической сложности $C_{TV}(q, d, N)$, статистического дисбаланса $D_{TV}(q, d, N)$ и информационной энтропии $S(q, d, N)$ для смеси d -сигнала и белого шума задаются следующими зависимостями от q , d и N :

$$S(q, d, N) = S_0(N) \cdot (1 - q) - \frac{\ln \left(\left(\frac{q}{d} \right)^q (1 - q)^{1-q} \right)}{\ln N},$$

$$D_{TV}(q, d, N) = \frac{1}{4} \left(\alpha(d, N) + 1 + q + (1 - q) \left(-1 + 2 \exp \left(\frac{1}{q - 1} \right) \right) \right)^2,$$

$$C_{TV}(q, d, N) = S(q, d, N) \cdot D_{TV}(q, d, N),$$

где $N \gtrsim 1000$ – размер спектрального ряда, а $S_0(N)$ – значение информационной энтропии для белого шума (согласно работе [6])

$S_0(N) \approx 1 + \frac{\gamma - 1}{\ln N}$, а γ – константа Эйлера-Маскерони, для $N = 2048$ $S_0 \approx 0,9446$, $\alpha(d, N) = -\frac{2d}{N}$, q – энергетическая доля d -сигнала в сигнально-шумовой смеси.

Задача 2 [Белая сетка для спектральной сложности]. Оценить зависимости значений $C_s(q, d, N)$ и энтропии $S(q, d, N)$ для d дискрет в спектре d -сигнала и для различных уровней сигнала в белом шуме (q – энергетическая доля сигнала в сигнально-шумовой смеси).

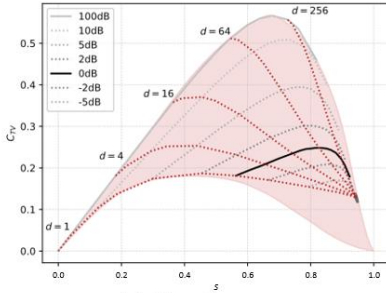
Лемма 2 [Белая сетка для диаграммы C_S]. Приближенные оценки спектральной сложности $C_S(q, d, N)$, спектрального дисбаланса $D_S(q, d, N)$ и информационной энтропии $S(q, d, N)$ для смеси d -сигнала и белого шума задаются следующими зависимостями от q , d и N :

$$S(q, d, N) = S_0(N) \cdot (1 - q) - \frac{\ln \left(\left(\frac{q}{d} \right)^q (1 - q)^{1-q} \right)}{\ln N},$$

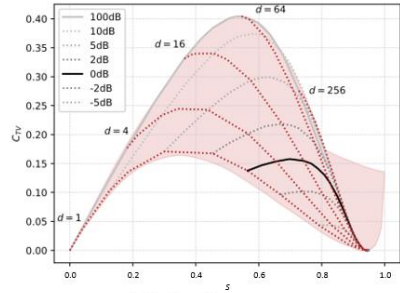
$$D_S(q, d, N) = \left(q + \frac{d(1+q)}{2N \cdot K_N} \left(1 + \ln \left(\frac{N+1}{d} \right) \right) + \beta \right)^2$$

$$C_S(q, d, N) = S(q, d, N) \cdot D_S(q, d, N),$$

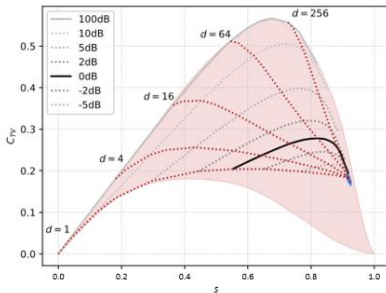
где $N \gtrsim 1000$ – размер спектрального ряда, а $S_0(N)$ – значение информационной энтропии для белого шума, $\beta(q, d, N) = -\frac{2}{N}(1-q)(d-1)$, q – энергетическая доля d -сигнала в сигнально-шумовой смеси.



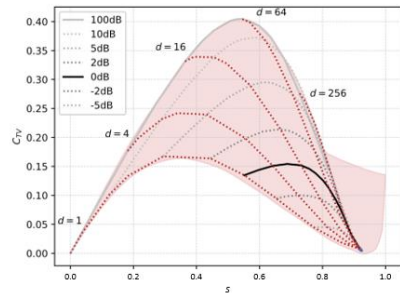
(а) C_{TV} , белый шум.



(б) C_S , белый шум.



(в) C_{TV} , голубой шум.



(з) C_S , голубой шум.

Рис. 2. Метрические сетки на диаграммах статистической и спектральной сложности (численный расчет)

На рис. 2 на диаграммах информационной сложности (S, C_{TV}) и (S, C_S) представлено при помощи метрической сетки расположение d -сигналов ($-15\text{дБ} < \text{SNR} < 100\text{дБ}$) с количеством дискрет 1, 4, 16, 64 и 256 (тонкие красные линии, нижняя линия соответствует дискретности $d = 1$) в смеси с белым (рис.2а–2б) и голубым шумом (рис.2в–2г). Графики построены по результатам численного эксперимента (каждый узел сетки рассчитан как среднее по 100 реализациям спектра сигнально-шумовой смеси). На рисунках показаны также уровни отношения сигнал-шум SNR (тонкие линии серого цвета соответствуют уровням -5дБ , -2дБ , 2дБ , 5дБ , 10дБ , 100дБ , черная линия соответствует уровню 0дБ). Закрашенная область – оценки области значений энтропии и статистической и спектральной сложностей, которые были получены в результате численного эксперимента и представлены в работе [7]. Здесь стоит сказать, что границы этих областей были получены посредством имитации сигнально-шумовых смесей d -сигналов, импульсов и различных шумов (белого, голубого, фиолетового, розового, коричневого).

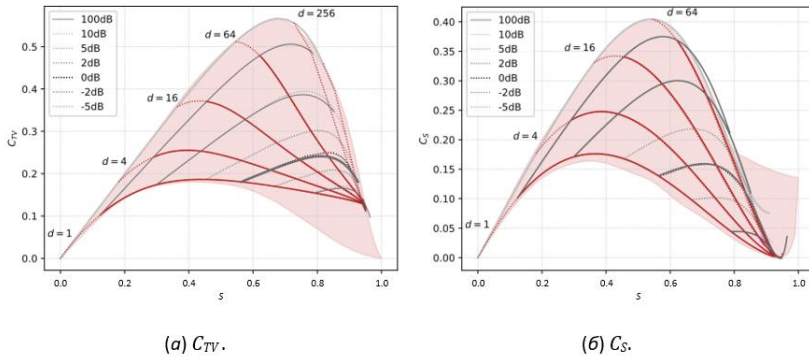


Рис. 3. Сравнение численного эксперимента (тонкие пунктирные линии) и расчёта

(сплошные линии, которые расходятся веером из точки с энтропией $S_0 \approx 0,9446$ – d -сигналы, количество дискрет 1, 4, 16, 64, а также пересекающие их сплошные линии – уровни отношения сигнал/шум, леммы 1–2).

На рис. 3 представлен сравнительный анализ фактических и расчетных (по леммам 1 и 2) метрических белых сеток ($N = 2048$). Согласно иллюстрациям для соответствующего размера ряда N диаграмма (S, C_{TV}) позволяет классифицировать сигналы с дискретностью до 256 и отношением сигнал/шум до -5 дБ.

Сформулированные и доказанные в настоящей работе леммы позволяют сформулировать тезис о том, что при определенных условиях (имеется ввиду при определенных уровнях дискретности и отношения сигнал/шум) между кортежем информационных характеристик S, C_{TV} с одной стороны и кортежем таких параметров как d (дискретность сигнала) и SNR (отношение сигнал/шум) существует взаимно-однозначное соответствие.

Заключение

К категории наиболее сложных задач вторичной обработки информации относится задача классификации. Для решения этой задачи необходимо сформировать признаковое пространство. Классификационные критерии, образующие признаковое пространство, должны быть достаточно информативны, чтобы посредством методов машинного обучения (нейронные сети, метод опорных векторов, метод ближайших соседей, генетический алгоритм) ошибки первого и второго рода были минимальными. В задаче классификации при выбранном пороге (например, по критерию максимального правдоподобия) уменьшить ошибку классификации можно двумя путями: увеличением объема обучающей выборки или использованием признаков, дающих наибольшее расстояние между классами. В ряде случаев создание больших обучающих выборок является неразрешимой проблемой, поэтому остается только один путь уменьшения вероятности ошибки классификации – это повышение качества признаков. Описанные в настоящей работе подходы по оценке метрических секток позволяют из совокупности информационных признаков составить классификационное ядро информативности.

1. **Andrienko Y.A., Brilliantov N.V., Kurths J.** Complexity of two-dimensional patterns // The European Physical Journal, 2012. DOI: 10.1007/s100510051157
2. **Feldman D.P., Crutchfield J.P.** Structural information in two-dimensional patterns: Entropy convergence and excess entropy // Physical review E 67, 051104, 2003. DOI: 10.1103/PhysRevE.67.051104
3. **Bandt C., Wittfeld K.** Two new parameters for the ordinal analysis of images // Chaos 33, 2023. DOI: 10.1063/5.0136912
4. **Kottlarz I, Parlitz U.** Ordinal pattern-based complexity analysis of high-dimensional chaotic time series // Chaos 33, 053105 (2023); DOI: 10.1063/5.0147219
5. **Галяев А.А., Лысенко П.В., Берлин Л.М.** Статистическая сложность как критерий задачи обнаружения полезного сигнала // Автоматика и телемеханика. 2023. №7. 121–145 стр.

6. **Галеев А.А., Бабиков В.Г., Лысенко П.В., Берлин, Л.М.** Новая спектральная мера сложности и её возможности по обнаружению сигналов в шуме // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2024. Т.518, №4. DOI: 10.1134/S1064562424702235
7. **Babikov V.G., Galyaev A.A.** Information Diagrams and Their Capabilities for Classifying Weak Signals // Problems of Information Transmission, 2024, Vol. 60, №2, pp. 127–140. © Pleiades Publishing, Inc., 2024. DOI: 10.31857/S0555292324020037

А.А. Бобцов, А.А. Маргун

СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ*

*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
bobotsov@mail.ru*

Введение

Мультиагентные системы (МАС) представляют собой распределённые динамические системы, состоящие из множества взаимодействующих автономных агентов, способных решать сложные задачи за счёт кооперации [1]. Такие системы находят применение в робототехнике, интеллектуальных энергосистемах, транспортных сетях и других областях [2]. Одной из важных проблем в управлении МАС является обеспечение устойчивости и согласованности поведения при неполной информации о состоянии системы, что делает актуальной задачу синтеза функциональных наблюдателей [3, 4].

Одним из наиболее робастных по отношению к неопределенностям и возмущениям является класс инвариантных по входу наблюдателей [5]. Инвариантные по входу функциональные наблюдатели позволяют восстанавливать заданные функции состояния системы, оставаясь нечувствительными к внешним возмущениям и неопределённым [6]. В контексте МАС такие наблюдатели особенно востребованы в задачах распределённого оценивания, отказоустойчивого управления и координации агентов. Однако синтез наблюдателей для МАС осложняется децентрализованной структурой, ограничениями на коммуникацию и возможными задержками в обмене данными [7 - 9].

* «Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 25-11-00239)»

Целью данной работы является применение разработанного авторами ранее метода [10] для построения функциональных наблюдателей, применимых к мультиагентным системам, динамика которых описывается линейными дифференциальными уравнениями.

Статья построена следующим образом: в разделе 1 приведена математическая постановка задачи; раздел 2 описывает метод синтеза инвариантных по входу наблюдателей для МАС; в третьем разделе описывается процедура синтеза функциональных наблюдателей; в разделе 4 представлены результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенного подхода.

Постановка задачи

Рассмотрим мультиагентную систему, где динамика каждого из Z объектов описывается системой линейных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \dot{x}_{(i)}(t) = Ax_{(i)}(t) + B(u_{(i)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^Z f_{ij}(x_{(j)}(t))), i = \overline{1, Z}, \\ y_{(i)}(t) = Cx_{(i)}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $x_{(i)}(t) \in R^n$ – вектор состояния i -го агента, $u_{(i)}(t) \in R^m$ и $y_{(i)}(t) \in R^l$ – векторы входа и выхода, соответственно; $f_{ij}(x_{(j)}(t)) \in R^m$ – неизвестные векторные функции, описывающие взаимодействие между агентами i и j ; A , B и C – известные матрицы соответствующих размеров. Каждый из агентов имеет вектор относительных степеней между входами и выходами $r = [r_1, \dots, r_l]$. Это означает, что для $i = \overline{1, l}$ выполняется условие

$$c_i b_k = c_i A^i b_k = 0, \forall j = 1, \dots, m \text{ и } c_i A^{r-1} b_k \neq 0, \exists k \in \{1, \dots, m\},$$

где c_i и b_k – i -я строка и k -й столбец матриц C и B соответственно. Стоит подчеркнуть, что это условие является фундаментальной характеристикой самой динамической системы, означающей, что каждая система обладает относительной степенью $r > 0$. Следовательно, оно не накладывает никаких ограничений на применимость метода, представленного в данной статье.

Целью настоящей работы является разработка функционального наблюдателя, обеспечивающего асимптотическую оценку некоторой линейной функции от вектора состояния системы. В отличие от классических наблюдателей полного состояния, предполагается, что необходимо восстанавливать не весь вектор $x_i(t)$, а лишь его часть, представляющую

интерес с прикладной точки зрения. Это может быть связано как с задачами управления, так и с диагностикой. Обозначим эту желаемую часть вектора состояния

$$\bar{x}_i(t) = Qx_i(t) \in R^q,$$

где $Q \in R^{q \times n}$ - заданная матрица, определяющая линейную комбинацию компонент вектора состояния, подлежащих оценке. Выбор матрицы Q должен соответствовать ряду условий, обеспечивающих существование наблюдателя при наличии на входе агента неизвестных сигналов от остальных участников системы. Конкретные требования к структуре матрицы Q , а также способ её определения, будут подробно рассмотрены в последующих разделах.

Синтез инвариантного по входу наблюдателя

Поставленная задача может быть решена путем синтеза такого наблюдателя, чтобы влияние функций $f_{ij}(\cdot)$ на динамику ошибки оценивания было полностью устранено. Для этого определим следующие дополнительные матрицы [11]

$$P = \begin{bmatrix} c_1 A^{r_1-1} \\ c_2 A^{r_2-1} \\ \dots \\ c_l A^{r_l-1} \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} c_1 A^{r_1-1} b_1 & c_1 A^{r_1-1} b_2 & \dots & c_1 A^{r_1-1} b_m \\ c_2 A^{r_2-1} b_1 & c_2 A^{r_2-1} b_2 & \dots & c_2 A^{r_2-1} b_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_l A^{r_l-1} b_1 & c_l A^{r_l-1} b_2 & \dots & c_l A^{r_l-1} b_m \end{bmatrix},$$

где предполагается, что матрица N имеет полный столбцовый ранг, что необходимо для существования решения задачи подавления неизвестных сигналов.

Для простоты изложения опустим зависимость от времени и индексы при $x_{(i)}(t)$, $u_{(i)}(t)$ и $y_{(i)}(t)$, подразумевая под x , u и y вектор состояния, вход и выход рассматриваемого агента. Далее, зададим структуру самого наблюдателя в следующем виде [10]

$$\dot{\hat{x}} = M\hat{x} + L(y - C\hat{x}) + Gy^{(r)} = F\hat{x} + Ly + Gy^{(r)}, \quad (2)$$

где $y^{(r)} = [y_1^{(r_1)} \quad y_2^{(r_2)} \quad \dots \quad y_l^{(r_l)}]$, а $y_i^{(r_i)}$ обозначает j -ю производную от i -го выхода агента. Матрицы $F = M - LC$, а также M и G подлежат выбору таким образом, чтобы удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{cases} B - GN = 0, \\ M = A - GP. \end{cases} \quad (3)$$

Введём ошибку наблюдения как $\tilde{x} = x - \hat{x}$. Продифференцируем ее и, используя уравнения динамики агента и наблюдателя, получим следующую динамическую модель ошибки:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}} &= Ax + B \sum_{j=1}^Z \sum_{i \neq j} f_{ij}(x_{(j)}) - M\hat{x} - L(y - C\hat{x}) - Gy^{(r)} = \\ &= (A - GP)x - M\hat{x} - LCM\tilde{x} = (M - LC)\tilde{x} = F\tilde{x}.\end{aligned}\quad (4)$$

Следовательно, динамика ошибки наблюдения \tilde{x} полностью зависит от матрицы F , которая определяется во время построения наблюдателя. Выбрав L соответствующим образом, матрицу F можно настроить так, чтобы обеспечить устойчивость и экспоненциальную сходимость \tilde{x} к нулю.

В работе [12] приведено доказательство, что система уравнений (3) имеет единственное решение

$$G = B(N^T N)^{-1} N^T,$$

существующее при выполнении следующих условий:

- $rank(N) = rank(B)$;
- пара матриц (M, C) детектируема.

На практике реализация наблюдателя, описываемого (2), осложняется невозможностью измерения производных выходного сигнала. Для ослабления данного требования используем вспомогательные переменные. Без потери общности предположим, что $r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_l$. Чтобы обеспечить построение наблюдателя для системы с относительными степенями $r_i = \overline{1, l}$, введем вспомогательные переменные z_i следующим образом:

$$\begin{aligned}z_1 &= \hat{x} - Gy^{(r-1)}, \dot{z}_1 = F(z_1 + Gy^{(r-1)}) + Ly, \\ z_2 &= z_1 - FGy^{(r-2)}, \dot{z}_2 = F(z_2 + FGy^{(r-2)}) + Ly, \\ &\dots \\ \dot{z}_{r_1} &= Fz_{r_1} + F^{r_1}G \begin{bmatrix} y_1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + F^{r_1}G \begin{bmatrix} 0 \\ y_2^{(r_2-r_1)} \\ \dots \\ y_\beta^{(r_\beta-r_1)} \end{bmatrix} + Ly, \\ &\dots \\ \dot{z}_{r_l} &= Fz_{r_l} + F^{r_1}G \begin{bmatrix} y_1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + F^{r_2}G \begin{bmatrix} 0 \\ y_2 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + \dots + F^{r_l}G \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ y_l \end{bmatrix} + Ly.\end{aligned}$$

Используя опорные переменные, оценку вектора состояния можно получить следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{z}_{r_l} + \mathbf{G}\mathbf{y}^{(r-1)} = \\ &= \mathbf{z}_{r_l} + \mathbf{F}^{r_l-1}\mathbf{G}\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{y}_l \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{F}^r\mathbf{G}\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_2^{(r_2-r_1-1)} \\ \dots \\ \mathbf{y}_l^{(r_l-r_1-1)} \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{G}\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1^{(r_1-1)} \\ \mathbf{y}_2^{(r_2-1)} \\ \dots \\ \mathbf{y}_l^{(r_l-1)} \end{bmatrix}, \quad (5)\end{aligned}$$

$$\dot{\mathbf{z}}_{r_l} = \mathbf{F}\mathbf{z}_{r_l} + \mathbf{F}^r\mathbf{G}\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{F}^{r_2}\mathbf{G}\begin{bmatrix} \mathbf{y}_2 \\ \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{F}^{r_l}\mathbf{G}\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{y}_l \end{bmatrix} + \mathbf{L}\mathbf{y}. \quad (6)$$

Для краткости перепишем наблюдатель следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}_1(\mathbf{z}_{r_l}, \mathbf{y}), \\ \dot{\mathbf{z}}_{r_l} = \mathbf{W}_2(\mathbf{z}_{r_l}, \mathbf{y}). \end{cases} \quad (7)$$

где $\mathbf{W}_1(\mathbf{z}_{r_l}, \mathbf{y})$ и $\mathbf{W}_2(\mathbf{z}_{r_l}, \mathbf{y})$ - функция оценки вектора состояния агента системы (1) и уравнение динамики последней опорной переменной \mathbf{z}_{r_l} , соответственно. Этот наблюдатель состояния может быть напрямую реализован для агентов, вектор относительных степеней которых состоит из единиц. Однако данный подход может быть использован в качестве основы для построения функционального наблюдателя для агентов с произвольным вектором относительных степеней. Метод построения таких наблюдателей, включая алгоритм выбора функциональной матрицы, представлен в следующем разделе.

Синтез функционального наблюдателя

В данном разделе рассматривается пошаговая процедура построения функционального наблюдателя для линейных агентов с различными относительными степенями на основе инвариантного по входу наблюдателя. Сначала будет приведён ряд частных примеров синтеза для систем с малым числом выходов и различными структурами вектора относительных степеней. Затем будет сформулирован и доказан обобщённый результат, устанавливающий условия существования функционального наблюдателя для агентов систем вида (1).

Предположим, что агент имеет два выходных канала и относительные степени выхода составляют вектор $\mathbf{r} = [\mathbf{1}, \mathbf{2}]$. В этом случае наблюдатель можно реализовать с использованием вспомогательной переменной \mathbf{z}_2 , как было описано ранее. Тогда оценка состояния принимает вид:

$$\hat{\bar{x}} = Q\hat{x} = Qz_2 + QFG \begin{bmatrix} 0 \\ y_2 \end{bmatrix} + QG \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix}.$$

Видно, что в оценку входят производные выходных сигналов, которые, как правило, недоступны. Чтобы устранить их, наложим условие инвариантности: $QG = 0$. Поскольку G линейно зависит от B , условие инвариантности можно изменить на $QB = 0$.

При выполнении этого условия выражение для оценки линейных комбинаций переменных состояния \bar{x} упрощается до

$$\hat{\bar{x}} = Qz_2 + QFG \begin{bmatrix} 0 \\ y_2 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим более сложную систему с тремя выходами и вектором относительных степеней $r = [1 \ 2 \ 3]$. Оценка линейных комбинаций переменных состояния может быть выражена как

$$\hat{\bar{x}} = Q \left(z_3 + F^2G \begin{bmatrix} 0 \\ y_3 \end{bmatrix} + FG \begin{bmatrix} 0 \\ y_2 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} \right).$$

Условием наблюдаемости функционала \bar{x} является зануление коэффициентов при всех производных выходов, что достигается при $QG = QFG = 0$. Учитывая, что $CB = 0$ и линейную зависимость B и G , получим $QGF = QAG$. Таким образом, \bar{x} наблюдаем, если $QG = QAG = 0$, или, что эквивалентно $QB = QAB = 0$.

На основе предыдущих примеров формулируется общий критерий, обеспечивающий наблюдаемость функционала состояния через наблюдатель вида (7).

Теорема. Пусть пара матриц (A, C) является детектируемой, а матрица Q удовлетворяет условию:

$$QA^i B = 0, i = \overline{0, r_l - 2}, \quad (8)$$

где $r_l = \max_i r_i$. Тогда существует матрица L такая, что наблюдатель $\hat{\bar{x}} = Q\hat{x}$ экспоненциально оценивает линейные комбинации переменных состояния агента (1), принадлежащие неизмеримому подпространству размерности $q = n - r_l$.

Доказательство теоремы. Максимальное число наблюдаемых линейных комбинаций переменных состояния зависит от ранга матрицы $Q \in R^{q \times n}$, и в лучшем случае $q = \text{rank}(Q)$. Для определения ограничений на q рассмотрим подпространство:

$$\mathbf{v} = \text{span}\{\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{r_l-2}\mathbf{B}\}.$$

Размерность этого подпространства определяется как

$$\rho = \text{rank}(\mathbf{v}) \leq r_l - 1,$$

поскольку базис \mathbf{v} может содержать не более $r_l - 1$ линейно независимых векторов, исходя из относительной степени системы.

Чтобы удовлетворить условию (8), строки \mathbf{Q} должны принадлежать ортогональному дополнению \mathbf{v} , обозначаемому как \mathbf{v}^* . Размерность \mathbf{v}^* равна

$$\dim(\mathbf{v}^*) = n - \rho.$$

Таким образом, ранг \mathbf{Q} ограничен неравенством:

$$\text{rank}(\mathbf{Q}) \leq \dim(\mathbf{v}^*) = n - \rho = n - r_l + 1.$$

Это показывает, что предложенный функциональный наблюдатель может оценить до $\mathbf{q} = n - r_l + 1$ различных линейных комбинаций переменных вектора состояния. Обратим внимание, что выходная переменная принадлежит этому подпространству по определению относительной степени. Поскольку \mathbf{y}_l доступен для измерения, его всегда можно извлечь из \mathbf{v}^* . Следовательно, размерность неизмеримого подпространства состояния, которое может быть восстановлено с помощью функционального инвариантного по входу наблюдателя, составляет $n - r_l$. Теорема доказана.

Для вычисления допустимой матрицы \mathbf{Q} можно использовать следующий алгоритм:

1. Строки \mathbf{Q} должны лежать в ортогональном дополнении подпространства, задаваемого векторами:

$$\mathbf{T} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{r_l-2}\mathbf{B}].$$

2. Определим базис ядра \mathbf{T} , например, используя сигнулярное разложение матрицы или метод ортогонализации Грама-Шмидта.

3. Сформируем матрицу \mathbf{Q} , используя в качестве ее строк строки полученного базиса ядра.

Компьютерное моделирование

Рассмотрим систему из двух агентов, динамика которых описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{x}}_{(1)} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{(1)} + \mathbf{B}(\mathbf{u}_{(1)} + \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_{(2)})),$$

$$\mathbf{y}_{(1)} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{(1)},$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{(2)} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{(2)} + \mathbf{B}(\mathbf{u}_{(2)} + \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_{(1)})),$$

$$\mathbf{y}_{(2)} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{(2)}.$$

Матрицы агентов имеют следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & -3 & -4 & -5 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Функции $\mathbf{f}_1(\mathbf{x}_{(2)})$ и $\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_{(1)})$ в процессе синтеза наблюдателя предполагаются неизвестными. В процессе моделирования они заданы следующим образом

$$\mathbf{f}_1(\mathbf{x}_{(2)}) = \sin(\mathbf{x}_{(2)}^T \mathbf{x}_{(2)}),$$

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_{(2)}) = 2 + \cos(5\mathbf{x}_{(2)}^T \mathbf{x}_{(2)}).$$

Построим наблюдатель для первого агента. Собственные числа матрицы \mathbf{F} выбраны как $\{-4, -5, -6, -7, -8\}$. Для того чтобы наблюдатель оценивал определённую часть вектора состояния, необходимо задать функциональную матрицу \mathbf{Q} , строки которой лежат в ортогональном дополнении к подпространству

$$\mathbf{v} = \text{span}\{\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{r_t-2}\mathbf{B}\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & -5 \end{bmatrix}.$$

Это подпространство описывает все линейные комбинации переменных состояния, которые не могут быть оценены независимо от неизвестного входа. Строки \mathbf{Q} выбираются так, чтобы они находились в ортогональном дополнении \mathbf{v} :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

На рис. 1 приведены переходные процессы ошибки наблюдения первых трех компонент вектора состояния агента при ненулевых начальных условиях. Анализ графиков показывает, что все ошибки наблюдения

сходятся к нулю, что иллюстрирует работоспособность синтезированного функционального наблюдателя. Таким образом, результаты моделирования подтверждают основное преимущество метода — инвариантность оценки к воздействию неизвестных входных сигналов, что позволяет применять его к мультиагентным системам за счет невосприимчивости к взаимному влиянию агентов в канале управления.

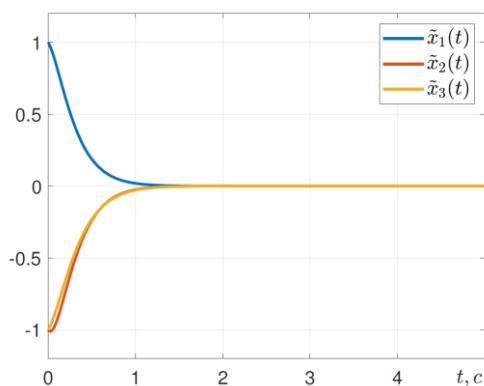


Рис. 1. Ошибка наблюдения первых трех компонент состояния агента

Заключение

В работе представлен метод синтеза функциональных наблюдателей для мультиагентных систем, основанный на применении инвариантных по входу наблюдателей. В качестве агентов рассматриваются линейные многоканальные системы. Полученный результат позволяет оценить ряд линейных комбинаций переменных состояния каждого агента. Предложен аналитический способ вычисления функциональной матрицы, получены ограничения на ее размер. Количество оцениваемых линейных комбинаций переменных состояния зависит от порядка системы и максимальной относительной степени. Представленный результат может быть использован для управления и диагностирования МАС в условиях неопределенностей и возмущающих воздействий.

1. **Гайдук, А.Р., Каляев, И.А., Капустян, С.Г., Кухаренко, А.П.** Модели и методы управления большими группами роботов: учебное пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 106 с.

2. **Kirn, S., Herzog, O., Lockemann, P., Spaniol, O.** Multiagent Engineering. Theory and Applications in Enterprises. – Springer, 2006. – P. 626.
3. **Ossowski, S.** Coordination in Multi-Agent Systems: Towards a Technology of Agreement // 6th German Conference, MATES 2008, LNAI 5244. – 2008. – pp. 2 – 12.
4. **Andreychuk, A., Yakovlev, K.** Path Finding for the Coalition of Co-operative Agents Acting in the Environment with Destructible Obstacles // Third International Conference, ICR 2018. – 2018. – pp. 13 – 22.
5. **Hou, M., Muller, P.C.** Design of Observers for Linear Systems with Unknown Inputs // IEEE. Trans. Autom. Control. 1992. V. 36. No. 6. P. 871–875.
6. **Warrad, B., Boubaker, O.** Design of Unknown Input Observers for Linear Systems with State and Input Delays // 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). 2018. P. 1–5.
7. **Olfati-Saber, R., Murray, R.M.** Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1520–1533.
8. **Daneshfar, F., Bevrani, H.** Multi-agent systems in control engineering: A survey // Journal of Control Science and Engineering. – 2009. – Vol. 35. – pp. 1 – 12.
9. **Пшихопов, В.Х.** групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2015. – 305 с.
10. **Margun, A.A., Bui, V.H., Bobtsov, A.A., Efimov, D.V.** State estimation for a class of nonlinear time-varying uncertain systems under multi-harmonic disturbance // European Journal of Control - 2025, Vol. 82, pp. 101185.
11. **Буй, В.Х., Маргун, А.А., Бобцов, А.А.** Синтез наблюдателя переменных состояния и синусоидального возмущения для линейной нестационарной системы с неизвестными параметрами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2024. - Т. 67. - № 3. - С. 209-219.
12. **Маргун, А.А., Буй, В.Х., Бобцов, А.А.** Диагностирование параметрически неопределенных систем с произвольной относительной степенью при неизмеряемом входе // Автоматика и телемеханика - 2024. - № 11. - С. 36-55.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ В SCARDO-МОДЕЛИ*

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
kozitsin.ivan@mail.ru*

Введение

Структура социальной системы во многом определяет ее успешное функционирование, поскольку задает связи между отдельными блоками системы. В социальных сетях связи между людьми определяют каналы, по которым распространяются информация (новости, сообщения, мемы) и влияние, в результате чего меняются мнения и поведение индивидов. От структуры социальной сети может зависеть управляемость социальной системы и ее устойчивость к распространению деструктивной информации и другим типам вредоносных интервенций [1].

В данной работе предлагается постановка, в которой субъект управления воздействует на активную сетевую структуру. Данная структура имеет вершины, характеризующиеся мнениями, изменяющимися в результате социального влияния согласно SCARDO-модели [2]. Цель субъекта управления заключается в изменении распределения мнений в системе в рамках конечного горизонта планирования. В основе постановки лежит приближение среднего поля для SCARDO-модели, имеющее вид системы обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет изучать поставленную задачу, применяя аппарат теории оптимального управления.

SCARDO-модель и приближение среднего поля

Рассмотрим социальную сеть из N агентов, соединенных некоторым социальным графом. Будем считать, что этот граф является неориентированным, невзвешенным и не содержит петель, задается при помощи стохастичной блочной модели, состоящей из M блоков. Вероятности возникновения связи внутри и между блоками определяются набором величин $\{\rho_{f,r}\}_{f,r \in [M]}$ ($[M] = \{1, \dots, M\}$ для $M \in \mathbb{N}$), где $\rho_{f,r} \in [0,1]$. Каждый агент описывается тремя характеристиками: мнением из пространства $Z = \{Z_1, \dots, Z_M\}$, типом из пространства $\Xi = \{\Xi_1, \dots, \Xi_M\}$ и активностью, которая однозначно определяется типом агента: $\pi_f = \pi(\Xi_f) > 0$. Динамика модели заключается в последовательности взаимодействий,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант №24-71-00070

происходящих в дискретном времени. В каждый момент времени случайно выбираются агент и один из его соседей в социальном графе, после чего второй влияет на первого. При этом вероятность выбора конкретного агента пропорциональна значению параметра активности. Исход влияния зависит от мнений и типов взаимодействующих агентов и формализуется при помощи распределения $\{p_{s,l,1}^{f,r}, \dots, p_{s,l,m}^{f,r}\}$, в котором величина $p_{s,l,k}^{f,r}$ задает вероятность того, что в результате взаимодействия и пересмотра своего мнения объектом влияния это мнение примет значение Z_k , при условии, что текущее мнение и тип объекта влияния есть Z_s и Ξ_f , а мнение и тип субъекта влияния суть есть Z_l и Ξ_r . Данные вероятности должны удовлетворять условию нормировки: $p_{s,l,1}^{f,r} + \dots + p_{s,l,m}^{f,r} = 1$.

Каждое взаимодействие агентов может быть заблокировано с некоторой вероятностью, которая также является функцией параметров взаимодействующих агентов. В этом случае ничего не происходит, и система переходит на следующую итерацию. Данный шаг имитирует работу алгоритмов ранжирования в социальных медиа-платформах [3]. Для удобства будем обозначать вероятность взаимодействия двух агентов с заданными мнениями и типами как $\Delta_{s,l}^{f,r}$.

Введем следующие обозначения. Пусть n_f – доля агентов типа Ξ_f , а $y_{a,f}(t)$ – доля агентов типа Ξ_f , имеющих мнение Z_a в момент времени t . Очевидно, для каждого t и для любого $f \in [M]$ имеет место: $n_f = \sum_{a \in [m]} y_{a,f}(t)$.

В работе [2] для представленной динамической системы было построено приближение среднего поля в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой неизвестными переменными выступали $y_{a,f}$. Система имеет следующий вид:

$$\frac{dy_{a,f}}{d\tau} = \frac{1}{A \cdot B^f(\tau)} \sum_{s=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m y_{s,f} \pi_f C_{s,l,k}^f(\tau) (\delta_{k,a} - \delta_{s,a}), \quad (1)$$

где $a \in [m]$, $f \in [M]$, а величины A , $B^f(\tau)$ и $C_{s,l,k}^f(\tau)$ определяются согласно следующим выражениям:

$$A = \sum_{f=1}^M n_f \pi_f, B^f(\tau) = \sum_{r=1}^M n_r \pi_r \rho_{f,r}, C_{s,l,k}^f(\tau) = \sum_{r=1}^M y_{l,r} \pi_r \rho_{f,r} \Delta_{s,l}^{f,r} p_{s,l,k}^{f,r}.$$

При этом τ является масштабированным временем, которое определяется как

$$\tau = \frac{t}{N}, \delta\tau = \frac{1}{N},$$

а $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера.

Управление структурой сети

Рассмотрим задачу управления, в которой управляющий субъект настраивает структуру социальной сети с тем, чтобы повлиять на распределение мнений в системе. В терминах кинетического уравнения (1) управление структурой означает настройку параметров стохастической блочной модели $\{\rho_{f,r}\}_{f,r \in [M]}$. Будем считать, что эти параметры не меняются во времени (сеть статична, а управляющий субъект задает веса перед запуском процесса), а горизонт планирования конечен и определяется моментом времени $\tau = T$. Пусть $y_i(\tau) = \sum_{f \in [M]} y_{i,f}(\tau)$ – доля агентов с мнением Z_i , а неотрицательный вектор весов $v = (v_1, \dots, v_m)$ задает, какие мнения наиболее нежелательны для управляющего субъекта.

Предлагается рассмотреть следующую задачу управления:

$$J = (v_1 y_1 + \dots + v_m y_m)|_T \rightarrow \inf_{\{\rho_{f,r}\}_{f,r \in [M]}},$$

$$\frac{dy_{a,f}}{d\tau} = \frac{1}{A \cdot B^f(\tau)} \sum_{s=1}^m \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m y_{s,f} \pi_f C_{s,l,k}^f(\tau) (\delta_{k,a} - \delta_{s,a}),$$

$$y_{a,f}(\tau_0) = q_{a,f}, \quad a \in [m], f \in [M],$$

$$N^2 \left(\sum_{f,r \in [M], f \neq r} \rho_{f,r} n_f n_r + \sum_{f \in [M]} \rho_{f,f} \frac{(n_f)^2}{2} \right) \leq \frac{L}{N^2},$$

$$\rho_{f,r} \in [\rho_{f,r}^{\min}, 1], \quad f, r \in [M],$$

где $\rho_{f,r}^{\min}$ – ограничение снизу на количество связей для данной пары типов. Интерпретация такой постановки: часть связей образуется самими агентами, а другая посредством алгоритма рекомендации друзей, которые активно используются в современных медиа-платформах.

Заключение

На основе приближения среднего поля для SCARDO-модели поставлена задача управления структурой социальных связей как задача оптимального управления. Дальнейшие исследования будут нацелены на ее решение, а также рассмотрение более содержательных постановок.

1. **Gezha, V.N.** Macroscopic Description of Structured Heterogeneous Online Social Systems with Dynamical Opinions/ V.N. Gezha, I.V. Kozitsin// 2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2024. – P. 133–138.
2. **Castellano, C.** Statistical physics of social dynamics/ C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto// Reviews of modern physics. – 2009. – Vol. 81. – No 2. – P. 591–646.
3. **Bellina, A.** Effect of collaborative-filtering-based recommendation algorithms on opinion polarization/ A. Bellina, C. Castellano, P. Pineau, G.

В.Б. Гисин

УСРЕДНЕННЫЙ КОНСЕНСУС В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ С ВИЗАНТИЙСКИМИ УЗЛАМИ

*Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
г. Москва, vginin@fa.ru*

Одна из основных задач управления работой распределенной системы состоит в том, чтобы гарантировать консенсус (соглашение) между узлами. Согласно знаменитой теореме о невозможности (Фишер, Линч, Паттерсон) консенсус в асинхронных системах невозможен даже в том случае, когда среди узлов имеется хотя бы один, который может прекратить работу. При частичной синхронности консенсус возможен, если число противодействующих узлов не слишком велико. Альтернативой детерминированному консенсусу может служить приблизительный консенсус (см. [1]). В этом случае значения, предлагаемые честными узлами сходятся к значениям, близким друг к другу, оставаясь в выпуклой оболочке значений, предложенных честными узлами. Достижение консенсуса требует при этом порядка n^d локальных вычислений, где d – размерность пространства параметров, а n – число узлов [2].

В работе описывается метод достижения усредненного согласия в асинхронной системе, в которой доля узлов с византийским поведением (византийских узлов) меньше $1/6$. Рассматривается модель распределенных вычислений, в которой имеется n узлов, из которых h являются честными, а $f = n - h$ – византийскими. Византийские узлы могут отклоняться от исполнения сетевого протокола произвольным образом. Ни один честный узел не знает, какие из остальных узлов являются честными. Византийские узлы знают друг друга и могут вступать в сговор. Можно считать, что все византийские узлы контролирует один противник (злоумышленник).

Византийские узлы могут отправлять произвольные сообщения, они могут отправлять разные сообщения на разные узлы. Византийский узел может задерживать отправку сообщений на честные узлы, но не в состоянии изменить сообщения от честных узлов, защищенные подписью отправителя.

Система предполагается асинхронной. Работа каждого честного узла разбита на раунды (подобно тому, как это сделано в [3]). В каждом

раунде каждый честный узел передает сообщение с указанием номера раунда и ожидает, пока он успешно соберет сообщения от $q \leq h$ других узлов (с правильно указанным раундом), прежде чем выполнить локальные вычисления и перейти к следующему раунду. Несмотря на то, что сеть асинхронна, каждый раунд в конечном итоге завершится для всех честных узлов, поскольку все сообщения от h честных узлов будут в конечном итоге доставлены. Некоторые из них могут быть доставлены после того, как узел получит q сообщений (включая сообщения византийских узлов). Такие сообщения не принимаются во внимание.

Обозначим множество всех узлов через N , а множество честных узлов – через H . Пусть для каждого узла $j \in N$ задан вектор $\rho^{(j)} \in \mathbb{R}^d$. Для $S \subseteq N$ положим

$$\text{diam}(\vec{\rho}, S) = \max_{j, k \in S} \|\rho^{(j)} - \rho^{(k)}\|.$$

и $\bar{\rho} = \frac{1}{h} \sum_{j \in H} \rho^{(j)}$. Предполагая, что $6f + 1 \leq n$ и q выбрано так, что $\frac{n}{2} + 2f < q \leq n - f$, положим

$$\varepsilon = \frac{2q - n - 4f}{q - f} \text{ и } C = \frac{(n + f - q)q + (q - 2f)f}{(n - f)(q - f)}.$$

В работе описывается алгоритм $A: \mathbb{R}^{nd} \rightarrow \mathbb{R}^{nd}$ такой, что

$$\text{diam}(A(\vec{\rho}), H) \leq (1 - \varepsilon) \cdot \text{diam}(\vec{\rho}, H)$$

и

$$\|\overline{A(\vec{\rho})} - \bar{\rho}\| \leq C \cdot \text{diam}(\vec{\rho}, H).$$

Заметим, что $0 < \varepsilon < 1$, и при p -кратном применении алгоритма A разброс векторов у честных узлов может быть сделан сколь угодно малым:

$$\text{diam}(A^p(\vec{\rho}), H) < (1 - \varepsilon)^p \cdot \text{diam}(\vec{\rho}, H).$$

Если $\frac{f}{n} < 0,123$, то q можно выбрать так, что $C/\varepsilon < 1$ и при этом

$$\|\overline{A^p(\vec{\rho})} - \bar{\rho}\| < \frac{C}{\varepsilon} \cdot \text{diam}(\vec{\rho}, H).$$

Алгоритм усреднения может быть использован для построения гребневой линейной регрессии (регуляризация по Тихонову) в распределенной системе и других задачах федеративного машинного обучения при наличии византийских узлов (в том числе, и при неоднородных данных).

1. **Dolev D., Lynch N.A., Pinter S.S., Stark E.W., Weihl W.E.** Reaching approximate agreement in the presence of faults //Journal of the Association for Computing Machinery (JACM). – 1986. – Т. 33. – №. 3. – С. 499-516.
2. **Mendes H., Herlihy M.** Multidimensional approximate agreement in byzantine asynchronous systems //Proceedings of the forty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing. – 2013. – С. 391-400.

3. **Bracha G.** Asynchronous Byzantine agreement protocols //Information and Computation. – 1987. – Т. 75. – №. 2. – С. 130-143.

О.И. Горбанёва, М.А. Иванов, Г.А. Угольников

КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ*

*Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону,
oigorbaneva@sfedu.ru, maki@sfedu.ru, gaugolnickiy@sfedu.ru*

Введение

В статье рассматривается когнитивная модель управления в глобальной организационной системе. Исследуются процессы управления в глобальной организационной системе и формирование её структуры. Требуют анализа текущие и возможные новые изменения мирового порядка, создание и функционирование межгосударственных объединений и организаций, распределение власти и доходов, установление отношений координации и субординации, выявление роли Российской Федерации в новой системе международных соглашений.

До окончания Второй мировой войны мир был многополярным, с 1945 по 1991 г. – двухполярным (США и СССР с их союзниками), затем однополярным (только США), а теперь снова уверенно возвращается к многополярности, что принципиально важно и требует научного анализа на основе математического моделирования. Чрезвычайную важность и актуальность имеют и другие проблемы изменения мирового порядка в настоящее время: анализ структуры и динамики межгосударственных объединений (БРИКС, ШОС, СНГ, ЕС, НАТО, AUCUS и т.д.), координирующая роль ООН при различном составе её Совета Безопасности и регламентах принятия решений, проблема возможного изменения границ в Европе в силу экономического и политического кризиса, изменение роли России и дружественных ей стран на мировой арене. Научный анализ указанных проблем позволит развить прикладную теорию игр и методы решения сложных динамических задач управления.

Один из подходов был предложен в знаменитой работе Дж. Форрестера "Мировая динамика" [1]. В ней Дж. Форрестер рассмотрел несколько сценариев развития мировой системы и проанализировал их с помощью оригинального метода системной динамики. Это направление

*Работа выполнена при поддержке РФФ, проект №25-11-00094

было продолжено ещё одной не менее знаменитой работой [2], которая на основе модельного анализа привлекла внимание всего человечества к ограниченности ресурсов и другим проблемам окружающей среды. В [3] дан систематический обзор наиболее критических глобальных тенденций. В [4] проведён экономический анализ глобальной рыночной экономики и изменений в мировой культуре за счёт торговли и контактов. Книга [5] содержит набор статей по эволюционной теории дивергентного экономического роста. Книга [6] рассматривает модели климата и угрозу глобального потепления, книга [7] - проблемы нехватки воды. Весьма популярная монография [8] исследует переход от традиционных рынков к электронной торговле и от промышленного производства к культурному. Коллективная монография [9] посвящена внутреннему экономическому росту при ограниченных ресурсах с акцентом на эволюционное моделирование. Авторы [10] дают хорошее введение в тематику глобального эколого-экономического взаимодействия. Автор [11] подчёркивает серьёзность глобального экологического кризиса и необходимости устойчивого развития.

В Советском Союзе тематика глобального моделирования была существенно развита коллективом ВЦ АН СССР под руководством академика Н.Н. Моисеева [12,13]. В частности, в этих работах была показана опасность так называемой "ядерной зимы", т.е. катастрофических последствий ядерной войны. Глобальные процессы в биосфере изучены в работах А.М. Тарко [14,15] на основе принципа Ле-Шателье. В настоящее время в РФ эта тематика развивается также в МГУ под руководством академиков А.А. Акаева и В.А. Садовниченко [16]. Обзоры можно найти в [17,18].

Математическая модель и ее исследование

Для анализа глобальной организационной системы используется модифицированная модель Солоу:

$$Y_i(t) = A_i(t)K_i^{\alpha_i}(t)(R_iL_i)^{1-\alpha_i}(t); \quad (1)$$

$$I_i(t) = s_i(t)Y_i(t); \quad (2)$$

$$C_i(t) = [1 - s_i(t)]Y_i(t); \quad (3)$$

$$R_i(t+1) = (1 + \eta_i)R_i(t); \quad (4)$$

$$K_i(t+1) = (1 - \mu_i)K_i(t) + \sum_{j=0}^n \kappa_{ji}(t)I_j(t); \quad (5)$$

$$L_i(t+1) = (1 + b_i - m_i)L_i(t); \quad (6)$$

$$K_i(0) = K_i^0; \quad L_i(0) = L_i^0; \quad R_i(0) = R_i^0; \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^n \kappa_{ij}(t) = 1; \quad 0 \leq s_i(t) \leq 1; \quad \kappa_{ij} \geq 0; \quad (8)$$

Пунктиром обведены элементы, относящиеся к государству, вне пунктирной линии расположены элементы других государств.

Когнитивная схема глобальной организационной системы связывает между собой когнитивные схемы отдельных государств. Ребра соединения отрицательны, так как чем больше ресурсов государство отдает другим государствам, тем меньше остается ему. Например, для глобальной организационной системы из трех государств когнитивная схема изображена на рис. 2.

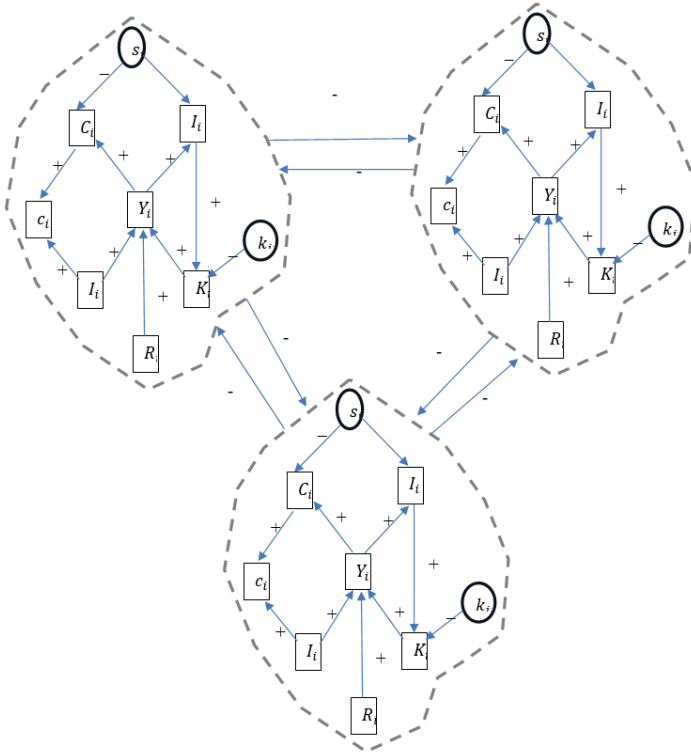


Рис. 2. Когнитивная схема глобальной организационной системы

Когнитивная карта государства, приведенная на рис. 1, содержит единственный цикл: $Y_i - I_i - K_i - Y_i$. Все ребра положительны, следовательно, цикл положителен [19]. Это означает, что система неустойчива. То есть, чем больше инвестиций, тем больше вклад в основные фонды, тем больше конечный выпуск, тем снова больше инвестиций. И наоборот, чем меньше инвестиций, тем меньше вклад в основные фонды, тем меньше конечный выпуск, тем снова меньше инвестиций.

Но если учесть, что несколько государств объединены в одну когнитивную карту, причем отрицательными ребрами, то рассмотрим, какие по численности объединения государств могут повысить устойчивость сильно связанной системы с отрицательными ребрами.

Если в системе два государства, то имеется один положительный цикл с двумя вершинами. В этом случае система неустойчива, так как показатель устойчивости $t = \frac{\text{число отрицательных циклов}}{\text{общее число циклов}} = 0$.

Если в системе три государства, то имеется три цикла с двумя вершинами с положительным знаком, два цикла с тремя вершинами с отрицательным знаком. Следовательно, в этом случае показатель устойчивости системы $t = \frac{2}{2+3} = \frac{2}{5} = 0,4$.

Если в системе четыре государства, то имеется шесть циклов с двумя вершинами с положительным знаком, восемь циклов с тремя вершинами с отрицательным знаком, два цикла с четырьмя вершинами с положительным знаком. Следовательно, в этом случае показатель устойчивости системы $t = \frac{8}{6+8+2} = \frac{8}{16} = 0,5$.

Если в системе пять государств, то имеется десять циклов с двумя вершинами с положительным знаком, двадцать циклов с тремя вершинами с отрицательным знаком, десять циклов с четырьмя вершинами с положительным знаком, два цикла с пятью вершинами с отрицательным знаком. Следовательно, в этом случае показатель устойчивости системы $t = \frac{20+2}{10+20+10+2} = \frac{22}{42} \approx 0,52$.

Обобщим результаты на произвольное количество вершин n . Число циклов с количеством вершин k равно:

$$m(k, n) = \begin{cases} 0, & k = 1, \\ C_n^k, & k = 2, \\ 2C_n^k, & k > 2. \end{cases}$$

Поэтому общее число циклов равно

$$\begin{aligned} m(n) &= C_n^2 + 2C_n^3 + 2C_n^4 + 2C_n^5 + \dots + 2C_n^n = 2 \cdot 2^n - C_n^2 - 2C_n^1 - 2C_n^0 = \\ &= 2 \cdot 2^n - C_n^2 - 2C_n^1 - 2C_n^0 = 2^{n+1} - \frac{n(n-1)}{2} - 2n - 2 = 2^{n+1} - \frac{n^2+3n+4}{2}. \end{aligned}$$

В случае нечетного количества вершин n число отрицательных циклов равно

$$m_-(n) = 2(C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^n)$$

а следовательно, мера устойчивости

$$t = \frac{2(C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^n)}{C_n^2 + 2C_n^3 + 2C_n^4 + 2C_n^5 + \dots + 2C_n^n}$$

Оценим величину t . Проведем некоторые преобразования:

$$t = \frac{2(C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-2} + C_n^n) - 2C_n^1}{2(C_n^0 + C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + C_n^4 + C_n^5 + \dots + C_n^n) - C_n^2 - 2C_n^1 - 2C_n^0}$$

Докажем, что при нечетном n выполняется $C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-2} + C_n^n = 2^{n-1}$. Для этого воспользуемся рекурсивной формулой $C_n^k = C_{n-1}^k + C_{n-1}^{k-1}$ при $k=1, \dots, n$. Заменим $C_n^1 = C_{n-1}^0 + C_{n-1}^1$, $C_n^3 = C_{n-1}^2 + C_{n-1}^3$, $C_n^5 = C_{n-1}^4 + C_{n-1}^5$, $C_n^7 = C_{n-1}^6 + C_{n-1}^7$, $C_n^{n-2} = C_{n-1}^{n-3} + C_{n-1}^{n-2}$, $C_n^n = 1 = C_{n-1}^{n-1}$. Подставим эти величины в выражение $C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-2} + C_n^n$:

$$C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-2} + C_n^n = C_{n-1}^0 + C_{n-1}^1 + C_{n-1}^2 + C_{n-1}^3 + \dots + C_{n-1}^{n-3} + C_{n-1}^{n-2} + C_{n-1}^{n-1} = 2^{n-1}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} t &= \frac{2 \cdot 2^{n-1} - 2n}{2^{n+1} - \frac{n^2+3n+4}{2}} = \frac{2^n - 2n}{2 \cdot 2^n - \frac{n^2+3n+4}{2}} = \frac{2^n - 2n}{2 \cdot (2^n - \frac{n^2+3n+4}{4})} = \\ &= \frac{2^n - 2n}{2 \cdot (2^n - 2n + 2n - \frac{n^2+3n+4}{4})} = \frac{2^n - 2n}{2 \cdot (2^n - 2n) + 4n - \frac{n^2+3n+4}{2}} = \\ &= \frac{2^n - 2n}{2 \cdot (2^n - 2n) - \frac{n^2-5n+4}{2}} = \frac{2^n - 2n}{2 \cdot (2^n - 2n) - \frac{(n-1)(n-4)}{2}}. \end{aligned}$$

Заметим, что при возрастании n степень устойчивости стремится к $1/2$. Если $\frac{(n-1)(n-4)}{2} > 0$ (а это может быть при объединении $n > 4$ государств), то степень устойчивости $t > 1/2$. При $n < 4$ (а в случае объединения нечетного количества государств это может быть только при $n=3$) степень устойчивости $t < 1/2$.

В случае четного количества вершин n число отрицательных циклов равно

$$m_-(n) = 2(C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-1})$$

а следовательно, мера устойчивости

$$t = \frac{2(C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-1})}{C_n^2 + 2C_n^3 + 2C_n^4 + 2C_n^5 + \dots + 2C_n^n}$$

Оценим величину t . Проведем некоторые преобразования:

$$t = \frac{2(C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-3} + C_n^{n-1}) - 2C_n^1}{2(C_n^0 + C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + C_n^4 + C_n^5 + \dots + C_n^n) - C_n^2 - 2C_n^1 - 2C_n^0}$$

Докажем, что при четном n выполняется $C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-3} + C_n^{n-1} = 2^{n-1}$. Для этого воспользуемся рекурсивной формулой $C_n^k = C_{n-1}^k + C_{n-1}^{k-1}$ при $k=1, \dots, n$. Заменим $C_n^1 = C_{n-1}^0 + C_{n-1}^1$, $C_n^3 = C_{n-1}^2 + C_{n-1}^3$, $C_n^5 = C_{n-1}^4 + C_{n-1}^5$, $C_n^7 = C_{n-1}^6 + C_{n-1}^7$, $C_n^{n-3} = C_{n-1}^{n-4} + C_{n-1}^{n-3}$, $C_n^{n-1} = C_{n-1}^{n-2} + C_{n-1}^{n-1}$. Подставим эти величины в выражение $C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-3} + C_n^{n-1}$:

$$C_n^1 + C_n^3 + C_n^5 + C_n^7 \dots + C_n^{n-3} + C_n^{n-1} = C_{n-1}^0 + C_{n-1}^1 + C_{n-1}^2 + C_{n-1}^3 + \dots + C_{n-1}^{n-4} + C_{n-1}^{n-3} + C_{n-1}^{n-2} + C_{n-1}^{n-1} = 2^{n-1}.$$

Следовательно,

$$t = \frac{2 \cdot 2^{n-1} - 2n}{2^{n+1} - \frac{n^2+3n+4}{2}} = \frac{2^n - 2n}{2 \cdot (2^n - 2n) - \frac{(n-1)(n-4)}{2}}$$

Доказательство и выводы аналогичны тем, которые были приведены при объединении нечетного количества государств.

То есть, при возрастании количества объединяемых государств n степень устойчивости стремится к $\frac{1}{2}$. При объединении 4 государств степень устойчивости $t = 1/2$, при объединении более 4 государств степень устойчивости $t > 1/2$. При объединении 2 или 3 государств степень устойчивости $t < 1/2$.

Заключение

В статье описаны когнитивная и математическая модели глобальной системы, когнитивная модель исследована на устойчивость. Доказано, что при возрастании количества объединяемых государств n степень устойчивости стремится к 50%. При объединении четырех государств степень устойчивости объединения равна 50%, при объединении более 4 государств степень устойчивости объединения более 50%, при объединении 2 или 3 государств степень устойчивости системы менее 50%.

1. **Forrester, J.W.** World Dynamics. – Cambridge, MA, USA: Wright-Allen Press, 1971.
2. **Meadows D., Randers J., Meadows D.** The Limits To Growth: The 30-Year Update. – White River Junction, VT: Chelsea Green Pub, 2004. – 338 pp.
3. **Brown, L.** Eco-Economy. – New York: W.W. Norton, 2001.
4. **Coven, T.** Creative Destruction: How Globalization Is Changing the World's Cultures. – Princeton University Press, 2002. – 192 pp..
5. **Day, R.H.** The Divergent Dynamics of Economic Growth: Studies in Adaptive Economizing, Technological Change, and Economic Development, Cambridge University Press, 2004.– 241 pp.
6. **Leroux, M.** Global Warming - Myth or Reality? The Erring Ways of Climatology. –Berlin: Springer, 2006. – 510 pp.
7. **Pearce, F.** When the Rivers Run Dry: Water-The Defining Crisis of the Twenty-First Century. – Beacon Press, 2006. – 320 pp.
8. **Rifkin, J.** The Age of Access. – Tarcher/Putnam, 2000. – 320 pp.
9. **Simpson D., Toman M.A., Ayres R.U., eds.** Scarcity and Growth Revisited: Natural Resources and the Environment in the New Millennium. – Washington, DC: Resources for the Future, 2005. – 292 pp.
10. **Steffen W., Sanderson, A., Tyson, P., Jager, J., Matson, et al.** Global Change and the Earth System: a Planet Under Pressure. – Berlin: Springer, 2004. – 336 pp.

11. **Speth, J. G.** Red Sky at Morning: America and the Crisis of the Global Environment. – Yale University Press, 2004. – 320 pp.
12. **Крапивин В.Ф., Свирежев Ю.М., Тарко А.М.** Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. - М., 1982.
13. **Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М.** Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. - М., 1985.
14. **Тарко А.М.** Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. - М., 2005.
15. **Тарко А.М.** О настоящем и будущем России и мира. - М., 2016.
16. **Садовничий В.А., Малков С.Ю., Акаев А.А.** Анализ и моделирование мировой и страновой динамики. Методология и базовые модели. - М., 2015.
17. **Hritonenko N., Yatsenko Yu.** (2007) Mathematical models of global trends and technological change // Mathematical Models. – V.3. – 303 p.
18. **Угольников Г.А.** Управление устойчивым развитием активных систем. - Ростов-на-Дону, 2016.
19. **Робертс Ф.** Дискретные математические модели с приложениями к социальному, биологическому и экологическому задачам. - М., 1986.

А.И. Дивеев, Е.А. Софронова

ЗАДАЧА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ СХЕМЫ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ

*Федеральный Исследовательский Центр «Информатика и Управление»
Российской Академии Наук, г. Москва,
aidivee@mail.ru, sofronova_ea@mail.ru*

Введение

Непрерывный бурный рост количества транспорта в городах заставляет городские власти постоянно изменять структуру сети городских и схем движения транспорта по ним. Очевидно, что предварительно все возможные изменения структуры сети, определенные бюджетом городских служб, должны быть промоделированы, а еще лучше оценены некоторой целевой функцией. Пакеты имитационного моделирования неплохо работают для уже существующей схемы дорожного движения на основе подбора параметров транспортного потока в модели, соответствующего реальному потоку. Для достоверного моделирования и оценки

еще не существующих схем дорожного движения в пакетах имитационного моделирования недостаточно математических функций. Так как при любом описании структуры сети дорог используется теория графов, то рассматриваемая в проекте научная проблема состоит в нахождении метода и алгоритма решения задачи синтеза структуры графа с целью обеспечения оптимального значения критерия, оценивающего качество управления транспортными потоками. Особенностью задачи является то, что граф структуры сети дорог практически задан и в задаче синтеза структуры определены только возможные частичные изменения структуры графа. Здесь также следует указать, что вместе с поиском структуры графа исследуется и изменения схемы движения транспортных потоков, которые также приводят к изменению структуры графа и количественной оценки.

Постановка задачи

Задана математическая модель управления транспортным потоком, построенная на основе теории управляемых сетей [1]. Модель представляет собой систему конечно-разностных уравнений, правые части которой, зависят от конфигурации сети дорог, описываемой матрицей конфигураций

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k - 1) + \mathbf{f}(\mathbf{A}(\mathbf{u}(k)), \mathbf{B}, \mathbf{D}), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(k)$ – вектор состояния транспортного потока, в момент управления k , определяет количество транспорта на каждом участке дороги сети, $\mathbf{A}(\mathbf{u}(k))$ – матрица конфигураций сети, в которой исключены определенные маневры или единица в матрице смежности графа чети в зависимости от значения вектора управления в момент k , $\mathbf{u}(k)$ – вектор управления, который указывает номера рабочих фаз светофоров на всех участках сети дорог, \mathbf{B} – пропускных способностей всех допустимых в момент k маневров, \mathbf{D} – матрица распределений указывает на доли транспортного потока, подъехавшего к перекрестку и движущихся в альтернативных направлениях.

Задано начальное состояние транспортного потока

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0. \quad (2)$$

Заданы вероятностные характеристики входного в сеть потока,

Задан критерий качества, который описывает среднее время ожидания транспортного потока на прохождение сети или количество транспорта, которое прошло данную сеть.

$$J = \int_0^{t_f} f_0(J) = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}) dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

В задаче необходимо найти матрицу конфигураций сети $A(u(k))$, чтобы минимизировать критерий (3), причем размерность матрицы конфигураций в процессе поиска и зависимость компонент матрицы от рабочих фаз светофоров может изменяться.

Предыдущие исследования по данному направлению связаны в основном с решением задачи оптимального управления транспортным потоком [2] для тех же критериев выбирались оптимальные длительности рабочих фаз светофоров без изменения конфигурации сети.

Метод решения

Для решения задачи структурно параметрического синтеза управления транспортными потоками используем методы машинного обучения эволюционными алгоритмами на основе применения универсального принципа малых вариаций базисного решения. Для решения задачи разработан специальный вариационный генетический алгоритм, который ищет возможное решение в виде кода, описывающего структуры и параметры управления транспортным потоком в рассматриваемой сети дорог.

Оптимизационная задачи структурно-параметрического синтеза управления относится к классу задач глобальной оптимизации и поэтому не может решаться классическими оптимизационными методами. Особенностью этой задачи является не только наличие множества возможных оптимальных решений, но и пространство поиска решений. Данное пространство состоит из множества специальных кодов, которые описывают структуру графа и параметры светофорного управления. На данном пространстве метрика расстояния между возможными решениями не определяет близость значений критериев поиска оптимального решения. Данные задачи являются наиболее сложными в методах оптимизации.

Сложность применения эволюционных алгоритмов, в частности генетического алгоритма, в данной задаче связана с пространством поиска, в котором сложно использовать генетические операции кроссовера, так как эта операция для не числовых пространств часто приводит к потере свойства наследования, и, как правила невозможности нахождения оптимального или близкого к нему возможного решения. Практически любая операция кроссовера сложных структур приводит к тому, что новые структуры, полученные после операции кроссовера, оказываются далекими от своих родительских структур, т.е. после операции кроссовера получают новые структуры, непохожие на родительские. Это приводит к тому, что эволюционный алгоритм преобразуется в алгоритм случайного поиска, в котором случайно генерируется новое возможное решение и проверяется значение критерия качества для него. В таком алгоритме с

нахождением более лучшего решения уменьшается вероятность нахождения еще более лучшего решения уменьшается пропорционально значению критерия для найденного наилучшего решения и не связана со значениями критериев родительских возможных решений.

Для сохранения свойств наследования используется генетический эволюционный алгоритм, построенный на основе принципа малых вариаций базисного решения. Сохранение свойства наследования в эволюционном алгоритме позволяет на всех стадиях поиска получать некоторое множество новых возможных решений, которые имеют значения критериев в окрестности значений критериев родительских возможных решений.

1. **Дивеев А.И.** Управляемые сети и их приложения // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2008. Т. 48, № 8. С. 1510-1525.
2. **Diveev, A.I., Sofronova, E.A.** Traffic flows optimal control problem with full information// Proceedings 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC. Rhodes, Greece, 20-23 September 2020.

А.М. Котюков, Н.Г. Павлова

О РАВНОВЕСИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ РЫНОЧНОЙ МОДЕЛИ ТИПА АЛЛЕНА*

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, г. Москва;
Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов
amkotyukov@mail.ru, natasharussia@mail.ru*

Введение

Доклад посвящен вопросу существования устойчивого условного частичного равновесия в динамической рыночной модели типа Аллена. Равновесием на рынке называется ситуация, при которой объем произведенных и предлагаемых к продаже товаров на рынке равен количеству товара, которое необходимо потребителям.

Цены на товары, при которых рынок находится в состоянии равновесия, называются равновесными. С точки зрения экономики интересно

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект №23-11-20020, <https://rscf.ru/project/23-11-20020/>)

получить условия существования равновесных цен, которые удовлетворяют априори заданным ограничениям. Задача имеет принципиально важное значение для прикладной математической экономики, поскольку создает фундамент для решения задач управления ресурсами, налогами и импортом/экспортом товаров с целью сокращения перепроизводства с одной стороны и дефицита товаров – с другой.

Частичное равновесие, то есть равновесие не по всем товарам на рынке, а лишь по некоторому набору товаров, также важно для экономики, поскольку часто на рынке присутствуют товары (например, товары первой необходимости), спрос на который не меняется при изменении цены. Однако исследование частичного равновесия исключает использование классических методов анализа систем дифференциальных уравнений в силу того, что количество уравнений в системе не совпадает с количеством неизвестных.

В данной работе частичное равновесие в динамической системе рассматривается как точка совпадения двух отображений метрических пространств.

Основная часть

Перейдем к описанию рассматриваемой модели. Пусть имеется $n \in \mathbb{N}$ товаров, цены на которые $p(t) = (p_1(t), \dots, p_n(t)) \in \mathbb{R}_+^n = \{x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n : x_i > 0, i = \overline{1, n}\}$ могут меняться с течением времени $t \in [0, T]$. Рассмотрим автономную систему дифференциальных уравнений

$$\dot{p}(t) = \Lambda \left(D(p(t)) - S(p(t)) \right), \quad (1)$$

в которой отображения предложения и спроса $S, D: \mathbb{R}_+^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $S(p) = (S_1(p), \dots, S_n(p))$, $D(p) = (D_1(p), \dots, D_n(p))$ определены формулами:

$$S_i(p(t)) = S_i^0 \prod_{j=1}^n \left(\frac{p_j(t)}{p_j^0} \right)^{\tilde{E}_{ij}}, D_i(p(t)) = D_i^0 \prod_{j=1}^n \left(\frac{p_j(t)}{p_j^0} \right)^{E_{ij}}, \quad (2)$$

где $p^0 = (p_1^0, \dots, p_n^0)$, $S^0 = (S_1^0, \dots, S_n^0)$, $D^0 = (D_1^0(p), \dots, D_n^0(p)) \in \mathbb{R}^n$, $E = (E_{ij})_{i,j=\overline{1,n}}$, $\tilde{E} = (\tilde{E}_{ij})_{i,j=\overline{1,n}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Lambda = (\lambda_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\lambda_{ij} \geq 0$.

Предположим, что известны также векторы $c_1 = (c_{11}, \dots, c_{1n})$, $c_2 = (c_{21}, \dots, c_{2n}) \in \mathbb{R}_+^n$ такие, что $c_{1i} < c_{2i}$, $c_{1i} < p_i^0 < c_{2i}$, $i = \overline{1, n}$, и обозначим $P = [c_{11}, c_{21}] \times \dots \times [c_{1n}, c_{2n}]$.

Определение. Динамической рыночной моделью типа Аллена назовем следующий набор параметров:

$$\sigma = (\Lambda, c_1, c_2, p^0, S^0, D^0, E, \tilde{E}). \quad (3)$$

С помощью теории накрывающих отображений и точек совпадения были получены условия, при которых в модели σ существует положение частичного равновесия.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}(\sigma) &= \min_{p \in P} \left\| \left(\frac{\partial S}{\partial p}(p) \right)^T \left(\left(\frac{\partial S}{\partial p}(p) \right) \left(\frac{\partial S}{\partial p}(p) \right)^T \right)^{-1} \right\|^{-1} \\ \hat{\beta}(\sigma) &= \max_{i=1, m} D_i^0 \left(\prod_{j=1}^n (p_j^0)^{-E_{ij}} \right) \sum_{k=1}^n |E_{ik}| \frac{c_{2k} - c_{1k}}{2} \max_{l=1, 2} \{c_{lk}^{E_{ik}-1}\} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \max_{l=1, 2} c_{lj}^{E_{ij}}, \\ \hat{\gamma}(\sigma) &= \max_{i=1, m} |S_i(\tilde{c}) - D_i(\tilde{c})|, \end{aligned}$$

$$\text{где } \tilde{c} = \frac{c_1 + c_2}{2}.$$

Теорема. Пусть параметры модели σ удовлетворяют следующим условиям:

$$1) \det \left(\frac{\partial S}{\partial p}(p) \right) \left(\frac{\partial S}{\partial p}(p) \right)^T \neq 0;$$

$$2) \hat{\gamma}(\sigma) < \hat{\alpha}(\sigma) - \hat{\beta}(\sigma).$$

Тогда в модели σ система (1) имеет устойчивое положение равновесия $p^0 \in P$.

Заключение

Полученная теорема решает важную для экономики задачу о существовании устойчивого положения равновесия в динамической рыночной модели типа Аллена. Аналогичный подход может быть использован для получения условий существования устойчивого равновесия и в других рыночных моделях. Полученные результаты могут быть использованы при решении различных задач управления (управление ценами, ресурсами производства, импортом, акцизами, налогами) с целью привести динамическую систему в состояние равновесия для улучшения экономической ситуации в моделируемом регионе.

1. **Kotyukov, A.M.** Equilibrium in Dynamic Market Models with Known Elasticity/ A.M. Kotyukov, N.G. Pavlova// Journal of Mathematical Sciences. –2023. – №269. – С. 847–852.
2. **Аллен, Р.** Математическая экономия/ Р. Аллен. – М: Издательство иностранной литературы. – 1960. – 669 с.

О.П. Кузнецов

НОВЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ НУМЕРАЦИИ ВЕРШИН НЕОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,
olpkuz@yandex.ru*

Введение

Предлагается новый распределенный алгоритм нумерации вершин корневого неориентированного графа, который в процессе нумерации строит остовное дерево, являющееся при этом деревом обхода в ширину. Приведены оценки сложности алгоритма и указаны области его эффективного применения.

Постановка задачи

Методы распределенных вычислений на графах начали появляться с 80-х гг. XX века. За прошедшие 40 с лишним лет было опубликовано значительное количество распределенных алгоритмов, решающих разнообразные графовые задачи. Среди них отметим задачи нахождения минимального остовного дерева (задача MST) [1-4] и дерева поиска в ширину (задача BFS) [5-7]. Обзоры методов решения этих и многих других задач содержатся в работах [8-10]. Практически все эти алгоритмы предполагают, что вершины либо пронумерованы (см. обзоры [8-10]), либо имеют какие-то уникальные идентификаторы [7]. В [8] описан распределенный алгоритм нумерации вершин, основанный на известном алгоритме Тэрри обхода ребер графа, изложенном в [11].

В настоящей статье предлагается распределенный алгоритм нумерации вершин неориентированного графа, который в процессе нумерации строит остовное дерево, являющееся при этом деревом обхода в ширину (BFS-деревом) и, соответственно, деревом кратчайших путей из корня. Даются оценки сложности алгоритма и приводится сравнение с другими известными алгоритмами.

Описание алгоритма

Будем считать, что данный неориентированный граф имеет n вершин и m ребер. В нем выделена начальная вершина (корень), которая обозначена v_0 . В каждой вершине находится процессор, который может выполнять один из локальных алгоритмов. Главная особенность предлагаемого алгоритма состоит в том, что вершины могут находиться в 4 разных состояниях, обозначаемых цветами, причем каждому состоянию соответствует свой алгоритм, обозначаемый цветом. Каждая вершина имеет упорядоченный список инцидентных ей ребер. Ребра имеют признак, который в ходе работы алгоритма принимает одно из 4 значений: входящее (верхнее), черное (нижнее), пунктирное (хорда) и красное.

Вершины могут обмениваться сообщениями двух типов.

Тип 1 имеет вид (i, c) , где i – номер, т.е. $i \leq n$, c – цвет, который может быть черным или красным.

Тип 2 имеет вид (i, j) , где i, j – черные номера; сообщение этого типа возникает, когда при попытке присвоить вершине номер $i + 1$ она сообщает, что уже имеет номер j .

В обоих типах сообщений i – это последний присвоенный номер. Его будем называть текущим.

Вершина белая, если она не пронумерована; ожидает сообщения, чтобы получить свой номер; после этого она становится либо серой (если у нее есть, кроме входящего ребра, другие инцидентные ей ребра), либо красной (если таких ребер у нее нет, т.е. она висячая);

- серая, если она пронумерована, но у нее есть пронумерованные соседи; ожидает сообщения типа 1, чтобы начать нумерацию соседних вершин, или сообщения типа 2, чтобы пометить ребро, по которому это сообщение пришло, как хорду;

- черная, если пронумерована и она, и все ее соседи; при получении текущего номера она передает его на следующий уровень;

- красная, если достижимые из нее вершины следующих уровней либо отсутствуют, либо пронумерованы. В обоих случаях об этом сообщается наверх: по входящему ребру отправляется красное i .

Описаны все четыре локальных алгоритма. Приведены примеры.

Общий алгоритм является строго последовательным: в каждый дискретный момент времени активна (т.е. выполняет свой алгоритм) только одна вершина.

Доказаны две теоремы.

Теорема 1. Предложенный алгоритм 1) строит остовное дерево; 2) это дерево является деревом обхода в ширину (BFS-деревом) и, соответ-

ственно, деревом кратчайших путей из корня; 3) каждая вершина получает свой уникальный номер, причем если $i < j$, то номер любой вершины i -го уровня будет меньше номера любой вершины j -го уровня.

Под сложностью $C_{\text{NBFS}}(n)$ предложенного алгоритма для корневого графа с n вершинами понимается его коммуникационная сложность, т.е. число сообщений, порождаемых NBFS-алгоритмом в ходе его работы. Это число совпадает с числом посещений вершин графа (каждое посещение – это передача сообщения).

Теорема 2. Сложность предложенного алгоритма имеет следующий вид: $C_{\text{NBFS}}(n) = O(n^2 - n)$.

Заключение

Приводится сравнение предложенного алгоритма с другими алгоритмами нумерации, в частности, со сравнительно недавним алгоритмом [12], который также строит нумерацию и BFS-дерево.

1. **Gallager, R.G., Humblet, P.A., & Spira, P.M.** A distributed algorithm for minimum-weight spanning trees // ACM Transactions on Programming Languages and Systems. 1983. V. 5. N. 1. P. 66-77.
2. **Peleg D., Rubinovich V.** A near-tight lower bound on the time complexity of distributed MST construction // In Proc. of the 40th IEEE Symp. on Found. of Comp. Sci. (FOCS). 1999. P. 253–261.
3. **Вялый М.Н., Хузиев И.М.** Быстрые протоколы выбора лидера и построения остовного дерева в распределенной сети // Пробл. передачи информ. 2017. Т. 53. №2. С. 91–111; Problems Inform. Transmission, **53**:2 (2017), 183–201.
4. **Dinitz M., Halldórsson M., Izumi T., Newport C.** Distributed minimum degree spanning trees // In Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, 2019. P. 511–520,
5. **Awerbuch B., Gallagher R.G.** Distributed BFS algorithms // Proc. 26th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS). 1985. P. 250-255.
6. **Park, J., Tokura, N., Masuzawa, T. and Hagihara, K.,** An efficient distributed algorithm for constructing a breadth-first search tree // Systems and Computers in Japan. 1989. V. 20. P. 15-30.
7. **Makki S.A.M.** Efficient distributed breadth-first algorithm // Computer Communications. 1996, V. 19, Issue 8. P. 628-636.
8. **Бурдонов И., Косачев А.** Общий подход к решению задач на графах коллективом автоматов // Труды ИСП РАН, том 29, вып. 2, 2017, стр. 27-76.

9. **Бурдонов И., Косачев А., Сторгов А.** Распределённые алгоритмы на корневых неориентированных графах // *Труды ИСП РАН*, 2017 г., том 29, вып. 5, стр. 283-310.
10. **Ghaffari M.** Distributed Graph Algorithms. 2022. <https://people.csail.mit.edu/ghaffari/DA22/Notes/DGA.pdf>
11. **Ope O.** Теория графов // М.: Наука. 1968.
12. **Métivier Y., Robson J.M, Zemmari A.** A distributed enumeration algorithm and applications to all pairs shortest paths, diameter...// *Information and Computation*. 2016.V. 247, P. 141-151.

А.А. Лазарев

МЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ РАСПИСАНИЙ $1|r_j|L_{max}$

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
jobmath@mail.ru*

Введение

Рассматривается фундаментальная проблема теории расписаний $1|r_j|L_{max}$. На одном приборе необходимо обслужить n работ, $N = \{1, 2, \dots, n\}$. Каждая работа $j \in N$ характеризуется: r_j – моментом поступления, моментом с которого может быть начато обслуживание работы; p_j – продолжительностью обслуживания; d_j – директивным сроком завершения. Прерывания при обслуживании работ и одновременное обслуживание нескольких работ запрещены. Через $\pi = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ будем обозначать расписание обслуживания работ, где через j_k , $k = 1, \dots, n$, обозначается работа, которая обслуживается k -ой по порядку.

Через $C_j(\pi)$ будем обозначать момент окончания обслуживания работы $j \in N$ при расписании π . Разность между моментом окончания обслуживания и директивным сроком $C_j(\pi) - d_j$, $j \in N$, в русскоязычной литературе называют временным смещением (в англоязычной литературе – *lateness*).

Необходимо найти расписание π^* , при котором величина $\max_{j \in N} \{C_j(\pi^*) - d_j\}$ принимала бы наименьшее значение среди всех $n!$ возможных расписаний (перестановок).

Данная проблема является одной из основных фундаментальных проблем теории расписаний.

Полиномиальные и псевдополиномиальные случаи проблемы

Одной из первых публикаций по данной проблеме была [1]. Одним из оптимальных расписанием будет $\pi^* = (j_1, j_2, \dots, j_n)$, когда работы обслуживаются в порядке неубывания директивных сроком, т.е. $d_{j_1} \leq d_{j_2} \leq \dots \leq d_{j_n}$.

Данная проблема является NP –трудной в сильном смысле [2].

Существует 11 полиномиальных и псевдополиномиальных случаев данной проблемы, известных автору.

1) Случай Джексона [1] $r_j = r = \text{const}, \forall j \in N$. Оптимальное расписание $\pi^* = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ может быть построено за $O(n \log n)$ операций, $d_{j_1} \leq d_{j_2} \leq \dots \leq d_{j_n}$.

Условие $r_j = r = \text{const}, j \in N$, может быть выражено с помощью системы уравнений

$$Fr^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ r \end{pmatrix}, \text{ где матрица } F_{n \times n}$$

$$F_{n \times n} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ а } r^T = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}.$$

2) $d_j = d = \text{const}, \forall j \in N$. Оптимальное расписание π^* может быть построено за $O(n \log n)$ операций: $\pi^* = (j_1, j_2, \dots, j_n), r_{j_1} \leq r_{j_2} \leq \dots \leq r_{j_n}$. Данный случай может быть выражен через систему равенств

$$Fd^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d \end{pmatrix}$$

3) Случай Хоогевена [3].

Если существует константа β , что

$$r_j \in [d_j - p_j - \beta, d_j - \beta], \quad \forall j \in N. \quad (1)$$

Для точного решения примеров из класса Хоогевена существует алгоритм сложности $O(n^2 \log n)$ операций [3]. Ограничения (1) можно переписать следующим образом.

Существует такая константа β , что

$$\beta \in [d_j - p_j - r_j, d_j - r_j], \quad \forall j \in N. \quad (2)$$

Условия (2) можно записать в виде системы линейных неравенств

$$-r_j - p_j + d_j \leq \beta, \quad \forall j \in N,$$

$$r_j - d_j \leq -\beta, \quad \forall j \in N,$$

$$E(d^T - p^T) \leq Er^T + B \leq Fd^T,$$

где

$$E_{n \times n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \text{ единичная матрица размерности } n \times n.$$

$$B = \begin{pmatrix} \beta \\ \beta \\ \vdots \\ \beta \end{pmatrix} - n - \text{ мерный столбец размерности } n.$$

r^T, p^T, d^T – вектора моментов поступления, продолжительностей и директивных сроков представленных в транспонированном виде

4) Случай Лазарева [4]. Данный случай выражается системой неравенств

$$d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n, \quad (3)$$

$$d_1 - r_1 - p_1 \geq d_2 - r_2 - p_2 \geq \dots \geq d_n - r_n - p_n. \quad (4)$$

То есть работы можно так пронумеровать, что удовлетворяются условия (3-4). Для решения примеров из данного класса существует алгоритм сложности $O(n^3 \log n)$ операций [4].

Условия (3-4) можно записать в виде системы линейных неравенств

$$Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix}, \quad F(d^T - r^T - p^T) \geq Fd^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n - r_n - p_n \end{pmatrix}$$

Данному случаю удовлетворяют примеры, когда $d_j = r_j + p_j + \text{Const}$, $\forall j \in N$, то есть у всех работ одинаковый резерв до своих директивных сроков.

5) В случае, когда все продолжительности обслуживания работ равны, то есть, $p_j = p, j \in N$, Барбарой Симонс [5] построен полиномиальный алгоритм решения трудоемкости $O(n^2 \log n)$ операций.

Система ограничений может быть записана следующим образом.

$$Fp^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ p \end{pmatrix}$$

6) В случае, когда директивные сроки равны константе, $d_j = d, j \in N$, то оптимальное расписание может быть найдено за $O(n \log n)$ операций, $\pi^* = (j_1, j_2, \dots, j_n), r_{j_k} \leq r_{j_{k+1}}, k = 1, \dots, n-1$.

$$Fd^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d \end{pmatrix}$$

7) В случае [6], когда множество работ состоит из двух подмножеств $N = N_1 \cup N_2$, где $N_1 = \{j: p_j = p\}$, а $N_2 = \{j: p_j = 2p\}$, где $p \in Z^+$.

Для решения примеров этого случая существует псевдополиномиальный алгоритм трудоемкости $O(n^2 \log n \log p)$ операций. Очевидно, в матричном виде данный случай может быть выписан следующим образом

$$F_{n_1 \times n_1}^1 p^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ p \end{pmatrix}, \quad F_{n_2 \times n_2}^2 2p^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 2p \end{pmatrix}.$$

8) В случае, когда моменты поступления и директивные сроки согласованы [4]

$$r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_n \text{ и } d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n, \quad (5)$$

то оптимальное расписание может быть найдено за $O(n \log n)$ операций. Система неравенств может быть записана

$$Fr^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}, \quad Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix},$$

9) Случай [7]

$$d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n,$$

$$d_1 - \alpha p_1 - \beta r_1 \geq \dots \geq d_n - \alpha p_n - \beta r_n, \quad (6)$$

$$\alpha \in [0,1], \beta \in [0, +\infty]. \quad (7)$$

Система (6-7) линейных ограничений может быть записана следующим образом:

$$Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix}, \quad F(d^T - \alpha p^T - \beta r^T) \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n - \alpha p_n - \beta r_n \end{pmatrix}.$$

Для построения оптимального расписания требуется $O(n^3 \log n)$ операций [7].

10) В случае, когда

$$r_i \leq r_j \Rightarrow d_i \geq d_j, \forall i, j \in N.$$

Мы можем пронумеровать работы следующим образом

$$r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_n \quad (8)$$

$$d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n \quad (9)$$

Оптимальное решение в этом случае может быть найдено за $O(n^3 P + np_{max}P)$ операций, где $P = \sum_{j=1}^n p_j$, $p_{max} = \max_{j \in N} p_j$, $p_j \in Z^+$, $\forall j \in N$ [4]. Система линейных неравенств (8) - (9) может быть записана следующим образом

$$Fr^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}, \quad Fd^T \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix},$$

11) В случае, когда к ограничениям (8) - (9) добавляются еще ограничения

$$d_j - p_j \leq d_{\min}, j \in N \quad (10)$$

где $d_{\min} = \min_{j \in N} d_j$.

В случае ограничений неравенств (8), (9), (10) оптимальное решение может быть найдено за $O(n^2)$ операций [4]. Система линейных ограничений может быть записана следующим образом

$$Fr^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}, Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix}, Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix}.$$

Иными словами, когда значения директивных сроков работ отличаются от d_{\min} не более чем на продолжительность работ, то оптимальное решение может быть найдено за полиномиальное время.

12) Еще в одном подслучае проблемы (8), (9), когда

$$r_i \leq r_j \Rightarrow d_i - p_i \geq d_j, \forall i, j \in N \quad (11)$$

Систему линейных неравенств (8), (9), (11) можно записать как

$$Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix}, Fd^T \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ d_n \end{pmatrix}, E(d^T - p^T) \leq \begin{pmatrix} d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \\ d_{n+1} \end{pmatrix},$$

Систему линейных неравенств (8),(9),(11) можно расписать

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_n, d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n \\ d_1 - p_1 \geq d_2 \\ d_2 - p_2 \geq d_3 \\ d_3 - p_3 \geq d_4 \\ \dots \\ d_n - p_n \geq d_{n+1} \end{array} \right. \quad (12)$$

Оптимальное решение может быть найдено за $O(n \log n)$ операций [4]. Необходимо заметить, значения параметров самых сложных примеров проблемы $|1|r_j|L_{max}$ удовлетворяют ограничениям

$$\begin{aligned} r_1 &\leq r_2 \leq \dots \leq r_n, \\ d_1 &\geq d_2 \geq \dots \geq d_n. \end{aligned}$$

Но когда разброс значений директивных сроков ограничен, а именно

$$d_1 - p_1 \geq d_2, \quad d_2 - p_2 \geq d_3, \dots, \quad d_{n-1} - p_{n-1} \geq d_n,$$

То есть разность значений текущего директивного срока и с последующим номером работы не меньше чем продолжительность работы. Иными словами, когда значения директивных сроков «разряжены» по временной оси. Из (7) видно, что

$$d_1 - p_1 - p_2 - \dots - p_{n-2} - p_{n-1} \geq d_n$$

Известно [4] два примера проблемы $|1|r_j|L_{max}$ $\{r_j, p_j, d_j\} j = \overline{1, n}$ и $\{r_j, p_j, d'_j\} j = \overline{1, n}$, если $d_j = d'_j + Const, \forall j = \overline{1, n}$, то эти два примера эквивалентны, т.е. множества оптимальных расписаний совпадают, а оптимальные значения целевой функции отличаются на $Const$. Поэтому можно назначить $d_n = d_1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_j$. А для фиктивной $n + 1$ работы назначить

$$d_{n+1} = d_1 - \sum_{j=1}^n p_j.$$

Таким образом исходный пример $\{r_j, p_j, d_j\} j = \overline{1, n}$ NP-трудной в сильном смысле проблемы $|1|r_j|L_{max}$ мы преобразуем в пример

$\{r'_j, p'_j, d'_j\} j = \overline{1, n}$ для которого $d'_n = d_1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_j$. И все директивные сроки смещены на величину $\alpha = d'_n - d_n$, т.е. $d'_j = d_j - \alpha, j = \overline{1, n-1}$.

Продолжительность обслуживания работ остаются без изменений, т.е. $p'_j = p_j, j = \overline{1, n}$. И добавляется директивный срок $n+1$ фиктивной работы $d'_{n+1} = d_1 - \sum_{j=1}^n p_j$.

Таким образом области определения примеров всех полиномиальных и псевдополиномиальных разрешимых случаев рассматриваемой NP - трудной в сильном смысле проблемы выписываются с помощью двух матриц

$$F = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ и } E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Заключение

Рассмотрена фундаментальная NP – трудная в сильном смысле $1|r_j|L_{max}$ задача. Все известные полиномиальные и псевдополиномиальные разрешимые случаи задачи записываются с помощью двух матриц.

1. **Jackson J.R.** Scheduling a production line to minimize maximum tardiness// Los Angeles, CA: University of California, 1955. Manag. Sci. Res. Project. Report N 43.
2. **Brucker P., Lenstra J.K., Rinnoy Kan A. N/G.** Complexity of machine scheduling problems // Math. Cent. Afd. Math. Beslisk. – Amsterdam, 1975. BW 43. – 29 pp.
3. **Hoogeveen J. A.** Minimizing maximum promptness and maximum lateness on a single machine// Math. Oper. Res. - 1996. - V. 21. - P. 100 - 114.(130 книга)
4. **Лазарев А.А.** Теория расписаний. Методы и алгоритмы. М.: ИПУ РАН, 2019. – 408 с.
5. **Simons B.B.** A fast algorithm for single processor scheduling // Proceedings of the 19th IEEE Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – New York: Ann. Arbor. Mich., 1978. – P. 246 – 252.
6. **Vakhania N.** Single machine scheduling with release times and tails. Annals of Operations Research, 129 (2004), p.253-271.

7. **Arkhipov D., Battaia O., Lazarev A.A.** An efficient pseudo-polynomial algorithm for finding a lower bound on the makespan for the Resource Constrained Project Scheduling Problem // European Journal of Operational Research. 2018. p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221718309305?via%3Dihub>.
8. **Лазарев А.А.** Парето-оптимальное множество ТЗ-трудной задачи минимизации максимального временного смещения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2006. – № 6. – С. 103 - 110.
9. **Лазарев А.А.** Оценка абсолютной погрешности задач теории расписаний с критерием минимизации максимального временного смещения // Доклады Академии Наук. – 2007. – Том 415, № 4. – С. 446-449.

*М.Ю. Лобачев, И.М. Буркин,
Е.В. Кудряшова, Н.В. Кузнецов, И.В. Курков*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ *

*Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург,
Институт Проблем Машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург,
Тульский государственный университет, г. Тула
nkuznetsov239@mail.ru, mlobachev64@gmail.com*

Введение

Схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, phase-locked loops, PLL) являются нелинейными системами управления и широко применяются в системах беспроводной связи, компьютерных архитектурах, гироскопии, системах навигации (GPS, ГЛОНАСС), энергосистемах [1-4]. Одной из ключевых инженерных задач нелинейного анализа систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) является задача определения *полосы захвата* для значений параметра частоты входного сигнала в зависимости от параметров физической реализации системы [5, 6]. При заданных параметрах физической реализации и частоты входного сигнала, соответствующих полосе захвата, система ФАПЧ входит в синхронизм, а соответствующую математическую модель называют глобально устойчивой.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФН в рамках научного проекта № 25-11-00147

Данный доклад является продолжением работ [7-8], в которых полоса захвата была аналитически вычислена для системы ФАПЧ с пропорционально-интегрирующим фильтром и непрерывной кусочно-линейной характеристикой фазового детектора (ФД). В работе для системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром предложена замена переменных, позволяющая строить двумерные бифуркационные диаграммы, учитывающие все параметры системы одновременно. Результаты моделирования показывают, что точные значения полосы захвата системы с симметричной кусочно-линейной характеристикой ФД могут быть использованы в качестве нижней и верхней оценок полосы захвата системы с классической синусоидальной характеристикой ФД. Предложенные оценки улучшают известные результаты К. Бёма и У.Д. Хейза [9, 10]. Для системы с пропорционально-интегрирующим фильтром показаны трудности моделирования, связанные с наличием в фазовом пространстве скрытого аттрактора.

Основная часть

Рассмотрим математическую модель системы ФАПЧ с пропорционально-интегрирующим фильтром $F(s) = \frac{1+\tau_2 s}{1+(\tau_1+\tau_2)s}$, где $\tau_1 > 0$ и $\tau_2 \geq 0$:

$$\dot{x} = -\frac{1}{\tau_1 + \tau_2}x + \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}v_e(\theta_e), \quad \dot{\theta}_e = \omega_e^{\text{free}} - K_{\text{vco}} \left(\frac{1}{\tau_1 + \tau_2}x + \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}v_e(\theta_e) \right). \quad (1)$$

Известно, что полоса захвата и глобальная устойчивость двумерной системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром определяются при увеличении частоты входного сигнала либо исчезновением состояний равновесия, либо рождением гетероклинической траектории из седла в седло [8, 11, 12]. В более общем случае пропорционально-интегрирующего фильтра нарушение глобальной устойчивости может происходить также через бифуркацию рождения полуустойчивого цикла второго рода — скрытого колебания, возникающего из уплющения траекторий [8, 12]. Математическое моделирование таких систем затруднено, поскольку численные методы могут не различать близкие траектории с различной устойчивостью при недостаточно малом шаге интегрирования [13].

Моделирование системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром

В случае $\tau_2 = 0$ сделаем в системе (1) гладкую замену $x_1 = \frac{1}{\tau_1}x$, $t_1 = \frac{1}{\tau_1}t$, не влияющую на устойчивость решений:

$$\frac{dx_1}{dt_1} = -x_1 + v_e(\theta_e), \quad \frac{d\theta_e}{dt_1} = \tau_1 \omega_e^{\text{free}} - \tau_1 K_{\text{vco}} x_1. \quad (2)$$

Система после замены зависит от двух параметров: $\tau_1 \omega_e^{\text{free}}$ и $\tau_1 K_{\text{vco}}$, что позволяет строить двумерные бифуркационные диаграммы полосы захвата, охватывающие все параметры системы одновременно. На рис.1 значение частоты захвата ω_p получено численно для системы (2) с синусоидальной характеристикой ФД. Из результатов моделирования следует, что в качестве нижней и верхней оценок можно рассматривать значения частоты захвата системы (2) с треугольной характеристикой ФД: $\omega_{\min}^{\text{tri}} = \omega_{\min}^{\text{tri}}(K_{\text{vco}})$ и $\omega_{\max}^{\text{tri}} = \frac{\pi}{2} \omega_{\min}^{\text{tri}} \left(\frac{\pi}{2} K_{\text{vco}} \right)$, для которых известны аналитические формулы [7, 8]. Возможный подход к аналитическому доказательству справедливости оценок — метод двумерных систем сравнения [14, 15]. Предложенные оценки уточняют известные результаты К. Бёма и У.Д. Хейза [9, 10].

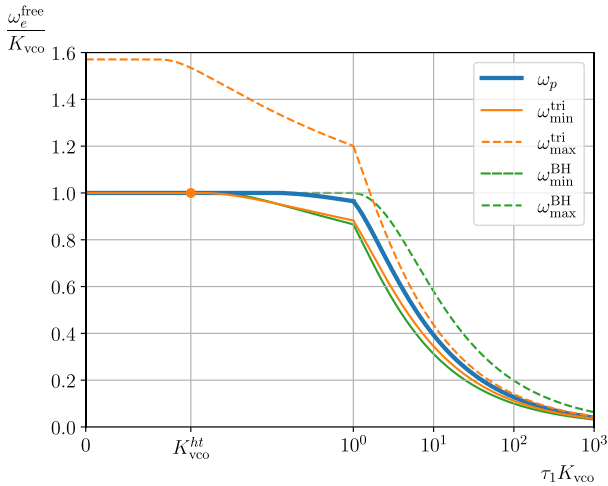


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма полосы захвата системы (2).

Значения ω_p получены численно, $\omega_{\min}^{\text{tri}}$ и $\omega_{\max}^{\text{tri}}$ построены по формулам из [7, 8], $\omega_{\min}^{\text{BH}}$ и $\omega_{\max}^{\text{BH}}$ — оценки Бёма-Хейза [9, 10]

Моделирование системы ФАПЧ с пропорционально-интегрирующим фильтром

Моделирование системы в случае $\tau_2 > 0$ осложнено тем, что потеря устойчивости может происходить также через бифуркацию рождения по-

луустойчивого цикла второго рода. Неправильный выбор шага численного алгоритма может приводить к появлению решений как красная траектория на рис.2.

Параметры симуляции в matlab для рис. 2 $K_{vco} = 250$, $\tau_1 = 0.0448$, $\tau_2 = 0.0185$, $\omega_e^{free} = 178.9$. При этом получается $x^{eq} \approx 0.0321$, $\sin\theta_e^{eq} = 0.7156$, $(\theta_e^{eq})_1 \approx 19.64704$, $(\theta_e^{eq})_2 \approx 25.930224$. Настройки для красной траектории:

```
options = odeset('MaxStep', 0.06, 'RelTol', 2e-3, 'AbsTol', 2e-3);
[T_1 X_1] = ode45(pll_s, 0:0.0008:0.5, [0.01088, 20.201], options);
```

Начальные данные для устойчивого цикла (нижнего): $x(0) = 0.009$, $\theta_e(0) = 6\pi$, для неустойчивого цикла (верхнего): $x(0) = 0.011$, $\theta_e(0) = 6\pi$, для траектории, стремящейся к состоянию равновесия: $x(0) = 0.014$, $\theta_e(0) = 6\pi$, для траектории, стремящейся к предельному циклу: $x(0) = 0.008$, $\theta_e(0) = 8\pi$.

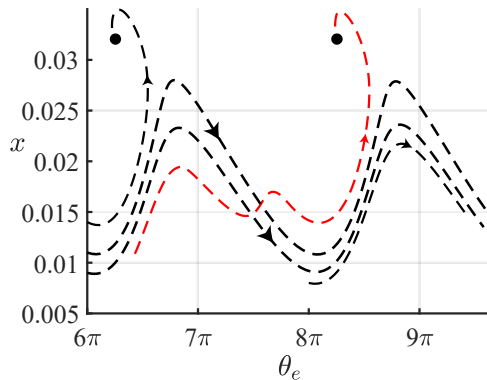


Рис. 2. Моделирование в случае пропорционально-интегрирующего фильтра

Заключение

В данной работе было проведено моделирование системы ФАПЧ с пропорционально-интегрирующим фильтром и синусоидальной характеристикой. На его основе, в случае интегрирующего фильтра, предложена оценка полосы захвата через точные значения полосы захвата системы с треугольной характеристикой.

1. **Karimi-Ghartemani M.** Enhanced Phase-Locked Loop Structures for Power and Energy Applications. — Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014.
2. **Kaplan E.D. and Hegarty C.J.** Understanding GPS/GNSS: Principles

- and Applications. — 3rd ed. — Norwood, MA, USA: Artech House, 2017.
3. **Middlestead R.W.** Digital Communications with Emphasis on Data Modems: Theory, Analysis, Design, Simulation, Testing, and Applications. — Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
 4. **Kuznetsov N.V., Belyaev Y.V., Styazhkina A.V., Tulaev A.T., Yuldashev M.V., and Yuldashev R.V.**, Estimation of PLL architecture on MEMS gyroscope performance // *Gyroscopy and Navigation*. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — P. 44–52.
 5. **Шахгильдян В.В. и Ляховкин А.А.** Системы фазовой автоподстройки частоты. — Москва, СССР: Связь, 1972.
 6. **Leonov G.A. and Kuznetsov N.V.** Nonlinear Mathematical Models of Phase-Locked Loops. Stability and Oscillations. — Cambridge, U.K.: Cambridge Scientific Publishers, 2014.
 7. **Кузнецов Н.В., Лобачев М.Ю. и Мокаев Т.Н.**, Скрытая граница глобальной устойчивости в контрпримере к гипотезе Капранова о полосе захвата // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. — 2023. — Т. 512. — С. 69–77.
 8. **Kuznetsov N.V. and Lobachev M.Y.**, Exact pull-in range and the hidden boundary of global stability for PLLs with lead-lag filters // *IEEE Access*. — 2025. DOI:10.1109/ACCESS.2025.3573693.
 9. **Böhm C.**, Nuovi criteri di esistenza di soluzioni periodiche di una nota equazione differenziale non lineare // *Annali di Matematica pura ed applicata*. — 1953. — Vol. 35, no. 1. — P. 343–353.
 10. **Hayes W.D.**, On the equation for a damped pendulum under constant torque // *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP)*. — 1953. — Vol. 4, no. 5. — P. 398–401.
 11. **Tricomi F.**, Integrazione di un'equazione differenziale presentatasi in elettrotecnica // *Annali della Scuola Normale Superiore de Pisa (in Italian)*. — 1933. — Vol. 2, no. 2. — P. 1–20.
 12. **Белюстина Л.Н. и Белых В.Н.**, Качественное исследование динамической системы на цилиндре // Дифференциальные уравнения. — 1973. — Т. 9, № 3. — С. 403–415. — [English transl.: *Differential Equations*, vol. 9, pp. 309–319, 1973].
 13. **Kuznetsov N.V., Leonov G.A., Yuldashev M.V., and Yuldashev R.V.**, Hidden attractors in dynamical models of phase-locked loop circuits: limitations of simulation in MATLAB and SPICE // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. — 2017. — Vol. 51. — P. 39–49.
 14. **Чаплыгин С.А.** Новый метод приближенного интегрирования дифференциальных уравнений. — Гостехиздат, 1950.
 15. **Kuznetsov N.V., Lobachev M.Y., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V.**,

and Tavazoei M.S., The Gardner problem on the lock-in range of second-order type 2 phase-locked loops // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2023. — Vol. 68, no. 12. — P. 7436–7450.

Н.А. Лутовинова

ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ТОЧНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ СУММАРНОЙ ЗАДЕРЖКИ

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,

Введение

Рассматривается классическая NP-трудная в обычном смысле ([1], [2]) задача теории расписаний $1||\Sigma T_j$, заключающаяся в минимизации суммарной задержки выполнения работ $N = \{1, 2, \dots, n\}$ на одном приборе. Прерывания и параллельное выполнение не допускаются. Для каждой работы j заданы время выполнения p_j и срок сдачи d_j . Требуется построить расписание $\pi = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ при котором достигается минимум функции $TT(\pi, t) = \sum_{j=1}^n \max\{0, C_j(\pi, t)\}$, где $C_j(\pi, t)$ - момент завершения выполнения работы j согласно расписанию π со временем старта t .

Задача известна с 1970-х годов, но остается актуальной: для ее решения разрабатываются новые точные алгоритмы (см., например, [5], [6], [7]), а также развиваются подходы с использованием методов машинного обучения ([4]).

В работах [8], [9] были сформулированы свойства оптимальных расписаний, обобщающие классические результаты по декомпозиции задачи ([1], [10]). На основе этих свойств был предложен алгоритм, рекурсивно вычисляющий оптимальное расписание. Вследствие рекурсии, этот алгоритм повторно решал одни и те же подзадачи (более 75% времени согласно [11]). Чтобы избежать этого применяется, например, подход ветвления и запоминания ([7] - считается самым быстрым точным алгоритмом на данный момент). В [11] предлагается алгоритм SBA, также модифицирующий декомпозиционный подход и избегающий повторного решения подзадач. В данной работе представлена верхняя оценка количества операций в алгоритме SBA и доказано, что эта оценка не улучшаема.

Постановка задачи и результаты

Обозначим набор работ (с учетом времени старта) за $I = \{N, t_0\}$. Среди всех работ выделим работу $j^*(I) = \max\{j \in N: p_j = \max_{i \in N} p_i\}$. Декомпозиционный подход предполагает определение множества подходящих позиций для j^* , каждая из которых задаёт разбиение оставшихся работ на подзадачи — до и после j^* . Эти подзадачи решаются независимо, а затем рекурсивно объединяются в оптимальное расписание.

Множество подходящих позиций $L(I)$ определяется (см. [8]) как множество всех индексов $k \in N, k \geq j^*(I)$, таких что: $t_0 + \sum_{j=1}^k p_j < d_{k+1}$ и $d_j + p_j \leq t_0 + \sum_{j=1}^k p_j$, для всех $j = j^*(I) + 1, \dots, k$.

Алгоритм SBA предлагает сначала найти всевозможные подзадачи, получаемые по правилам декомпозиции, а потом уже рекурсивно вычислять оптимальные, что позволяет избежать повторного вычисления одних и тех же задач. Для оценки количества операций необходимо было ответить на вопрос: сколько может быть подходящих позиций для работы j^* . Было доказано следующее утверждение:

Утверждение: Если $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n, d_k = t_0 + \delta + \sum_{j=1}^{k-1} p_j, \delta > 0$ (1), то $L(I) = N$.

То есть при выполнении определенных условий подходящими будут все позиции. На основании этого утверждения была получена верхняя оценка для обсуждаемого алгоритма:

Лемма: Алгоритм SBA находит решение задачи за не более чем $O(n2^n)$ операций. При этом, при выполнении условия (1) количество операций будет не менее, чем $O(n2^n)$.

Заключение

На основании утверждения о мощности множества $L(I)$ была получена точная (и неулучшаемая) оценка сложности алгоритма SBA в худшем случае. Предложенная оценка, хоть и является строгой, не даёт точной характеристики трудоёмкости алгоритма на типичных входных данных. В дальнейшем предполагается сравнение с результатами, изложенными в [5], а также оценка средней сложности алгоритма.

1. Lawler, E. L. A 'pseudopolynomial' algorithm for sequencing jobs to

- minimize total tardiness / E. L. Lawler // *Annals of Discrete Mathematics*. – 1977. – Vol. 1. – P. 331–342.
2. **Du, J.** Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard / J. Du, J. Y. T. Leung // *Mathematics of Operations Research*. – 1990. – Vol. 15, № 3. – P. 483–495.
 3. **Koulamas, C.** The single-machine total tardiness scheduling problem: Review and extensions / C. Koulamas // *European Journal of Operational Research*. – 2010. – Vol. 202, № 1. – P. 1–7.
 4. **Bouška, M.** Deep learning-driven scheduling algorithm for a single machine problem minimizing the total tardiness / M. Bouška, P. Šůcha, A. Novák, Z. Hanzálek // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 308, № 3. – P. 990–1006.
 5. **Tripathi, R. P.** Single Machine Scheduling Model with Total Tardiness Problem / R. P. Tripathi, N. Tyagi, A. B. Chandramouli // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9, № 37.
 6. **Garraffa, M.** An exact exponential branch-and-merge algorithm for the single machine total tardiness problem / M. Garraffa, L. Shang, F. Della Croce, V. T'kindt // *Theoretical Computer Science*. – 2018. – Vol. 745, № 1. – P. 1–20.
 7. **Shang, L.** Branch memorize exact algorithms for sequencing problems: Efficient embedding of memorization into search trees / L. Shang, V. T'Kindt, F. Della Croce // *Computers and Operations Research*. – 2021. – Vol. 128. – P. 105171.
 8. **Szwarc, W.** Solution of the single-machine total tardiness problem / W. Szwarc, F. Della Croce, A. Grosso // *Journal of Scheduling*. – 1999. – Vol. 2. – P. 55–71.
 9. **Szwarc, W.** Algorithmic paradoxes of the single-machine total tardiness problem / W. Szwarc, A. Grosso, F. D. Croce // *Journal of Scheduling*. – 2001. – Vol. 4, № 2. – P. 93–104.
 10. **Della Croce, F.** A new decomposition approach for the single machine total tardiness problem / F. Della Croce, R. Tadei, P. Baracco, A. Grosso // *Journal of the Operational Research Society*. – 1998. – Vol. 49. – P. 1101–1106.
 11. **Лазарев, А. А.** Теория расписаний. Методы и алгоритмы: монография / А. А. Лазарев. – Москва: ИПУ РАН, 2019. – 408 с.

УПРАВЛЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫМИ СИСТЕМАМИ С ФИКСИРОВАННЫМ ВРЕМЕНЕМ СХОДИМОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОТОКОЛА ЛОКАЛЬНОГО ГОЛОСОВАНИЯ

*Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург,
daniilmingazov@mail.ru*

Введение

Современные задачи управления сложными динамическими системами требуют разработки эффективных методов координации как централизованных, так и распределённых структур. Особую актуальность приобретает анализ устойчивости таких систем, поскольку отсутствие гарантий устойчивости делает их непригодными для практического применения даже при незначительных возмущениях.

В классической теории управления устойчивость определяется расположением спектра матрицы состояния или полюсов передаточной функции. Однако для многосвязных систем с высокой размерностью прямой спектральный анализ становится вычислительно неэффективным. Альтернативный подход, основанный на декомпозиции системы и анализе взаимодействия подсистем, был предложен в работах Красовского А.А. [1] и Соболева О.С. [2]. Дальнейшее развитие этот подход получил в исследованиях Поляка Б.Т. и Цыпкина Я.З. [3], где был разработан графоаналитический критерий устойчивости, обобщающий классические частотные методы.

Особый класс распределённых систем представляют мультиагентные системы (МАС), характеризующиеся:

- отсутствием единого центра управления;
- локальностью взаимодействий, описываемых графами;
- целевой ориентацией на достижение консенсуса.

Традиционные алгоритмы консенсуса, предложенные Олфати-Сабером Р. [4] и Амелиной Н.О. [5; 6], обеспечивают асимптотическую сходимость, однако требуют неограниченного времени, что

¹ Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор кафедры системного программирования СПбГУ Олег Николаевич Граничин

ограничивает их применение в задачах с жёсткими временными рамками.

Перспективным направлением является разработка алгоритмов фиксированного времени сходимости (FTC - «Fixed-Time Convergence Metod), обеспечивающих достижение консенсуса за конечный интервал независимо от начальных условий. Теоретические основы этого подхода были заложены в работах Парсегова С.Э. [7] где предложены нелинейные протоколы управления, гарантирующие заданное время согласования состояний агентов.

В работе Н. О. Амелиной, О.Н. Граничина и А.Д. Корнивец (2013) [8], авторы в разделе будущих исследований рассказали о том, что в последнее время были разработаны новые методы конечной стабилизации непрерывных моделей с ограниченными возмущениями [9; 10]. В работе [11] рассматриваются алгоритмы с глобальной фиксированно-временной устойчивостью, когда стабилизация достигается за заданное конечное время независимо от начальных условий. Эти результаты используются в [12] для достижения конечной стабилизации в нелинейных сетях с переключаемой топологией, а в [13] - для гипер-конечной стабилизации в задаче равномерного распределения агентов на интервале с точной коммуникацией между двумя соседними агентами.

Постановка задачи

В этой статье автором будет приведен протокол управления в динамической сети с топологией (N, E_t) с обратной связью по наблюдениям состояний:

$$u_t^i = K_t^i \left(y_t^{i,j_1}, \dots, y_t^{i,j_{m_i}} \right) \quad (1)$$

где множество $\{j_1, \dots, j_{m_i}\} \subseteq \{i\} \cup \bar{N}_t^i$, $\bar{N}_t^i \subseteq N_t^i$, а K_t^i - некоторая гладкая функция своих аргументов при каждом $t = 0, 1, 2, \dots$.

Рассматривается следующий алгоритм с фиксированным временем сходимости, являющийся нелинейной версией протокола локального голосования:

$$u_t^i = \alpha_t \sum_{j \in \bar{N}_t^i} \left[K_1 (y_t^{i,j} - y_t^{i,i})^{1/3} + K_2 (y_t^{i,j} - y_t^{i,i})^3 \right] \quad (2)$$

где $y_t^{j,i}$ и $y_t^{i,i}$ - состояния агентов, а K_1 и K_2 - положительные константы усиления, определяющие вклад соответственно нелинейной и сверхнелинейной компонент в управляющее воздействие.

Особенностью такого протокола является комбинация слагаемых с дробной $\frac{1}{3}$ и целой (3) степенями, что обеспечивает:

- быструю начальную сходимость за счёт доминирования нелинейного члена при больших рассогласованиях;
- точное достижение консенсуса благодаря сверхнелинейной компоненте при малых ошибках;
- гарантированное время сходимости, не зависящее от начальных условий.

Целью работы является исследование возможностей достижения консенсуса за конечное время. В частности, будут изучены и показаны:

- Условия существования фиксированного времени сходимости — при каких параметрах системы (K_1 , K_2 , α_t) и начальных состояниях агентов гарантируется, что все агенты придут к согласованному состоянию:

- за заранее известное время (например, 5 секунд);
- независимо от того, насколько далеко были начальные состояния агентов друг от друга.

- Влияние топологии сети на динамику системы — как структура связей между агентами влияет на скорость согласования;

- Эксперименты алгоритма с помехами измерений — способность системы сохранять работоспособность:

- При неточных измерениях состояний соседей ($y_t^{i,j} + \xi_t$, где ξ_t — шум);
- При пропадании части данных (пакетные потери);
- При задержках в передаче информации.

Стоит отметить, что в статье доказана сходимость алгоритма в дискретной системе, а также экспериментально доказана сходимость в стохастической дискретной системе.

Математическое доказательство схождения алгоритма за фиксированное время в дискретной системе планируется реализовать в будущих исследованиях.

Протокол локального голосования

Проблема достижения консенсуса в мультиагентных системах является ключевой для обеспечения эффективной координации автономных агентов в распределенных средах. Консенсус предполагает согласование общего состояния или значения между всеми участниками системы, несмотря на ограниченную коммуникацию, неполные данные и возможные конфликты в локальных целях агентов.

Основные методы решения этой задачи включают итеративные алгоритмы, основанные на локальном взаимодействии агентов. В таких

подходах каждый участник постепенно корректирует свое состояние на основе информации от соседей, что в итоге приводит к глобальному согласованию. Для моделирования этого процесса используются математические методы, включая линейные и нелинейные модели консенсуса, а также стохастические алгоритмы для работы в условиях неопределенности.

На процесс достижения консенсуса влияют:

- топология сети (связность, централизация, динамические изменения),
- параметры коммуникации (задержки, надежность каналов),
- степень автономности и интеллектуальности агентов.

Особое значение имеют адаптивные алгоритмы, способные поддерживать консенсус при изменении среды, частичных сбоях или появлении новых агентов.

Алгоритмы консенсуса находят применение в управлении роем роботов, синхронизации данных в децентрализованных сетях, координации беспилотных транспортных средств и коллективном принятии решений. Современные исследования направлены на разработку более эффективных, устойчивых и масштабируемых методов, учитывающих реальные ограничения.

Протокол локального голосования представляет собой децентрализованный алгоритм консенсуса в мультиагентных системах, основанный на принципах стохастической аппроксимации. Ключевая идея метода - достижение глобального согласования через локальные взаимодействия агентов без централизованного управления.

Для каждого агента $i \in N = \{1, \dots, n\}$ в момент времени t состояние определяется как:

$$x_t^i = \frac{q_t^i}{p_t^i}, \quad (3)$$

где q_t^i - очередь заданий, p_t^i - производительность агента. Динамика системы описывается:

$$x_{t+1}^i = x_t^i + f_t^i + u_t^i, \quad i \in N, \quad (4)$$

или в терминах очереди:

$$q_{t+1}^i = q_t^i - p_t^i + z_t^i + p_t^i u_t^i, \quad i \in N, t \geq 0 \quad (5)$$

Цель протокола - достижение консенсуса:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_t^i - x_t^j) = 0, \quad \forall i, j \in N \quad (6)$$

Агенты получают информацию о соседях через зашумленные наблюдения:

$$y_t^{i,j} = x_{t-d_t}^j + w_t^{i,j}, \quad j \in N_t^i \quad (7)$$

где d_t - задержка, $w_t^{i,j}$ - шум измерения.

Управляющее воздействие вычисляется как:

$$u_t^i = \gamma \sum_{j \in N_t^i} a_t^{i,j} (y_t^j - y_t^i) \quad (8)$$

где γ - параметр шага, $a_t^{i,j}$ - весовые коэффициенты, N_t^i - множество соседей агента i . Алгоритм устойчив к шумам и изменениям топологии сети, что делает его перспективным для распределенных систем управления.

Нелинейный протокол локального голосования

В этой статье автором предложено моделирование с нелинейным протоколом локального голосования (10), которое показывает улучшение качества процесса балансировки нагрузки, а также теоретически обоснованы свойства протокола типа (10), что позволило подбирать параметры алгоритма в соответствии с требованиями к времени переходного процесса.

Определение 1. Назовем протоколом управления в динамической сети с топологией (N, E_t) обратную связь по наблюдениям состояний:

$$u_t^i = K_t^i (y_t^{i,j_1}, \dots, y_t^{i,j_{m_i}}) \quad (9)$$

где множество $\{j_1, \dots, j_m\} \subseteq \{i\} \cup \bar{N}_t^i$, $\bar{N}_t^i \subseteq N_t^i$, а K_t^i - некоторая гладкая функция своих аргументов при каждом $t = 0, 1, 2, \dots$.

В статье рассматривается следующий алгоритм с фиксированным временем сходимости:

$$u_t^i = \alpha_t \sum_{j \in \bar{N}_t^i} [K_1 (y_t^{i,j} - y_t^{i,i})^{1/3} + K_2 (y_t^{i,j} - y_t^{i,i})^3] \quad (10)$$

где $y_t^{i,i}$ и $y_t^{i,j}$ - состояния агентов, а K_1 и K_2 - константы, регулирующие скорость сходимости. Использование таких управляющих функций позволяет достичь приближенного консенсуса быстрее и за конечное время по сравнению с классическими подходами.

Определение 2. Будем говорить, что в сети достигнут консенсус в момент времени t , если для всех $i \in N$ существует такое x^* (значение консенсуса), что $x^* = x_t^i$.

Задача консенсуса заключается в формировании алгоритма управления, который обеспечивает достижение консенсуса.

Пусть $(\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{P})$ - основное вероятностное пространство. Будем использовать следующие обозначения:

- E - математическое ожидание;
- E_x - условное математическое ожидание при условии x .

Условие A1. Функции $f^i(\cdot, \cdot): \mathcal{R} \times \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}$ из уравнения динамики сети (13) удовлетворяют:

$$|f^i(x, u) - f^i(\hat{x}, \hat{u})| \leq L_1(L_x|x - \hat{x}| + |u - \hat{u}|); \quad (11)$$

Для любого фиксированного x выполняется $E_x f^i(x, u) = f^i(x, E_x u)$.

Из условия (11) следует:

$$|f^i(x, u)|^2 \leq L_2(L_c + L_x|x|^2 + |u|^2). \quad (12)$$

Обозначим через $\bar{w}_t \in R^{n \times n}$ вектор помех наблюдений, $\bar{x}_t = [x_t^1, \dots, x_t^n]$ и $\bar{u}_t = [u_t^1, \dots, u_t^n]$.

Определение 3. Будем говорить, что в сети достигается средний ε -консенсус в момент времени t , если $E \left\| x_t^i \right\|^2 < \infty$ для всех $i \in N$ и существует случайная величина x^* такая, что $E \left\| x_t^i - x^* \right\|^2 \leq \xi$ для всех $i \in N$.

Условие A2.

а) Для всех $i \in N, j \in N_t^i \cup \{i\}$ помехи наблюдений $w_t^{i,j}$ - центрированные, независимые одинаково распределенные случайные величины с $E(w_t^{i,j})^2 \leq \sigma_w^2$.

б) Для всех $i \in N, j \in N_{max}^i$ появления дуг (j, i) в графе $\mathcal{G}_{\mathcal{A}_t}$ являются независимыми событиями с вероятностями $p_a^{i,j}$.

в) Веса K_1 и K_2 ограничены: $K \leq K_t^{i,j} \leq \bar{K}$ п.н. и существуют $K^{i,j} = EK_t^{i,j}$

д) Задержки $d_t^{i,j} \leq \bar{d}$ п.н. и являются н.о.р.с.в.

Все случайные величины независимы.

Для $t \geq 0$ определим σ -алгебры \mathcal{F}_t , порожденные $\bar{x}_0, A_0, \dots, A_{t-1}, d_0^{i,j}, \dots, d_{t-1}^{i,j}$ и другими величинами, и $\bar{\mathcal{F}}_t = \sigma\{\mathcal{F}_t, A_t\}$.

При $\bar{d} > 0$ вводим $n\bar{d}$ дополнительных узлов с состояниями x_{t-k}^i , $k = 1, \dots, \bar{d}$. Пусть $\bar{n} = n(\bar{d} + 1)$ и определим матрицу $A_{max} \in R^{\bar{n} \times \bar{n}}$.

$$a_{max}^{i,j} = p_a^{i,((j-1) \bmod n)+1} K^{i,((j-1) \bmod n)+1}, \quad (13)$$

где $a_{max}^{i,j} = 0$ при $i = n + 1, \dots, \bar{n}$.

Теоремы о близостях траекторий

Теорема 1. При выполнении условий *A1*, *A2* существует $\bar{\alpha}$ такой, что при $(0 \leq \alpha_t \leq \bar{\alpha} < \tilde{\alpha})$ выполняется:

$$E \max_{0 \leq t \leq T} \left| \bar{X}_t - \bar{Z}_t \right|^2 \leq c_1 \mathcal{T}_T e^{(c_2 \mathcal{T}_T)} \bar{\alpha}, \quad (14)$$

где $\mathcal{T}_T = \alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_{T-1}$, $c_1, c_2 > 0$ - некоторые константы:

$$C_1 = 2^{3+\bar{d}} n^3 L_1^2 \bar{K}^2 (\sigma_\omega^2 + 4 \left(\frac{n L_2 L_c + (\bar{\alpha} n L_1 \bar{K})^2}{c_3 - 1} \right.$$

$$\left. + \left| \bar{X}_0 \right|^{20/3} \right) e^{T \ln c_3})$$

$$c_2 = 2^{\bar{d}/2} L_1 \left(\frac{L_x}{\underline{\alpha}} + \left| \mathcal{L}(\mathcal{A}_{max}) \right| \right),$$

$$\underline{\alpha} = \min_{0 \leq t \leq T} \alpha_t, \bar{d} = 0, \text{ If } \bar{d} = 0, \text{ or } \bar{d} = 1, \text{ If } \bar{d} > 0,$$

$$c_3 = 2^{\bar{d}} + L_x \left(2^{1+\bar{d}/2} L_1 + L_2 \right) + \bar{\alpha} 2^{1+\bar{d}/2} L_1 \left| \mathcal{L}(\mathcal{A}_{max}) \right| + \bar{\alpha}^2 \left(L_2 \left| \mathcal{L}(\mathcal{A}_{max}) \right|^2 + (2 L_1 (n-1) \bar{K})^2 \right)$$

Теорема 1 утверждает, что если выполнены условия, перечисленные выше (случайные веса, задержки, независимые шумы и т.д.) то существует пороговое значение $\bar{\alpha}$, при котором выполняется оценка ошибки уравнения (14).

Здесь:

- $E \max_{0 \leq t \leq T} \left| \bar{X}_t - \bar{Z}_t \right|^2$ - математическое ожидание максимального отклонения между двумя процессами.

- T_T - суммарный шаг алгоритма:

$$T_T = \alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_{T-1} \quad (15)$$

- c_1 и c_2 - положительные константы, определяющие, как быстро растет ошибка.

- $e^{c_3 T_T}$ указывает на экспоненциальную зависимость ошибки от шага алгоритма.

Чем меньше шаг α_t , тем меньше ошибка. Однако при слишком большом α_t ошибка может стать неуправляемой, поэтому важно ограничивать α_t сверху. Доказательство теоремы было строго проведено аналогично доказательству похожей теоремы в статье Н.О. Амелиной и А. Л. Фрадкова [12] с использованием метода усредненных моделей.

Теорема 2. При выполнении условий *A1*, *A2*, $0 < \alpha \leq \bar{\alpha}$, в усредненной дискретной системе $\bar{Z}_{t=1} = U \bar{Z}_t + G(\alpha_t, \bar{Z}_t)$, $\bar{Z}_0 = \bar{X}_0$ в момент времени T достигается $\frac{\epsilon}{4}$ -консенсус, и для констант c_1, c_2 из формулировки Теоремы 1 справедлива оценка

$$c_1 T_T e^{c_2 T_T^2} \alpha \leq \frac{\epsilon}{4} \quad (16)$$

то алгоритм с фиксированным временем сходимости обеспечивает достижение ϵ -консенсуса в стохастической дискретной системе $\bar{X}_{t+1} = U\bar{X}_t + F(\alpha_t, \bar{X}_t, \bar{\omega}_t)$ к моменту времени T .

Теперь перейдем к доказательству этой теоремы.

В силу первого условия ϵ -согласованность в усреднённой дискретной системе достигается благодаря использованию алгоритмов, обладающих фиксированно-временной сходимостью. Обозначим через x^* значение ϵ -консенсуса для системы

$$\bar{Z}_{t+1} = U\bar{Z}_t + G(\alpha_t, \bar{Z}_t), \bar{Z}_0 = \bar{X}_0.$$

Из начальных условий теоремы о консенсусе следует, что требования теоремы о сходимости алгоритма выполняются, а значит, её вывод справедлив. На основании оставшихся условий теоремы о достижении согласия и результатов теоремы о сходимости алгоритма получаем

$$E \left| \bar{X}_t - x^* \mathbf{1} \right|^2 \leq 2E \left| \bar{X}_t - \bar{Z}_t \right|^2 + 2 \left| \bar{Z}_t - x^* \mathbf{1} \right|^2 \leq \frac{\epsilon}{2} + \frac{\epsilon}{2} \leq \epsilon.$$

Экспериментальная часть

Для иллюстрации теоретических результатов приведем пример имитационного моделирования задачи балансировки нагрузки децентрализованной компьютерной сети (рис. 1).

Начальные состояния были заранее определены $q_0^1 = 0.69$, $q_0^2 = 0.68$, $q_0^3 = 0.59$, $q_0^4 = 0.63$, $q_0^5 = 0.39$, $q_0^6 = 0.52$, $q_0^7 = 0.03$, $q_0^8 = 0.62$, $q_0^9 = 0.46$, $q^1 0_0 = 0.8$.

Для сравнения эффективности протоколов LVP и нелинейного протокола LVP было разработано имитационное моделирование на языке Python в среде Google Colab.

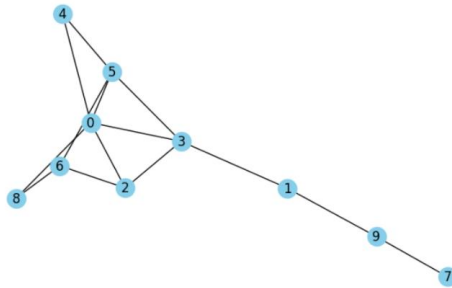


Рис. 1. Пример неориентированного двудольного графа G .
Граф демонстрирует типичную структуру связей
в задаче распределённого консенсуса

В ходе эксперимента протокол локального голосования показал точные результаты. Агенты сошлись к консенсусу.

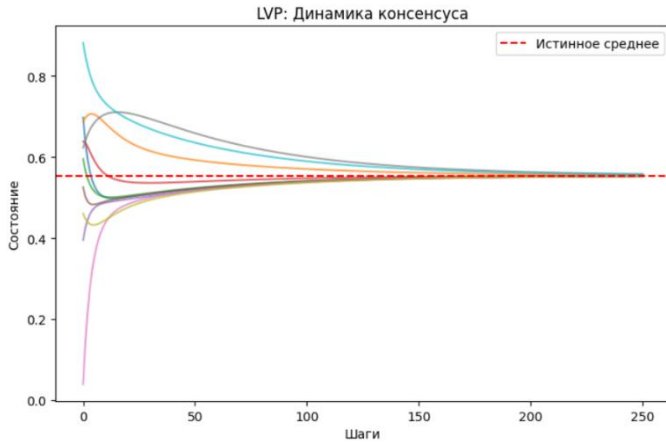


Рис. 2. Нахождение консенсуса протоколом локального голосования по графу. Красной пунктирной линией показано истинное среднее значение агентов. Разными цветами можно увидеть сходимость по каждому шагу вычислений агентов к нахождению консенсуса

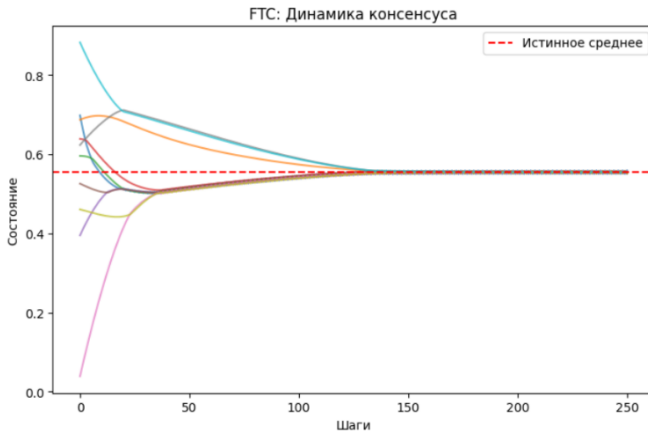


Рис. 3. Нахождение консенсуса нелинейным протоколом локального голосования по графу

Благодаря этому эксперименту можно увидеть, что нелинейный протокол локального голосования достигает приближенного консенсуса, что экспериментально подтверждает теорему о достижении консенсуса, рассмотренную ранее.

Метрики

Оценим предложенный нелинейный протокол локального голосования и сравним его с базовым методом на основе метрики под названием «Ошибка». Она показывает, насколько состояние каждого узла отклоняется от оптимальной стратегии распределения нагрузки балансировки.

Формально определим эту метрику следующим образом:

$$Error = \sqrt{\sum_{i \in N} \frac{(x_t^i - x_t^*)^2}{n}} \quad (17)$$

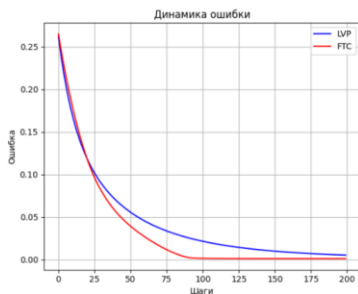
где x_t^i это состояние узла i , x_t^* является оптимальной стратегией распределения нагрузки. Оптимальная стратегия вычисляется как среднее значение всех узлов, то есть $x_t^i = \frac{1}{n} \sum_{i \in N} x_t^i$.

Эксперименты с задержками

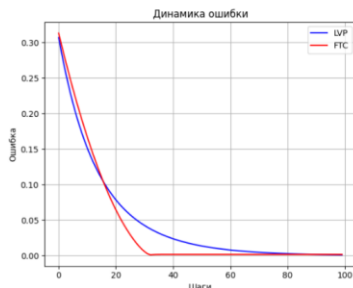
В современных распределенных системах передача данных часто происходит в условиях неидеальных каналов связи, что может приводить к задержкам и ошибкам при обмене информацией между агентами. Эти факторы существенно влияют на время достижения консенсуса в мультиагентных системах, что требует тщательного анализа эффективности различных алгоритмов в условиях реальных сетевых помех.

Для сравнительного исследования эффективности рассматриваемых методов была смоделирована сеть из 20 взаимодействующих узлов. В экспериментальных условиях предполагается, что при каждой передаче данных между узлами существует вероятность возникновения ошибки передачи. Данная модель позволяет оценить устойчивость и скорость работы как классического протокола локального голосования, так и его нелинейной версии, гарантированно сходящейся за конечное время.

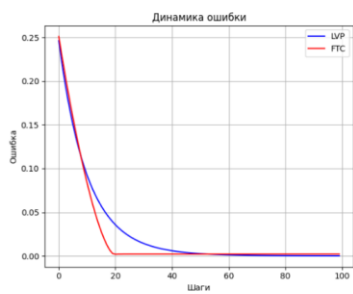
Первоначально рассматривается базовый случай, когда передача данных происходит без потерь и задержек, то есть при вероятности успешной передачи сигнала, равной 100 процентов. Этот сценарий служит контрольным экспериментом для последующего сравнения с работой алгоритмов в условиях неидеальной передачи данных.



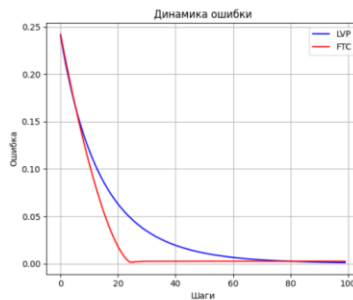
(а) Граф Эрдеша-Реньи с $p = 0.2$



(б) Граф Эрдеша-Реньи с $p = 0.5$



(в) Граф Эрдеша-Реньи с $p = 0.8$



(г) k -регулярный граф с $k = 8$

Рис. 4. Система состоит из 20 узлов.
Входящие задачи поступают в момент времени $t=0$

На представленных графиках визуализированы результаты работы алгоритмов в идеальных условиях передачи данных. Как демонстрируют экспериментальные данные, оба метода успешно достигают консенсуса, однако нелинейная версия протокола локального голосования демонстрирует более высокую скорость сходимости. Важно отметить, что при варьировании параметров системы (таких как количество агентов или начальные условия) нелинейный протокол сохраняет стабильное время сходимости, в то время как базовый вариант протокола локального голосования показывает зависимость количества итераций от изменяемых параметров.

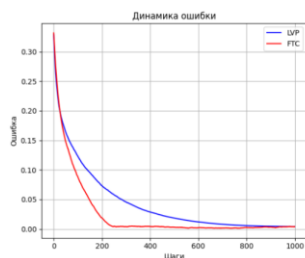
Дополнительным преимуществом нелинейного протокола является возможность регулирования скорости его сходимости путем настройки управляющих констант. Это позволяет оптимизировать работу алгоритма в зависимости от требований конкретной задачи. Разница в эффективности достигает 30-40 процентов в пользу нелинейной версии.

Эксперимент с потерями данных

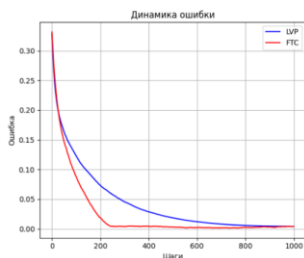
Исследуем работоспособность протокола локального голосования и его нелинейной версии в условиях пакетных потерь. Пакетные потери – это явление, при котором часть передаваемых данных теряется или искажается в процессе передачи между узлами сети.

Системы не идеальны, и может произойти так, что информация, передаваемая от одного агента другому, будет содержать ошибку с определенной вероятностью. В результате агенты получают искаженные данные о состоянии своих соседей, что может повлиять на процесс достижения консенсуса.

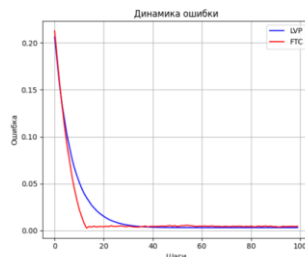
Рассматривается случай, когда вероятность получения искаженного пакета составляет 20 процентов, погрешность искаженных данных достигает 30 процентов от исходного передаваемого значения, передача данных между агентами происходит без задержек (доставка 100 процентов пакетов, но часть из них содержит ошибки).



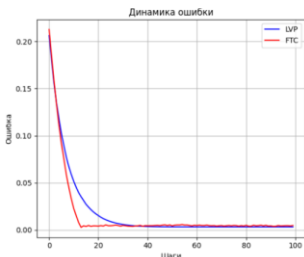
(а) Граф Эрдёша-Реньи с $p = 0.2$



(б) Граф Эрдёша-Реньи с $p = 0.5$



(в) Граф Эрдёша-Реньи с $p = 0.8$



(г) k-регулярный граф с $k = 8$

Рис. 5. Система состоит из 20 узлов. Входящие задачи поступают в момент времени $t=0$. Ошибка при передаче данных с вероятностью 20 процентов. Передаваемые данные увеличиваются на 30 процентов

На всех типах графов наблюдается общая закономерность: нелинейная версия менее чувствительна к искажениям данных и лучше адаптируется к различным сетевым топологиям. При этом эффективность обоих протоколов закономерно повышается с ростом плотности связей между агентами.

В заключение следует отметить, что нелинейный протокол локального голосования обладает значительными преимуществами перед базовой реализацией благодаря ряду ключевых характеристик.

Наличие управляющих констант обеспечивает три важных свойства: поддержание высокой скорости сходимости независимо от значений агентов, гарантированное конечное время достижения консенсуса и инвариантность к начальным условиям системы. Применение сверхнелинейной компоненты, в свою очередь, способствует точному достижению консенсуса при малых ошибках, обеспечивает устойчивость к возмущениям в процессе сходимости и позволяет эффективно компенсировать погрешности измерений.

Указанные свойства определяют высокую эффективность нелинейного протокола при использовании в реальных мультиагентных системах, функционирующих в условиях неидеальных каналов связи и наличия помех. Проведенные исследования подтверждают перспективность применения этого подхода для решения задач распределенного управления и координации, что открывает новые возможности для разработки надежных алгоритмов консенсуса в сложных условиях эксплуатации.

Заключение

В статье автором представлен метод достижения ϵ -консенсуса в мультиагентных системах за фиксированное время с использованием нелинейного протокола локального голосования. Представленный подход сочетает теоретическую строгость с практической применимостью, что подтверждается результатами численного моделирования.

Основные научные результаты исследования включают:

- Модификацию классического протокола локального голосования путем введения специальных коэффициентов усиления, обеспечивающих гарантированную сходимость в дискретных системах.
- Строгое доказательство достижения ϵ -консенсуса за конечное время, подтвержденное как теоретическим анализом, так и вычислительными экспериментами.
- Демонстрацию эффективности метода при решении задач балансировки нагрузки в децентрализованных сетях, где применение метода усредненных моделей позволяет сократить вычислительные затраты.

Проведенный анализ современных подходов к организации локального голосования выявил ключевые направления для совершенствования алгоритмов этого класса. Особое внимание уделено исследованию устойчивости предложенного протокола к различным видам сетевых возмущений и неидеальностям каналов связи в стохастических системах.

Перспективы дальнейших исследований связаны с:

- расширением области применения алгоритма для задач распределенного управления сложными динамическими системами;
- анализом зависимости времени достижения консенсуса от характеристик сетевой топологии;
- оптимизацией энергопотребления при реализации протокола в беспроводных сенсорных сетях.

Полученные результаты имеют важное значение для развития методов децентрализованного управления и могут найти применение в таких областях, как интеллектуальные энергосистемы, распределенные робототехнические системы и интернет вещей.

1. **Красовский А.А.** О двухканальных системах автоматического регулирования с антисимметричными связями // Автомат. и телемех. — 1955. — Vol. 18. — P. 126–136.
2. **Соболев О.С.** Однотипные связанные системы регулирования. — Москва : Наука, 1978.
3. **Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З.** Устойчивость нелинейных псевдоградиентных систем // Автоматика и телемеханика. — 1996. — No. 5. — P. 45–63.
4. **Olfati-Saber R., Fax J., Murray R.** Consensus and Cooperation in Networked Multi- Agent Systems // Proceedings of the IEEE. — 2007. — Vol. 95, no. 1. — P. 215–233. — DOI: 10.1109/JPROC.2006.887293.
5. **Амелина Н.О., Фрадков А.Л., Андриевский Б.Р.** Согласование состояний агентов в сетях с нерегулярной передачей информации // Автоматика и телемеханика. — 2012. — No. 8. — P. 63–79.
6. **Амелина Н.О.** Конечномерные алгоритмы согласования в распределенных системах // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2019. — No. 3. — P. 45–58.
7. **Парсегов С.Э., Поляк Б.Т., Щербаков М.В.** Нелинейный адаптивный алгоритм фиксированного времени сходимости // Автоматика и телемеханика. — 2013. — No. 5. — P. 63–79.
8. **Amelina N., Granichin O., Kornivets A.** Local Voting Protocol in Decentralized Load Balancing Problem with Switched Topology, Noise, and Delays // 2013 IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC). — Florence, Italy, 12/2013. — P. 4965–4970. — DOI:

- 10.1109/CDC.2013.6760695.
9. **Polyakov A., Poznyak A.** Lyapunov function design for finite-time convergence analysis: twisting controller for second-order sliding mode realization // Automatica. — 2009. — Vol. 45, no. 2. — P. 444–448. — DOI: 10.1016/j.automatica.2008.09.019.
 10. **Cruz-Zavala E., Moreno J. A., Fridman L. M.** Uniform robust exact differentiator // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2011. — Vol. 56, no. 11. — P. 2727–2733. — DOI: 10.1109/TAC.2011.2159213.
 11. **Polyakov A.** Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2012. — Vol. 57, no. 8. — P. 2106–2110. — DOI: 10.1109/TAC.2012.2190179.
 12. **Hui Q., Haddad W. M., Bhat S. P.** Finite-time semistability, filippov systems, and consensus protocols for nonlinear dynamical networks with switching topologies // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. — 2010. — Vol. 4, no. 3. — P. 557–573. — DOI: 10.1016/j.nahs.2010.03.006.
 13. **Parsegov S. E.** Hyper finite-time stabilisation of multi-agent systems // Problems of Control. — 2012. — No. 6. — P. 7–12.
 14. **Амелина Н.О., Фрадков А.Л.** Приближенный консенсус в стохастической динамической сети с неполной информацией и задержками в измерениях // Автоматика и телемеханика. — 2012. — No. 11. — P. 6–29.

С.О. Никаноров

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕОНТЬЕВА С УПРАВЛЕНИЕМ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, г. Москва,
nikanorov.stas4@gmail.com*

Введение

Доклад посвящен исследованию динамической модели Леонтьева. Модель Леонтьева (см. [1, 2]) – математическая модель экономических процессов "Затраты – выпуск". Исследуемая модель разрабатывалась В. В. Леонтьевым с 1924 года, став одним из основоположников теории межотраслевого баланса. Модели межотраслевого баланса, в частности модель Леонтьева, представляют собой таблицу, отражающую связь между объемами затрат на производство продукции в одной отрасли, и затратами, необходимыми для обеспечения этого производства в других

отраслях.

Основные принципы построения модели состоят в том, что в экономической системе производятся, реализуются, потребляются и инвестируются n типов ресурсов. При этом каждая отрасль производит только один уникальный тип продукта, то есть различные отрасли производят различные типы ресурсов.

Под производственным процессом в каждой отрасли подразумевается преобразование некоторых типов ресурсов, взятых в определенных количествах, в некоторое количество ресурса одного соответствующего типа. При этом соотношение затрачиваемых ресурсов и выпускаемого продукта предполагается постоянным.

Балансовые модели представляют собой систему линейных уравнений. Коэффициентами этой системы являются объемы ресурсов, необходимые для производства условной единицы товара. Замкнутость технологического множества позволяет понять, корректно ли смоделирована экономическая система.

Основная часть

Открытая динамическая модель Леонтьева межотраслевых балансовых соотношений описывается системой

$$x = \hat{A}x + \hat{B}\dot{x} + u. \quad (1)$$

Под открытостью динамической модели будем понимать существование в экономической системе потребления товаров и услуг, которые не связаны с процессом производства. Другими словами, в модели существует вектор конечного потребления.

Здесь $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор валовых выпусков отраслей, $\hat{A} = \hat{a}_{ij}$, $i, j = \overline{1, n}$ – матрица прямых затрат размерности $n \times n$, $\hat{B} = \hat{b}_{ij}$, $i, j = \overline{1, n}$ – матрица прироста основных производственных фондов, той же размерности. \dot{x} – прирост выпуска отраслей, $u = (u_1, \dots, u_n) \in \mathbb{R}_+^n$ – вектор управления.

Матрица \hat{A} является продуктивной. Условие продуктивности матрицы \hat{A} описано в [3] и заключается в том, что все элементы матрицы неотрицательные и для любого вектора $v \in \mathbb{R}_+^n$ найдется такой вектор $w \in \mathbb{R}_+^n$, что $\hat{A}w + v = w$.

Если обратить внимание на систему, описывающую модель Леонтьева, а именно на слагаемое $\hat{B}\dot{x}$, становится видно, что прирост выпуска отраслей экономики пропорционален величине капитала, вложенного в производство.

Всякую существенно ограниченную функцию u будем называть допустимой функцией непроизводственного потребления или допустимым управлением, для которой $u \in K$. Здесь K – заданный выпуклый конечнопорожденный конус

$$K = \{v \in \mathbb{R}^n: v = \sum_{i=1}^k \lambda_i v_i, \quad \lambda_i \geq 0, v_i \in \mathbb{R}^n, \quad i = \overline{1, k},$$

$v_i \neq 0$ – заданные векторы из \mathbb{R}^n , $v_i = (0, \dots, 1, \dots)$, $\forall i = \overline{1, k}$.

Технологическим множеством в момент времени T является множество

$$P_T = \{(-\hat{A}y, y): y \in D_T\}.$$

Здесь D_T – множество достижимости. Если интерпретировать D_T с экономической точки зрения, то это множество всех возможных векторов валовых выпусков, которые можно получить на временном промежутке $[0, T]$ при всех возможных допустимых функциях непроизводственного потребления.

Теорема 1. Технологическое множество P_T в динамической модели Леонтьева (1) в случае двух секторов производства является замкнутым, если

$$\begin{cases} \frac{\hat{b}_{22}}{\Delta} \hat{a}_{21} + \frac{\hat{b}_{22}}{\Delta} (1 - \hat{a}_{22}) = 0 \\ \frac{\hat{b}_{11}}{\Delta} \hat{a}_{12} + \frac{\hat{b}_{12}}{\Delta} (1 - \hat{a}_{11}) = 0 \end{cases}.$$

Заключение

Полученные необходимые условия замкнутости технологического множества позволяют понять, корректно ли смоделирована производственная система. В подобных моделях сложность состоит в случаях, когда предполагается инвестирование ресурсов, произведенных одной отраслью в другие. Другими словами – матрица \hat{B} основных производственных фондов не является диагональной. В будущем планируется исследование n -мерной производственной модели и получение необходимых условий замкнутости технологического множества. Представленный подход может быть применен к исследованию других производственных моделей типа "Затраты – выпуск".

1. **Леонтьев В.** Предисловие // Межотраслевая экономика / Научный редактор и автор предисловия академик РАН А. Г. Гранберг; Пер. с англ. — М.: Экономика, 1997. — С. 19—20. — 480 с.
2. **Леонтьев В.** Спад и подъём советской экономической науки // Экономические эссе: Теории, исследования, факты и политика. — М.: Политиздат, 1990. - С. 218.
3. **David Hawkins, Herbert A. Simon**, Some Conditions of Macroeconomic Stability, // *Econometrica*, Vol. 17, pp 245, 01 Jul 1949

И.И. Пузанов, А. А. Положенцев

К ВОПРОСУ О МОДИФИЦИРОВАННОЙ СХЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДАМИ В ПРОДУКЦИОННЫХ БАЗАХ ЗНАНИЙ

Введение

Продукционные системы, реализующие парадигму «условие—действие», находят широкое применение в экспертных и рекомендательных системах, интеллектуальных агентах, системах планирования и поддержки принятия решений [1]. Продукционные базы знаний являются ядром таких систем, в них отражается логика знаний эксперта в предметной области. Эффективность применения продукционной базы знаний во многом определяется схемой управления переходами. Классические механизмы управления переходами между продукционными правилами (жесткие приоритеты, статические графы состояний) не приспособлены к функционированию в динамически изменяющихся средах, характеризующихся не стационарностью бизнес-логики, высокой степенью неопределенности и конфликтами между правилами. Применительно к медицинским экспертным системам это выражается, например, в необходимости быстрой реконфигурации процедур диагностики при изменении симптоматики или данных пациента [2].

Обзор литературы показывает, что современные методы (интеграция нейросетевых компонентов, вероятностное внесение приоритетов, контекстные деревья) позволяют лишь частично повысить адаптивность, оставаясь непрозрачными в логике работы или ограниченными в масштабе. Предлагается модифицированная схема управления переходами, сочетающая интерпретируемость графовых моделей с возможностями оптимизации многоагентных систем (на основе принципов теории игр), обеспечивая динамическую перестройку структуры переходов и реализацию гибкой политики разрешения конфликтов [3].

Целью работы является разработка и экспериментальная проверка модифицированной схемы управления переходами между продукционными правилами, обеспечивающей динамическую адаптацию структуры переходов к переменному контексту функционирования за счет совместного использования графовых моделей, методов оптимизации и контекстного анализа, с фокусом на минимизацию конфликтов и ускорение обработки входных данных.

Материалы и методы исследования. Система представляется в виде ориентированного графа $G=(V,E)$, где V - множество правил, E - возможные переходы. Каждый переход характеризуется динамически изменяемым весом:

$$w_{ij} = \alpha * P_i + \beta * A_j - \gamma * C_{ij}, \quad (1)$$

где P_i - приоритет правила i (инициализируется экспертно, адаптируется на основе частоты использования); A_j - степень соответствия условиям правила текущего состояния исходных данных и контекста; C_{ij} - коэффициент конфликта между правилами, отражающий семантические и логические противоречия; α, β, γ - параметры, подлежащие адаптации (например, на этапе обучения с учётом целевых метрик точности и скорости).

Введённая функция в виде (1) используется в итерационной процедуре обновления: на каждом цикле правила-агенты, сопоставленные с узлами графа, конкурируют за активацию, каждый стремится максимизировать свою полезность на заданном контексте. Для предотвращения циклических переходов реализуются механизмы учёта истории переходов с временным подавлением повторных активаций, реализовано автоматическое "забывание" при длинных цепочках вывода.

В экспериментах использовались два типа данных:

- синтетический набор (генерация: Python Faker, 10 000 правил, 30% конфликтов, разметка обучающей и тестовой выборки);
- реальные медицинские данные (1500 правил, параметры пациентов, подтвержденные клинической экспертизой).

Проводилась оценка по следующим метрикам: среднее время обработки, точность классификации, индекс разрешения конфликтов, масштабируемость по объёму памяти.

Для сравнения применялись статические списки приоритетов и контекстно-независимые графы. Реализация - Python 3.10 (NetworkX, Pandas, Matplotlib). Измерения выполнены на Intel Core i7-10750H, 32 ГБ RAM, Ubuntu 22.04.

Основные результаты сравнения эффективности традиционной схемы и предложенной модифицированной представлены в таблице 1.

Видно значительное улучшение гибкости, точности и уменьшение доли конфликтов.

Более детализированная оценка производилась отдельно на синтетическом и реальном медицинском наборе данных (таблица 2). Это позволило провести сравнение по точности, времени выполнения и потреблению памяти.

Таблица 1 - Результаты сравнения

| Параметр | Традиционная схема, % | Модифицированная схема, % |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Гибкость (0–10) | 3.2 | 8.7 |
| Скорость (мс/правило) | 14.5 | 10.2 |
| Точность (%) | 82.1 | 94.3 |
| Доля конфликтов (%) | 18.4 | 5.9 |

Таблица 2 - Оценка на синтетических и реальных данных

| Метрика | Синтетика | Медицинские данные |
|----------------------|-----------|--------------------|
| Точность (%) | 96.4 | 89.2 |
| Время выполнения (с) | 3.8 | 7.5 |
| Использование памяти | 12.1 МБ | 18.3 МБ |

Предложенная модифицированная схема управления переходами демонстрирует превосходство по показателям скорости и точности по сравнению с классическими методами. Динамика весового графа обеспечивает снижение времени обработки на 26% и рост точности до 94% на синтетических данных (89.2% - на реальных медицинских примерах). Существенно снизилась доля конфликтов между правилами (5.9%), что особенно актуально для областей с высокой степенью неопределенности, таких как медицинские диагностические системы.

Ограничением является возрастающее потребление памяти при масштабировании базы правил, однако возможна оптимизация хранения структур или внедрение процедур инкрементального обновления графа. В дальнейшем планируется внедрение элементов обучения с подкреплением для предиктивной оптимизации переходов, расширение экспериментирования за пределы медицины (например, в робототехнических комплексах, промышленных экспертных системах).

Результаты исследования подтверждают перспективность применения модифицированной схемы управления переходами в продукционных базах знаний, позволяющих существенно повысить гибкость и масштабируемость продукционных систем без утраты их интерпретируемости и прозрачности принимаемых решений [4].

1. **Кирияк А. Н., Евгеньев Г. Б., Кирияк Н. Ю.** Многоязычная система создания продукционных баз знаний для интеллектуальных методов проектирования с автоматическим программированием // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 12 (138). – С. 117.
2. **Зелинская С. А., Зелинский С. С.** Изучение возможностей методов Data Mining для проведения анализа медицинских данных // Педагогический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 5-1. – С. 621.
3. **Волчихин В. И. и др.** Представление и структурирование знаний в семантико-ориентированной вычислительной среде. Часть II. Интерпретации концептуальных событийных сетевых моделей для заданных предметных областей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 3 (67). – С. 41–71.
4. **Продукционная модель для параллельной обработки знаний / Е. А. Титенко, Е. А. Петрик, Д. А. Воронин, И. В. Атакишева** // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2011. – Т. 9, № 11. – С. 81-86.

А.С. Рей

КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО РИСКА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЕГО СТРУКТУРЫ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
a.rey@ipu.ru*

Введение

Когда речь идет об оценке интегрального риска сложных систем, следует учитывать особенность таких систем, а именно, наличие множества взаимосвязанных между собой рисков и характеризующих их компонентов. Поиск же интегрального (общего) риска без учета корреляций между локальными рисками и их компонентами может привести к завышению или занижению итоговой оценки риска всей системы. Тем не менее, на сегодняшний день, подавляющее большинство исследований рассматривают риск изолировано, то есть без учета влияния других рисков и их составляющих [1–2]. Также, зачастую, ряд исследователей, при поиске интегрального риска, прибегают к суммированию локальных рисков [3] или суммированию показателей риска для каждого сценария, в случае

использования сценарного подхода [4]. Однако такие способы в полной мере не берут во внимание структуру риска сложной системы и могут привести к неверным расчетам. Среди качественных и количественных способов, используемых для оценки риска, выделяется механизм комплексной оценки (МКО) [5]. Потенциально механизм позволяет учитывать взаимосвязь рисков и их компонентов при поиски интегральной оценки риска благодаря правилам построения, которые дают возможность манипулировать структурой дерева. Однако сам по себе классический экспертный МКО не предлагает способа для формальной идентификации бинарного дерева. В связи с этим возникает необходимость в модификации МКО для обоснованного определения структуры бинарного дерева свертки, позволяющей корректно учитывать структуру риска сложной системы. В данной работе предлагается процедура идентификации бинарного дерева КО риска сложной системы на основе экспертно-заданной его иерархической декомпозиции, позволяющая формализовать процесс построения.

Идентификация дерева комплексного оценивания интегрального риска. Постановка задачи и предлагаемый подход к ее решению

Так как в классическом подходе МКО предполагается, что дерево свертки критериев строится экспертами, а интуитивно такая задача может быть затруднительна, ряд исследователей разработали способы, помогающие идентифицировать само дерево. Например, метод бинарной композиции [6] или метод последовательной дихотомии [7]. В первом случае, если критерии не рядоположены, то эксперт не сможет их обоснованно проранжировать. Во втором же случае, проблема заключается в том, что исходной формулировки может быть больше одной. Поэтому вернее сказать, что эти методы могут помочь при построении дерева КО, но не всегда гарантируют обоснованность.

Если экспертами задана иерархическая декомпозиция риска сложной системы, то она необязательно должна иметь вид дерева. Следовательно, стоит формализовать переход от такой декомпозиции к бинарному дереву для оценки интегрального риска системы в целом.

Пусть у нас есть сложная система, чей интегральный риск представлен в виде иерархической декомпозиции, которую можно изобразить в виде ориентированного графа $G = (V, E)$ ярусно-параллельного типа.

Оценки компонентов риска на каждом ярусе декомпозиции получаются в результате агрегирования оценок компонентов следующего яруса. В случае, если компоненты риска могут быть декомпозированы на более чем два подкомпонента, то встает вопрос о порядке их агрегирования на

промежуточных ярусах иерархической декомпозиции. Формально задача заключается в поиске отображения

$$\mathfrak{F}: G(V, E) \rightarrow G'(V', E'), V \subseteq V',$$

где любая из вершин $v \in V'$ имеет степень исхода либо 2, либо 0. В данной работе не вводится обязательного требования о единичной степени захода для всех вершин, в отличие от классического МКО, где отображение $G'(V', E')$ обязательно должно представлять собой одно бинарное дерево. В связи с отсутствием данного условия, можно говорить о некой модификации классического МКО.

Процедура идентификации дерева КО на основании экспертно-заданной иерархической декомпозиции включает в себя четырехшаговый алгоритм. Входными данными являются элементы ярусов иерархической структуры риска. Парная композиция рисков строится по следующему принципу: на текущем шаге агрегируются те пары подмножеств субкомпонентов, соответствующее значение показателя зависимости которых является максимальным среди всех допустимых к агрегации на текущем шаге пар подмножеств.

Стоит отметить, что данный алгоритм рассмотрен только на экспертно-заданных иерархических структурах риска. Природа их может быть различной, например, причинно-следственной или классификационной. На верхнем ярусе иерархии находится ровно одна вершина – интегральный риск. Подграфы, образованные подмножествами вершин соседних ярусов, являются двудольными.

Следующим этапом является выбор шкал оценивания рисков, а также построение матриц их свертки. Конкретные значения определяются экспертами, например, в зависимости от наличия в системе противодействующих атакам мер. В результате сворачивания компонентов риска получается комплексная оценка интегрального риска сложной системы.

Предложенный подход позволяет построить комплексную оценку интегрального риска, учитывая при этом его структуру и исходную связанность его компонентов. Критерий для парной свертки является формальным и базируется на соотношении числа общих субкомпонентов рассматриваемой пары.

1. **Горина, М.С.** Оценка рисков и угроз экономической безопасности предприятия / М.С. Горина // Естественно-гуманитарные исследования. – 2024. – № 3(53). – С. 113–119.
2. **Сиротюк, В.О.** Анализ и оценка рисков информационной безопас-

- ности организаций / В.О. Сиротюк // Материалы 28-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС'2020, Москва). – 2020. – С. 232–238.
3. **Глухов, В.Н.** Модель комплексной оценки рисков проекта по созданию промышленных парков / В.Н. Глухов, В.Н. Войтюк // *п-Есопоту*. – 2023. – № 1, Т.16. – С. 113–119.
 4. **Куликова, Е.Ю.** Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве / Е.Ю. Куликова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 2-1. – С. 124–133.
 5. **Баркалов, С.А.** Модели управления конфликтами и рисками: [под ред. Д.А. Новиков] / С.А. Баркалов, Д.А. Новиков, В.И. Новосельцев, Н.А. Половинкина, В.Н. Шипилов // Воронеж: Научная книга. – 2008. – 495 с.
 6. **Блачев, Р.Н.** Особенности процедуры бинарной агрегации многокритериальных экспертных оценок / Р.Н. Блачев // *Автоматика и телемеханика*. – 1997. – № 5. – С. 126–132.
 7. **Левинталь, А.Б.** Комплексное оценивание и планирование развития региона : Научное издание / А.Б. Левинталь, В.Ф. Ефременко, В.Б. Гусев, В.В. Павельев, Ф.Ф. Пашенко // Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2006. – 52 с.

М.С. Рыжов

МОДЕЛИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ*

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва,
maksim.ryzhov@frtk.ru*

Введение

Случайные графы создаются с заданными вероятностными характеристиками и находят широкое применение в моделировании сложных сетей. Предпочтительное присоединение (ПП) — модель соединения узлов в ненаправленном случайном графе, где новый узел соединяется существующими узлами пропорционально их степени [1,2,3]. Эта модель хорошо описывает поведение людей в сообществах. Для направленных графов предложены схемы ПП, которые учитывают направления связей

*Работа выполнена при поддержке РНФ, номер проекта 24-21-00183

[4,5,6]. Исследования показывают, что распределение связей может соответствовать power-law или экспоненциальному распределению в зависимости от параметров модели. Основная цель работы — изучить метод ПП для направленных графов с учетом удаления узлов и связей в процессе эволюции для получения асимптотического распределения связей узлов.

Метод эволюции ненаправленных графов предпочтительным присоединением

Результаты для распределений связей узлов в ненаправленных графах, полученных методом ПП, приведены в [3]. Пусть дан граф $G = (V, E)$, где $|V| = N$, а p_i - доля узлов графа с i связями в этом графе. Если граф G эволюционирует по ПП, то для него будет справедливо

$$(N + 1 - r)p_i = Np_i + \delta_{ic} + c\pi_{i-1}p_{i-1} - c\pi_i p_i + 2m \sum_{i'} \pi_{i-1,i'} p_{i-1,i'} - 2m \sum_{i'} \pi_{i,i'} p_{i,i'} + r(i+1)p_{i+1} - r i p_i + 2qm \sum_j e_{i+1,j} - 2qm \sum_j e_{i,j} - r p_i,$$

где π_i — вероятность, что новый узел будет присоединён связью к узлу с i связями; $\pi_{i,i'}$ - вероятность, что новая связь будет создана между узлами с i и i' связями; $p_{i,i'}$ - вероятность выбора пары узлов с i и i' связями; $e_{i,j}$ - вероятность выбора связи между узлами с i и j . В этом уравнении описаны процессы, которые происходят с графом на шаге эволюции:

- добавление нового узла с $c \geq 0$ связями, где второй узел для связи выбирается с вероятностью $\pi_i \sim (a + bi)$. Пример — добавление нового документа в сеть Интернет, со ссылками на существующие;
- добавление $m \geq 0$ связей между уже существующими узлами, пара узлов для связи выбирается с вероятностью $\pi_{i,i'} \sim (s + ti)(s + ti')$, $s \geq 0, t \geq 0$. Пример — добавление гиперссылок или цитирования между веб-страницами, добавление в "друзья" в социальных сетях;
- с вероятностью $r \in [0,1]$ может быть принято решение удалить один узел. Узел выбирается равномерно среди существующих. Пример — удаление веб-сайта вместе со всеми его ссылками;
- с вероятностью $q \in [0,1]$ может быть принято решение удалить m связей, уже существующих в графе. Каждая связь выбирается равномерно среди всех. Пример — удаление из списка "друзей" пользователя в социальных сетях.

Уравнение упрощается и решается в частных случаях параметров, если ввести среднее число связей приходящееся на один узел

$$\langle D \rangle = \frac{2[c + m(1 - q)]}{1 + r}.$$

Далее приведены несколько частных случаев и решения, которые им соответствуют:

Рост без удаления узлов и связей, $r = q = 0$. Это приводит к распределению по степеням $p_i \sim (i + i_0)^{-\gamma}$, где

$$\gamma = 2 + \frac{s[a + b(c + 2m)] + 2tc[a + b(c + m)]}{bsc + 2atm + 2bt(c + m)(c + 2m)},$$

$$i_0 = \frac{4bms(c + m) + as(c + 2m) + 2ac(c + m)t}{bsc + 2atm + 2bt(c + m)(c + 2m)}.$$

Рост с удалениями связей и узлов. В отличие от прошлого случая, было обнаружено, что при различных параметрах можно получить разные типы распределений. Было получено, при условии, что можно предположить $\pi_i = A(a + i)$ и $\pi_{i,i'} = B^2(s + i)(s + i')$ через нормировочные константы A и B , при $a < a_c$ что степени узлов имеют распределение $p_i \sim i^{-\gamma} \Omega^i$, где

$$\gamma = \frac{Ac + B2ms + \Omega - (Aac + 2ms)(1 - \Omega)}{\Omega(Ac + 2mB - 2\Omega(r + 2qm/\langle D \rangle)) + (r + 2qm/\langle D \rangle)},$$

$$\Omega = \frac{Ac + 2mB}{r + 2qm/\langle D \rangle} < 1,$$

При $a > a_c$, что соответствует $\Omega = 1$, будет распределение powerlaw $p_i \sim i^{-\gamma}$. При $a = a_c$, $p_i \sim i^{-\gamma} e^{-\zeta \sqrt{i}}$, где

$$\gamma = -\frac{3}{4} + \frac{a}{2}, \zeta = 2\left(\frac{c + m(1 - q)}{cr + m(q + r)}\right)^{1/2}.$$

Во всех случаях

$$a_c = \left(\frac{c + m(1 - q)}{1 + r}\right) \left(\frac{c(1 - r) + 2m(1 - q)}{m(q + r) + cr}\right).$$

Метод эволюции направленных графов предпочтительным присоединением

Схемы ПП были описаны в [4,5,6]. Схемы служат для создания новых направленных связей в графе. Связи могут быть направленными от ново добавленного узла к существующему узлу (так называемая α – схема), от существующего узла к ново добавленному (γ – схема) или между двумя существующими узлами (β – схема). Тип схемы, применяемой на шаге эволюции, выбирается с вероятностью α, β и γ так, что $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Пусть $G_k = (V_k, E_k)$ — направленный граф, полученный методом ПП на шаге эволюции k , а $N_k = \|V_k\|$ и $e_k = \|E_k\|$ число узлов и связей в графе. Связь $v \rightarrow w = (v, w) \in E_{k+1}$, созданная α – схемой на $k + 1$

шаге, направляется из нового узла $v \in V_{k+1}/V_k$, $v \notin V_k$, к существующему узлу $w \in V_k$, который выбирается с вероятностью

$$P_k^\alpha(w) = \frac{I_k(w) + \delta_{in}}{e_k + \delta_{in}N_k}.$$

Связь (w, v) , добавленная γ -схемой, направляется в новый узла $v \in V_{k+1}/V_k$, $v \notin V_k$, из существующему узла $w \in V_k$, который выбирается с вероятностью

$$P_k^\gamma(w) = \frac{O_k(w) + \delta_{out}}{e_k + \delta_{out}N_k}.$$

Связь (w_1, w_2) , добавленная β -схемой, создаётся между парой узлов $w_1, w_2 \in V_k$, каждый из которых выбирается независимо с вероятностью

$$P_k^\beta(w_1, w_2) = \left(\frac{I_k(w_1) + \delta_{in}}{e_k + \delta_{in}N_k} \right) \left(\frac{O_k(w_2) + \delta_{out}}{e_k + \delta_{out}N_k} \right) = P_k^\alpha(w_1)P_k^\gamma(w_2).$$

Добавим удаление узлов и связей по следующим правилам:

- при добавлении нового узла $v \in V_k$, $v \notin V_{k-1}$ с вероятностью $r \in [0,1]$ будет принято решение равномерно удалить один узел со всеми его связями. С вероятностью $1 - r$ ни один из узлов удалён не будет. Из этого следует, что узел может быть удалён только при использовании α - и γ -схем присоединения.

- при добавлении новой связи в граф на шаге k с вероятностью $q \in [0,1]$ будет принято решение равномерно удалить связь из множества E_{k-1} . Так при любой из схем присоединения создаётся одна новая связь, то на каждом шаге эволюции может быть удалена одна связь.

Пусть $x_{i,k}$ и $y_{j,k}$ это числа узлов с $i \geq 0$ входящими и $j \geq 0$ исходящими связями в направленном графе G_k на шаге эволюции k . Введём константы c_{in}, c_{out}, τ , как что

$$\begin{aligned} c_{in} &= \frac{(\alpha + \beta)(1 + r)}{1 - q + \delta_{in}(\alpha + \gamma)(1 + r)}, \\ c_{out} &= \frac{(\gamma + \beta)(1 + r)}{1 - q + \delta_{out}(\alpha + \gamma)(1 + r)}, \\ \tau &= \frac{r+q}{1-q}. \end{aligned}$$

Из результата работы [7,8] для числа узлов с $x_{i,k}$ и $y_{j,k}$ выполнено

$$x_{i,k} = p_i^{in}k + o(k), \quad y_{j,k} = p_j^{out}k + o(k)$$

при $r \neq 1, q \neq 1, \beta \neq 1$ с вероятностью 1 при $k \rightarrow \infty$, где при $i \rightarrow \infty, j \rightarrow \infty$

$$p_i^{in} \sim \begin{cases} A_{in} i^{-1+\delta_{in}-\frac{1}{\tau-c_{in}}(\frac{c_{in}}{\tau})^i}, & \text{при } \tau > c_{in}, \\ A_{in} i^{-\frac{3}{4}+\frac{\delta_{in}}{2}} e^{-\frac{2}{\sqrt{c_{in}}}\sqrt{i}}, & \text{при } \tau = c_{in}, \\ A_{in} i^{-1-\frac{1}{c_{in}-\tau}}, & \text{при } \tau < c_{in}, \end{cases} \quad (1)$$

$$p_j^{out} \sim \begin{cases} A_{out} j^{-1+\delta_{out}-\frac{1}{\tau-c_{out}}(\frac{c_{out}}{\tau})^j}, & \text{при } \tau > c_{out}, \\ A_{out} j^{-\frac{3}{4}+\frac{\delta_{out}}{2}} e^{-\frac{2}{\sqrt{c_{out}}}\sqrt{j}}, & \text{при } \tau = c_{out}, \\ A_{out} j^{-1-\frac{1}{c_{out}-\tau}}, & \text{при } \tau < c_{out}, \end{cases} \quad (2)$$

соответственно. При $r = 0$, $q = 0$ результат совпадает с теоретическими распределениями входящих и исходящих связей, полученными в работах [4,5,6].

Из формул (1) и (2) видно, что удаление узлов и связей приводит к появлению экспоненциального и показательного семейств распределений числа связей для части случая параметров. Схожий результат наблюдается для ненаправленных графов [3]. Пример зависимости типа распределения для числа входящих связей узла от параметров r , q и α представлен на Рис. 1. Из рисунка видно, что увеличение r , q приводит переходу от распределения power-law с конечным числом существующих моментов для числа связей к экспоненциальным и показательным распределениям с бесконечным числом конечных моментов. Это подтверждает результаты [9], что Пейджранги узлов, как меры влияния близкие по распределению к числу входящих связей, из-за удаления узлов и связей имеют более легкие хвосты распределений, что соответствует большему числу конечных моментов.

Заключение

В работе представлены результаты исследования распределений числа входящих и исходящих связей случайного графа, полученного моделью предпочтительного распределения и стратегий удаления узлов и ребер. Было получено, что помимо классического power-law распределения это приводит к экспоненциальным и показательным распределениям с ростом числа удаляемых узлов и связей по сравнению с таковыми в направленных графах, полученных методом предпочтительного присоединения без удаления узла и ребра.

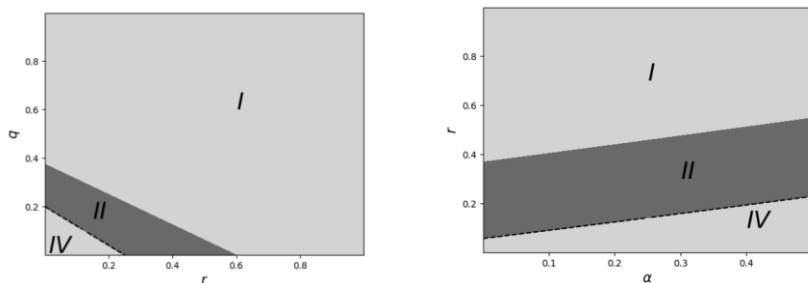


Рис. 3. Графики зависимости типа распределения количества входящих числа связей узла от параметров $(\alpha, \beta, r, q, \delta_{in})$ для ПП эволюции со схемами

удаления узлов и связей. Черный пункт соответствует случаю *III*.

Обозначения *I, II, III, IV* соответствуют распределениям из (1) при $-1 + \delta_{in} - \frac{1}{\tau - c_{in}} > 0, \tau > c_{in}; -1 + \delta_{in} - \frac{1}{\tau - c_{in}} < 0, \tau > c_{in}; \tau = c_{in}; \tau < c_{in}$. При вариации остальные принимаются равными $\alpha = 0.2, \beta = 0.5, r = 0.1, q = 0.1, \delta_{in} = 1$.

1. **Newman M. E. J.** Networks: an introduction; Oxford University Press: - Oxford, New York - 2010.
2. **van der Hofstad R.** Random Graphs and Complex Networks Vol. 1. - Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics - 2017.
3. **Ghoshal G.** The role of elementary processes in network evolution. // Ghoshal G., Chi L. and Barabási AL. // Sci Rep 3, 2920 - 2013.
4. **Bollobás B.** Mathematical Results on Scale-Free Random Graphs. // Bollobás B. and O.M. Riordan. // Wiley-WCH, Weinheim - 2002.
5. **Bollobás B.** Directed scale-free graphs // Bollobás B., Borgs C., Chayes J. and Riordan O. // In Proceedings of the fourteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms (SODA '03). Society for Industrial and Applied Mathematics, USA, pp. 132–139, 2003.
6. **Wan P.** Are extreme value estimation methods useful for network data? // Wan P., Wang T., Davis R. A., Resnick S.I. // Extremes 23 - pp. 171–195 - 2020.
7. **Рыжов М.С.** Асимптотическое распределение числа связей узла в направленном случайном графе, меняющемся по модели предпочтительного присоединения. АиТ (в процессе рецензирования)
8. **Markovich N.** Modeling distributions of node characteristics in directed graphs evolving by preferential attachment // Markovich N., Ryzhov M. // Proceeding of the 27th international scientific conference on Distributed

Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2024). - Cham: Springer, 2025. - 15460. pp. 279-288.

9. **Markovich N.** Tail Index Estimation of PageRanks in Evolving Random Graphs.// Markovich N., Ryzhov M., Vaičiulis M. // Mathematics - 10(16), 3026 - 2022.

В.Д. Сметанина

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МУЛЬТИАГЕННЫХ СИСТЕМАХ

*Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург,
v.smetanina@spbu.ru*

Введение

Развитие технологий в последние годы привело к значительным изменениям в проектировании и управлении сложными системами. Вычислительные архитектуры становятся всё более распределёнными и масштабными, что стимулирует активные исследования в сфере управления крупными мультиагентными системами.

Децентрализованная организация таких систем демонстрирует высокую эффективность в условиях динамичности, распределённости и сложности, обеспечивая адаптивность, отказоустойчивость и масштабируемость. Рост интереса к ним связан с распространением задач в области роевой робототехники, Интернета вещей и умных энергосистем. Однако классические методы управления зачастую не способны справиться с возрастающей сложностью, что создаёт потребность в новых, более гибких и масштабируемых решениях [1]. Так, макроскопические подходы теряют точность при наличии задержек, а микроскопическое управление становится чрезмерно затратным при увеличении количества агентов [2]. Под воздействием внешних возмущений, неопределённостей или ограничений может происходить не только изменение параметров среды, но и трансформация самой структуры пространства состояний агентов, что делает задачу управления существенно более сложной и неустойчивой [3], [4]. В качестве альтернативы классическим методам управления было разработано мезо-управление или кластерное управление, основанное

на динамической группировке агентов в кластеры. Кластеры динамичны и адаптируются к изменениям среды, обеспечивая гибкость и масштабируемость без глобальных перестроек всей системы [1]. Важную роль в кластеризации играет вычисление центроидов, которые упрощают обработку данных и принятие решений. Кроме того, пространственное разделение кластеров делает их в пространстве состояний разреженными [5], что дает возможности для эффективного сжатия и передачи информации, особенно в условиях ограниченных ресурсов. Предложен метод децентрализованного вычисления центроидов с использованием методологии опознавания по сжатию и глубокого обучения. Такой подход делает кластеризацию более адаптивной и эффективной для реального времени, расширяя возможности для практического применения.

Постановка задачи

Рассмотрим мультиагентную систему, состоящую из набора агентов $\mathcal{N} = \{1, \dots, n\}$. Динамика каждого агента $i \in \mathcal{N}$ моделируется с помощью следующего представления в пространстве состояний:

$$x_i(t+1) = f_i(x_i(t), u_i(t), w_i(t+1)) \quad (1)$$

где $x_i(t) \in R^d$ – вектор состояния, $u_i(t) \in R^q$ – управляющий вход, $w_i(t) \in R^p$ – внешнее возмущение, а $f_i: R^d \times R^q \times R^p \rightarrow R^d$ – это нелинейная функция, описывающая динамику агента i . Объединяя локальные переменные, определим глобальный набор состояний $D(t) = \{x_i(t)\}_{i=1}^n$ и глобальные векторы:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \text{col}(x_1(t), \dots, x_n(t)) \in R^{nd}, \\ \bar{u}(t) &= \text{col}(u_1(t), \dots, u_n(t)) \in R^{nq}, \\ \bar{w}(t) &= \text{col}(w_1(t), \dots, w_n(t)) \in R^{np}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, общая динамика системы может быть описана следующим образом:

$$\bar{x}(t+1) = F(\bar{x}(t), \bar{u}(t), \bar{w}(t+1)), \quad (3)$$

где $F: R^{nd} \times R^{nq} \times R^{np} \rightarrow R^{nd}$ это функция агрегированного отображения.

Используем матрицу смежности для компактного представления графа в каждый момент времени. Эта матрица динамически изменяется в зависимости от изменения рёбер $E(t)$. Матрица смежности может быть представлена в виде последовательности матриц $\{B(t)\}_{t \in T}$, где каждая $B(t)$ соответствует взвешенной матрице смежности в момент времени t :

$$B[i, j](t) = \begin{cases} b_{i,j}(t), & \text{если } (v_j, v_i) \in E(t) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

и $b_{i,j}t > 0$ вес, представляющий стоимость передачи данных по этой связи (v_j, v_i) в момент времени t . Взвешенная входящая степень узла i равна $\deg_i^+(B(t)) = \sum_{j=1}^n b_{i,j}(t)$, и матрица Лапласа $\mathcal{L}(B(t)) = \mathcal{D}(B(t)) - B(t)$,

где $\mathcal{D}(B(t)) = \text{diag}(\deg_1^+(B(t)), \dots, \deg_n^+(B(t)))$.

Определим коалиционную динамику в момент времени t с помощью изменяющегося во времени разбиения $\mathcal{CS}(t) = \{\mathcal{C}_\alpha(t)\}_{\alpha=1}^{s(t)}$ набора агентов \mathcal{N} в $s(t)$ кластеры ($1 \leq s(t) \leq n = |\mathcal{N}|$). Это разбиение удовлетворяет:

- 1) $\mathcal{C}_\alpha(t) \neq \emptyset$ для всех α ,
- 2) $\bigcup_{\alpha=1}^{s(t)} \mathcal{C}_\alpha(t) = \mathcal{N}$,
- 3) $\mathcal{C}_\alpha(t) \cap \mathcal{C}_\beta(t) = \emptyset$ для $\alpha \neq \beta$.

Кроме того, каждый кластер $\mathcal{C}_\alpha(t)$ характеризуется центроидом $\bar{x}_\alpha(t)$ и радиусом $r_\alpha(t) > 0$, так что для любого агента $i \in \mathcal{C}_\alpha(t)$, его состояние $x_i(t)$ соответствует $\|x_i(t) - \bar{x}_\alpha(t)\|_2 \leq r_\alpha(t)$. Мощность кластера обозначается как $|\mathcal{C}_\alpha(t)|$.

Необходимо найти центроиды, установленные на основе агрегированных сжатых измерений:

$$\hat{\theta}_i = f_\theta(y_i)$$

Назначение кластера определяется как:

$$l^* = \arg \min \|x_i - \hat{\theta}_l\|_2$$

Предложенный метод

В рассматриваемой мультиагентной системе каждый агент оперирует данными о своем местоположении. Однако при взаимодействии

множества агентов возникает проблема избыточных вычислений и высокой нагрузки на ресурсы. Поэтому ключевой задачей становится оптимизация передачи и обработки информации между узлами.

Одним из подходов к решению этой задачи является пространственная дискретизация на основе регулярной сетки. Такой подход обеспечивает структуризацию информации посредством разбиения области на равномерные элементы, что оптимизирует процессы хранения и обработки данных. В отличие от неструктурированных точечных распределений, требующих сложных вычислительных структур, регулярная сетка допускает использование простых матричных представлений. Это обеспечивает быстрый доступ к данным, снижает нагрузку на память и открывает возможности для применения различных методов предварительной обработки информации, включая алгоритмы сжатия.

После сопоставления координат агентов с ячейками сетки можно получить разреженное представление состояния системы — когда значительная часть данных не содержит полезной информации или сконцентрирована в отдельных зонах [6], [7], [8]. Такая разреженность позволяет применить методологию опознания по сжатию (compressed sensing) [9], [10], [11].

Сжатие данных может быть формализовано через линейные преобразования. Рассмотрим сигнал $x \in \mathbb{R}^N$, для которого прямое измерение всех N компонент оказывается невозможным или ресурсоемким. В качестве альтернативы мы ограничиваемся получением m линейных измерений, где $m \ll N$:

$$y = \Psi x \quad (4)$$

где $y \in \mathbb{R}^m$ вектор измерений, $\Psi \in \mathbb{R}^{m \times N}$ это Ψ матрица измерений, которая описывает как мы получаем измерения y из исходного сигнала x , а x — это разреженный сигнал, то есть большинство его компонент равны нулю или близки к нулю.

В контексте предложенной работы сигнал x представляет собой разреженный вектор, соответствующий положению агента i в дискретной двумерной сетке. Обозначим этот вектор как $\tilde{x}_i \in \mathbb{R}^s$, где s обозначает общее количество ячеек в сетке. Вектор \tilde{x}_i формируется путём отображения состояния агента x_i на двумерную сетку $(2D)$, в результате чего ненулевыми остаются только те компоненты, которые соответствуют занимаемой агентом ячейке [12, 13]. Более строгие доказательства выполнения свойства RIP описаны в работе [14].

В качестве измерительной матрицы используется матрица, элементы которой генерируются случайным образом из нормального распределения, то есть каждый элемент матрицы имеет независимое нор-

мальное распределение с нулевым средним значением и заданной дисперсией. $\Phi_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, где $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$ – нормальное распределение с нулевым средним значением и стандартным отклонением σ , которое может быть скорректировано в зависимости от задачи. В случае сжатого восстановления элементы матрицы Φ независимы и равномерно распределены.

С помощью этой матрицы каждый агент преобразует своё разреженное представление $\tilde{x}_i \in \mathbb{R}^s$ в вектор сжатых измерений $y_i \in \mathbb{R}^m$ по следующей формуле:

$$y_i = \Phi \tilde{x}_i,$$

где $\Phi \in \mathbb{R}^{m \times s}$.

Для совместной оценки агрегированного состояния группы используется линейная агрегация сжатых измерений от всех агентов. Объединённый вектор агрегированных измерений \bar{y} вычисляется как:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi \tilde{x}_i.$$

Это агрегированное представление служит основой для дальнейшего восстановления положения центроида кластера.

Для координации агентов в распределённой среде был применён протокол ускоренного локального голосования (ALVP), основанный на консенсусном подходе, как описано в работе [5]. Этот алгоритм обеспечивает согласование данных между агентами с минимальным числом итераций и снижает объём межагентного обмена, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов.

После консенсуса агенты формируют глобальное сжатое представление, которое передаётся в предварительно обученную нейронную сеть. Сеть обучена распознавать структуру сжатых данных и восстанавливать из них координаты центроидов кластеров и их веса - количество агентов в кластере.

Структура предлагаемого метода распределенной кластеризации:

Этап 1: Дискретизация для разреженного представления состояния. Каждый агент дискретизирует своё пространство состояний, отображая его на сетку для получения разреженного представления.

Этап 2: Сжатие с использованием методологии опознания по сжатию. Каждый агент берёт своё дискретизированное состояние и сжимает его с помощью гауссовой измерительной матрицы.

Этап 3: Агрегация на основе ускоренного метода ALVP. Для объединения локальных сжатых измерений, полученных от нескольких агентов, на этом этапе используются методы ускоренного консенсуса.

Этап 4: Оценивание центроидов с помощью предварительно обученной нейронной сети.

Эксперименты

Для проведения экспериментальной оценки был сгенерирован синтетический набор данных, содержащий 10 000 выборок. Каждая выборка представляла собой систему, состоящую из 100 агентов. Агенты были равномерно распределены по сетке размером 128 на 128, что позволило имитировать двумерную пространственную среду. Такое пространственное расположение позволило моделировать сценарии, в которых агенты действуют в пределах определенной области, имитируя реалистичные ограничения, присущие физическим или сетевым мультиагентным системам.

В рамках процесса создания набора данных агенты были систематически разделены на три отдельных кластера. Такая настройка характерна для реальных распределенных систем, где распространено локализованное взаимодействие или группировка по конкретным задачам.

Сжатие состояния агента осуществлялось с использованием метода опознавания по сжатию с использованием гауссовой измерительной матрицы.

В рамках эксперимента использовался коэффициент сжатия 8х, что означает, что объём исходных данных был уменьшен в восемь раз.

Для моделирования взаимодействия между агентами использовалась базовая коммуникационная сеть, построенная в виде случайного графа. В этой модели каждое возможное соединение между парой агентов формировалось независимо с вероятностью 0.2. Такая вероятность соединений имитирует частично связанные и потенциально изменяющиеся во времени топологии, которые характерны для многих реальных распределённых систем. Использование случайной сети позволяет привнести в моделирование реалистичные ограничения: не каждый агент имеет прямую связь со всеми остальными, а информация передаётся поэтапно через соседей.

Таблица 1

Сравнительный анализ показателей эффективности оценки координат центроидов (среднее значение) относительно распределенного метода k – means

| Метод | NMI | ARI | Silh. Score | Davis-Bouldin |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| k -means Предложенный метод | $0,90 \pm 0,1$ $0,72 \pm 0,09$ | $0,86 \pm 0,20$ $0,83 \pm 0,17$ | $0,60 \pm 0,27$ $0,631 \pm 0,05$ | $0,36 \pm 0,26$ $0,398 \pm 0,25$ |

**Сравнительный анализ показателя обмена сообщениями
относительно распределенного метода k – means**

| Метод | MessageCount |
|--------------------|----------------------------------|
| k -means | $N=100$: 43804, $N=150$: 74010 |
| Предложенный метод | $N=100$: 19360, $N=150$: 43760 |

Предварительно обученная нейронная сеть точно оценила координаты центроидов кластеров с показателями, представленными в Таблице 1. Средняя ошибка рассчитана на основе выполнения 15 различных наборов тестов. Например, на рис. 1. показана одна выборка с оцененными и реальными центроидами.

Проведено сравнительное исследование предложенного метода и классического распределенного алгоритма K -means по двум ключевым параметрам: качество кластеризации и эффективность коммуникации в распределенной среде. Результаты сравнительного анализа, представленные в Таблице 1, демонстрируют, что разработанный метод обеспечивает сопоставимый с K -means уровень качества кластеризации. Высокие значения ARI (Adjusted Rand Index), NMI (Normalized Mutual Information) и индекса Silhouette указывают на то, что в определении центроидов метод обеспечивает четкое и корректное распределение объектов по кластерам. Это говорит либо о достаточной разделенности кластеров, либо об устойчивости их структуры к небольшим ошибкам в оценке положения центроидов. Отличие наблюдается в показателях сетевой нагрузки: как следует из данных Таблицы 2, предложенный алгоритм характеризуется существенно меньшими требованиями к коммуникационным ресурсам, что представляет особую ценность для распределенных вычислительных систем.

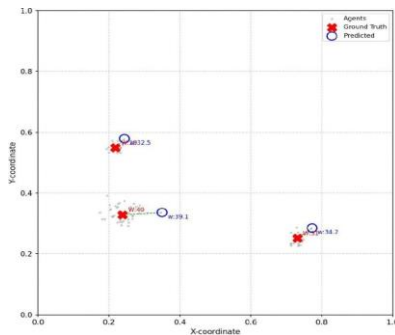


Рис. 6. Типичный образец с оцененными и реальными центроидами.

Заключение

Разработан децентрализованный метод кластеризации агентов, основанный на сжатом представлении их состояний. Предложена схема агрегации сжатых данных через линейные комбинации и реализован консенсусный алгоритм ускоренного протокола локального голосования.

Экспериментальная оценка предложенного метода выявила его устойчивую способность к точному восстановлению пространственных координат и весовых параметров центроидов даже в условиях существенной компрессии исходных данных. Сравнительный анализ с распределенной реализацией алгоритма k-means продемонстрировал значительное преимущество разработанного подхода по показателю коммуникационной эффективности. Хотя текущая реализация имеет ограничения, связанные с субоптимальной точностью вычислений, метод демонстрирует значительные перспективы для дальнейшего совершенствования за счет оптимизации нейронных сетей и алгоритмической адаптации к различным формам обработки данных.

Особую ценность предложенный метод представляет для распределенных вычислительных систем, где критически важными являются способность к масштабированию и минимизация нагрузки на коммуникационные каналы.

1. A new method of adaptive mesoscale control in complex multiagent networked dynamical systems / K. Amelin [и др.] // *Cybernetics and Physics*. — 2022. — Т. 11, № 4. — С. 175—189.
2. Adaptive distributed cluster flow control for a group of autonomous robots / V. Erofeeva [и др.] // 22nd IFAC World Congress, IFAC-PapersOnLine. — 2023. — Т. 56, № 2. — С. 8690—8695. — ISSN 2405-8963.
3. Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches. / F. L. Lewis [и др.] // Berlin, Germany: Springer. — 2013.
4. **Arslan O., Guralnik D. P., Koditschek D. E.** Coordinated robot navigation via hierarchical clustering. // *IEEE Transaction Robotics*. — 2016. — Т. 32, № 2. — С. 352—371.
5. **Erofeeva V., Granichin O., Uzhva D.** Meso-scale coalitional control in large-scale networks // *Automatica*. — 2025. — Т. 177. — С. 112276. — ISSN 0005-1098. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2025.112276>.
6. **Egiazarian K., Katkovnik V.** 3F-PNP: Compressive Sensing Using Nonlocal Self- Similarity and Deep Learning Priors // *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. — 2024. — С. 2696—

- 2701.
7. **Granichin O., Volkovich Z., Toledano-Kitai D.** Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining. — Springer Berlin, Heidelberg, 2015.
 8. **Pankov V.** Estimation of sparse models parameters : Thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences / Pankov V. — St. Petersburg University, 2024. — С. 87.
 9. **Granichin O., Pavlenko D.** Randomization of data acquisition and l1 optimization (recognition with compression) // Automation and Remote Control. — 2010. — С. 2259—2282.
 10. **Candes E., Romberg J., Tao T.** Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. // IEEE Transactions on Information Theory. — 2006. — Т. 52, № 2. — С. 489—509.
 11. **Donoho D.** Compressed sensing. // IEEE Transactions on Information Theory. — 2006. — Т. 52, № 2. — С. 1289—1306.
 12. **Erofeeva V., Pankov V., Smetanina V.** Decentralized Clustering for Adaptive Control in Dynamic Multi-Agent Systems // 15th IFAC Workshop on Adaptive and Learning Control systems (Accepted). — 2025.
 13. **Smetanina V.** The Study of Agent Clustering in Distributed Multi-Agent Systems : Магистерская диссертация / Smetanina V. — St Petersburg University, 2025.
 14. Communication-Efficient Decentralized Clustering for Dynamical Multi-agent Systems / V. Erofeeva [и др.] // PlosOne. — 2025.

И.Б. Фуртат, С.А. Вражеский, П.А. Гуцин

ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРЕМА О КРУГАХ ГЕРШГОРИНА И ДИВЕРГЕНТНЫЙ МЕТОД В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ*

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербургский
государственный университет, г. Санкт-Петербург,
cainenash@mail.ru*

Введение

При анализе свойств динамических систем и синтезе закона управления ими одним из ключевых вопросов является устойчива ли система. В настоящее время для определения устойчивости применяется много

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20075, <https://rscf.ru/project/25-19-20075/> в ИПМаш РАН.

различных методов и подходов: вычисление собственных значений матрицы [1], различные алгебраические и частотные критерии устойчивости [1], метод функций Ляпунова [1], дивергентные методы исследования устойчивости [2] и т.д.

Данный доклад сконцентрирован на построении области локализации собственных значений матриц с применением полученной области к анализу и синтезу систем управления. Для построения области локализации собственных значений будет рассмотрена теорема о кругах Гершгорина [3-5] (далее просто теорема Гершгорина) и некоторые следствия из нее, а также будут получены новые результаты по обобщению данной теоремы на случай параметрически неопределенных матриц и матриц с нестационарными параметрами.

Теорема Гершгорина и различные ее модификации неоднократно рассматривались в литературе. Интерес к данной теореме связан с простым способом определения области локализации собственных значений. Зачастую, теорема Гершгорина приводит к изучению систем с матрицей с диагональным преобладанием. В частности, такие системы изучались в работе [6-8] и были названы сверхустойчивыми (если все круги Гершгорина целиком находились в левой полуплоскости комплексной плоскости). Показано, что анализ и синтез систем управления приводит к задачам линейного программирования. В работах [9-13] получены уточняющие области локализации в виде усредненных оценок, использовании l_1 векторных норм и т.д., а в работах [14, 15] предложен синтез статических линейных законов управления с использованием теоремы Гершгорина. В [16-18] рассмотрено применение теоремы Гершгорина к исследованию устойчивости моделей в химической промышленности, моделей электрических сетей с трехфазными генераторами и биологических моделей эпидемии.

Анализ литературы показал, что при построении области локализации собственных значений матриц теорема Гершгорина имеет преимущества в простоте ее применения, выпуклой процедуре поиска области локализации и небольших вычислительных затратах. Однако ограничения в применении данной теоремы связаны с завышенными оценками области локализации и рассмотрением матриц с диагональным преобладанием (или приводимым к ним с использованием диагональной матрицы для преобразования базиса). Требование диагонального преобладания является существенно ограничительным и при синтезе закона управления.

В данной докладе будет рассмотрено решение следующих задач:

1. будут получены области локализации собственных значений матрицы с интервальной параметрической неопределенностью;
2. будет решена задача поиска матрицы в линейном законе управления с использованием линейных матричных неравенств для объектов с

матрицей без диагонального преобладания.

В докладе используются следующие обозначения: \mathbb{C} – множество комплексных чисел, \mathbb{R}^n – n -мерное евклидово пространство с векторной нормой $|\cdot|$, $\mathbb{R}^{n \times n}$ – множество всех действительных матриц размерности $n \times n$ с индуцированной матричной нормой $\|Q\|$ для матриц $Q = (q_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, \mathbb{R}_{\geq} – множество неотрицательных вещественных чисел, $\lambda_i\{Q\}$ – i -е собственное число квадратной матрицы Q , $\Re\{\lambda_i\{Q\}\}$ – действительная часть i -го собственного числа квадратной матрицы Q , $\Im\{\lambda_i\{Q\}\}$ – мнимая часть i -го собственного числа квадратной матрицы Q , I – единичная матрица соответствующего порядка.

Оценки областей локализации собственных чисел

В данном разделе рассмотрим поиск областей локализации собственных чисел для матриц с интервально неопределенными параметрами:

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q_0 + \Delta Q(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}, \\ Q_0 &= (q_{ij}^0), \quad \Delta Q(t) = (\Delta q_{ij}(t)), \\ \Delta q_{ii} &\leq \Delta q_{ii}(t) \leq \Delta \bar{q}_{ii}, \quad |\Delta q_{ij}(t)| \leq m_{ij} \text{ при } i \neq j. \end{aligned} \quad (1)$$

Введем в рассмотрение следующую фигуру.

Определение. Фигуру, образованную объединением кругов $\mathcal{EC} = \bigcup_{q \in [q, \bar{q}]} \{z \in \mathbb{C} : |z - q| \leq R\}$, назовем e -кругом.

Введем обозначения для оценок сверху сумм по строкам и столбцам абсолютных значений элементов матриц $Q(t)$ и $D^{-1}Q(t)D$, исключая диагональные элементы, в виде

$$\begin{aligned} \hat{R}_i(Q) &= \sum_{j=1, j \neq i}^n (|q_{ij}^0| + m_{ij}), \quad \hat{C}_j(Q) = \sum_{i=1, i \neq j}^n (|q_{ij}^0| + m_{ij}), \\ \hat{R}_i^D(Q) &= \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{d_j}{d_i} (|q_{ij}^0| + m_{ij}), \quad \hat{C}_j^D(Q) = \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{d_i}{d_j} (|q_{ij}^0| + m_{ij}). \end{aligned}$$

Теорема 1. Собственные значения матрицы $Q(t)$ из (1) находятся в области пересечения e -кругов

$$\mathcal{EC}_{row} \cap \mathcal{EC}_{col}, \quad (2)$$

где

$$\mathcal{EC}_{row} = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{EC}_{row, i}, \quad (3)$$

$$\mathcal{EC}_{row, i} = \bigcup_{\Delta q_{ii} \in [\Delta q_{ii}, \Delta \bar{q}_{ii}]} \{t \in \mathbb{R}_{\geq}, \lambda \in \mathbb{C} : |\lambda - q_{ii}^0 - \Delta q_{ii}| \leq \hat{R}_i^D(Q)\},$$

$$\mathcal{EC}_{col} = \bigcup_{j=1}^n \mathcal{EC}_{col, j},$$

$$\mathcal{EC}_{col, j} = \bigcup_{\Delta q_{jj} \in [\Delta q_{jj}, \Delta \bar{q}_{jj}]} \{t \in \mathbb{R}_{\geq}, \lambda \in \mathbb{C} : |\lambda - q_{jj}^0 - \Delta q_{jj}| \leq \hat{C}_j^D(Q)\}. \quad (4)$$

Доказательство. Пусть $\lambda(t)$ – собственное значение матрицы $Q(t)$ и $s(t) = \text{col}\{s_1(t), \dots, s_n(t)\}$ – собственный вектор, соответствующий данному собственному значению. Выберем i -ю компоненту вектора $s(t)$ так, что $\sup\{s_i(t)\} \geq \max\{\sup\{s_1(t)\}, \dots, \sup\{s_{i-1}(t)\}, \sup\{s_{i+1}(t)\}, \dots, \sup\{s_n(t)\}\}$. Обозначим $\bar{s}_i = \sup\{s_i(t)\}$. Из соотношения $\lambda(t)s(t) = Q(t)s(t)$ выпишем выражение для i -й координаты в виде $\lambda(t)s_i(t) = \sum_{j=1}^n q_{ij}(t)s_j(t)$ или $(\lambda(t) - q_{ii}(t))s_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^n q_{ij}(t)s_j(t)$. Воспользовавшись неравенством треугольника, рассмотрим оценку

$$\begin{aligned} |\lambda(t) - q_{ii}(t)||s_i(t)| &= |\sum_{j=1, j \neq i}^n q_{ij}(t)s_j(t)| \leq \\ &\leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}(t)s_j(t)| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}(t)||s_j(t)| \leq \bar{s}_i \sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}(t)|. \end{aligned} \quad (5)$$

Перепишем выражение (5) как $|\lambda(t) - q_{ii}(t)||s_i(t)| - \bar{s}_i \sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}(t)| \leq 0$ или в виде

$$\bar{s}_i \left(|\lambda(t) - q_{ii}(t)| \frac{|s_i(t)|}{\bar{s}_i} - \sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}(t)| \right) \leq 0. \quad (6)$$

Так как $\frac{|s_i(t)|}{\bar{s}_i} \leq 1$, то выражение (2) будет выполнено, если будет выполнено неравенство

$$|\lambda(t) - q_{ii}(t)| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}(t)|. \quad (7)$$

Так как $\Delta q_{ii} \leq \Delta q_{ii}(t) \leq \Delta \bar{q}_{ii}$ и $|\Delta q_{ij}(t)| \leq m_{ij}$ при $i \neq j$, то перепишем неравенство (11) в виде e -круга $\mathcal{EC}_{row, i}$ из (4).

Соотношение (3) выполнено для некоторого i . Поскольку неизвестно, какое i соответствует данному $\lambda(t)$, то можно лишь сказать, что $\lambda(t)$ принадлежит объединению e -кругов $\mathcal{EC}_{row} = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{EC}_{row, i}$. Значит, все собственные числа матрицы $Q(t)$ находятся в объединении e -кругов \mathcal{EC}_{row} .

Поскольку матрица $Q^T(t)$ имеет те же собственные значения, что и матрица $Q(t)$, то все собственные значения матрицы $Q(t)$ заключены в объединении e -кругов $\mathcal{EC}_{col} = \bigcup_{j=1}^n \mathcal{EC}_{col, j}$. Дальнейшие рассуждения для матрицы $Q^T(t)$ аналогичны рассуждениям для матрицы $Q(t)$. Так как собственные значения матрицы $Q(t)$ находятся одновременно в \mathcal{EC}_{row} и \mathcal{EC}_{col} , значит, они находятся в области (2).

Теорема 2. Пусть заданы $d_i > 0, i = 1, \dots, n$. Собственные значения матрицы $Q(t)$ из (1) находятся в области пересечения e -кругов

$$\mathcal{EC}_{row}^D \cap \mathcal{EC}_{col}^D,$$

где

$$\mathcal{EC}_{row}^D = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{EC}_{row, i}^D,$$

$$\mathcal{EC}_{row, i}^D = \bigcup_{\Delta q_{ii} \in [\Delta \underline{q}_{ii}, \Delta \bar{q}_{ii}]} \{t \in \mathbb{R}_{\geq}, \lambda \in \mathbb{C}: |\lambda - q_{ii}^0 - \Delta q_{ii}| \leq \hat{R}_i^D(Q)\},$$

$$\mathcal{EC}_{col}^D = \bigcup_{j=1}^n \mathcal{EC}_{col, j}^D,$$

$$\mathcal{EC}_{col, j}^D = \bigcup_{\Delta q_{jj} \in [\Delta \underline{q}_{jj}, \Delta \bar{q}_{jj}]} \{t \in \mathbb{R}_{\geq}, \lambda \in \mathbb{C}: |\lambda - q_{jj}^0 - \Delta q_{jj}| \leq \hat{C}_j^D(Q)\}.$$

Теорема 3. Пусть заданы $d_i > 0, i = 1, \dots, n$ и $\alpha \in [0; 1]$. Собственные значения матрицы $Q(t)$ из (1) находятся в области пересечения e -кругов

$$\mathcal{EC}^{D,\alpha} = \cup_{i=1}^n \mathcal{EC}_i^{D,\alpha},$$

где

$$\mathcal{EC}_i^{D,\alpha} = \cup_{\Delta q_{ii} \in [\Delta q_{ii}^0, \Delta \bar{q}_{ii}]} \{t \in \mathbb{R}_{\geq}, \lambda \in \mathbb{C}: |\lambda - q_{ii} - \Delta q_{ii}| \leq [\hat{R}_i^D(Q)]^\alpha [\hat{C}_i^D(Q)]^{1-\alpha}\}.$$

Можно выписать оценки на максимальные и минимальные значения собственных значений матрицы $Q(t)$. То есть существуют числа $d_i > 0, i = 1, \dots, n$ и $\alpha \in [0; 1]$ такие, что справедливы следующие оценки

$$\max_i \{\sup_t \{\Re\{\lambda_i\{Q(t)\}\}\}\} \leq \sigma_{\max}^D\{Q(t)\} \leq \sigma_{\max}\{Q(t)\},$$

$$\min_i \{\sup_t \{\Re\{\lambda_i\{Q(t)\}\}\}\} \geq \sigma_{\min}^D\{Q(t)\} \geq \sigma_{\min}\{Q(t)\},$$

$$\max_i \{\sup_t \{\Re\{\lambda_i\{Q(t)\}\}\}\} \leq \sigma_{\max}^{D,\alpha}\{Q(t)\} \leq \sigma_{\max}^\alpha\{Q(t)\},$$

$$\min_i \{\sup_t \{\Re\{\lambda_i\{Q(t)\}\}\}\} \geq \sigma_{\min}^{D,\alpha}\{Q(t)\} \geq \sigma_{\min}^\alpha\{Q(t)\},$$

где

$$\sigma_{\max}(Q(t)) = \min\{\max_i \{q_{ii}^0 + \Delta \bar{q}_{ii} + \hat{R}_i(Q)\}, \max_j \{q_{jj}^0 + \Delta \bar{q}_{jj} + \hat{C}_j(Q)\}\},$$

$$\sigma_{\min}(Q(t)) = \max\{\min_i \{q_{ii}^0 - \Delta \bar{q}_{ii} - \hat{R}_i(Q)\}, \min_j \{q_{jj}^0 - \Delta \bar{q}_{jj} - \hat{C}_j(Q)\}\},$$

$$\sigma_{\max}^D(Q(t)) = \min\{\max_i \{q_{ii}^0 + \Delta \bar{q}_{ii} + \hat{R}_i^D(Q)\}, \max_j \{q_{jj}^0 + \Delta \bar{q}_{jj} + \hat{C}_j^D(Q)\}\},$$

$$\sigma_{\min}^D(Q(t)) = \max\{\min_i \{q_{ii}^0 - \Delta \bar{q}_{ii} - \hat{R}_i^D(Q)\}, \min_j \{q_{jj}^0 - \Delta \bar{q}_{jj} - \hat{C}_j^D(Q)\}\},$$

$$\sigma_{\max}^\alpha(Q(t)) = \max_{i,\alpha} \{q_{ii}^0 + \Delta \bar{q}_{ii} + [\hat{R}_i(Q)]^\alpha [\hat{C}_i(Q)]^{1-\alpha}\},$$

$$\sigma_{\min}^\alpha(Q(t)) = \min_{i,\alpha} \{q_{ii}^0 - \Delta \bar{q}_{ii} - [\hat{R}_i(Q)]^\alpha [\hat{C}_i(Q)]^{1-\alpha}\},$$

$$\sigma_{\max}^{D,\alpha}(Q(t)) = \max_i \{q_{ii}^0 + \Delta \bar{q}_{ii} + [\hat{R}_i^D(Q)]^\alpha [\hat{C}_i^D(Q)]^{1-\alpha}\},$$

$$\sigma_{\min}^{D,\alpha}(Q(t)) = \min_i \{q_{ii}^0 - \Delta \bar{q}_{ii} - [\hat{R}_i^D(Q)]^\alpha [\hat{C}_i^D(Q)]^{1-\alpha}\}.$$

Пример 1. Рассмотрим две параметрически неопределенные матрицы Q с постоянными и переменными параметрами в виде

$$Q = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1.5 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & 2r_{12} \\ 3r_{21} & 4r_{22} \end{bmatrix}}_{\Delta Q},$$

$$Q(t) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1.5 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \sin(t) & 2\cos(1.5t) \\ 3\text{sign}(\sin(2t)) & 4\text{sign}(\cos(1.7t)) \end{bmatrix}}_{\Delta Q(t)},$$

где r_{ij} , $i, j = 1, 2$ – псевдослучайные числа равномерно распределенные на интервале $(-1; 1)$. Рассмотрим 200 реализаций для каждого r_{ij} . Матрицы ΔQ и $\Delta Q(t)$ имеют одинаковые m_{ij} , поэтому и оценки области локализации будут одинаковыми.

На рис. 1 представлена область локализации собственных значений Q и $Q(t)$ с использованием полученных результатов (серая область), где кружками и треугольниками изображены собственные значения матрицы Q с постоянными параметрами, а непрерывными линиями – собственные значения матрицы Q с нестационарными параметрами. На трех рисунках из четырех пары e -кругов совпали за счет варьирования d_i и α , поэтому на трех рисунках указаны только два e -круга.

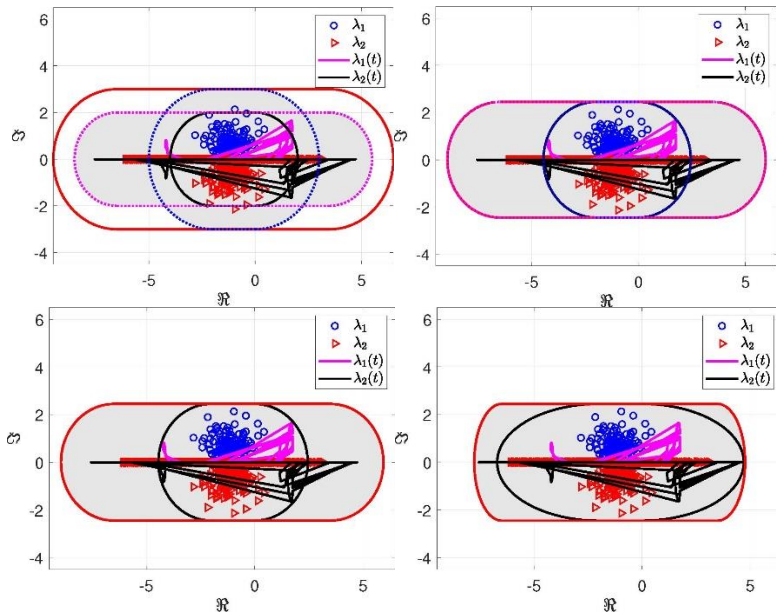


Рис. 1. Области локализации собственных значений возмущенных матриц Q и $Q(t)$.

Синтез закона управления для линейных систем с матрицами без диагонального преобладания

Рассмотрим систему

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + F(t)f(t), \quad (8)$$

где $t \geq 0$, $x \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния, $f \in \mathbb{R}^l$ – внешний сигнал такой, что $\sup\{|f(t)|\} \leq \bar{f}$, $F(t) \in \mathbb{R}^{n \times l}$ ($\sup\{\|F(t)\|\} \leq \bar{F}$) $u \in \mathbb{R}^m$ – сигнал управления, $A(t) = A_0 + \Delta A(t)$, $A_0 = (a_{ij}^0)$, $\Delta A(t) = (\Delta a_{ij}(t))$, $\Delta a_{ii} \leq \Delta a_{ii}(t) \leq \bar{\Delta a}_{ii}$ и $|\Delta a_{ij}(t)| \leq m_{ij}$ при $i \neq j$ и для всех t , $B(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $\underline{B} \leq B(t) \leq \bar{B}$, пара $(A(t), B(t))$ управляема для всех t . Остальные обозначения, как в (16). Предположим, что неизвестны параметры $\Delta A(t)$, $b(t)$, $F(t)$ и $f(t)$.

Введем закон управления

$$u = Kx, \quad (9)$$

где $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Ниже сформулированы теоремы, позволяющие рассчитать матрицу K , которая обеспечивает экспоненциальную устойчивость замкнутой системы

$$\dot{x}(t) = (A(t) + B(t)K)x(t) + F(t)f(t). \quad (10)$$

Отметим, что ни в матрице $A(t)$, не в матрице $A(t) + B(t)K$ не требуется выполнение свойства диагонального преобладания.

Теорема 4. Пусть матрицы A , B и F в (23) известны и постоянны, а также пусть для заданного $\alpha > 0$ существует матрица $Q = Q^T$ и коэффициент $\beta > 0$ такие, что выполнены следующие условия

$$\begin{aligned} \Psi_{ii} &< 0, \\ \Psi_{ij} &\geq 0 \text{ при } i \neq j, i, j = 1, \dots, n, \\ \sigma(Q) &> 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\Psi = (\Psi_{ij}) = QA^T + AQ + Y^TB^T + BY + \alpha Q + \beta F^TF, \quad (12)$$

$\sigma(Q)$ – одна из оценок снизу на собственные значения матрицы Q . Тогда система (25) экспоненциально устойчива с $K = YQ^{-1}$.

Доказательство. Введем функцию плотности

$$\rho(x) = x^TPx, \quad (13)$$

где $P = Q^{-1}$, и, согласно [2], найдем следующее выражение:

$$\operatorname{div}\{\rho \dot{x}\} - \operatorname{div}\{\dot{x}\}\rho = x^T[(A + BK)^TP + P(A + BK)]x + 2x^TFf. \quad (14)$$

Обозначив $z = \operatorname{col}\{x, f\}$ и подставив (13) и (14) в условие экспоненциальной устойчивости $\operatorname{div}\{\rho \dot{x}\} - \operatorname{div}\{\dot{x}\}\rho + \alpha\rho + \gamma f^Tf < 0$, $\gamma > 0$, получим

$$z^T \begin{bmatrix} (A + BK)^TP + P(A + BK) + \alpha P & PF \\ \star & -\gamma I \end{bmatrix} z < 0. \quad (15)$$

Следуя [19], неравенство (15) будет выполнено, если будет выполнено следующее условие:

$$\begin{bmatrix} (A + BK)^TP + P(A + BK) + \alpha P & PF \\ \star & -\gamma I \end{bmatrix} < 0. \quad (16)$$

Воспользовавшись леммой Шура [19], перепишем (16) в виде

$$(A + BK)^T P + P(A + BK) + \alpha P + \beta P F^T F P < 0, \quad (17)$$

где $\beta = 1/\gamma$. Умножив слева и справа (32) на Q^{-1} и заменив $Y = KQ$, получим

$$\Psi := QA^T + AQ + Y^T B^T + BY + \alpha Q + \beta F^T F Q < 0. \quad (18)$$

Собственные значения симметричных матриц Ψ и Q будут отрицательны и положительны соответственно, если будут выполнены неравенства (11). С другой стороны, согласно [4] (теорема 7.2.1), эрмитова матрица положительно (отрицательно) определена в том и только в том случае, если все ее собственные значения положительны (отрицательны). Значит, условия $\Psi < 0$ и $Q > 0$ будут выполнены, если будут выполнены неравенства (11).

С использованием результатов теоремы 4, сформулируем следующую теорему для систем с неизвестными нестационарными параметрами.

Теорема 5. Рассмотрим систему (8) с нестационарными параметрами. Пусть существует матрица $Q = Q^T$ и коэффициент $\beta > 0$ такие, что выполнены условия

$$\begin{aligned} \Phi_{ii} &< 0, \\ \Phi_{ij} &\geq 0 \text{ при } i \neq j, \\ \sigma(Q) &> 0, \end{aligned} \quad (19)$$

в вершинах $|\Delta a_{ij}(t)| \leq m_{ij}$ и $\underline{b}_{ij} \leq b_{ij}(t) \leq \bar{b}_{ij}$, где

$$\begin{aligned} \Phi = (\Phi_{ij}) := & QA_0^T + A_0 Q + Q \Delta A^T(t) + \Delta A(t) Q + \\ & + Y^T B^T + BY + \alpha Q + \beta \bar{F}^2 I, \end{aligned}$$

$\sigma(\Psi)$ – одна из оценок сверху матрицы Ψ , полученная с помощью (12). Тогда система (10) будет экспоненциально устойчивой с $K = YQ^{-1}$, $P = Q^{-1}$.

Доказательство. Воспользуемся результатами (13)–(18) из доказательства теоремы 4 с учетом нестационарных параметров. Поскольку $A(t) = A_0 + \Delta A(t)$ и $\|F(t)\| \leq \bar{F}$, то перепишем (18) в виде $\Phi := QA_0^T + A_0 Q + Q \Delta A^T(t) + \Delta A(t) Q + Y^T B^T + BY + \alpha Q + \beta \bar{F}^2 I < 0$.

Если выполнены условия (18) в вершинах $|\Delta a_{ij}(t)| \leq m_{ij}$ и $\underline{b}_{ij} \leq b_{ij}(t) \leq \bar{b}_{ij}$ то, согласно [19], условие (18) будет выполнено для любых $\Delta A(t)$ и $B(t)$ внутри политопа с вершинами $|\Delta a_{ij}(t)| \leq m_{ij}$ и $\underline{b}_{ij} \leq b_{ij}(t) \leq \bar{b}_{ij}$.

Пример 2. Рассмотрим систему (8) с параметрами $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$,

$B = \text{col}\{0, 0, 1\}$, $F = \text{col}\{0.1, 0.5, 1\}$ и $f(t) = \sin(t)$.

Очевидно, что матрица A без диагонального преобладания, а структура матрицы B не позволяет законом управления $u = Kx$ с $K \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$

привести к замкнутой системе с матрицей с диагональным преобладанием. Поэтому, воспользуемся теоремой 4 для анализа области локализации собственных значений матрицы Φ , полученной в результате применения метода функций Ляпунова. Воспользовавшись теоремой 4, получим $K = \text{col}\{-1.3671 \ -2.3619 \ -2.5724\}$ и $\text{trace}(P) = 25.5858$. Воспользовавшись [20], получим $K = \text{col}\{-2.8862 \ -4.9244 \ -3.2136\}$ и $\text{trace}(P) = 40.631$. В обоих случаях ставилась цель $\text{trace}(P) \rightarrow \min$ для расчета K .

Из рис. 2 видно, что в установившемся режиме значение $|x(t)|$ предложенного алгоритма больше. Однако меньше всплеск $|x(t)|$ и амплитуда сигнала управления $u(t)$ в начальный момент времени, а также меньше значение $\text{trace}(P)$.

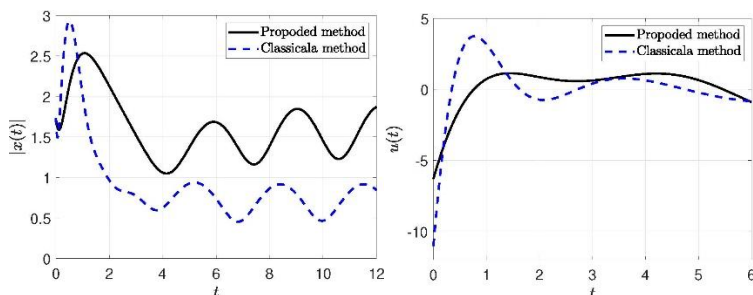


Рис. 2. Переходные процессы по $|x(t)|$ и $u(t)$ для предложенного алгоритма (сплошные кривые) и алгоритма [20] (пунктирные кривые)

Заключение

В докладе рассмотрено применение теоремы о кругах Гершгорина и производных от нее теорем для оценки области локализации собственных значений матрицы с постоянными и известными параметрами. Затем, данные результаты обобщаются на оценку области локализации для матриц с параметрической интервальной неопределенностью. Предложено понятие ϵ -круга, позволяющее получить более точные оценки области локализации, чем прямое применение теоремы Гершгорина. С использованием дивергентного метода разработан подход по расчету матрицы в линейном законе управления при управлении линейными системами, где не выполнено свойство диагонального преобладания для матриц в замкнутой системе.

1. Теория автоматического управления. Часть 1. М.: Высшая школа. Под ред. А.А. Воронова, 1986.

2. **Фуртат, И.Б., Гушин, П.А.** Методы анализа и синтеза линейных и нелинейных систем управления при наличии возмущений и запаздывания. Ижевск: Издательство «ИКИ», 2021.
3. **Беллман, Р.** Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1969.
4. **Хорн, Р.А., Джонсон, С.Р.** Матричный анализ. М.: Мир, 1989.
5. **Гантмахер, Ф.Р.** Теория матриц. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
6. **Поляк, Б.Т., Щербаков, П.С.** Сверхустойчивые линейные системы управления. I. Анализ // Автоматика и телемеханика. 2002. № 8. С. 37–53.
7. **Поляк, Б.Т., Щербаков, П.С.** Сверхустойчивые линейные системы управления. II. Синтез // Автоматика и телемеханика. 2002. № 11. С. 56–75.
8. **Поляк, Б.Т.** Обобщенная сверхустойчивость в теории управления // АиТ. 2004. № 4. С. 70–80.
9. **Uronen, P., Jutila, E.A.A.** Stability via the theorem of Gershgorin // Int. J. Control. 1972. Vol. 16, no. 6. P. 1057–1061.
10. **Соловьев, В.Н.** Обобщение теоремы Гершгорина // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1983. № 47, том 6. С. 1285–1302.
11. **Curran, P.F.** On a variation of the Gershgorin circle theorem with applications to stability theory // IET Irish Signals and Systems Conference (ISSC 2009), Dublin, 2009. P. 1–5.
12. **Vijay, Hote, Amar Nath, Jha.** New approach of Gerschgorin theorem in model order reduction // International Journal of Modelling and Simulation. 2015. Vol. 35. P. 143–149.
13. **Li C.-K., Zhang F.** Eigenvalue continuity and Gersgorin's theorem // Electronic Journal of Linear Algebra. 2019. Vol. 35. P. 619–625.
14. **Kazakova-Frehse N., Frick K.** The estimation of a robust domain of attraction using Gersgorin theorem // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 1998. Vol. 8. P. 295–303.
15. **Vijay Hote, Amar Nath Jha.** Reduced order state feedback controller design // 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR - 2014), 2014. P. 1–6.
16. **Pachauri N., Rani A.** Gerschgorin theorem based stability analysis of chemical process // 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR - 2014), 2014. P. 1–5.
17. **Xie L., Huang J., Tan E., He F., Liu Z.** The Stability Criterion and Stability Analysis of Three-Phase Grid-Connected Rectifier System Based on Gerschgorin Circle Theorem // Electronics. 2022. Vol. 11, no. 20, 3270.
18. **Adom-Konaduy A., Albert Lanor Sackiteyz, Anokyex M.** Local Stability Analysis Of Epidemic Models Using A Corollary Of Gershgorin's

19. **Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.** Linear matrix inequalities in system and control theory. Philadelphia: SIAM, 1994.
20. **Назин С.А., Поляк Б.Т., Топунов М.В.** Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов // Автоматика и телемеханика. 2007. № 3. С. 106–125.

М.В. Хлебников

СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва,
khlebnik@ipu.ru*

Теория ПИД-регуляторов имеет более чем 80-летнюю историю, восходя к работе [1] Циглера и Николса 1942 года. С тех пор появилось множество работ, посвященных теории и практике их настройки, были предложены различные принципы их настройки; здесь можно упомянуть монографии [2–6] и многие другие. Однако до настоящего времени имеется не так много работ, где формулируются явные критерии оптимальности ПИД-регуляторов (например, такие как H_∞ -оптимальность [7, 8]).

В недавних публикациях [9, 10] был предложен новый – оптимизационный – подход к решению линейно-квадратичной задачи и задачи подавления ограниченных внешних возмущений в линейных системах управления при помощи статической линейной обратной связи по состоянию и по выходу. При этом исходные задачи были сведены к задачам невыпуклой матричной оптимизации, описан градиентный метод для отыскания обратной связи и дано его обоснование.

В [11–13] оптимизационный подход был применен к задаче настройки ПИД-регуляторов по линейно-квадратичному критерию, а именно была предложена как новая постановка задачи, решение которой определяет ПИД-регулятор, так и эффективный алгоритм ее решения.

В настоящем докладе продолжают обе эти линии исследований: он посвящен решению задачи синтеза ПИД-регулятора для подавления неслучайных ограниченных внешних возмущений в линейных системах управления.

Рассмотрим линейную непрерывную систему управления

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + bu + Dw, \\ y &= c^T x, \\ z &= Cx,\end{aligned}$$

где $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $b, c \in \mathbf{R}^n$, $D \in \mathbf{R}^{r \times m}$, $C \in \mathbf{R}^{r \times n}$, с состоянием $x(t) \in \mathbf{R}^n$, управлением $u(t) \in \mathbf{R}$, наблюдаемым выходом $y(t) \in \mathbf{R}$, регулируемым выходом $z(t) \in \mathbf{R}^r$ и внешним возмущением $w(t) \in \mathbf{R}^m$, удовлетворяющим ограничению

$$\|w(t)\| \leq \bar{w} \text{ для всех } t \geq 0.$$

Никаких иных ограничений на возмущение w не накладывается; так, оно не предполагается ни случайным, ни гармоническим.

Будем искать управление в виде ПИД-регулятора

$$u(t) = -k_p y(t) - k_i \int_0^t y(\tau) d\tau - k_d \dot{y}(t),$$

который стабилизирует замкнутую систему и подавляет воздействие внешних возмущений w , минимизируя «пиковое» значение выхода z , т.е. величину $\max_{t \geq 0} |z(t)|$. Точное решение такой задачи затруднительно, однако возможна минимизация верхней оценки этой величины, формулируемой с помощью понятия инвариантного эллипсоида (такой подход впервые был применен в монографии [14] и впоследствии развит в [15]). А именно, минимизируется размер ограничивающего эллипсоида, содержащего выход z системы.

Напомним, что эллипсоид

$$E_x = \{x \in \mathbf{R}^n: x^T P^{-1} x \leq 1\}, \quad P > 0,$$

называется *инвариантным* для устойчивой динамической системы

$$\dot{x} = Ax + Dw, \quad \|w(t)\| \leq \bar{w},$$

если любая ее траектория, исходящая из точки, лежащей в эллипсоиде E_x , в любой момент времени остается в этом эллипсоиде при всех допустимых внешних возмущениях w , действующих на систему. При этом линейный выход $z = Cx \in \mathbf{R}^r$ этой системы при $x_0 \in E_x$ будет принадлежать эллипсоиду

$$E_z = \{z \in \mathbf{R}^r: z^T (CPC^T)^{-1} z \leq 1\},$$

называемому *ограничивающим*.

В качестве критерия минимальности ограничивающего эллипсоида будем рассматривать линейную функцию

$$f(P) = \text{tr}(CPC^T),$$

соответствующую сумме квадратов его полуосей.

Обсуждаемый в докладе подход, основанный на сведениях исходной задачи к задаче невыпуклой матричной оптимизации, позволяет конструктивно решать задачи настройки и оптимизации параметров ПИД-регулятора, предоставляя «хорошие» по обычным инженерным показателям ПИД-регуляторы. Как показывают разнообразные примеры, предлагаемая итеративная процедура является весьма эффективной.

В докладе рассматриваются только SISO-системы, однако предлагаемый подход в полном объеме переносится и на многомерный случай. При этом выкладки становятся несколько более громоздкими, в то время как идейная сторона меняется мало.

1. **Ziegler J.B., Nichols N.B.** Optimum Settings for Automatic Controllers // Transactions of the ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
2. **Visioli A.** Practical PID Control. London: Springer-Verlag, 2006.
3. **Aström K.J., Hägglund T.** PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995.
4. **Aström K.J., Hägglund T.** Advanced PID Control. Research Triangle Park: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
5. **Bhattacharyya S.P., Keel L.H.** Linear Multivariable Control Systems. Cambridge University Press, 2022.
6. **Wang Q.-G., Ye Z., Cai W.-J., Hang C.-C.** PID Control for Multivariable Processes. Berlin: Springer, 2008.
7. **Blanchini F., Lepschy A., Miani S., Viaro U.** Characterization of PID and Lead/Lag Compensators Satisfying Given H_∞ Specifications // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49. No. 5. P. 736–740.
8. **Han S., Keel L.H., Bhattacharyya S.P.** PID Controller Design with an H_∞ Criterion // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. No. 4. P. 400–405.
9. **Fatkhullin I., Polyak B.** Optimizing Static Linear Feedback: Gradient Method // SIAM Journal on Control and Optimization. 2021. Vol. 59. No. 5. P. 3887–3911.
10. **Поляк Б.Т., Хлебников М.В.** Синтез статического регулятора для подавления внешних возмущений как задача оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2021. № 9. С. 86–115.
11. **Поляк Б.Т., Хлебников М.В.** Новые критерии настройки ПИД-регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2022. № 11. С. 62–82.
12. **Хлебников М.В.** Настройка ПИД-регуляторов как задача оптимизации // Материалы XVI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2023). Волгоград, 11–15 сентября 2023 г. Т. 2. С. 91–93.
13. **Шатов Д.В.** Синтез параметров пропорционально-интегрирующих и пропорционально-интегрально-дифференцирующих регуляторов для стационарных линейных объектов с ненулевыми начальными

условиями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2023. № 1. С. 18–27.

14. **Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.** Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM, 1994.
15. **Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.** Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: URSS, 2014.

А.Д. Хлытчиев, И.В. Козицин

КОНСИСТЕНТНОСТЬ ЭПИСТЕМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ АРГУМЕНТОВ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
kozitsin.ivan@mail.ru*

Введение

В эпоху стремительного развития искусственного интеллекта и машинного обучения особое внимание исследователей привлекают большие языковые модели (англ. – Large language models, сокр. – LLMs), способные генерировать содержательные тексты, отвечать на сложные вопросы, решать творческие задачи и вести диалог на уровне человека. Для полноценного понимания механизмов работы этих систем, чья работа не поддается интерпретации, поскольку данные модели включают миллиарды параметров, необходимо не только оценивать их эффективность, но и анализировать внутренние процессы формирования выводов и аргументации этих программ [1].

В данной работе представлена попытка изучения логического “мышления” больших языковых моделей с позиции Теории аргументационных коммуникаций (англ. – Argument-based communication theory of bi-polarization) [2]. В ее основе лежит предположение о том, что мнение человека является результатом действия когнитивного отображения из эпистемического пространства *аргументов*, которые находятся в памяти человека и которые человек считает релевантными, в пространство *мнений*.

Конструирование эпистемической сети языковой модели

Будем считать, что тематика обсуждения зафиксирована. К примеру, это может быть повестка, связанная с легализацией ношения огнестрельного оружия – она вызывает большие споры во многих странах

мира и зачастую индуцирует поляризацию общественного мнения [3]. Кроме того, будем считать, что зафиксирована языковая модель (далее - Модель), а также ее настраиваемые параметры (температура).

Для конструирования множества аргументов предлагается воспользоваться самой Моделью, которой необходимо выдать соответствующую директиву. В результате будет сгенерировано множество аргументов $A = \{a_1, \dots, a_m\}$. Договоримся, что его элементы упорядочены и первые p элементов являются про-аргументами, а элементы, начиная с a_{p+1} – кон-аргументы ($a_j = 1$ для про-аргументов и $a_j = -1$ для кон-аргументов):

$$A = \left(\underbrace{a_1, \dots, a_p}_{\text{про-аргументы}}, \underbrace{a_{p+1}, \dots, a_m}_{\text{кон-аргументы}} \right).$$

Эти аргументы необходимо проверить независимыми экспертами-людьми на предмет их корректности. Затем необходимо выдать Модели директиву оценить данные аргументы с точки зрения того, насколько они убедительны. В результате каждый аргумент $j \in A$ будет ассоциирован с положительным числом r_j . Альтернативный подход заключается в конструировании множества аргументов и инициализации их валентности и весов при помощи экспертов-людей.

Далее необходимо организовать процедуру, направленную на выявление логических связей между полученными аргументами (с точки зрения Модели). Для этого для каждой упорядоченной пары различных аргументов $a_i, a_j \in A$ ($i \neq j$) Модель должна оценить *степень достоверности* аргумента a_j по некоторой положительной (возможно, дискретной) шкале при условии, что она (Модель) считает аргумент a_i достоверным. В результате для рассматриваемой упорядоченной пары аргументов должна быть получена оценка $w_{i,j} > 0$.

Проделанные действия позволяют построить простой взвешенный ориентированный граф без петель, вершины которого соответствуют аргументам, а веса ребер определяются величинами $w_{i,j}$, образующими матрицу смежности $W = (w_{i,j})_{i,j \in [m]}$ ($w_{i,i} = 0$). При этом вершины характеризуются весами r_j (которые можно сгруппировать в вектор $R = (r_1 \dots r_m)$) и валентностями a_j . Данный граф формализуем как кортеж $G = (A, R, W)$ и далее будем именовать *эпистемической сетью аргументов* Модели. Поскольку большие языковые модели могут в одних и тех же ситуациях генерировать различные ответы, то имеет смысл при построении эпистемического графа проводить несколько независимых реализаций описанного выше алгоритма после чего осуществлять усреднение полученных результатов

Непротиворечивость эпистемической сети

Если говорить о непротиворечивости “внутреннего устройства” большой языковой модели, ее соответствия человеческому восприятию мира, то предлагаемая конструкция эпистемической сети позволяет провести эту оценку количественно. Интуитивно понятно, что для языковой модели, чье “внутреннее устройство” соответствует человеческому восприятию, должна соблюдаться следующая закономерность: основной “вес” ребер должен быть локализован между вершинами одной валентности, при этом данная тенденция должна быть особенно сильно выражена для вершин с большим весом. Такая эпистемическая сеть должна обладать относительно высоким уровнем непротиворечивости.

Для количественного описания непротиворечивости эпистемической сетевой структуры аргументов предлагается использовать следующую метрику:

$$C = \frac{\sum_{i,j \in [m]} (w_{i,j} - \bar{w}_{i,j}) a_i a_j r_i r_j}{\sum_{i,j \in [m]} (\hat{w}_{i,j} - \bar{w}_{i,j}) a_i a_j r_i r_j},$$

где $\bar{w}_{i,j} = \frac{\sum_{i,j \in [m]} w_{i,j}}{m(m-1)}$ – средний вес ребра в эпистемической сети, а последовательность весов $\{\hat{w}_{i,j}\}_{i,j \in [m]}$ – перестановка последовательности $\{w_{i,j}\}_{i,j \in [m]}$, максимизирующая выражение $\sum_{i,j \in [m]} w_{i,j} a_i a_j r_i r_j$. Метрику C будем именовать *консистентностью* эпистемической сети. Нетрудно показать, что данная величина не превосходит единицу и является положительной в том случае, когда ребра с большим весом *более* часто соединяют вершины одной валентности и большого веса, если сравнивать с такой же эпистемической сетью, в которой веса ребер перемешаны случайным образом.

Заключение

В работе предложена концепция эпистемической сети аргументов для изучения логического “мышления” больших языковых моделей с позиции Теории аргументационных коммуникаций. Построена метрика консистентность, позволяющая оценивать непротиворечивость эпистемической сети аргументов.

1. **Nguyen, T.D.** Empirically evaluating commonsense intelligence in large language models with large-scale human judgments/ T.D. Nguyen, D.J. Watts, M.E. Whiting// arXiv preprint arXiv:2505.10309. – 2025.
2. **Mäs, M.** Differentiation without distancing. Explaining bi-polarization of opinions without negative influence/ M. Mäs, A. Flache// PloS one. – 2013. – Vol. 8. – No 11. – C. e74516.

3. **Bail, C.A.** Can Generative AI improve social science?// Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2024. – Vol. 121. – No 21. – P. e2314021121.

А.А. Ченцов¹, А.Г. Ченцов^{1,2}, П.А. Ченцов^{1,2}

РАЗДЕЛЬНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ МАРШРУТИЗАЦИИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДЕКОМПОЗИЦИИ

¹Институт математики и механики УрО РАН, г. Екатеринбург,

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,

Задачи маршрутизации возникают при исследовании многообразных систем и имеют многочисленные инженерные приложения. Отметим в этой связи задачу управления инструментом при фигурной листовой резке деталей на машинах с ЧПУ, задачу о последовательном демонтаже радиационно опасных объектов (имеются в виду аварии, подобные Чернобылю и Фукусиме, а также проблема демонтажа энергоблока АЭС, выведенного из эксплуатации), транспортные задачи, задачи, связанные с авиапожарным патрулированием. При этом возникают потребности как в «обычных» постановках с аддитивным агрегированием затрат, так и в минимаксном варианте, ориентированном на случай задач на узкие места (в частности, последний случай может касаться вопросов прокладки маршрутов в малой авиации). В большой серии работ авторов последовательно развивался подход, связанный с применением широко понимаемого динамического программирования (ДП) и ориентированный на очень общие постановки задач маршрутизации с условиями предшествования и функциями стоимости с возможной зависимостью от списка заданий. Реализация данного подхода позволяет получать оптимальные решения, что может, однако, потребовать неприемлемых временных затрат (в этой связи заметим, что исследуемые постановки имеют своим прототипом известную труднорешаемую задачу коммивояжера (ЗК); см. [1-6] и др.).

Одним из приемов, позволяющим снижать временные затраты, является декомпозиция исходной задачи, имеющей ощутимую размерность. В настоящем исследовании, ориентируясь на «диапазонные» в смысле размерности задачи маршрутизации, будем рассматривать декомпозицию, связанную с выделением только двух частичных задач (двух

кластеров): предваряющей и финальной (заметим, что в [7, разд.12] построен алгоритм и для решения исходной задачи в случае, когда кластеров может быть больше двух); см. [7-14].

Важно отметить, что в ряде случаев упомянутая декомпозиция на только не приводит к огрублению исходной инженерной задачи, но, напротив, позволяет учесть важные (хотя и плохоформализуемые) моменты, присущие исходной содержательной задаче. Так, например, в случае термической резки деталей на машинах с ЧПУ процесс резки следует начинать с длинномерных [15, с.46] деталей, которые в максимальной степени подвержены тепловым деформациям; подробнее см. в [15, с.46].

В упомянутом случае длинномеры (точнее, контуры таких деталей) логично включить в кластер первоочередных, т.е. в кластер предваряющей задачи, поскольку при этом еще не нарушены или нарушены, но в меньшей степени, условия отвода тепла, возникающего за счет операций по выполнению резки. Разумеется, по соображениям, связанным со сложностью вычислений, длинномеры в предваряющей задаче могут быть дополнены какими-либо другими деталями, но все же с практической точки зрения здесь уже достаточно понятна основа для построения кластера предваряющей задачи; оставшиеся контура будут использоваться при формировании кластера финальной задачи. В связи с данным примером отметим, что по соображениям компьютерной реализации в упомянутых построениях используются дискретные аналоги контуров – непустые конечные множества, именуемые далее мегаполисами.

Подчеркнем, что конструкция, сочетающая ДП и декомпозицию, рассматривалась в двух вариантах: задача с аддитивным критерием, минимаксная постановка. Задача, связанная с листовой резкой, традиционно рассматривается в рамках аддитивной постановки. Минимаксная постановка требуется зачастую в задачах «на узкие места», последние могут возникать в малой авиации, когда (при условиях директивного характера) рассматривается сама возможность системы перелетов при характерном ограничении на дальность беспосадочного полета, что может быть связано с дефицитом топлива. Алгоритм [12, разд.2] годится в своей логической основе для применения в обоих вышеупомянутых вариантах (аддитивном и минимаксном).

Еще одним общим (для двух вариантов) моментом математической постановки является использование в положительном направлении ограничений предшествования: применяемый и восходящий к [16, разд. 4.9] вариант ДП учитывает возможность появления данных ограничений и (объективно) позволяет эффективно решать задачи большей размерности в сравнении со случаем, когда ограничения предшествования отсутствуют. Поэтому использование условий предшествования (т.е. условий типа «одно после другого») представляет практический интерес.

В своих построениях мы реализуем специальный вариант согласования предваряющей и финальной задач; заметим, что в каждой из этих частичных задач критерий включает оценку внешних перемещений, оценку внутренних работ, связанных с посещением «целевых» множеств – мегаполисов, и оценку терминального состояния. Упомянутая терминальная компонента критерия предваряющей задачи в существенной части определяется функцией экстремума финальной задачи. Данная функция экстремума определяется, в свою очередь, процедурой ДП в финальной задаче. Упомянутый способ согласования предваряющей и финальной задач позволяет на основе алгоритма [12, разд. 2] находить оптимальное композиционное решение – маршрутный процесс, включая оптимизацию маршрута (перестановки индексов заданий), траекторию посещения мегаполисов, занумерованных в соответствии с данным маршрутом, и точку старта из заданного априори непустого конечного множества. Заметим, что определение композиционного экстремума и оптимальной точки старта может осуществляться с некоторой экономией ресурса памяти вычислителя (см. [10, замечание 2.1]).

Упомянутый алгоритм [12, разд. 2] реализован на многоядерной ПЭВМ. Вычислительный эксперимент показал приемлемое быстродействие при решении задач диапазонного типа (случай, когда совокупная задача имеет ощутимую размерность, но при декомпозиции реализуются частичные задачи, допускающие уже построение решения по методу ДП); имеется в виду построение оптимальных композиционных решений.

1. Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. 1989. Вып. 9. С. 3-33; Вып. 10. С. 3-29; Вып. 11. С.3-26.
2. Гэри М. и Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 419 с.
3. Гимади Э.Х., Хачай М.Ю. Экстремальные задачи на множествах перестановок. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016.
4. Литл Дж., Мурти К., Суини Д., Кэрел К. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере // Экономика и математические методы. 1965. Т. 1, Вып. 1. С. 94-107.
5. Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере // Кибернетический сборник. М.: Мир, 1964. Т. 9. С. 219-228.
6. Хелд М., Карп Р. М. Применение динамического программирования к задачам упорядочения // Кибернетический сборник. М.: Мир, 1964. Т. 9. С. 202-218.

7. **Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Экстремальная двухэтапная задача маршрутизации и процедуры на основе динамического программирования // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2022. Т. 28, № 2. С. 215-248.
8. **Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Двухэтапное динамическое программирование в задаче маршрутизации с элементами декомпозиции // Автоматика и телемеханика. 2023. № 5. С. 133-164.
9. **Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Динамическое программирование в задаче маршрутизации: декомпозиционный вариант // Вестник российских университетов. Математика. 2022. Т. 27, № 137. С.95-124.
10. **Ченцов А.Г.** Задача маршрутизации “на узкие места” с системой первоочередных заданий // Изв. ИМИ УдГУ. 2023. Т. 61. С. 156-186.
11. **Ченцов А.Г., Ченцов А.А., Ченцов П.А.** Задача маршрутизации «на узкие места» (оптимизация в пределах зон) // Вестн. Удмуртск. ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2024. Т. 34, вып. 2. С.267–285.
12. **Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Динамическое программирование и декомпозиция в экстремальных задачах маршрутизации // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2025. Т. 31. № 1. С. 247-272.
13. **Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Некоторые конструкции решения задач маршрутизации с использованием декомпозиций и преобразований целевых множеств // Вестник Удмуртского Университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2024. Т. 34. вып. 4. С. 518-540.
14. **Ченцов А.Г.** Динамическое программирование и декомпозиция в задачах маршрутизации с ограничениями // XIV Всероссийской совещание по проблемам управления ВСПУ-2024, Москва 17-20 июня 2024 г. С.1184-1189.
15. **Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы. Екатеринбург: Ид-во УрФУ, 2020. 247 с.
16. **Ченцов А.Г.** Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2008.

УЧЕТ СТРУКТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РИСКАМИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРЫ

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской
академии наук, г. Москва,
shiroky@ipu.ru*

Введение

Существующие широко применяемые на практике подходы и методы управления рисками обычно предполагают поиск решения задачи оптимизации на множестве допустимых контрмер, позволяющего минимизировать риски при выполнении различных (например, временных или бюджетных) ограничениях. Если система достаточно сложная, то ее совокупный (или интегральный) риск разбивается на несколько локальных компонент, которые затем оцениваются по отдельности. При этом вопрос о взаимной связанности компонентов интегрального риска обычно обходится стороной. В то же время большинство сложных систем характеризуются сложными взаимосвязями компонентов, как следствие — изменение величины одного из локальных рисков может приводить к изменению величины другого риска, в том числе с противоположным знаком.

Следует отметить, что модель структуры таких взаимосвязей может быть идентифицирована, например, экспертным методом. Однако получающаяся задача оптимизации, по всей видимости, является NP-трудной, и на практике получение точного переборного решения за приемлемое время оказывается невозможно даже для моделей с относительно небольшим числом взаимосвязанных локальных рисков.

В предшествующей работе [1] обсуждалась упрощенная формулировка задачи управления рисками, где множество допустимых контрмер ограничено выбором размещения элементов системы в заданной структуре. Такая постановка позволяет оценить влияние структуры сложной системы на ее интегральный риск априори, то есть до применения мер по снижению локальных рисков. Напомним ее вкратце.

Постановка задачи

Пусть защищаемая система включает в себя конечное множество элементов $S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $i \in N = \{1, \dots, n\}$, $n \in \mathbb{N}$, каждый из которых характеризуется величиной, называемой удельным риском:

$$\rho_i^0 = u_i p_i^0, \quad (1)$$

где u_i — величина ожидаемого ущерба в случае отказа элемента s_i , а p_i^0 — удельная вероятность наступления события, вызывающего его отказ.

Предположим, что задана структура $W_m = \langle G(V, E), v_0 \rangle$, $v_0 \in V$, где $G(V, E)$ — ориентированное дерево со множеством вершин V и множеством дуг E , v_0 — корень дерева, который мы будем называть периметром, а m — число висячих вершин, то есть листьев. Структура W_m задает ограничение на распространение отказов — любая их последовательность начинается с корня v_0 и распространяется по дугам дерева G .

Взаимно-однозначное соответствие $M^{-1}: S \rightarrow V$ назовем размещением элементов S в структуре W_m . Локальным риском размещенного в W_m элемента защищаемой системы $s_i = M(v_j)$ будем называть величину

$$\rho_i = \begin{cases} u_i p_i, & \text{если } s_i = M(v_0), \\ u_i p_i^0 \cdot \max_{s_k \in M(V_j')} p_k, & \text{если } s_i = M(v_j), j \neq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $V_j' \subset V$ — подмножество вершин, из которых выходит дуга в v_j .

Интегральным риском защищаемой системы назовем величину

$$\rho(S, W_m, M^{-1}) = \sum_{i=1}^n \rho_i. \quad (3)$$

Запишем задачу минимизации интегрального риска как задачу поиска оптимального в этом смысле размещения:

$$\mathbf{M}_{min} = \underset{M^{-1}}{\operatorname{Argmin}} \rho(S, W_m, M^{-1}): \rho_{min} = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad \forall M^{-1} \in \mathbf{M}_{min}. \quad (4)$$

Решения задачи оптимального размещения элементов в заданных структурах различных типов

В [1] представлено аналитическое решение задачи (4) для простой цепной структуры W_1 . В [2] для звездообразной структуры W_m , состоящей из m простых цепей с общей вершиной-периметром v_0 , было показано, что при выполнении соотношения

$$\frac{1-p_i^0}{u_i p_i^0} = \frac{1-p_j^0}{u_j p_j^0} \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

любое размещение вида

$$M^{-1}: S \rightarrow V: p_i^0 = \min_{i=1, n} \{p_i^0\}, s_0 = M(v_0) \in S \quad (6)$$

является решением задачи (4). В той же работе для более слабых ограничений

$$\begin{cases} u = u_1 = u_2 = \dots = u_n, \\ \rho(S, W_m, M^{-1}) < \infty \quad \forall n \in \mathbf{N} \end{cases} \quad (7)$$

были рассчитаны верхние оценки относительной погрешности решений с ограниченным перебором для небольшого числа вершин, а также получен абсолютный максимум таких оценок, равный 0,607. Содержательно

это означает, что субоптимальное решение задачи (4), построенное по предложенному в [2] алгоритму, отклоняется от точного не более чем на 6,07%.

Наконец, в работе [3] было доказано, что эта оценка справедлива для древовидных структур W_m произвольных конфигураций.

Заключение

Достаточно очевидным представляется утверждение о том, что для любой структуры $W_m = \langle G(V, E), v_0 \rangle$, $v_0 \in V$ произвольной топологии и некоторых заданных $S = \{s_1, \dots, s_n\}$, $n \in \mathbb{N}$ и $M^{-1}: S \rightarrow V$ найдется аппроксимирующее риск дерево $W'_m = \langle G'(V, E'), v_0 \rangle$, $E' \subseteq E$, то есть такое, что $\rho(S, W'_m, M^{-1}) = \rho(S, W_m, M^{-1})$. В то же время, при попытке решить задачу (4) потребуются рассмотреть различные размещения, что может приводить к изменению конфигурации аппроксимирующего дерева и невозможности сравнивать решения между собой. Фиксация же аппроксимирующего дерева не выглядит возможной до получения искомого решения задачи (4). Разрешение этого противоречия позволит распространить полученные результаты на произвольные структуры с одновершинным периметром.

1. **Широкий, А.А.** Управление рисками сложных систем с учётом их структуры / А. А. Широкий // Труды 16-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2023, Волгоград). – Волгоград: ВГТУ, 2023. – Т. 2. – С. 353–356.
2. **Широкий, А.А.** Влияние внутренней структуры на интегральный риск сложной системы на примере задачи минимизации риска в случае звездообразной структуры / А.А. Широкий // Управление большими системами: сборник трудов. – 2025. – вып. 113. – С. 181–214.
3. **Широкий, А.А.** Влияние внутренней структуры сложной системы на ее интегральный риск на примере задачи минимизации риска в древовидной структуре / А.А. Широкий, А.О. Калашников // Проблемы управления. – 2025. – № 2. – С. 27–37.

РАЗДЕЛ 2

ПРОБЛЕМЫ

РАСПРЕДЕЛЕННОГО

УПРАВЛЕНИЯ

В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ

СИСТЕМАХ

И СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ. МЕТРИКИ ПРОДУКТА

¹ Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург,
vicerektor.int@spbstu.ru

² ООО «Газинформсервис», г. Санкт-Петербург, Baskakov-D@gaz-is.ru

Введение

Качество программного обеспечения (ПО) остаётся одним из ключевых факторов, определяющих его надёжность, безопасность и дальнейшее сопровождение. Предиктивный анализ качества — это направление, ориентированное на построение моделей, способных заранее прогнозировать дефекты, технический долг и иные показатели, влияющие на жизненный цикл ПО. Работа посвящена исследованию современных метрик качества программного обеспечения как продукта применительно к ИСППР. В работе не рассматриваются проектные и процессные метрики. Предложены новые метрика качества ПО ИСППР как продукта и их применение для предиктивного анализа.

Обзор метрик качества программного обеспечения как продукта

Истоки формальной оценки качества программного обеспечения восходят к 1970-м годам. Исследования в области цикломатической сложности (англ. Cyclomatic Complexity of a Program) Томас Дж. Мак-Кейба (John McCabe) в 1976 году стали первым формальным инструментом оценки тестируемости модулей и, как следствие, оценки качества программного обеспечения [1]. *Математически цикломатическая сложность структурированной программы* (программа в виде иерархической структуры блоков) определяется с помощью ориентированного графа, узлами которого являются блоки программы, соединённые рёбрами, если управление может переходить с одного блока на другой. Тогда *сложность ПО* определяется как:

$$V(G) = E - N + 2P, \quad (1)$$

где: $V(G)$ - цикломатическая сложность,
 E - количество ребер в графе потока управления,
 N - количество узлов в графе,

P — количество компонент связности.

В другом случае для оценки цикломатической сложности используется граф, в котором каждая точка выхода соединена с точкой входа. В этом случае граф является связным (граф, содержащий ровно одну компоненту связности, то есть между любой парой вершин этого графа существует как минимум один путь), и цикломатическая сложность программы равна цикломатическому числу данного графа этого графа (также известному как первое число Бетти — последовательность инвариантов топологического пространства), которое определяется как:

$$V(G) = E - N + P \quad (2)$$

В случае простой программы, метода $P = 1$. В случае множества подпрограмм или методов P будет равняться количеству данных подпрограмм или методов.

Для стандартного случая (один вход/один выход) сложность программы равняется:

$$V(G) = E - N + 2 \quad (3)$$

При наличии K — точек выхода количество узлов становится $N + 1$, новое количество ребер равно $E + K$, а значит цикломатическая сложность равна:

$$V(G) = E - N + K + 1 \quad (4)$$

Эта метрика позволяет выявить участки кода с высокой сложностью, что может быть индикатором повышенной вероятности ошибок. Например, Microsoft использует пороговые значения цикломатической сложности для идентификации проблемных областей в своих продуктах [2].

Маурис Холстед (Maurice Halstead) в 1977 году предложил *алгебраическую модель объема и сложности кода* [3]:

$$V = (N_1 + N_2) \times \log(n_1 + n_2), \quad (5)$$

где: N_1 — общее количество операторов в программе,

N_2 — общее количество операндов в программе,

n_1 — число уникальных операторов в программе,

n_2 — число уникальных операндов в программе.

Также Холстед ввел метрику *уровня программы* L , известная также как метрика уровня качества программирования, которая позволяет количественно оценить сложность и качество программы одновременно, а именно:

$$L = \frac{2}{n_1} \times \frac{n_2}{N_2}, \quad (6)$$

Метрика L принимает значения от 0 до 1 и чем выше, тем лучше.

Также Холстед известен тем, что ввел метрику *интеллектуальных усилий разработчика* E :

$$E = \frac{n_1 N_2 N \log_2 n}{2 n_2}, \quad (7)$$

В случае $E < 300$ речь может идти о тривиальной программе, а в случае $E > 1000$ можно говорить о весьма сложной программе, которая потребует значимых усилий команды разработки. Важными и полезными выводами из работ Холстеда можно привести заключение, что объем программы V сильно коррелирует с количеством ошибок в коде, количество которых примерно равно: $\frac{V}{3000}$.

В 1980-х годах фокус оценки качества кода сместился на *функциональные характеристики* программного обеспечения, например, *метод функционального точечного анализа* (англ. Function Point Analysis, FPA) Алана Альбюрехта (Alan Albrecht), в котором оценивается полезность системы через пользовательские транзакции, независимо от реализации [5]. Метод включает в себя категоризацию функций программного обеспечения, таких как формы ввода данных, выходные отчеты, запросы, файлы и интерфейсы, и назначение веса каждой из них на основе их сложности. Количественно оценивая эти функции и связанные с ними веса, FPA обеспечивает объективную меру размера и сложности программного обеспечения.

Существенный вклад в качество программного обеспечения как продукта внес и Норман Фентон (Norman Fenton) в 1990-е [4]. Фентон отмечает, что метрики программного обеспечения всегда должны быть:

1. Валидируемыми (статистически подтвержденными).
2. Измеряемыми.
3. Строго математически обоснованными.
4. Разделяемыми на прямые и косвенные.
5. Интерпретируемыми (иметь четкие пороговые значения).
6. Экономически эффективными (затраты на сбор и обслуживание метрики не должны превосходить выгод от их применения).

Также Фентон сводит все продуктовые метрики в триаду вида:

1. Размер/Объем программы:

– *LOC (Lines of Code)* — количества строк кода (без комментариев и пустых строк). Базовая мера объема, которая часто коррелирует с числом дефектов.

– *FP* (англ. Functional Point). FP отражает полный объем функциональности, предоставляемой пользователю, независимо от используемой технологии или языка программирования. Итоговый расчет делается с учетом веса каждого из компонентов.

2. Структурная сложность программы:

– $V(G)$.

– *Связанность* (англ. Coupling) — мера зависимости между модулями программы. Оценивает, насколько изменения в одном модуле влияют на другие:

$$C(M) = \frac{fan-out(M)}{fan-in(M) + fan-out(M)}, \quad (8)$$

где:

$fan-in(M)$ — число модулей, передающих данные в модуль M ,

$fan-out(M)$ — число модулей, получающих данные из модуля M .

Для $C(M) < 0,3$ - идеал для микросервисов,

$C(M) < 0,5$ - допустимо для монолита и $C(M) < 0,5$ требует рефакторинга кода, ибо при $C(M) > 0.4$ количество дефектов возрастает на 65%.

– *RPC (Response of Class)* — количество уникальных методов, которые могут быть вызваны для данного класса.

– *LCOM (Lack Cohesion in Methods)* — мера несвязанности методов внутри класса:

$$LCOM = \frac{P - Q}{1 - Q}, \quad (9)$$

где P — количество пар методов, не разделяющих общие переменные и Q — доля пар методов, разделяющих общие переменные.

3. Надежность программы:

– *DD* (англ. Defect Density) — плотность дефектов:

$$DD = \frac{\text{Число дефектов (D)}}{\text{Размер кода (KLOC)}}, \quad (9)$$

где *KLOC* - количество тысяч LOC.

Выше был приведен краткий обзор литературы и методов качества программного обеспечения как продукта. Мы обсудили метрики качества ПО, их историю, проблемы и ограничения. В контексте ИСППР требуются совершенно новые метрики, о чем речь и пойдет ниже.

Проблемы и перспективы метрик качества ПО ИСППР

Исторически метрики качества ПО, от цикломатической сложности МакКейба, алгебраических мер Холстеда до функциональных точек Альбрехта и индексов связности Фентона фокусировались на статических атрибутах кода: объеме, структурной сложности и модульных зависимостях. Однако в ИСППР, где решения генерируются динамическими ИИ-

моделями (например, нейросетями с онлайн-обучением), эти метрики становятся недостаточными из-за фундаментальных ограничений.

Ключевые проблемы традиционных метрик

Перечислим ключевые проблемы традиционных метрик применительно к ИСППР:

1. *Контекстная слепота.* Метрики игнорируют критичность последствий ошибки. Например, цикломатическая сложность алгоритма диагностики рака $V(G) = 12$ и рекомендательной системы $V(G) = 12$ формально идентичны, но цена ошибки в первом случае катастрофична. Традиционные метрики не учитывают *цену решения*.

2. *Статичность vs. динамика ИСППР.* ИСППР постоянно адаптируются к новым знаниям, что вызывает дрейф моделей [6]. $V(G)$ не оценивает деградацию точности на новых данных, эффект обратной связи (рекомендации, которые меняют или искажают поведение пользователей и системы).

3. *Семантическая корректность.* Оценка $V(G)$ или LOC не отражает *смысловую корректность решений*. Система кредитного скоринга может иметь идеальный $F1 - score = 0.91$, но принимать решения на основе расовых предубеждений. Необходимы метрики, оценивающие логическую обоснованность вывода (например, через соответствие медицинским протоколам или ГОСТ).

4. *Этические пробелы в решениях.* Метрики не учитывают или редко учитывают как половую принадлежность, так и расовую, социальную, национальную или социокультурную, которые критически важны для ИСППР.

5. *UI/UX.* Метрики не оценивают качество продукта с точки зрения пользовательского опыта и дизайна, что критически важно для человека. Высокая когнитивная нагрузка или низкое доверие к ИСППР сводит на нет все усилия по созданию качественного продукта.

Новые гибридные метрики качества ПО ИСППР

На основании изложенного выше мы предлагаем рассмотреть новый подход к созданию и применению метрик качества ПО ИСППР. Введем *гибридные метрики*, которые используют как классические метрики качества ПО, так и совершенно новые, которые и могут быть применены при оценке качества ПО ИСППР.

1. *Технические метрики.* Предлагаем оставить классические основные метрики кода, например $V(G) < 10$, $C(M) < 0.3$, LOG .
2. *Динамические метрики.* Вводим метрики, которые учитывают особенности работы ИСППР:

– *Качество ИСППР*:

$$Q_{\text{ИСППР}} = \frac{\text{Точность на новых данных}}{\text{Точность на исторических данных}} \geq 0,95 \quad (10)$$

– *Метрика технической адаптивности*, которая отражает способность ИСППР изменять свое поведение в зависимости от новых данных:

$$D_{\text{ИСППР}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times A_i}{T} \quad (11)$$

где: A_i - степень адаптации по каждому из параметров (интерфейс, новые данные или алгоритмы), w_i — вес параметра и T - временной интервал наблюдения.

– *Метрика временной стабильности вывода, TSO* (англ. Temporal Stability of Output). Измеряет стабильность решений при одинаковых входных условиях. Высокое значение может указывать на непредсказуемость модели:

$$TSO = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i(t_1) - O_i(t_2)|, \quad (12)$$

где: $O_i(t_1)$ - значение i - го выходного решения в момент времени t_1 .

– *Метрика чувствительности к данным, DSM* (англ. Data Sensitivity Metric). Позволяет определить, насколько модель ИСППР чувствительна к изменениям в обучающих или входных данных. Может использоваться для оценки робастности системы:

$$DSM = \frac{\text{Число измененных решений}}{\text{Число модифицированных записей в данных}} \quad (13)$$

3. Семантико-этические метрики:

– *Согласованность с экспертной оценкой*. При верификации должна быть выше 0,8.

– *Метрика справедливости, ECM* (англ. Ethical Consistency Metric):

$$Z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_n), \quad (14)$$

где $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ - пол, раса, возраст, социальный статус и иные метрики справедливости.

$$ECM = \frac{\text{Число согласованных решений в соответствии с } Z}{\text{Общее число решений}}, \quad (15)$$

– *Метрика объяснимости, ES* (англ. Explainability Score). Количественная оценка того, насколько система позволяет человеку понять механизм принятия решения. Особенно важна в регулируемых сферах (медицина, банки, право):

$$ES = \frac{\sum_{k=1}^p w_k \times E_k}{p} \quad (16)$$

где: E_k - уровень объяснимости по каждому p параметру входных данных и w_k — вес параметра.

Ключевой новизной такого подхода является нахождение баланса

между классическими методами качества ПО и новыми подходами, описанными выше. Вкупе с динамическим мониторингом и регулярным пересчетом при обновлении данных сможем получить требуемую контекстную релевантность с учетом и семантико-этических метрик, тем самым значимо повысив качество ПО ИСППР.

Выводы и дальнейшие перспективы исследования.

В статье представлены новые подходы к оценке качества ПО ИСППР через призму динамических, технических и семантико-этических метрик. Предложенные метрики позволяют учитывать не только традиционные аспекты надежности и производительности, но и такие критические и важные характеристики, как объяснимость, справедливость, этическая консистентность и влияние на пользователя. Это особенно актуально для систем, применяемых в регулируемых и социально значимых сферах (банки, медицина или промышленность).

Дальнейшие перспективы исследования включают разработку методов автоматизированного расчета и мониторинга предложенных метрик, их интеграцию в CI/CD-процессы, создание эталонных наборов данных для тестирования, а также формирование обобщенной шкалы качества ИСППР. Особое внимание должно быть уделено стандартизации и нормативно-правовому сопровождению использования таких метрик в реальных системах с учетом законодательства РФ.

Заключение

Качество ПО ИСППР нельзя свести к метрикам только кода — необходим переход к контекстно-зависимым, мультидисциплинарным стандартам и оценка типа ISO/IEC TR 24028:2020 [7], где технические атрибуты дополнены семантической валидностью, этической проверкой и человеко-ориентированным дизайном. Без этого интеллектуальные системы рискуют стать «черными ящиками»: эффективными статистически, но опасными или просто ненужными практически.

1. **T. J. McCabe**, "A Complexity Measure," in IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-2, no. 4, pp. 308-320, Dec. 1976, doi: 10.1109/TSE.1976.233837
2. <https://blog.umano.tech/7-software-quality-metrics-to-track-in-2025>
3. **Halstead M. H.** Elements of Software Science. New York: Elsevier, 1977. 316 p.
4. **Fenton N.E.** Software Metrics: A Rigorous Approach. 3rd ed. CRC Press, 2014. 624 p.
5. **lbrecht A.J.** Measuring Application Development Productivity // Proceedings of the IBM Applications Development Symposium. Monterey: IBM

- Press, 1979. P. 83 -92.
6. **Fabian Hinder, Valerie Vaquet, Johannes Brinkrolf, Barbara Hammer**, Modelbased explanations of concept drift, *Neurocomputing*, Volume 555, 2023, 126640, ISSN 0925-2312
 7. <https://www.iso.org/standard/77608.html>

Д.Г. Арсеньев¹, Е.С. Гебель², В.П. Шкодырев³

УМНЫЕ ФАБРИКИ: ЦИФРОВИЗАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург*

¹vicerector.int@spbstu.ru, ²gebel_es@spbstu.ru, ³shkodyrev@mail.ru

Введение

В условиях современной рыночной экономики динамика спроса и предложения резко усложняется, что приводит к необходимости масштабируемости и организации экономически эффективного сбора информации, гибкости и быстрого принятия решений, поддержку цифровых моделей структурно-сложных высокотехнологичных дискретных процессов и производств и глубокую интеграцию с сенсорными сетями для сохранения конкурентоспособности бизнеса путем быстрой адаптации предприятия к меняющимся условиям. Применение традиционных моделей, методов и средств планирования, управления и оптимизации производства, ориентированных на централизованную многоуровневую иерархическую структуру предприятия и пакетную обработку информации, основанную на линейном или динамическом программировании, не учитывает индивидуальных технологических особенностей, приоритетов и ограничений [1]. Новая парадигма в условиях сетевой экономики реального времени предполагает создание максимально автономных интеллектуальных систем управления, работающих непрерывно, обеспечивая распределение ресурсов, планирование, оптимизацию, мониторинг и контроль результатов в режиме реального времени [2].

Архитектура системы управления

Решить проблему адаптивного управления предприятием с приемлемым качеством и в требуемое время становится возможным используя одно из ключевых направлений в области искусственного интеллекта –

мультиагентные технологии, ключевым свойством которых является возможность создания самоорганизующихся систем, где каждый элемент принимает решения, что позволяет сделать систему более открытой к изменениям, гибкой и эффективной для решения различных сложных задач. «Открытость» в распределенной интеллектуальной системе управления производством и предприятием в целом реализуется на уровне решаемой задачи, что означает запуск процесса обработки при наступлении некоторого события (ситуационное управление); на уровне системы – мониторинг внутреннего состояния и внешних факторов; на уровне алгоритма решения – учет текущих данных и знаний.

Архитектура открытой распределенной системы управления структурно-сложным высокотехнологичным дискретным производством (рис. 1) построена на основе интеллектуальных агентов с большой автономией, интеллектуальные узлы равнозначны по логике, гетерогенны по физике и независимы по функциям.

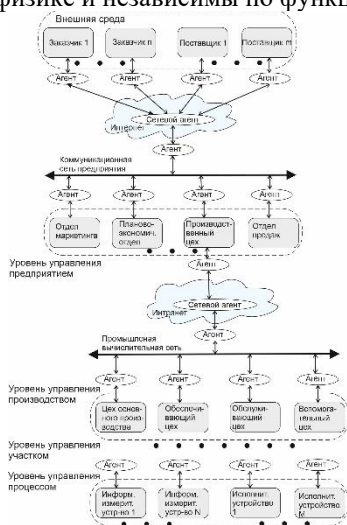


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы управления

При построении архитектуры основное внимание уделяется выявлению межфункциональных процессов, создающих результативность деятельности предприятия. Эволюция представлений о межсистемных взаимодействиях следуя закону биогенетического развития происходит, начиная с физической интеграции различных информационных систем на уровне компьютерных сетей и аппаратных интерфейсов обмена данными, переходя на уровень интеграции приложений, где необходимо согласовать способы обмена данными и интерфейса межпроцессорного взаимодействия.

Завершающим этапом становится интеграция бизнес-задач, т.е. построение общей логики/архитектуры решения на уровне объектов и регламентов обмена данными.

Интеллектуальная система управления

Каждый интеллектуальный агент в системе управления построен на гибридной фреймowo-производственной модели, которая в общем виде

представляет собой граф знаний или кортеж вида:

$$G = \{E, R, F\},$$

где E, R, F – это множества сущностей (состояний, сценариев поведения) объектов $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{Ne}\}$, фактов $(h, r, t) \in F$ и отношений между ними $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{Nr}\}$. Рассматривая множество фактов (имеющихся ресурсов), как связь между сущностями, решение задачи оптимального управления заключается в поиске связи отношения состояний $r \in R$ с выбранной моделью реагирования $t \in T$ для перехода системы в желаемое целевое состояние:

$$f \rightarrow \pi(X, Y, U),$$

в котором под $\pi(X, Y, U)$ понимается модель управления.

Адаптивное управление высокотехнологичным производством в таком случае сводится к составлению расписания (сценариев), как распределенного и динамического объекта, используя недетерминированный алгоритм ввиду наличия параллельных и асинхронных процессов вычислений, отражающих состояние ресурсов предприятия на заданный момент времени.

Современный подход к реализации мультиагентных технологий к управлению предприятием основан на микросервисной архитектуре [3], в которой интеграционная шина EBS выполняет функции брокера сообщений. Каждый агент в облики микросервиса представлен отдельным контейнером Docker и управляется системой Kubernetes, что позволяет осуществить самоконтроль, автоматизацию процессов, оркестровку хранилища.

Заключение

Эффектом внедрения такой системы является накопление знаний о производстве, о сложившихся проблемных ситуациях и способах их преодоления, позволяя квазиоптимально перенастраивать производство под текущие задачи с учетом имеющих ресурсных и временных ограничений в парадигме «направляемой самоорганизации».

1. **GARTNER.** Top Strategic Predictions for 2016 and Beyond: The Future Is a Digital Thing. – Stamford: Gartner, Inc., 2015. – URL: <https://www.gartner.com/en/documents/3142020> (дата обращения 05.06.2025).
2. **Леонидов А. В.** Решение сложных задач управления ресурсами: от классической оптимизации и теории игр - к мультиагентным технологиям для поиска консенсуса / А. В. Леонидов, П.О. Скобелев // Проблемы управления. – 2025. – № 2. – С. 14-26.
3. **Бондаренко А. С., Королев Д.В., Зайцев К.С.** Исследование эф-

Д.Г. Арсеньев, В.П. Шкодырев

КОГНИТИВНАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

*Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, vicerecator.int@spbstu.ru, shkodyrev@spbstu.ru*

Введение

Управление структурно-сложными плохо формализуемыми объектами, к которым можно отнести крупные промышленные предприятия горнодобывающей и горно-перерабатывающей отраслей, объекты энергетики, других производств, остается одной из серьезных проблем современной теории управления. Многие частные решения проблемы приводят как правило, к большому числу ограничений, не позволяющие сформировать общую концепцию единой универсальной среды управления [1].

Одним из перспективных направлений в создании общей концепции единой универсальной среды управления промышленными системами может стать концепция сильного промышленного искусственного интеллекта, рассматриваемого с позиции формирования и развития базовых принципов и методологии формирований стратегий группового управления командным поведением многих взаимодействующих когнитивных управляющих агентов в единой кибер-физической среде управления [3,5]. Именно применения сильного промышленного искусственного интеллекта (ПИИ) показывает преимущества нестандартных методов в повышении эффективности управления, рассматриваемых в частности, в контексте многоцелевой многокритериальной оптимизации процессов управления структурно-сложным производственным комплексом. В докладе внимание авторов сфокусировано на применении указанного подхода к управлению сбалансированным теплоснабжением одного из энергоемких предприятий цветной металлургии.

Задачу развития концепции сильного промышленного искусственного интеллекта для решения широкого круга задач управления авторы рассматривают в контексте реализации принципа когнитивизма как основы интеллектуализации систем, основанных на знаниях [5]. Внимание

фокусируется на ключевом понятии знания управления и его онтологической структуре – как способе формализации предметных знаний, связывающей понятие сущности «объект управления» и «стратегия реагирования / управления», переводящая объект управления –из текущего в заданное целевое состояние.

Постановка задачи

Исходным этапом является введение обобщенной системы G^Σ целевого состояния для многоцелевой оптимизации, интегрирующей систему целевых показателей эффективности

$$G^\Sigma = [G_1(u), G_2(u), \dots, G_k(u)],$$

где $G_k(u), k = \overline{1, K}$ – частные показатели, по которым (на основании которых) формулируются целевые функции управления

$$u_\Sigma = \arg \min_{u \in U} \left(\max_{k \in K} G^\Sigma \right)$$

и систему частных критериев качества управления как

$$G_k(u) \Rightarrow J_k(\|G_k^{max} - G_k\|) \rightarrow \min$$

$$u = \arg \min_{u \in U} \left(\max_{k \in K} G_k \right)$$

Задача группового управления - формулируется как задача формирования стратегии взаимодействия агентов, реализующих декомпозицию стратегической цели G^Σ на систему подцелей с последующей коррекцией промежуточных результатов в единую оценку эффективности группового управления.

Декомпозиция задачи группового управления

Результатом решения задачи декомпозиции сложной цели управления, заданной целевой функцией, на дерево подцелей является графовая интерпретация знания управления, формализующая стратегию интеллектуального управления графом знаний [4]:

$$G = \{\mathcal{E}, \mathcal{R}, \mathcal{F}\},$$

в котором \mathcal{E} , \mathcal{F} and \mathcal{R} определены как «сущности», отображающие текущие состояния объекта управления, «факты» реагирования на данные состояния согласно выбранным подцелям, и «отношения», связывающие текущие состояния с выбранными стратегиями реагирования. Стратегия планирование действий, в виде траектории на дереве поиска локальных оптимумов для каждого агента, реализуется общим алгоритмом последовательности действий, позволяющих достигнуть желаемого эффекта в процессе выработки оптимальных совместных решений коалицией взаимодействующих агентов, образующих единую интеллектуальную мультиагентную систему $Net = \{A_i\}, i = \overline{1, n}$ группового управления. Подобная стратегия может быть выработана на основе когнитивных возможностей

каждого агента к восприятию и трансформации получаемой информации в знания [2]. При этом с учетом сложности поведения объекта управления, множество сущностей его состояния можно определить как $\mathcal{E} = \{e_1, e_2, \dots, e_{N_e}\}$, множество фактов реагирования f в наиболее общем случае - задать кортежем $f \equiv (h, r, t) \in \mathcal{F}$; и множество отношений - как $\mathcal{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_{N_r}\}$. Ключевым элементом в таком графе знаний, формально интерпретирующим факты реагирования \mathcal{F} , можно рассматривать как множество стратегий реагирования или управления, которые задают порядок, по которому происходит развертывание состояний.

Разработанная стратегия коалиционного взаимодействия управляющих агентов сети $\text{Net}=\{A_i\}$ рассматривается в контексте формирования модели управления так называемого верхнего – мета уровня, реализуемого мета-агентом стратегического планирования. Для мета-агента вводится дополнительная возможность активизации агентов нижнего уровня для решения задач группового взаимодействия в достижении общей – стратегической цели управления. С формальной т.з. функционал мета-агента можно представить кортежем:

$$m^{MG} = \{\{A_i^{MG}\}, MG, R, S_o, \},$$

в котором оговариваются функционалы т.н. вложенных агентов $\{A_i^{MG}\}$, формирующих группу коалиционного взаимодействия агентами нижнего уровня, решающих конкретные задачи группового взаимодействия, MG - метаграф знаний, на основе которого выполняются правила управления агента, R - набор множество правил $\{r_j\}$, реализуемых мета-агентом; S_o - стартовое условие выполнения (действия) агента, что соответствует фрагменту метаграфа, который используется для стартовой проверки правил, стартовое правило. В этом случае мета-агент может быть представлен в виде *мета-вершины мета-графа*, который является отображением его операционной семантики, представляемой графом переходов [4,6].

Практическое применение

Прикладной эффект применения сильного промышленного ИИ иллюстрируется на примере решения задачи многоцелевой многокритериальной оптимизации процессов управления структурно-сложным производственным комплексом в части задачи управления сбалансированным теплоснабжением одного из энергоемких предприятий цветной металлургии.

На Рисунке 1 представлены результаты применения стратегии многоцелевой оптимизации, реализуемой интеллектуальной системы управления в автоматическом режиме непрерывного оперативного планирования.

Закключение

Полученный прикладной эффект применения стратегии непрерывного переобучения интеллектуальной системы управления в условиях неопределенности непрерывного изменения рабочих режимов показывает преимущества и перспективность подобных систем для широкого класса задач многоцелевой многокритериальной оптимизации структурно-сложных производственных комплексов. Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение классов задач управления структурно сложными производственными комплексами, функционирующих в условиях существенной неопределенности как внешних, так и внутренних факторов влияния на эффективность таких систем.

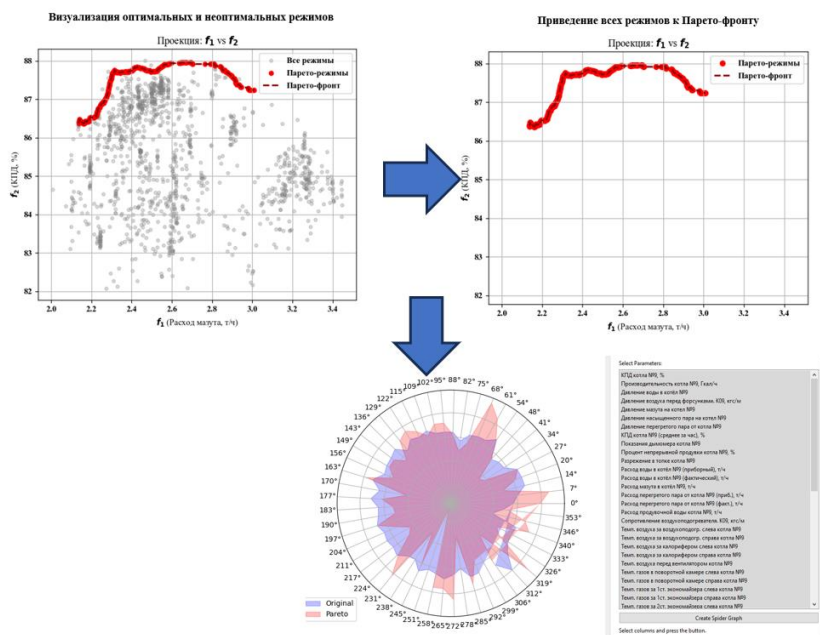


Рис.2. Оптимизации режимов генерации теплоносителя в паровом котле в координатах «КПД» – «расход мазута»: а – до оптимизации, б-после оптимизации, с-лепестковая диаграмма визуализации динамики параметров управления

Полученный прикладной эффект применения стратегии непрерывного переобучения интеллектуальной системы управления в усло-

виях неопределенности непрерывного изменения рабочих режимов показывает преимущества и перспективность подобных систем для широкого класса задач многоцелевой многокритериальной оптимизации структурно-сложных производственных комплексов. Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение классов задач управления структурно сложными производственными комплексами, функционирующих в условиях существенной неопределенности как внешних, так и внутренних факторов влияния на эффективность таких систем.

1. **Редько В.Г.** Эволюционная кибернетика. М., Наука, 2001.
2. **Троцкий Д.В., Городецкий В.И.** Сценарная модель и язык описания знаний для оценки и прогнозирования ситуаций. Труды СПИ-ИРАН. 2009. Вып. 8. -С.94-127.
3. **Ben Goertzel.**, Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects, Journal of Artificial General Intelligence 5(1) 1-46, 2014 Submitted 2013-2-12 . DOI: 10.2478/jagi-2014-0001;
4. **Noy, N., Gao, Y., Jain, A., Narayanan, A., Patterson, A., Taylor, J.,** Industry-scale knowledge graphs: Lessons and challenges: Five diverse . technology companies show how it's done. Queue 17, 48–75. 2019.
5. **Perlovsky L, Shkodyrev V.** Physics of Mind – A Cognitive Approach to Intelligent Control Theory in Lecture Notes in Networks and System, 95, Cyber-Physical Systems and Control, Springer, 2020.

А.П. Герасимова, А.С. Мальцев

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ» ЦКП «СКИФ»*

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
a.gerasimova1@alumni.nsu.ru*

Введение

Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 124041700067-6)

фотонов» (ЦКП «СКИФ») — комплекс зданий, сооружений и оборудования, обеспечивающий выполнение научных исследований на пучках синхротронного излучения [1]. Станция 1-3 «Быстропротекающие процессы» одна из экспериментальных станций первой очереди ЦКП «СКИФ» [2]. Станция позволит проводить исследования процессов, происходящих в условиях взрыва и импульсных ударных нагрузок при скоростях до 20 км/с и времени экспозиции порядка 100 пс и менее, а также воздействия на материалы мощного импульсного нагрева, приводящего к деформации, возникновению механических напряжений и механическому разрушению материалов. В докладе рассматривается разработка автоматизированной системы управления (АСУ) экспериментальным оборудованием станции 1-3. Представлена общая архитектура распределенной системы управления на базе открытых компонентов и протоколов, а также рассмотрены детали реализации программного обеспечения рабочих мест инженеров с использованием архитектуры веб-приложения. Представленная система автоматизации проходит экспериментальную апробацию на оборудовании строящейся в настоящее время станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» в наукограде Кольцово около Новосибирска.

Постановка задачи

Назначением АСУ является диспетчерское и местное управление подвижками, гидроцилиндрами, сервоклапанами, пусковыми реле и приводами технологического оборудования средствами вычислительной техники с целью организации научного эксперимента. Создание системы АСУ предполагает достижение следующих целей:

- повышение безопасности при проведении научных экспериментов за счет расширения контрольных и блокировочных функций;
- повышение оперативности управления и улучшение условий труда исследователей и обслуживающего персонала за счет расширения технологических возможностей управления научным оборудованием станции;
- снижение эксплуатационных затрат за счет ввода диагностических функций, обеспечивающих контроль технического состояния устройств и получение статистических данных о времени их фактической работы.

В АСУ должны быть интегрированы функции:

- диспетчерского и местного центров управления оборудованием станции;
- передачи данных устройств сопряжения с объектами;
- средств диагностики оборудования станции;

- логического контроля действий оператора станции в любом режиме работы системы.

Настройка оборудования на этапе ввода в эксплуатацию станции выполняется с рабочего места инженера. Одним из требований к инженерскому ПО управления станции является возможность удаленного взаимодействия с оборудованием, а также минимизация подготовки рабочего места для запуска управляющего интерфейса. Исходя из данных требований наиболее подходящим вариантом реализации является веб-приложение.

Применение веб-приложения для управления оборудованием имеет ряд преимуществ перед использованием десктопных приложений:

- пользовательский интерфейс может быть запущен на устройстве с любой операционной системой;
- на устройстве оператора требуется только наличие веб-браузера, не требуется установка отдельного приложения;
- обновления и изменения в пользовательском интерфейсе могут быть внесены централизованно на сервере, что устраняет необходимость обновления приложения на каждом устройстве оператора.

Экспериментальное оборудование на станции включает в себя различные функциональные подсистемы, каждая из которых отвечает за выполнение определённых задач. Для повышения удобства управления оборудованием пользовательский интерфейс инженера должен быть логически разделен по этим подсистемам.

Система оборудования станции включает элементы физического управления оборудованием и (или) элементы для измерения. Элементом управления может быть механическая подвижка, которая является устройством, осуществляющим физическое перемещение в определенном направлении плоскости. Элементами для измерения являются датчики.

Функциональными требованиями к ПО инженера станции являются:

- отображение параметров элементов системы экспериментального оборудования. Примером параметра механической подвижки является значение координаты положения подвижки, а для датчика – измеренные им значения температуры;
- отображение значений, которые находятся в регистрах памяти микроконтроллера элемента системы;
- отправка команд для изменения параметров элементов управления;
- отправка команд для изменения значений, находящихся в регистрах памяти микроконтроллеров элементов системы;
- отображения статуса каждого элемента системы;

- отображение статуса работы системы управления;
- отображение допустимости отправляемых пользователем команд;
- система должна предоставлять доступ к функциям управления оборудованием только авторизованным пользователям.

Система автоматизации станции

Станция Быстропротекающих процессов ЦКП «СКИФ» представляет собой распределенную систему состоящую из нескольких сотен единиц технологического оборудования, исполнительных устройств и датчиков. Исходя из требования к системе автоматизации принято решение для разработки программного обеспечения на среднем и верхнем уровне использовать открытые решения, протоколы и форматы данных, которые широко используются в сфере ИТ. Подобный принцип ранее применялся при создании автоматизированной системы управления движением поездов Новосибирского метрополитена [3].

Программное обеспечение выполнено по двухуровневой архитектуре и включает набор программ и библиотек для программируемого логического контроллера (ПЛК семейства ICPDAS, средний уровень) и персональные компьютеры оператора и серверы (верхний уровень). Верхний уровень отвечает за визуализацию текущего статуса исполнительных устройств и получение команд пользователя посредством интерфейса; формирование соответствующих сообщений и отправку сообщений на брокер, получение соответствующих сообщений с брокера, их распаковку, хранение данных и команд. Средний уровень выполняет команды и получает статус исполнительных устройств на уровне контроллеров. Общение между уровнями происходит согласно протоколу MQTT. Для настройки работы программного обеспечения используются конфигурационные файлы в формате JSON. JSON используется как унифицированный формат представления данных, команд и конфигураций в АСУ станции.

На верхнем и среднем уровне АСУ используется одинаковая версия операционной системы Linux, язык программирования, компилятор и набор открытых библиотек. Подобное решение обеспечивает единообразный подход к разработке программного обеспечения для программируемых логических контроллеров, рабочих мест операторов, инженеров и других служб, единую структуру разрабатываемого исходного кода и использование общих библиотек для всех распределенных компонент системы автоматизации на всех уровнях. Использование одних и тех же программных модулей на среднем и верхнем уровне ускорило и удешевило процесс разработки и отладки программного обеспечения. За счет

использования открытых библиотек отпала необходимость в покупке коммерческих средств разработки и привлечения программистов узкого профиля. Общая структура системы автоматизации показана на рис. 1.

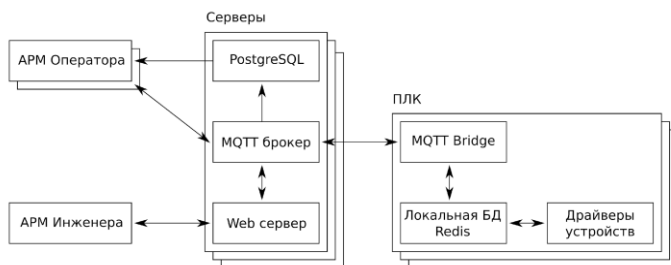


Рис. 1. Структура системы автоматизации станции

Программное обеспечение ПЛК включает набор драйверов, осуществляющих получение данных от технологического оборудования и их упаковку в формат JSON, а также формирование команд управления. Для обмена данными между драйвера устройств в качестве локального хранилища используется база данных Redis. Redis – нереляционная база данных, работающая со структурами типа «ключ-значение», обеспечивающая высокую производительность для операции чтения и записи. Для передачи данных из локальной базы Redis на верхний уровень и получения команд управления используется модуль MQTT Bridge, связанный с брокером MQTT.

Система автоматизации станции включает следующие подсистемы:

- Датчик положения пучка погустковый ДПП.
- Блок прерывателей пучка БПП.
- Блок охлаждаемых щелей с монитором пучка БОЩ1.
- Блок нерассеивающих щелей с монитором пучка БНЩ1.
- Блок нерассеивающих щелей с монитором пучка БНЩ2.
- Блок нерассеивающих щелей с монитором пучка БНЩ3
- Пулеулавливатель ПУЛЛ1 и ПУЛЛ2.
- Пневматическое устройство высокого давления ПУВД1 и ПУВД2.
- Взрывная камера ВК.
- Узел зеркал УЗ.
- Секционная труба с монитором пучка СТМП.
- Секционная труба с коллимационной системой МУРР (СТМУРР).
- Ловушка тормозного излучения ЛТИ.

- Стойка регистрирующей аппаратуры PA1 и PA2.
- Вакуумная система транспортировки пучка ВСТП.
- Система безопасности СДЕП.

Программное обеспечение каждой из подсистем запускается на ПЛК в виде набора независимых программ (драйверов устройств соответствующей подсистемы). Запуск программ, журналирование, контроль состояния осуществляется штатным механизмом управления службами systemd ОС Linux. Например, программное обеспечение подсистем МУРР (СТМУРР), БНЦ1, БНЦ2, БНЦ3, БОЦ1, СТМП включает драйвера подвижек leadshine, программу управления блоком щелей slit, чтения аналоговых сигналов dcon, управления клапанами valves, программы чтения и записи дискретных портов di и do. Программа slit управляет щелью (щель представляет собой набор из двух ножей в одной плоскости). Программа пересчитывает значение ширины зазора и положение центра зазора в значения координаты положения ножей и отправляет эти значения в локальную базу данных Redis, программа циклически опрашивает значения координаты положения ножей, пересчитывает их в текущие значения ширины зазора и положение центра зазора и сохраняет в локальной базе данных Redis в формате JSON. Программа dcon циклически опрашивает температурные датчики системы по протоколу dcon и сохраняет данные опроса в локальной базе данных Redis в формате JSON. Программа valves формирует дискретные сигналы управления клапаном монитора пучка, а также считывает дискретные сигналы конечных выключателей. За счет комбинации набора запускаемых программ и их конфигурационных файлов для подсистем обеспечивается гибкость настройки ПО каждого контроллера для соответствующей подсистемы.

Программное обеспечение инженера

Информация об элементах оборудования регулярно обновляется, что требует оперативного отображения изменений на пользовательском интерфейсе. Чтобы избежать частой полной перезагрузки страницы и обеспечить быструю реакцию системы, для реализации веб-приложения [4] применяется модель одностраничного приложения (single page application). При использовании этой модели изменения вносятся в отдельные компоненты пользовательского интерфейса, содержащиеся на веб-странице, без необходимости перезагрузки всей страницы [5]. Такой подход уменьшает объем передаваемых данных и обеспечивает комфортное и непрерывное взаимодействие пользователя с приложением.

Пользовательский интерфейс приложения проектируется с использованием библиотеки React. React [6] - это библиотека JavaScript для со-

здания пользовательских интерфейсов. React позволяет создавать повторно используемые компоненты, которые инкапсулируют как логику взаимодействия, так и представление. Использование компонентного подхода React способствует стандартизации интерфейсов систем оборудования и упрощает добавление интерфейсов управления новых систем оборудование.

Сервер является Node.js приложением, построенным с использованием Express. Node.js [7] - это кроссплатформенная среда выполнения JavaScript. Node.js позволяет писать серверный код на том же языке программирования, что и клиентский, что упрощает разработку веб-приложений. Express [8] — это фреймворк для Node.js, предоставляющий средства для разработки веб-приложений.

Визуальное представление систем оборудования реализовано в виде табличной формы, обеспечивающей структурированное отображение данных. Каждая строка таблицы соответствует отдельному элементу оборудования. Столбцы содержат значения параметров этого элемента, а также инструменты управления, предназначенные для отправки команд на изменение соответствующих параметров.

При настройке оборудования оператор станции преимущественно взаимодействует с высокоуровневыми параметрами элемента оборудования. Однако в отдельных ситуациях может потребоваться более детализированное управление, осуществляемое на уровне регистров конкретных элементов. В связи с этим функциональность низкоуровневой настройки вынесена за пределы основного интерфейса и реализована в виде модального окна, что позволяет сохранить удобство основного взаимодействия и одновременно обеспечить доступ к расширенным возможностям управления [9].

Реализованы компоненты, на основе которых могут создаваться пользовательские интерфейсы управления оборудованием. Библиотека компонентов состоит из следующих элементов:

- Таблица.
- Поле состояния. Текстовый элемент, использующийся для отображения состояния приложения или элемента оборудования. Если возникла ошибка, цвет текста красный, при успешной работе зелёный, при изменении параметра элемента, например при перемещении элемента в новое положение, текст состояния чёрный.
- Поле ввода. Используется для отправки числовых команд от пользователя к оборудованию.
- Кнопка. Служит элементом для отправки определенных команд от пользователя к оборудованию.
- Кнопка открытия модального окна.
- Модальное окно.

Переход между разделами приложения осуществляется с использованием библиотеки React Router, которая обеспечивает навигацию между логически разделенными страницами внутри одного одностраничного приложения.

Для обеспечения корректной передачи данных между клиентом, сервером и брокером MQTT в веб-приложении используются конфигурационные файлы как на клиентской, так и на серверной стороне.

На клиентской стороне конфигурационные файлы в формате JSON задают структуру отображения данных на пользовательском интерфейсе, а также устанавливают соответствие между визуальными компонентами интерфейса и элементами, определенными на серверной стороне. В конфигурациях задаются параметры таблиц, соответствующих различным системам оборудования: отображаемые имена элементов, ключи полей таблицы, а также вспомогательная информация, включая название системы, имя элемента, его индекс и наличие управления регистровыми данными. Дополнительно указываются названия таблиц, которые будут отображаться на интерфейсе. Ключи полей, названия системы, элемента и индекс используются для точной идентификации объектов при обмене с сервером, что обеспечивает корректную отправку управляющих команд и получение актуальной информации.

На стороне сервера конфигурационные файлы содержат сведения о MQTT-топиках, необходимых для подписки на данные и передачи управляющих сообщений. В конфигурациях задается соответствие между топиками и элементами интерфейса, что позволяет выполнять корректную маршрутизацию сообщений. Такая архитектура обеспечивает автоматическое сопоставление поступающих данных с компонентами интерфейса и адресацию управляющих команд в рамках протокола MQTT.

Для каждой подсистемы оборудования на серверной стороне предусмотрены отдельные конфигурационные файлы. В конфигурации указываются объекты, в которых хранятся данные, с полями соответствующие полям, используемым на клиентской стороне. Кроме того, для каждого элемента включается поле timestamp, отображающее время формирования последнего пришедшего сообщения с информацией об этом элементе, что позволяет оценить актуальность полученной информации и влияет на определение текущего статуса элементов. Для каждого элемента системы задаётся сопоставление его полей объекта данных с полями сообщения, определяются функции обработки поступающих данных, а в отдельных случаях — соответствие между значениями и их интерпретацией. Такая структура конфигурации обеспечивает гибкость обработки сообщений и точное связывание данных с интерфейсными компонентами.

В приложении реализован механизм авторизации. Отправка управляющих команд доступна только авторизованным пользователям. Для обеспечения безопасной аутентификации и верификации прав используется JSON Web Token (JWT). JWT — это механизм аутентификации, основанный на использовании специального типа токенов. Токен является структурой данных в формате JSON, которая содержит заголовок с общей информацией, тело с полезной нагрузкой и криптографическую подпись. Эта схема является одним из наиболее безопасных механизмов передачи данных между двумя сторонами, поэтому считается предпочтительным методом управления доступом к REST API [10].

Обработка ошибок реализована на двух уровнях: глобальные ошибки, такие как потеря соединения с сервером или отсутствие подключения к брокеру MQTT, отображаются в верхней части интерфейса в статусной панели приложения. Ошибки, связанные с конкретными действиями пользователя (например, попытка отправки команды без авторизации или неверный ввод данных при аутентификации), обрабатываются с помощью локальных всплывающих уведомлений (alert). Такой подход обеспечивает информирование пользователя о текущем состоянии системы и позволяет оперативно реагировать на возникающие проблемы.

Серверная часть приложения состоит из ряда модулей. Файл `index.js` является точкой входа и отвечает за инициализацию сервера, запуск приложения. Модуль `routes` направляет входящие HTTP-запросы в соответствующие контроллеры. Для обмена данными по протоколу MQTT используется `mqttService.js`, предоставляющий методы подключения к брокеру, публикации сообщений и управления соединением. Модуль `mqttClient.js` создает клиента, подписывается на топики и передает полученные сообщения или команды в соответствующие экземпляры `messageProcessing.js`. Этот класс реализует распаковку, валидацию и упаковку данных на основе конфигураций, используя вспомогательные функции из `functionProcessing.js`, где описана логика обработки конкретных типов сообщений. Управление этими экземплярами осуществляется через `messageProcessor.js`, формирующий их на основе JSON-конфигураций для каждой подсистемы оборудования. Модули `userService.js` и `tokenService.js` обеспечивают авторизацию пользователей и работу с JWT-токенами для контроля доступа. Архитектура сервера представлена на рис. 2.

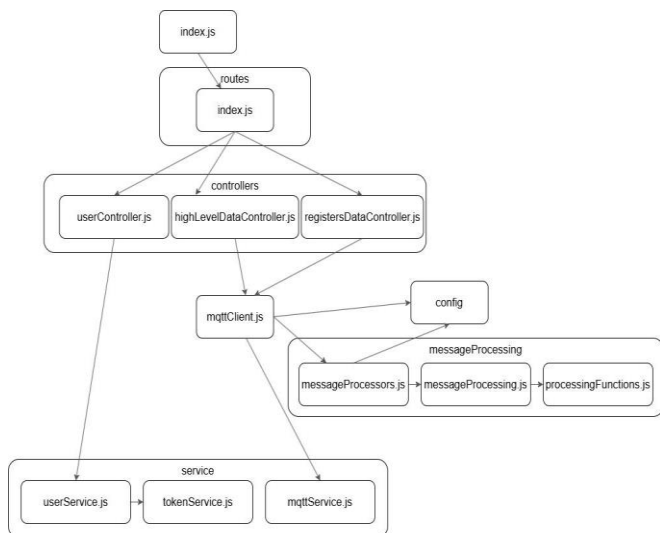


Рис. 2. Структура компонентов сервера

Заключение

Предложенный принцип построения автоматизированной системы управления оборудованием станции отличается использованием открытых операционных систем, компиляторов, библиотек и обеспечивает единообразный подход к реализации ПО на всех уровнях системы. Использование веб-приложения для организации автоматизированного рабочего места инженера позволяет минимизировать время подготовки рабочего места, предоставляет доступ к контролю и настройке оборудования из любой точки станции. Модульная распределенная архитектура обеспечивает гибкость и масштабируемость системы. Модульность увеличивает надежность системы за счет уменьшения количества потенциально содержащего ошибки исполняемого кода, а аварийная ситуация, возникшая во время выполнения отдельного модуля, не распространяется на всю систему. Компоненты системы автоматизации протестированы на моделях и реальном оборудовании строящейся станции.

1. Левичев Е.Б., Журавлев, А.Н., Золотарев, К.В., Zubavichus, Я.В., Шефер, К.И. Проект создания синхротронного источника поколения 4+ ЦКП «СКИФ» в р. п. Кольцово Новосибирской области: об-

- щая информация и статус реализации // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов" СКИФ". 2022. С. 8-12.
2. **Рубцов И.А., Прууэл Э.Р., Тен К.А., Кашкаров А.О., Аракчеев А.С.** Концептуальный проект Станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов" СКИФ". 2022. С. 115-135.
 3. **Золотухин Ю.Н., Белоконь С.А., Васильев В.В., Филиппов М.Н., Ян А.П.** Автоматизированная система диспетчерского управления движением поездов Новосибирского метрополитена: направление развития // Вычислительные технологии. Т. 18. 2013. С. 156–162.
 4. **Turc T.** Using WEB Services in SCADA Applications // *Procedia Technology*, vol. 19. 2015 pp. 584-590.
 5. **Mesbah A., Van Deursen A.** An architectural style for Ajax // 2007 Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA'07). IEEE. 2007. P. 9.
 6. React [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://legacy.reactjs.org/> (дата обращения: 10.05.2025).
 7. Node.js [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nodejs.org/en/learn/getting-started/introduction-to-nodejs> (дата обращения: 10.05.2025).
 8. Express [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://expressjs.com/> (дата обращения: 10.05.2025).
 9. **Gerasimova A.P., Maltsev A.S.** Universal Operator Interaction System with Control System Components for Experimental Equipment // 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2024). Vladikavkaz, Russian Federation. 2024, pp. 101-103.
 10. **Kornienko D. V.** Principles of securing RESTful API web services developed with python frameworks // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, vol. 2094. – №. 3. 2021. pp. 032016.

**АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СЕТЬЮ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО
РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ
В РЕЖИМЕ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ**

*АО «Корпорация «Комета», г. Москва,
info@corpkometa.ru*

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в области изучения и использования ресурсов Мирового океана. Это сопровождается развитием средств гидроакустического наблюдения, позволяющих получать достоверную информацию о подводной обстановке. Среди них особое место занимают многопозиционные системы подводного наблюдения (МСПН), построенные на базе пространственно-распределённой сети стационарных гидроакустических станций (СГАС), работающей в режиме мультистатической гидролокации (МГЛ) [1,2]. Такие системы обеспечивают обнаружение малозаметных подводных объектов и позволяют определять их координаты и параметры движения с высокой точностью. Это достигается за счёт организации согласованной по времени и пространству работы распределённой сети СГАС, что требует построения соответствующего контура управления.

Проблема автоматического управления работой пространственно-распределённых гидроакустических средств МСПН широко рассмотрена в литературе. В частности, в пионерской работе [3] вместо использования заранее составленного расписания излучения гидролокационных сигналов или случайного выбора параметров и очередности излучения предложен адаптивный алгоритм управления гидроакустическими средствами. В алгоритме излучающая СГАС, тип сигнала, момент его излучения и группа принимающих СГАС выбираются на каждом шаге по времени на основе анализа информации, вырабатываемой сетью СГАС.

Следует отметить, что в этой и других работах по данной тематике во избежание создания станциями взаимных гидроакустических помех используется временной метод разделения сигналов, в котором СГАС излучают гидролокационные сигналы строго поочерёдно. Это приводит к тому, что вскрытие подводной обстановки в акватории большой площади, т.е. обнаружение всех находящихся в ней подводных объектов, мо-

жет занимать достаточно продолжительное время. По этой причине актуальной является разработка алгоритмов управления, позволяющих сократить временные затраты на решение данной задачи.

Алгоритм управления распределённой сетью СГАС

В настоящей работе предложен алгоритм управления работой распределённой сети СГАС в режиме МГЛ, в котором в дополнение к временному используется метод пространственного разделения сигналов. В его основе лежит возможность одновременного излучения гидролокационных сигналов несколькими станциями, достаточно удалёнными друг от друга и поэтому не создающими взаимных помех. Тем самым по сравнению с известными методами управления гидроакустическими средствами МСПН сокращается время, затрачиваемое на вскрытие подводной обстановки.

Пусть контролируемая акватория представляет собой прямоугольную область, которая разбивается на $N=N_xN_y$ элементарных ячеек, где N_x, N_y – количество ячеек по её длине и ширине. Введём вероятность p_{ij} , которая характеризует степень нашей уверенности в присутствии подводного объекта в ячейке (i,j) : если мы уверены, что объект в ячейке присутствует, то $p_{ij}=1$, в противном случае $p_{ij}=0$. Если о нахождении объекта ничего не известно, то $p_{ij}=0,5$. После излучения гидролокационных сигналов СГАС регистрируют отражённые эхо-сигналы и принимают решение о наличии/отсутствии в акватории подводных объектов. На основании этой информации обновляются значения вероятности p_{ij} во всех ячейках, поэтому распределение указанной вероятности представляет собой функцию пространственных координат и времени $p(x,y,t)$.

Качество решения задачи вскрытия подводной обстановки будем характеризовать интегральным показателем контролируемости района:

$$P_t(t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} p_{ij}(t).$$

Не ограничивая общность полученных результатов, будем полагать, что при решении задачи вскрытия обстановки подводные цели в районе отсутствуют. Тогда управление работой СГАС должно осуществляться таким образом, чтобы показатель P_t за минимально возможное время достиг порогового значения P_t^{th} , которое выбирается близким к нулю.

В предложенном алгоритме излучение гидролокационных сигналов СГАС производится сеансами. Для каждого сеанса решается оптимизационная задача по выбору типа сигнала k и комбинации из M СГАС $C(M)$, в которой станции расположены таким образом, что могут одновременно

излучать зондирующие сигналы, не создавая при этом взаимных помех. Оптимизация проводится по критерию максимизации абсолютного снижения показателя P_t на множестве всех излучающих СГАС Ω и всех типов зондирующих сигналов K :

$$C = \operatorname{argmax} |\Delta P_t(C(M), k)|, M \in \Omega, k \in K.$$

Результаты моделирования

В качестве примера рассмотрим акваторию в форме квадрата со стороной 200 км, в которой равномерно в узлах прямоугольной сетки размещена 81 СГАС. На рисунке 1 а) показана динамика показателя P_t для двух алгоритмов управления. При использовании алгоритма на основе только временного разделения сигналов для достижения порогового значения $P_t^{th}=0,05$ требуется $N_T=9$ сеансов излучения. Предложенный алгоритм, использующий пространственно-временное разделение сигналов, позволяет сократить требуемое количество сеансов излучения до $N_{ST}=4$.

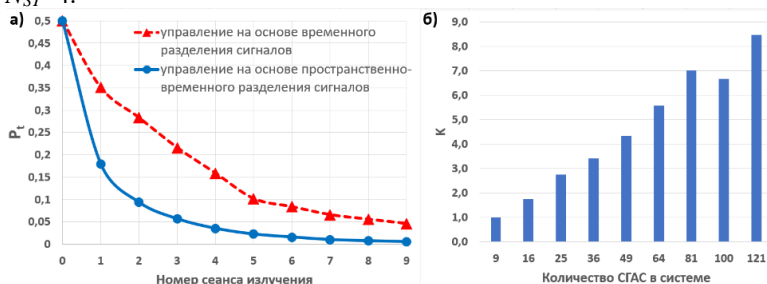


Рис. 1. Динамика показателя P_t для различных алгоритмов управления (а), Временной выигрыш K как функция количества СГАС (б)

Определим временной выигрыш от использования пространственного разделения сигналов в дополнение ко временному как $K=N_T/N_{ST}$. На рисунке 1 б) показана зависимость указанного выигрыша K от числа СГАС, расположенных в акватории. Как следует из представленных данных, с увеличением числа СГАС временной выигрыш монотонно возрастает по закону, близкому к линейному. Сокращение времени вскрытия подводной обстановки более чем в два раза достигается уже при 20 гидроакустических станциях в системе, с использованием которых в зависимости от гидролого-акустических условий можно обеспечить контроль акваторий площадью от нескольких единиц до нескольких десятков тысяч квадратных километров.

1. **Colmer A., Ellem R.** Remote undersea surveillance//Emerging Disruptive Technology Assessment Symposium. Australian Department of Defence. Defence Science and Technology Group, 2021.
2. **Машошин А.И.** Оценка эффективности стационарной распределённой системы подводного наблюдения // Морской сборник. 2020. Т. 4. С. 65–69.
3. **Krout D. и др.** Intelligent Ping Sequencing for Multistatic Sonar Systems // 2006 9th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2006.

О.И. Дранко, А.Ф. Резчиков

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
drankooi@ipu.ru, rw4cy@mail.ru*

Введение

Система моделирования управления развитием крупномасштабных систем используется для анализа сценариев достижения целей национальной безопасности и стратегий развития России и крупнейших предприятий. Используются имитационные и оптимизационные модели, системной динамики, сценарии развития.

Система моделирования поддержана открытыми данными электронного правительства России, прежде всего ФНС России и Росстата, включая данные по отдельным предприятиям.

Анализируются примеры моделирования достижения национальных целей экономической безопасности.

Комплекс задач развития крупномасштабных систем

Рассматривается связанная многоуровневая система моделей развития крупномасштабных систем, ориентированная на увеличение результативности на макро-, мезо- и микроуровнях (рис. 1).



Рис. 1. Схема моделей управления развитием

Вопросам моделирования достижения национальных целей посвящено достаточно много работ. В работах Д.А. Новикова, О.О. Смирновой и коллег [1, 2] рассматривается система стратегического и индикативного планирования страны. Техногенная безопасность рассматривается в работах С.Н. Васильева, Н.А. Махутова и коллег [3, 4]. В.А. Салыгин и коллеги рассматривают стратегии развития энергетики, в том числе с помощью цифровых и инновационной методов [5]. Региональные аспекты моделирования развития отражены в работах [6, 7].

Система моделей была применена при индикативном планировании достижения целей экономической безопасности страны в общей системе «Развитие страны – отраслевое развитие – предприятия – проекты – продукты».

Текущие результаты моделирования [8, 9] показывают, что многие индикаторы экономической безопасности недостижимы при инерционном или слабо-ускоренном сценариях развития.

Использование системы моделирования показывает, что происходит смена ограничивающих ресурсов развития крупномасштабных систем. Общее правило оптимизации – максимальный эффект при ограниченных ресурсах, в простейшем эвристическом правиле – поиск приоритетов P_i максимизации отношения целевого критерия \underline{G}_i к ограничивающим ресурсам \underline{R}_i

$$P_i = G_i / R_i. \quad (1)$$

Основным ограничивающим фактором как правило рассматривается финансовый ресурс. Как следствие, оптимизация финансовых ресурсов – один из основных приоритетов в управлении. В частности, при оценке инвестиционных проектов вводятся показатели NPV (*Net Present Value*) – финансовой результат проекта в целом, IRR (*Internal Rate of Return*) – предельный процентный доход, PI (*Profitability Index*) – отношение приведенного дохода к приведенным инвестициям.

Кардинальные изменения в финансовой сфере: программы количественного смягчения QE (*Quantitative Easing*) при стабилизации экономической глобализации и ограничениях при КОВИД, – обеспечили избыточное предложение финансовых ресурсов. В то же время нарастает дефицит квалифицированных кадров. По производительности труда Россия отстает от США примерно в 2 раза по показателю ВВП по ППС (Валовой внутренний продукт по паритету покупательной способности).

По данным Росстата, в начале 2025 года уровень безработицы в России составил 2,8%, что является историческим минимумом за весь период статистических наблюдений. Соответственно, основное внимание при принятии долгосрочных решений следует уделять производительности труда LP (*Labor Productivity*). Вариант расчета – отношение добавленной стоимости VA к численности занятых Em

$$LP_j = VA_j / Em_j. \quad (2)$$

Заключение

Используемый комплекс моделей многоуровневой системы позволяет рассмотреть имитационные и оптимизационные модели развития крупномасштабных систем, включая отрасли, регионы и предприятия.

Как правило, математические постановки задач (типа линейного программирования) не учитывают содержательные аспекты критериев и ресурсов. Актуальным является адаптация принимаемых решений под изменение основных критериев развития и ограничивающих факторов для применения этих моделей в условиях быстро изменяющейся среды, без возможности длительной настройки моделей и обработки исходной информации.

1. **Смирнова, О.О.** Основы стратегического планирования Российской Федерации. – Москва: Издательский Дом «Наука», 2013. – 302 с.
2. **Инструменты** индикативного планирования: стратегический менеджмент и математическое моделирование / Под ред. д.т.н. О.И. Дранко. – Москва: ЛЕНАНД, 2025. – 352 с.

3. **Васильев, С.Н.** От природно-техногенных и других угроз к устойчивому развитию / С. Н. Васильев, С. С. Гончаренко // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2020. – Т. 223, № 3. – С. 203-212. – DOI 10.38197/2072-2060-2020-223-3-203-212.
4. **Махутов, Н.А.** Обеспечение безопасности – приоритетное направление в области фундаментальных и прикладных исследований / Н.А. Махутов, Н.В. Абросимов, М.М. Гаденин // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2013. – № 3(27). – С. 46-71.
5. **Салыгин, В.И.** Обзор сценариев развития мировой энергетики / В. И. Салыгин, И. И. Литвинюк // Вестник МГИМО Университета. – 2016. – № 2(47). – С. 197-206.
6. **Дранко, О.И.** Управление развитием региона. Моделирование возможностей. / Дранко О.И., Новиков Д.А., Райков А.Н., Чернов И.В. – Москва: URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2023. – 432 с.
7. **Васильев, С.Н.** Моделирование динамики развития региона с сырьевой специализацией / С. Н. Васильев, Ф. Ф. Пашенко, В. Б. Гусев // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. – 2012. – Т. 5, № 5. – С. 52-61.
8. **Дранко, О.И.** Сценарное моделирование развития страны на основе индикативного планирования / Дранко О.И., Резчиков А.Ф., Степановская И.А., Богомолов А.С., Кушников В.А. // Проблемы управления. – 2024. – № 5. – С. 25-41.
9. **Акинфиев, В.К.** Методы и инструментальные средства управления развитием компаний со сложной структурой активов / Акинфиев В.К., Цвиркун А.Д. – Москва: ИПУ РАН, 2020. – 307 с.

***Н.В. Колесов, В.С. Тюльников, А.М. Грузликов,
Е.Г. Литуненко, Ю.М. Скородумов***

МНОГОПУТЕВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ С УПОРЯДОЧИВАНИЕМ СООБЩЕНИЙ

*ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
г. Санкт-Петербург*

Введение

Телекоммуникационные сети занимают важное место в современном мире. В работе рассматривается класс сетей с подвижными узлами,

в котором значимым подклассом являются так называемые географические сети. Их отличительная особенность состоит в доступности для каждого абонента сети знания координат всех аппаратов и, как следствие, знания топологии сети.

Важным этапом организации информационного обмена является вопрос маршрутизации сообщений, а именно построение кратчайшего маршрута доставки. Традиционно, построение маршрута решается с использованием алгоритма Дейкстры [1]. Однако для увеличения скорости и надежности доставки сообщений на практике решается задача построения нескольких вариантов маршрутов (задача многопутевой маршрутизации) [2], что и является вопросом настоящей работы.

Построение множества параллельных маршрутов для передачи сообщений

Математическая постановка решаемой задачи заключается в следующем. Предполагается, что анализируемая сеть задана направленным графом $G(E, V)$, где E – множество ребер, V – множество вершин. При этом ребра графа взвешены значениями расстояний w_i между инцидентными вершинами, где $i = \overline{1, n}$ и n – число ребер в графе. Требуется для заданной пары вершин $A, B \in V$ найти заданное (K) количество путей с минимальным числом пересечений.

Суть предлагаемого алгоритма состоит в следующем, с использованием алгоритма Дейкстры строится кратчайший маршрут из вершины A в вершину B . Далее ребра, принадлежащие этому маршруту, исключаются из исходного графа, а в полученном графе отыскивается новый маршрут с использованием модифицированного алгоритма Дейкстры (рис. 1) и имеющий минимум числа пересечений с ранее полученным маршрутом. Будем считать маршруты пересекающимися, если у них имеется хотя бы одна общая вершина.

Алгоритм повторяется заданное число раз, либо прерывается при отсутствии маршрута между вершинами. Псевдокод алгоритма многопутевой маршрутизации приведен на рис. 2.

Упорядочивание очереди сообщений при однопутевой маршрутизации

В рассматриваемой сети узлы с заданным периодом передают пакеты сообщений, которые состоят из собственных сообщений, сгенерированных передающим узлом, а также из сообщений, полученных от других узлов на предыдущем периоде, которые необходимо ретранслиро-

вать. Известно, что в общем случае различным упорядоченностям сообщений, передаваемых узлом, будет соответствовать различная оперативность доставки сообщений. В работе предлагается использовать оптимальные алгоритмы упорядочивания очередей сообщений, соответствующие различным случаям, подробно описанные в [4].

Algorithm 1 NewDijkstra(G, A, B)

```

1: Входные параметры:
    $G(E, V)$  - исходный граф,  $E$  - множество ребер,  $V$  - множество вершин
    $A, B \in V$  - вершины графа, между которыми строится маршрут
2: Выход:  $p$  - кратчайший маршрут
3: Инициализация:  $Q \leftarrow \{(A, (0, 0))\}$  - приоритетная очередь, из которой извлекается очередная
   вершина для анализа (как и в оригинальном алгоритме Дейкстры)
4: for  $Q \neq \emptyset$  do
5:    $(u, (R_u, W_u)) \leftarrow Q.extractMin();$ 
   if  $(R_u, W_u) \neq (R[u], W[u])$  continue
6:   for  $u \rightarrow v \in E$  do
7:      $(newR, newW) \leftarrow (R[u] + r[e], W[u] + w[e])$ 
8:   end for
9:   if  $newR < R[v]$  or  $newR$  is  $R[v]$  and  $newW < W[v]$  then
10:     $(R[v], W[v], prev[v]) \leftarrow (newR, newW, u); Q.update(v, (newR, newW))$ 
11:   end if
12: end for
13:  $p \leftarrow RecoverPath(prev, B)$ 
14: return  $p$ 

```

Рис. 1. Псевдокод модифицированного алгоритма Дейкстры

Algorithm 2 MultiPathRouting(G, A, B, K)

```

1: Входные параметры:
    $G(E, V)$  - исходный граф,  $E$  - множество ребер,  $V$  - множество вершин
    $A, B \in V$  - вершины графа, между которыми строится маршрут,  $K$  - число маршрутов
2: Выход:  $P = \{p_0, p_1, \dots, p_k\}, k \leq K$  - список маршрутов
3: Построение маршрута с использованием алгоритма Дейкстры:  $p_0 \leftarrow Dijkstra(G, A, B)$ 
4: Запись маршрута в список:  $P \leftarrow \{p_0\}$ 
5: Исключение из графа  $G$  ребер из пути  $p_0$ :  $G'(E, V') \leftarrow G(E, V \setminus p)$ 
6: for  $k = 1$  to  $K$  do
7:   if между вершинами есть маршрут  $A$  и  $B$  then
8:     Установка веса ребра в графе  $G'$ :  $e_i \leftarrow (r_i, w_i), \forall e_i \in E'$ , где  $r_i - 1$  - если вершина ребра
       принадлежит кратчайшему пути, иначе  $0$ ;  $w_i$  - не изменяется после удаления ребер.
9:     Установка веса вершины в графе  $G'$ :  $\forall v_j \in V : v_j \leftarrow (R_j, W_j),$ 
        $R_j, W_j \leftarrow (0, 0)$  if  $(v_j \text{ is } A)$  else  $(\infty, \infty)$ 
10:    Поиск нового маршрута:  $p_k \leftarrow NewDijkstra(G', A, B)$ 
11:    Исключение маршрута  $p_k$  из  $G'$ :  $G'(E, V') \leftarrow G(E' \setminus p_k, V)$ 
12:    Запись маршрута в список:  $P \leftarrow P \cup \{p_k\}$ 
13:   end if
14: end for
15: return  $P$ 

```

Рис. 2. Псевдокод алгоритма многопутевой маршрутизации

В качестве критерия оперативности при планировании информационных обменов используется суммарное время Δ_s доставки всех сообщений из передаваемой последовательности. При этом выражение для времени доставки Δ сообщения, находящегося на k -й позиции в очереди, при многошаговом маршруте передачи имеет вид:

$$\Delta_{[k]} = \sum_{i=1}^{r_{[k]}} (e_{[k],i}^w + e_{[k],i}^t),$$

где $r_{[k]}$ – общее число шагов маршрута, по которому передается сообщение, находящееся на k -й позиции в очереди, i – порядковый номер шага маршрута, $e_{[k],i}^w$ – время ожидания в очереди передающего узла, $e_{[k],i}^t$ – времени переноса сообщения (время от момента начала передачи сообщения до момента конца его приема) между передающим узлом и узлом-адресатом.

Упорядочивание очередей сообщений при многопутевой маршрутизации

Предполагается, что в рассматриваемом узле сети сформирована очередь сообщений для передачи некоторому единственному адресату. При этом для сокращения времени доставки предполагается использование более одного пути.

Предлагаемое решение реализуется в три этапа. На первом этапе сформированная выходная очередь сообщений упорядочивается с использованием алгоритмов [4]. На втором этапе преобразованная очередь распределяется между путями доставки с сохранением достигнутой упорядоченности и обеспечением сбалансированности нагрузки. На третьем этапе происходит восстановление исходной очереди при приеме. Сразу следует оговориться, что предлагаемое решение в общем случае является приближенным.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы многопутевой маршрутизации сообщений в телекоммуникационной сети. Приведен алгоритм построения кратчайших путей, которые имеют с оптимальным кратчайшим путем минимальное число пересечений. Получена оценка времени доставки сообщения при многопутевой маршрутизации, оценка применяется при упорядочивании сообщений по критерию минимизации суммарного времени доставки в соответствии с известным алгоритмом.

1. **Богатырев В.А., Ту Л.А., Абрамова Е.А.** Перераспределение потоков сети с многопутевой маршрутизацией // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 4(70). – С. 141 – 149
2. **Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К.** Алгоритмы: построение и анализ. М. «Вильямс», 2010. 1296 с.
3. **Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М.** Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2022. – № 6. – С. 43 – 51.

Е.В. Ку克林,¹ В.В. Потехин,² А.И. Шибалов³

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШИМИ ДАННЫМИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
¹kuklin_ev@spbstu.ru, ²Slava.Potekhin@spbstu.ru, ³shibalov.ai@spbstu.ru*

Введение

В статье рассматриваются особенности применения облачных платформ для управления большими данными в распределённых автоматизированных системах. Предлагается архитектурный подход, сочетающий возможности облачных сервисов хранения и потоковой обработки данных с модульной структурой управления, реализуемой на основе стандартов IEC 61499 и OPAS. Обсуждаются принципы интеграции виртуальных контроллеров и облачных аналитических компонентов, а также вопросы масштабируемости, интероперабельности и надёжности. Отдельное внимание уделяется перспективам адаптивного управления и удалённой реконфигурации распределённых узлов. Работа подчёркивает актуальность использования облачных технологий для построения гибких и устойчивых систем управления в условиях цифровизации промышленности и концепции Индустрии 4.0.

Внедрение открытых платформ: вызовы и решения

Современный этап развития промышленной автоматизации, обусловленный концепцией Индустрии 4.0, характеризуется экспоненциальным ростом объёмов данных, генерируемых в производственных процессах. Датчики, оборудование и операционные системы создают массивы

информации, которые требуют эффективной обработки, хранения и анализа для оптимизации производственных процессов, реализации предиктивного обслуживания и поддержки принятия обоснованных управленческих решений. Распределённые системы, позволяющие децентрализованно обрабатывать данные на множестве узлов, обеспечивают необходимую масштабируемость и надёжность для работы с большими данными. Облачные платформы, благодаря своей эластичности, экономической эффективности и глобальной доступности, становятся ключевой инфраструктурой для поддержки таких систем, предоставляя динамически распределяемые вычислительные ресурсы и упрощая интеграцию информационных технологий (ИТ) с операционными технологиями (ОТ). Такие платформы позволяют минимизировать задержки и обеспечивать линейную масштабируемость при обработке данных с сотен датчиков.

Однако внедрение облачных технологий в промышленную автоматизацию сталкивается с рядом вызовов, главным из которых является доминирование проприетарных систем в области ОТ. Эти системы создают зависимость от одного поставщика, ограничивают гибкость и затрудняют интероперабельность между устройствами и системами различных производителей. Согласно публикациям Open Process Automation Forum (ОРАФ), проприетарные архитектуры препятствуют инновациям и увеличивают затраты на модернизацию систем управления. Для преодоления этих ограничений отрасль активно переходит к открытым стандартам, которые обеспечивают бесшовную интеграцию, снижение затрат и ускорение технологического прогресса. Среди таких стандартов особое место занимает Open Process Automation Standard (ОPAS), разработанный ОРАФ, консорциумом, объединяющим более 800 организаций, включая ExxonMobil, Schneider Electric и Yokogawa. OPAS направлен на создание открытых, безопасных и интероперабельных архитектур, интегрированных с облачными платформами для эффективного управления большими данными.

Обзор стандартов

Внедрение облачных платформ для управления большими данными в распределённых системах промышленной автоматизации сопряжено с рядом технических и организационных вызовов, которые ограничивают их широкое применение. Анализ стандартов IEC 61131, IEC 61499 и OPAS выявляет ключевые проблемы, связанные с их интеграцией, производительностью, безопасностью и организационными барьерами.

Ограничения в производительности наблюдаются при высокой нагрузке облачных систем. Например, тестирование OPAS показало увеличение задержки на 120% при обработке данных с 200 датчиков, что критично для приложений, требующих реального времени [1,2]. Для IEC 61499 проблемы с обработкой событий в реальном времени, включая пропуск событий и зависания, требуют улучшений аппаратных и программных платформ.

Облачные системы уязвимы к кибератакам, включая утечки данных и сложные целевые атаки. OPAS предусматривает строгие протоколы безопасности, такие как аутентификация и шифрование через фреймворк OCF, но их внедрение остаётся сложной задачей [3]. Надёжность также вызывает вопросы: тестирование выявило задержки до 1,5 секунд при переключении на резервные системы, что недопустимо для критически важных приложений. Эти проблемы требуют разработки более надёжных механизмов защиты и резервирования.

Интеграция облачных стандартов с устаревшими системами, использующими проприетарные протоколы, представляет значительную сложность. OPAS стремится решить эту проблему через стандартизированные интерфейсы. Крупные поставщики часто сопротивляются переходу к открытым стандартам из-за экономических интересов, что замедляет их принятие.

Управление сложностью распределённых систем, особенно с микросервисной архитектурой, требует решения задач балансировки нагрузки и согласованности данных [4].

Таблица 1

Основные проблемы внедрения стандартов

| Стандарт | Ключевые проблемы | Потенциальные решения |
|-----------|---|---|
| IEC 61131 | Ограниченная поддержка распределённых систем | Интеграция с OPAS или IEC 61499 |
| IEC 61499 | Низкая производительность, сложность разработки | Оптимизация инструментов, улучшение платформ |
| OPAS | Сложности интероперабельности, безопасность | Тестирование, внедрение протоколов безопасности |

Перспективы развития облачных платформ

Облачные платформы открывают новые горизонты для промышленной автоматизации благодаря своей способности динамически адаптировать вычислительные ресурсы к потребностям системы. Одним из наиболее перспективных направлений является развитие гибридных облачных архитектур, сочетающих централизованные облачные дата-центры с edge-вычислениями. Edge-обработка данных минимизирует задержки, что критично для приложений реального времени. Исследование облачной распределённой системы управления на базе OPAS демонстрирует, что DCN могут эффективно функционировать в таких архитектурах, обеспечивая линейную масштабируемость при обработке данных с сотен датчиков [5].

Интеграция с Industrial Internet of Things (IIoT) и искусственным интеллектом (AI) представляет собой ещё одну область технологического прорыва. IIoT-устройства генерируют огромные объёмы данных, которые облачные платформы могут агрегировать и анализировать для реализации предиктивного обслуживания и оптимизации процессов. OPAS, с его платформой расширенных вычислений (ASCP), идеально подходит для внедрения AI, позволяя проводить сложные вычисления, такие как машинное обучение, непосредственно в облаке.

Концепция универсальной автоматизации предполагает создание портативных программных компонентов, совместимых с платформами разных поставщиков. OPAS и IEC 61499 играют центральную роль в реализации этой идеи за счет стандартизации интерфейсов и событийно-ориентированному управлению.

1. **Potekhin V.V., Alekseev A.P., Kuklin E.V., Misnik A.E., Khitrova Ya.D.,** Programming Of Open Distributed Industrial Systems Based on the International Standard IEC 61499, Computing, Telecommunications and Control. 2024. Т. 17. № 1. С. 10-19.
2. **Zoiti, T. Strasser, C. Sunder, and T. Baier,** Is IEC 61499 in harmony with IEC 61131-3?, IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 3, pp. 49–55
3. **Vrba, P.; Tichý, P.; Mařík, V.; Hall, K.H.; Staron, R.J.; Maturana, F.P.; Kadera, P.,** Rockwell Automation's Holonic and Multiagent Control Systems Compendium, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Vol. 41 , Issue 1, 2011 , pp. 14 – 30.

4. **Арсеньев Д.Г., Амирхоссин Б., Лядский Д.Д., Потехин В.В.,** Прогнозный мониторинг в обслуживании интеллектуальных промышленных систем, XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультиконференции. В 4-х томах. Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Волгоград, 2023. С. 230-232.
5. **Потехин В.В., Лядский Д.Д., Болотов С.В.,** Использование методов машинного обучения для предиктивного анализа при эксплуатации производственных систем, Сборник научных трудов по материалам конференции «Технологическая перспектива: новые рынки и точки экономического роста» 2021-2022. В 2-х томах. Санкт-Петербург, 2023. С. 90-100.

С.А. Мальгина В.М. Шабуров, Е.В. Панкратова, О.В. Блинова

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ РАБОТАМИ*

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-
исследовательский институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина, г. Саров,
blinova_olga_v@mail.ru*

Введение

Управление научно-исследовательскими работами (НИР) требует глубокого анализа результатов выполнения поставленных задач, сравнение их с мировым уровнем и соответствием техническому заданию. Использование в этих целях технологий искусственного интеллекта (ИИ) целесообразно, так как позволяет автоматизировано выполнить сложные задачи по анализу семантики документов, подготовить краткие аннотации, выполнить сравнение документов, подготовить информацию в удобном для пользователя виде. Современные LLM способны обработать научные статьи и сформулировать аннотации, выводы и итоги даже без

*Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах

дополнительной настройки и обучения [1]. Но качество результатов работы систем ИИ не всегда удовлетворительное и может сильно искажать смысл текста.

Применение ИИ в обработке НТД

В рамках разработки платформы для интеллектуальной обработки документации для поддержки принятия решений по управлению научными проектами создаются модули для автоматического аннотирования текстов, сравнения задания с планом с использованием LLM и систем машинного обучения [2]. Автоматизировано оценить смысл написанного текста для подготовки аннотации и ряда других задач практически невозможно без использования интеллектуальных технологий в связи с трудностью и многогранностью человеческой речи.

При этом важно помнить, что системы искусственного интеллекта в настоящее время не могут критически оценить результаты проведенного анализа или генерации, полученный результат может выглядеть убедительно и правдоподобно, но содержать фактические ошибки и сильно исказить смысл текста [3, 4]. А пользователь может ошибочно полагать, что логика ИИ сравнима с человеческой логикой и недостаточно критично относиться к полученным результатам. Особенно это важно при анализе НТД, где замена термина близким, но отличным по значению, может кардинально исказить смысл полученного результата. А анализ документации осуществляется для принятия управленческих решений и такое искажение может привести к принятию неверного решения. Методы верификации и проверки достоверности результатов генерации в настоящий момент сильно отстают от возможностей по созданию контента. Необходимо разрабатывать методы оценки достоверности, верификации, модерации результатов.

Методы верификации результатов работы ИИ

Можно предложить ряд решений, позволяющих упростить проверку достоверности данных и подготовить некоторый алгоритм для проведения таких проверок [4]. Ни одно из них не обеспечит гарантии получения качественных результатов, но существенно снизит возможность пропуска грубых неточностей и принятия решений на основе неверных данных.

1. Несколько раз формировать запрос с минимальными изменениями и сравнивать результаты. При возникновении различных ответов на одинаковые вопросы проводить дополнительное тестирование. Это можно попытаться автоматизировать.

2. Ознакомить авторов с аннотациями на их работы. Проводить обработку их замечаний.

3. Просить системы ИИ подкреплять каждый вывод прямыми цитатами из текста. Контролировать корректность цитирования. Были случаи что системы ИИ ссылались на несуществующие работы.

4. Сравнить результаты разных моделей ИИ по одной и той же работе или задаче.

5. Экспериментальным путем подбирать параметры запроса к ИИ, с указанием высоких требований к достоверности полученных результатов. Проводить оценки результата.

6. Не отказываться от проверок экспертами не только в случае неудовлетворительного результата, но определенного процента положительно оцененных работ. Сравнить результаты эксперта и ИИ.

7. Рассмотреть возможность использования более «прозрачных» методов формирования результатов.

Модерация и проверка данных генерации систем ИИ — это серьезная проблема, требующая внимания и разработки автоматизированных сервисов для проведения таких оценок. Использование предложенных выше методов требует оценки трудозатрат и ресурсов, так как их применение может быть более ресурсозатратным, чем экономия от внедрения системы автоматизированной обработки текстов в целом. результатов.

Заключение

Возможности применения LLM для обработки и анализа научной документации широки и выходят за рамки рассмотренных в этой работе задач [5]. Дальнейшее расширение их возможностей и сфер применения неизбежно. Система анализа НТД с применением сервисов ИИ и система контроля качества и модерации результатов работы таких сервисов должны быть рассмотрены как единая комплексная система, позволяющая ускорить и упростить работу пользователей по анализу документации для принятия решений о качестве выполнения НИР и поддержке инициатив.

1. **Садовская, Л.Л. Гуськов, А.Е., Косяков, Д.В., Мухамедиев, Р.И.** Обработка текстов на естественном языке: обзор публикаций // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – №. 3. – С. 66-86.
2. **Фархадов, М.П., Блинова, О.В., Давыдов, Е.Ю., Мальгина, С.А.** Построение системы поддержки принятия решений и управления процессом анализа научно-технической информации // Материалы международной конференции XXVI Харитоновские тематические научные чтения «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», – 2025. – С.153-155.

3. **Команич, Д.В., Фархадов, М.П., Куприков, О.Д., Смирнов, В.А.** Перспективы применения больших языковых моделей для задачи локальной обработки и анализа научно-технической документации // Материалы международной конференции XXVI Харитоновские тематические научные чтения «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», – 2025. – С.82-84.
4. **Лактионова, Е. Д.** К вопросу о правовом регулировании систем искусственного интеллекта в аспекте достоверности общедоступной информации //ГОУ ВПО «ДОННУ». – 2025. – С. 117.
5. **Минбалеев, А. В., Петровская, О. В.** Проблемы реализации принципа достоверности информации в условиях цифровой трансформации //Российский юридический журнал. – 2022. – №. 4. – С. 20-28.
6. **Meng, F., Wang, C.** Artificial Intelligence and Machine Learning Approaches to Text Recognition: A Research Overview // J. Math. Tech. Comput. Math. – 2024. – Т. 3. – С. 1-5.

М.В. Орда-Жигулина, А.А. Родина, Д.В. Орда-Жигулина

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА*

*Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр РАН,
jigulina@mail.ru, dinazhigulina@mail.ru, ar.rodina@mail.ru*

Введение

Актуальные задачи экологического мониторинга и мониторинга опасных явлений требуют создания гибких и надежных систем сбора и анализа данных в реальном времени. Традиционные централизованные системы мониторинга часто недостаточно приспособлены к быстроизменяющимся условиям окружающей и неоднородным характеристикам вычислительных устройств. В данной работе предложена методология организации гетерогенных вычислительных узлов децентрализованных реконфигурируемых систем мониторинга с мобильными компонентами –

*Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гос. рег. 125011200147-2

автономными робототехническими модулями. Предлагаемый подход объединяет несколько современных информационных технологий, таких как распределенный реестр, интеллектуальный анализ данных, туманные и облачные вычисления, элементы робототехники [1 – 4] в единую методологию, применение которой при разработке новых децентрализованных систем мониторинга позволит повысить надежность и снизить латентность таких систем.

Комплекс методов

Был разработан комплекс методов, направленных на снижение латентности и увеличение надежности вновь разрабатываемых децентрализованных систем мониторинга, который состоит из:

1) Метод обеспечения функционирования и снижения отказоустойчивости мобильных компонентов для систем мониторинга на базе распределенного реестра. Данный метод основан на сочетании метода формирования ограничений поискового пространства при перераспределении вычислительной нагрузки в децентрализованных системах мониторинга на основе распределенного реестра, новой онтологической модели, описывающей предметную область, и метода формирования оптимального состава группы мобильных компонентов (мобильных роботов) [5]. Мобильные робототехнические комплексы взаимодействуют через распределенный реестр, что устраняет проблемы синхронизации данных. Онтологическая модель формализует знания о состоянии окружающей среды и параметры мобильных компонентов, что позволяет оптимизировать распределение вычислительной нагрузки при анализе данных от интеллектуальных датчиков, размещенных на мобильных компонентах. Метод позволяет повысить отказоустойчивость и адаптивность системы.

2) Метод комплексирования информации от интеллектуальных датчиков мобильных компонентов системы мониторинга. Метод обеспечивает минимизацию объемов обрабатываемых, передаваемых и хранимых данных за счет формирования оптимального состава группы мобильных компонентов. Данный подход позволяет на основе исходных данных о поставленной задаче, условиях среды функционирования и функциональных возможностях имеющихся роботов автономно сформировать группу роботов, способную эффективно решить поставленную перед ней задачу мониторинга [6]. Для решения задачи формирования оптимального состава группы мобильных компонентов применяются два типа программных агентов: агент задачи (управляющий агент) и исполнительные агенты мобильных компонентов (роботов), взаимодействующие через распределенный реестр. Исполнительные агенты могут быть реализованы как «на борту» мобильных компонентов, так и в облаке ресурсов системы мониторинга, что позволяет обеспечить преимущественное ис-

пользование тех мобильных компонентов, которые могут измерять максимально возможное количество показателей с использованием установленного на борту оборудования, то есть участвовать в решении максимально возможного количества поставленных задач мониторинга.

3) Метод комплексирования информации от интеллектуальных датчиков мобильных компонентов систем мониторинга на базе распределенного реестра [7]. Метод обеспечивает высокую скорость записи, безопасное и надежное хранение пользовательских данных в гетерогенных распределенных системах мониторинга с вычислительными узлами различной мощности за счет применения распределенного реестра типа блокчейн.

Работоспособность предложенного комплекса методов была подтверждена в результате экспериментальных исследований с применением прототипа децентрализованной реконфигурируемой системы мониторинга и диагностики с мобильными компонентами.

Заключение

Предложенная методология может применяться при разработке новых децентрализованных систем мониторинга для различных областей применения с целью снижения латентности и увеличения надежности вновь разрабатываемых систем.

Научная новизна методологии состоит в комплексном сочетании нескольких перспективных информационных технологий в одной системе мониторинга: распределенный реестр для надежного хранения данных, методы интеллектуального анализа (онтологические модели) для адаптивного управления данными, инфраструктура туманных и облачных вычислений для локальной обработки большого потока данных от интеллектуальных датчиков, мобильные роботы для мониторинга. Направлением для дальнейших исследований может являться разработка методов организации мобильных компонентов (узлов «туманного и краевого слоя») с целью оптимизации энергопотребления мобильных компонентов систем мониторинга.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № ГР проекта 122020100270-3, на оборудовании ЦКП ЮНЦ РАН № 501994.

1. **Лоднева О.Н.** Аналитический обзор методов построения туманных вычислений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2020. — Т. 16, № 2. — С. 358–370.
2. **Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S.** Fog computing and its role in the internet of things [Электронный ресурс] // Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. — 2012. — P. 13–16. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/235409978> (дата обращения: 26.04.25).

3. **Кирсанова А.А., Радченко Г.И., Черных А.Н.** Обзор технологий организации туманных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9. №. 3. С. 35 – 63. DOI: 10/14529/cmse200303
4. **Пименов А.В., Федоров И.Р., Беззатеев С.В.** Построение архитектуры туманных вычислений с использованием технологии блокчейн // Информационно-управляющие системы. – 2022. – №. 5 (120). – С. 40 – 48.
5. **Мельник, Э.В., Сафроненкова И.Б.** Предметно-ориентированная онтологическая модель распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами на базе распределенного реестра // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Материалы мультиконференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года / Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Том 2. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 305-308.
6. **Капустян С.Г., Мельник Э.В.** Системный анализ требований и оптимизация состава группы роботов в задаче мониторинга окружающей среды // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». — 2024. — Т. 16, № 2. — С. 12–25. — DOI: 10.14529/mmph240202.
7. **Орда-Жигулина М.В., Пуха И.С.** Повышение надежности распределенных систем мониторинга метеорологических систем данных с помощью машинного обучения и технологий распределенного реестра // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное приборостроение — перспективы разработок, создания, развития и использования». — 2024. — С. 282–284.

МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ*

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург,
sokolov_boris@inbox.ru*

Введение

В настоящее время неопределенность сценариев развития будущего для таких высоко инерционных объектов, к которым относятся как сами искусственные (артефакты) сложные объекты (СЛО), так и их системы управления (СУ), требует перехода от традиционной методологии и технологий реактивного управления СЛО к методологии и технологиям проактивного управления перечисленными объектами и системами. При этом проактивное управление СЛО является принципиально новым видом и технологией управления, при котором в СУ синтезируются управляющие воздействия на СЛО, позволяющие заранее предотвращать предпосылки (а не последствия) возникновения нештатных (критических) ситуаций за счет целенаправленно сформированной в СУ структурно-функциональной избыточности, базирующейся на данных, информации и знаниях, полученных в результате многовариантного упреждающего прогнозирования возможных вариантов функционирования СЛО в возмущающей среде. Проактивное управление предполагает одновременную реализацию проактивного мониторинга СЛО, в ходе которого осуществляется превентивное, либо предиктивное оценивание состояний СЛО (с заранее заданными интервалами контроля, либо с непрерывным контролем и диагностированием) с целью своевременного обнаружения, локализации и предотвращения непредвиденных (расчетных, нерасчетных) нештатных (критических) ситуаций, вызванных сбоями и отказами. Однако для решения рассматриваемого класса задач управления не разработана ни методология, ни соответствующее методическое обеспечение.

Содержательное и формальное описание проблемы

Необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, программное обеспечение, позволяющие синтезировать такие технологии и программы проактивного управления многоструктурной динамикой СЛО с использованием и без использования их цифровых двойников (ЦД), а также управления реализацией указанных программ

* Исследование выполнено за счет госбюджетной НИР FFZF-2025-0020

$\langle U_*^t, S_\delta^{*tf} \rangle$, при которых выполняются следующие условия:

$$J_\theta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{<\chi, \chi>}^t, P_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \frac{extr}{<U^t, S_\delta^{*tf}> \in \Delta_g},$$

$$\Delta_g = \left\{ <U^t, S_\delta^{*tf}> \mid R_\beta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{<\chi, \chi>}^t, P_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; \right.$$

$$\left. U^t = P_{<\delta_1, \delta_2>}^{t_1} \circ P_{<\delta_2, \delta_3>}^{t_2} \circ P_{<\tilde{\delta}, \tilde{\delta}>}^{t_2}; \chi \in B \right\}, \quad (0)$$

где χ – индекс, характеризующий различные типы структур СЛО, СУ СЛО, и их ЦД, $\chi \in \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ИО}\}$ – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной и технической структурам, структурам программно-математического и информационного обеспечения (ПМО, ИО), $t \in T$ – множество моментов времени; $X_\chi^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры динамического альтернативного мультиграфа G_χ^t ; $\Gamma_\chi^t = \{\gamma_{<\chi, l, l'>}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество дуг мультиграфа типа G_χ^t , описывающих рассматриваемую развивающуюся ситуацию (РС) и отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ; $Z_\chi^t = \{z_{<\chi, l, l'>}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов мультиграфа. $F_{<\chi, \chi>}^t$ – отображения различных структур СТО, КФС, ЦД друг на друга в момент времени t , $P_{<\tilde{\delta}, \tilde{\delta}>}^t$ – операция композиции многоструктурных макросостояний с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент времени t ; U^t – проактивные управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуры СЛО, СУ СЛО, ЦД, так и процессы целенаправленного изменения их структурной динамики; J_θ – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования как СЛО, СУ СЛО, так и их ЦД, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ – множество номеров показателей; Δ_g – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров СЛО, СУ СЛО, ЦД, а также множество программ проактивного управления их структурной динамикой); B – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих реализацию вычислительных процессов, описывающих проактивное управления структурной динамикой СЛО, СУ СЛО, ЦД; \tilde{R}_g – заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени, на котором синтезируются технологии и программы проактивного управления структурной динамикой СТО, КФС, ЦД.

Методология и технологии решения проблемы

При решении сформулированной проблемы мы опирались на основные положения теории функциональных систем академика П.К. Ано-

хина и ее базовую концепцию “опережающего отражения”, которую применительно к рассматриваемым классам СЛО назвали концепцией “опережающего разнообразия”. Кроме того, за счет предложенной системно-кибернетической интерпретации данную проблему удастся решить на основе фундаментальных и прикладных результатов, полученных в междисциплинарной отрасли системных знаний, и, прежде всего, в рамках таких ее направлений как системология, теория управления, информатика и инженерия знаний (искусственный интеллект). Общая этапность решения проблемы сводится к следующему.

На первой фазе осуществляется формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний СЛО или, по-другому, осуществляется структурно-функциональный синтез нового облика СЛО, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке. Ортогональное проектирование целевого множества на аппроксимированную область достижимости логико-динамической системы, описывающей СЛО позволяет получить множество допустимых вариантов многоструктурных макросостояний СЛО (множество В. Парето). На второй фазе проводится выбор конкретного варианта многоструктурного макросостояния СЛО с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) проактивного управления переходом СЛО из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие СЛО, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого проактивного управления СЛО в промежуточных многоструктурных макросостояниях.

Заключение

Достоинство, новизна и отличия предлагаемой методологии и технологии проактивного управления состоит в том, что базируясь на фундаментальных и прикладных результатах современной теории управления и квалиметрии моделей и полимодельных комплексов можно на конструктивной основе обеспечивать полноту, замкнутость и непротиворечивость результатов, связанных с многокритериальным структурно-функциональным синтезом проактивного управления СЛО [1-2].

1. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. – 314 с.

А. Рафик, Я.Э. Мельник, Е.В. Лищенко, В.И. Волощук

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ЛОГИСТИКИ*

*Институт компьютерных технологий и информационной
безопасности Южный федеральный университет, г. Таганрог,
iamelnik@sfedu.ru*

Введение

Современные большие языковые модели (LLM) приобретают все большую значимость в сфере логистики благодаря своей способности к обработке и анализу значительных массивов структурированных и неструктурированных данных. Их применение позволяет существенно повысить эффективность ключевых логистических процессов, включая управление цепочками поставок, прогнозирование спроса, оптимизацию складских запасов и маршрутизацию перевозок [1].

Особую ценность представляет способность LLM к семантическому анализу текстовой информации, такой как транспортные накладные, складские отчеты и рыночные тенденции, что обеспечивает более точное и оперативное принятие управленческих решений. Кроме того, интеграция данных из разнородных источников и их последующая интерпретация с помощью языковых моделей открывают новые возможности для моделирования сложных логистических сценариев и выявления скрытых взаимосвязей в цепях поставок [2].

Внедрение LLM в логистические системы способствует не только автоматизации рутинных операций, но и переходу к интеллектуальному, адаптивному управлению транспортно-складской инфраструктурой, что соответствует современным требованиям к цифровой трансформации отрасли.

Основная часть

При использовании LLM в системах с обработкой большого объема данных одновременно и постоянным их дополнением ключевой проблемой является скорость обработки запросов. Это может сказаться на способности системы планирования и координирования перевозок своевременно отвечать при повышении количества обращений к ней.

* Работа выполнена при поддержке гранта в рамках программы постдоков Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета N ПД/24-02-КТ

В современных логистических системах применяются различные методы обработки данных и оптимизации маршрутов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Традиционные графовые базы данных, такие как Neo4j и Amazon Neptune, демонстрируют высокую эффективность при работе со связанными данными, обеспечивая точный учет логистических ограничений, включая дорожную сеть, погодные условия и загруженность маршрутов. Однако эти системы обладают существенным недостатком – отсутствием возможности семантического анализа текстовой информации, что критически важно при обработке транспортных накладных, складских отчетов и других неструктурированных данных [3-4].

Альтернативный подход, основанный на использовании векторных баз данных (Pinecone, Weaviate, FAISS), позволяет осуществлять быстрый поиск по семантическому сходству, но не учитывает структурные связи между объектами логистической сети. В результате такие системы демонстрируют низкую точность при маршрутизации, поскольку не способны корректно интерпретировать логистические зависимости. Попытки комбинирования векторного поиска с большими языковыми моделями (LLM), как в архитектуре RAG (Retrieval-Augmented Generation), частично решают проблему семантического анализа, но приводят к значительным вычислительным затратам из-за необходимости обработки больших объемов контекста языковой моделью. Кроме того, подобные системы остаются слабо адаптированными к динамически изменяющимся условиям [5-6].

Предлагается способ организации и поиска информации для обеспечения ускорения производительности системы. Данный способ заключается в использовании гибридной структуры, объединяющей свойства векторных и графовых представлений, которая ранее была представлена авторами [7-9]. Она будет строиться следующим образом.

Вершины будут содержать информацию о складах, магазинах и прочих точках закупки/продажи товаров (включая просто покупателей при наличии таковых), а также вспомогательную информацию о дорогах, погоде и других факторах, влияющих на доставку. Связи будут показывать для складов и торговых точек запросы на закупку, для средств передвижения и событий, влияющих на дороги, – влияние вторых на первые. Запросы будут формироваться в зависимости от наличия/отсутствия определённых товаров у вершин. Дополнительная информация будет использоваться для построения наиболее оптимального маршрута доставки, а также для его корректировки при возникновении экстренных и непредвиденных ситуаций.

Также каждая вершина графа будет векторизирована и сохранена как эмбединг. По этим представлениям можно будет проводить быстрый поиск нужного подграфа, который будет служить контекстом для LLM. Это позволит увеличить скорость поиска информации для запроса и ограничить её объём. Всё это вместе обеспечит более быстрое и стабильное функционирование системы анализа и построения логистических операций.

Предлагаемая гибридная структура, сочетающая графовое представление данных с векторными эмбедингами и LLM, позволяет преодолеть указанные ограничения по сравнению с аналогами. Графовая составляющая обеспечивает точное моделирование логистических связей и ограничений, в то время как векторные представления вершин позволяют осуществлять быстрый семантический поиск. Важным преимуществом является то, что языковая модель обрабатывает только релевантный подграф, что значительно снижает вычислительную нагрузку по сравнению с pure LLM-подходами. Это обеспечивает оптимальный баланс между скоростью обработки запросов, точностью маршрутизации и способностью адаптироваться к изменяющимся условиям.

Для подтверждения преимущества гибридной структуры был проведён эксперимент. Его целью было сравнение эффективности трёх методов поиска в логистической сети: графового, векторного и гибридного. Эксперимент проводился на основе синтетических данных, включающих 5000 узлов, представляющих собой склады, магазины и транзитные точки. Каждый узел характеризовался типом, географическим расположением, инвентарём и текстовым описанием. Для построения семантических представлений использовалась модель all-MiniLM-L6-v2, генерирующая эмбединги размерностью 384 [10]. Было сформировано 200 тестовых запросов, отражающих типичные задачи логистики – поиск складов с определённым товаром, магазинов в заданном регионе и узлов в конкретных географических зонах.

Графовый поиск основывался на близости координат, векторный – на косинусной близости эмбедингов, а гибридный подход объединял оба метода с весом 0.8 в пользу семантики. Основной метрикой оценки качества стал F1-score, учитывающий как точность, так и полноту найденных результатов. Результаты показали, что гибридный метод демонстрирует лучшие показатели по сравнению с другими подходами. Средний F1-score для графового поиска составил около 0.02, для векторного – около 0.04, а для гибридного – 0.07. Таким образом, гибридный поиск обеспечивает явное преимущество за счёт одновременного учёта географической и семантической близости. Это позволяет более точно находить релевантные узлы в сложной логистической сети. Полученные

данные подтверждают целесообразность использования гибридных методов при решении реальных задач поиска в логистических системах.

Заключение

В статье показано, что использование гибридной структуры, объединяющей графовые и векторные методы, значительно повышает эффективность логистических систем. Такой подход позволяет учитывать как структурные связи, так и семантическую информацию, обеспечивая более точный и быстрый поиск решений. Эксперименты подтвердили его преимущество по сравнению с традиционными методами. Гибридная модель способствует цифровой трансформации логистики и открывает возможности для интеллектуального управления транспортно-складскими процессами.

1. **Зеленков, Ю.А.** Управление знаниями организации и большие языковые модели / Ю.А. Зеленков // Российский журнал менеджмента. – 2024. – №3.
2. **Чарыева, Г.В.** Цифровая логистика и ее особенности / Г.В. Чарыева, О.М. Аббасова. – Наука и мировоззрение. – 2024. – №24.
3. **Никольский Д.Р.,** Барабанов В.Ф. Анализ графовых систем управления базами данных / Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко, А.М. Нужный // Вестник ВГТУ. – 2023. – №6.
4. **Казакова, Е.Д.** Анализ точности актуальных алгоритмов определения сообществ в сетях при работе с графовыми базами данных / Е.Д. Казакова // Computational nanotechnology. – 2023. – №1.
5. **Шалагин, Н.Д.** Обзор алгоритмов семантического поиска по текстовым документам / Н.Д. Шалагин // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – №9.
6. **Олейник, А.Г.** Использование rag-технологии для создания интеллектуальной информационной системы поддержки исследовательского поиска / А.Г. Олейник, А.М. Федоров, И.О. Датьев, А.А. Зуненко, А.В. Шестаков, И.Г. Вишняков // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2024. – №3.
7. **Козловский, А.В.** О подходе для автоматической генерации сюжетно связанного текста / А.В. Козловский, Я.Э. Мельник, В.И. Волощук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 160-167.
8. **Мельник, Я.Э.** О подходе создания алгоритма смены стиля текста

- на основе его семантического анализа / Я.Э. Мельник, Е.В. Лищенко, М.А. Козловская // Технологии разработки инструментальных средств ТРИС-2023. Материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Таганрог: 2023. – С. – 135-140.
9. **Волощук, В.И.** Подход к построению адаптивных систем учета объектов с использованием методов искусственного интеллекта / В.И. Волощук, А. Гарягдыев, М.А. Козловская, Я.Э. Мельник, А.Н. Самойлов// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5 (241). – С. 152-162.
10. **Ивахин, Д. Е.** Автоматический анализ текста для выявления профессиональных навыков: гибридный подход на основе TF-IDF и нейросетевых эмбедингов / Д.Е. Ивахин, Е.Ю. Андиева // Вестник науки. – 2025. – №4 (85).

М.С. Сеимов, Г.С. Филиппов, Р.А. Чернецов

ПРИЁМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ЦИФРОВЫХ И АНАЛОГОВЫХ ДАТЧИКОВ НА ПЛАТФОРМЕ «PHYSICAL COMPUTING» С ОТКРЫТЫМ ПРОГРАММНЫМ КОДОМ

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН, г. Москва,
info@imash.ru*

Введение

Современные технологии, от сложных и узкоспециализированных систем управления производственными процессами до широко распространенной бытовой электроники требуют эффективных методов обработки сигналов, получаемых от различных датчиков в реальном времени.

Во многих случаях разработка управляющих систем разного рода может столкнуться с некоторыми трудностями, в числе которых: Ограничения вычислительных возможностей; Несовершенство устройств считывания информации; Преобладание устаревшего на сегодняшний день стиля проектирования кода.

Актуальность данной работы заключается в нахождении общего подхода к решению вышеописанных проблем, что позволит существенно упростить разработку управляющих систем, а именно позволить проектировщику мыслить на уровне системы в целом, исключая (или, по крайней мере, существенно упрощая) взаимодействие с низкоуровневой логикой.

Основная часть

Для решения вышеописанной актуальной проблемы целью работы является реализация программного решения в виде набора библиотек, представляющих собой систематизацию методов приёма и обработки сигналов различных датчиков, а также проектирования всей системы в целом.

Основная часть содержит формальную постановку решаемой научной задачи, методы и подходы к ее решению, основные результаты, их новизна. В качестве основы для построения конкретных компонентов системы в библиотеке присутствуют базовые, абстрактные интерфейсы для всех основных видов объектов и компонентов, а именно: датчик (базовый интерфейс – Sensor), фильтр (базовый интерфейс – Filter), привод (базовый интерфейс – Actuator). Они предоставляют самые базовые функции, которые можно ожидать от соответствующих компонентов, и их расширение дочерними классами обеспечивает однородный и привычный синтаксис.

Схематично общая структура библиотеки представлена на диаграмме на рисунке 1.

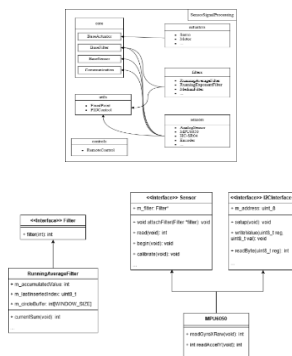


Рис. 1. Схема библиотеки и примеры расширения библиотеки своими классами

Основной упор в данной работе нацелен на прием и обработку сигналов от различных датчиков, были реализованы и протестированы следующие фильтры: Бегущее среднее с произвольной шириной окна; Бегущее экспоненциальное среднее; Медианный фильтр; Фильтр Калмана.

На рисунке 2 представлены диаграммы среднего времени выполнения каждого фильтра, а также среднеквадратичной ошибки.

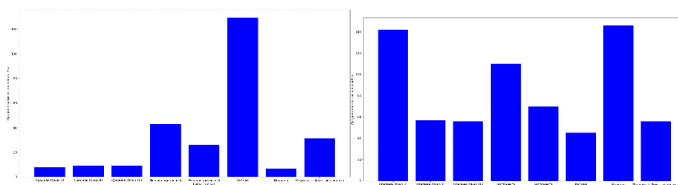


Рис. 2. Диаграммы среднего времени выполнения каждого фильтра, а также среднеквадратичной ошибки

Наиболее результативным оказался фильтр Калмана, однако он же оказался и самым долгим в работе, а также требовал подбора наиболее подходящих коэффициентов. Недалеко от него с точки зрения точности ушли фильтры бегущего среднего арифметического и комбинация медианного и экспоненциального, однако первый показал существенно меньшее время работы, и по итогам тестов выглядит наиболее предпочтительным в использовании.

В качестве проверки системы был реализован демонстрационный образец имеющий форму двухколесного устройства и обладающего следующими компонентами: гироскоп (определение текущего положения и угла отклонения от вертикальной оси), сервопривод (задание направления движения), привод заднего колеса (управление движением), фронтальный сонар (предотвращение столкновений с препятствиями), привод реакционного колеса (корректировки угла наклона) (Рисунок 3).



Рис. 3. Архитектура демонстрационного проекта

Заключение

В рамках выполнения работы была разработана библиотека для платформы physical computing Arduino, которая обеспечивает пользователя необходимой для проектирования простых управляющих систем функциональностью. Основной сферой применения такой библиотеки

является разработка управляющей логики для систем, принимающих информацию от окружающего мира, а также оказывающих на него воздействие.

1. **В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлуков** «Датчики. Справочное пособие» / Под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. – 624 с.
2. Кратко про протоколы взаимодействия в микроконтроллерах: SPI, IDC, UART, CAN – URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/798571/> (дата обращения: 20.03.2025).
3. **Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В.** цифровая обработка сигналов // Учебное пособие по дисциплине "Цифровая обработка сигналов". – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.
4. Фильтр Калмана. Алгоритм фильтрации данных – URL: <https://microtechnics.ru/filtr-kalmana/> (дата обращения: 28.03.2025).

Е.Ю. Тарасова

**ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАДАЧАМИ
В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА
ВРЕМЕННОГО ЗАПАСА**

*Санкт-Петербургский Государственный Университет,
г. Санкт-Петербург,
elizaveta.tarasova@spbu.ru*

Введение

В условиях высокой нагрузки и ограниченности вычислительных ресурсов особую актуальность приобретает задача децентрализованного адаптивного управления в системах массового обслуживания (СМО), таких как колл-центры, онлайн-консультации или сервисы поддержки. В таких системах невозможно обеспечить централизованное принятие решений в реальном времени, что требует распределённых подходов к назначению задач.

В работе предлагается распределённый алгоритм назначения задач, вдохновлённый архитектурой адаптивных мультиагентных систем [1] и

укоренённый в практическом опыте СМО, таких как колл-центры [2]. Предложенный метод использует коэффициент временного запаса, позволяющий учитывать дедлайны, характеристики задач и оценки времени обработки. Такой подход обеспечивает устойчивость к перегрузкам и позволяет уменьшить запаздывание даже в условиях ограниченного обмена информацией между агентами.

Основная часть

Предлагаемый метод основан на вычислении коэффициента временного запаса: $K_{ij}(t) = \frac{(D_i - t)}{p_{ij}}$, где D_i — дедлайн задачи i , t — текущее время, p_{ij} — прогноз времени выполнения задачи i агентом j .

В рамках децентрализованной архитектуры каждый агент получает локальную информацию о доступных задачах — например, задачах из общей очереди или переданных по соседству. Агент самостоятельно вычисляет значения K_{ij} для всех доступных ему задач и выбирает ту, для которой значение минимально. Таким образом, решение о назначении принимается на уровне агента, а не централизованного планировщика.

Механизм может быть реализован в двух вариантах: жадное распределение, при котором задача назначается агенту с наименьшим локальным K_{ij} , и локальное голосование, при котором окончательное решение принимается по минимальному K_{ij} среди конкурирующих агентов [3]. В случае, если запаздывание задачи превышает допустимый порог, инициируется адаптивная передача задачи другому агенту. Это создаёт гибкий механизм локального реагирования на перегрузки и ошибки прогнозов.

Таблица 1

Сравнение стратегий по ключевым метрикам

| Стратегия | Среднее запаздывание | Максимальное запаздывание | Максимальное ожидание |
|-----------|----------------------|---------------------------|-----------------------|
| K-Ratio | 2.26 | 8.37 | 8.39 |
| SPT | 1.44 | 15.45 | 16.96 |

Для оценки эффективности подхода была проведена симуляция мультиагентной системы с 10 агентами, работающими по децентрализо-

ванному алгоритму на основе K_{ij} . Сравнение выполнено с базовой стратегией SPT (наименьшее время обработки). Результаты сведены в таблицу 1.

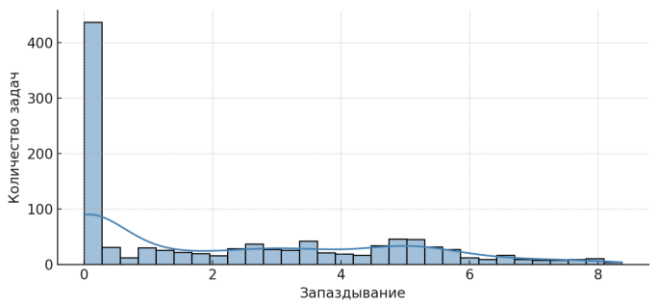


Рис. 1. Распределение запаздывания задач по стратегии K-Ratio

На Рис. 1 представлено распределение запаздывания задач, иллюстрирующее наличие тяжёлого хвоста у SPT. Рис. 2 показывает суммарную загрузку агентов при использовании K-Ratio.

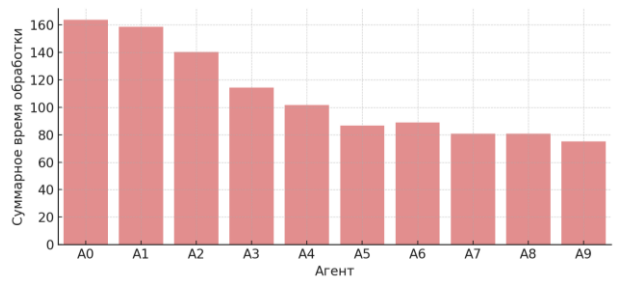


Рис. 2. Общая загрузка агентов при использовании K-Ratio

Закключение

Разработанный децентрализованный алгоритм назначения задач на основе коэффициента временного запаса обеспечивает устойчивое поведение мультиагентной системы при динамической загрузке и частичной доступности информации. Метод позволяет существенно снизить максимальные значения запаздывания и времени ожидания по сравнению с традиционными стратегиями, сохраняя простоту реализации и масштабируемость.

Проведённое моделирование подтверждает эффективность подхода в распределённой среде, типичной для современных СМО с ограничениями на коммуникацию и обработку. Перспективным направлением является расширение метода за счёт внедрения механизмов адаптивного обмена задачами и обучения локальных предсказательных моделей на уровне агентов.

1. **Granichin O., Skobelev P., Lada A., Tsarev A.** Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent systems for real time truck scheduling // Proc. Int. Conf. on Soft Computing. – 2012. – P. 282–285.

2. **Gans N., Koole G., Mandelbaum A.** Telephone call centers: Tutorial, review, and research prospects // Manufacturing & Service Operations Management. – 2003. – Т. 5, № 2. – С. 79–141.

3. **Zhitnukhin N. A., Zhadan A. Yu., Kondratov I. V., et al.** Multi-agent local voting protocol for online DAG scheduling // Computer Research and Modeling. – 2025. – Т. 17, № 1. – С. 29–44. – DOI:10.20537/2076-7633-2025-17-1-29-44.

П.М. Трефилов

ИНТЕГРАЦИЯ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
petetrfrf@ipu.ru*

Современные киберфизические системы, включая интеллектуальные транспортные средства, автономные робототехнические комплексы и распределённые сенсорные сети, функционируют в условиях ограниченной наблюдаемости и высокой неопределённости. Это требует применения алгоритмов, способных формировать устойчивую и согласованную оценку состояния окружающей среды на основе фрагментарной информации, поступающей от множества агентов. Основной вызов заключается в объединении локальных измерений при ограниченных возможностях связи и отсутствии централизованного управляющего узла.

В данной работе рассматривается реализация распределённой оценки состояния системы на основе фильтра Калмана. Предполагается, что глобальное состояние системы описывается вектором $x \in R$, эволюция которого задаётся линейной моделью:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k),$$

где A - матрица перехода, B - матрица управления, $u(k)$ - управляющее воздействие, $w(k) \sim N(0, Q)$ - шум процесса. Каждый агент i получает своё

локальное измерение:

$$z_i(k) = H_i x(k) + b_i(k),$$

где H_i - матрица наблюдения, $b_i(k)$ - шум измерения. Учитывая, что ни один агент не обладает полной информацией, предлагается реализация распределённого фильтра Калмана, в котором каждый узел выполняет локальную фильтрацию и участвует в консенсусной процедуре обмена оценками.

Алгоритм включает два этапа. На этапе прогноза агент i обновляет оценку состояния и ковариацию, на этапе коррекции используется локальное измерение.

Далее агент передаёт свою оценку соседям по коммуникационной сети N_i и усредняет полученные значения:

$$\hat{x}_i(k+1) \leftarrow \sum_{j \in N_i \cup \{i\}} w_{ij} \hat{x}_j(k+1), \sum_j w_{ij} = 1$$

Весовые коэффициенты w_{ij} могут определяться заранее или адаптироваться на основе текущей оценки качества измерений (например, следа ковариационной матрицы). В результате формируется устойчивая, итеративно сходящаяся схема фильтрации, обеспечивающая близость локальных оценок к истинному состоянию системы.

Экспериментальные исследования проводились в среде имитационного моделирования с 12 автономными мобильными агентами, каждый из которых был оснащён GPS и IMU и имел ограниченное количество соседей по связи. Результаты показали, что при использовании распределённого фильтра Калмана достигается точность локализации, сопоставимая с централизованной системой (с отклонением менее 5 %), при этом объём межагентного обмена уменьшается в 3-4 раза. Отмечена высокая устойчивость алгоритма при временных потерях связи и частичной недоверности измерений.

Дополнительно была проведена оценка отказоустойчивости системы в условиях, когда часть узлов передаёт искажённые или шумовые данные. Для повышения надёжности применялась стратегия взвешивания информации по остаточному шуму:

$$r_i(k) = z_i(k) - h_i \hat{x}_i(k)$$

где величина $\|r_i(k)\|$ использовалась как индикатор достоверности измерения. В экспериментах такая схема позволяла поддерживать корректную оценку даже при нарушении корректности данных на 30 % узлов.

Предложенный подход демонстрирует, что даже при простом линейном предсказании и локальных измерениях можно обеспечить эффективное распределённое управление. Алгоритм не требует полной синхронизации и легко адаптируется под различные топологии взаимодействия - от кольцевой до динамически меняющейся сетевой структуры.

В перспективе планируется переход к расширенному фильтру Калмана (EKF) для применения в нелинейных системах и интеграция механизма динамической доверительности, который позволит автоматически

исключать узлы с низкой корреляцией между прогнозом и наблюдением. Это особенно актуально для задач навигации в условиях внешнего воздействия, например, при наличии помех, обрывов GPS или преднамеренных атак на сеть.

Таким образом, распределённая реализация фильтра Калмана не только сохраняет основные преимущества классической схемы (оптимальность при линейных допущениях и гауссовских шумах), но и обеспечивает структурную устойчивость в условиях ограниченной связи и децентрализации. Это делает подход эффективным инструментом для построения интеллектуальных распределённых систем управления, обладающих высокой степенью автономности и способностью к самоорганизации.

1. **Трефилов П.М., Романова М.А.** Формирование достоверной навигационной информации в задачах ориентации и навигации автономных робототехнических устройств с использованием инфраструктуры интеллектуальной транспортной среды // Управление большими системами: сборник трудов. – 2023. – Вып. 106. – С. 71–95.
2. **Трефилов П.М.** Алгоритм интеграции сенсорных данных для оценки состояния автономных роботов в интеллектуальной транспортной среде // Управление большими системами. – 2024. – Вып. 112. – С. 257–273.

М. П. Фархадов, Е.Ю. Давыдов, С.В. Павлов, О.В.Блинова

УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМИ ПРОЕКТАМИ: ПЕРЕХОД ОТ ЛОКАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДОКУМЕНТАЦИИ К РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИНТЕРАКТИВНЫМ СИСТЕМАМ *

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
Всероссийский научно-исследовательский институт технической
физики имени академика Е. И. Забабахина, г. Саров
blinova_olga_v@mail.ru*

Введение

Ведение научно-исследовательского проекта требует подготовки и

* Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах

обработки большого количества научно-технической документации (НТД): это технические задания, отчеты, проектная документация, протоколы, материалы публикаций и т. д. Подготовка и проверка таких объемов документации — это большой труд, занимающий много времени у высококвалифицированных специалистов [1, 2]. В настоящий момент весь цикл работы с документами выглядит крайне неэффективным. Сначала одна организация тратит время и силы для приведения информации по ходу научного проекта в стандартный формат, затем другая занимается считываем и обработки информации. И составители, и получатели способны проанализировать содержание документа, а вот сделать это автоматизировано сложно из-за богатства и многозначности естественного языка.

Новые форматы передачи данных могут быть эффективнее и уже частично задействуются в виде заполнения онлайн форм при подаче материалов или регистрации на мероприятия (например, система управления конференциями *iconfu*), но это маленькая часть от реальных возможностей, которые предоставляют современные информационные технологии.

Перспективы использования программных платформ

Необходимо разрабатывать онлайн платформы для ведения научных проектов, доступ к которым был бы у всех участников НИР, были бы созданы формы для учета исполнителей, для представления данных в заданных форматах, автоматизированного формирования документации, доступа и заказчиков и исполнителей к обработанной и структурированной информации, автоматизированного анализа и аннотирования, сравнения документов, удобных форматов для общения пользователей между собой.

При разработке такой системы важно помнить, что данные должны быть тщательно защищены от любого несанкционированного доступа, повреждения или потери. Это должна быть система с изолированными локальными модулями для подготовки, обработки и анализа информации в рамках одного предприятия и коммуникативного контура, обеспечивающего связь между предприятиями, передачу документации и других сведений, использование унифицированных форматов и правил подготовки, подготовленных шаблонов, и таким образом позволяющего получить сводную информацию о ходе выполнения проекта.

На российском рынке существует уже несколько систем управления проектами, ориентированных прежде всего на ведение научно-исследовательских проектов, таких как AcademicLine, ряд решений компании NAUMEN, БИТ.НАУКА и т.д.[3] Эти системы представляют богатый и интересный функционал, но все же ориентированы в первую очередь на

контроль выполнения задач, распределение ресурсов, контроль формальных критериев, но не на анализ смысла полученных результатов и не учитывают многие форматы документации. Нужны системы, ориентированные на сбор, хранение и анализ НТД и на глубокий семантический анализ результатов.

Обработка данных

В рамках работы над системой анализа НТД в рамках ведения научных проектов при обработке документации возникает много задач по распознаванию метаданных, к которым достаточно сложно разработать программные системы распознавания [4]. Например, такой является задача распознавания авторов статей. Традиционно указывают только фамилию и инициалы автора. Авторы в процессе работы над одним проектом или одной тематикой могут менять фамилии, имена и места работы. В настоящий момент такие связи очень сложно отследить. Нужны формы, шаблоны и программные продукты для написания статей, позволяющие легко и быстро представить данные в заданном формате и преобразовать их. Когда начинается научно-исследовательский проект сведения об исполнителях обычно уже где-то хранятся в формализованном виде, при передаче данных о публикации эти сведения могли бы передаваться в специальном формате независимо от параметров оформления документа, например в формате json. [5,6] Можно перейти к формату создания статей к формату, более похожему на создание web страницы – с замещающими надписями по рисунку, формуле или графику, с удобным конструктором, с учетом необходимости программной обработки и т.д.

Заключение

НТД содержит самые передовые сведения о достижениях науки, но обработка их стандартными средствами, подходящими для всех текстовым документам, приводит к значительным трудозатратам на поиск и анализ информации. Авторы всех ресурсов в сети понимают насколько важно, чтобы их тексты обрабатывались поисковыми роботами (иначе их не увидят пользователи), такое же понимание необходимости адаптации документов для их обработки с использованием программных средств должно формироваться у авторов научных работ. Эту задачу необходимо решать, разрабатывая программные средства для обработки уже существующей документации, но и подготавливая новые работы к успешной автоматизированной обработке, переходя к использованию комплексных интерактивных программных средств для представления материала в за-

данном формате без потери качества и с удобными средствами коммуникации и анализа.

1. **Давыдов, Е.Ю., Мальгина, С.А., Фархадов, М. П., Блинова, О. В.** Построение системы для комплексной интеллектуальной обработки научно-технической документации / Материалы 8-й Международной научной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2024, Владикавказ). – М.: ИПУ РАН, – 2024. – С. 87-90.
2. **Блинков, Ю. А., Панкратов, И. А.** Документо-ориентированное хранение и обработка научных публикаций /Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – №. 4. – С. 28-36.
3. **Gubanov, D.A., Kuznetsov, O.P., Kurako, E.A., Lemtyuzhnikova, D.V., Novikov, D.A., Chkhartishvili, A.G.** Information system for the analysis of scientific activity (ISAND) in the field of management theory // Problems of management. – 2024. – Vol. 3. – pp. 42-65.
4. **Команич, Д.В.** Автоматический анализ текстовой информации // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 108, – Ч. 12. – С. 67-71
5. **Команич, Д.В., Фархадов, М.П., Куприков, О.Д, Смирнов, В.А.** Перспективы применения больших языковых моделей для задачи локальной обработки и анализа научно-технической документации // Материалы международной конференции XXVI Харитоновские тематические научные чтения «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», –2025. –С.82-84.
6. **Andreichev, M.D., Gafurova, P.O., Elizarov, A.M., Lipachev, E.K.** Replenishment of metadata of documents of mathematical digital retro collections by the method of semantic networks // Scientific service on the Internet: proceedings of the XXIII All-Russian Scientific Conference. – 2021. – pp. 22-33.

АНАЛИЗ SCADA-ПРИЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург,
hohlovskij_vn@spbstu.ru*

Введение

Ни одна интеллектуальная система не может функционировать без интеграции с другими информационными и управляющими системами, поэтому необходимо предусмотреть возможность обмена данными с различными подсистемами в иерархии средств автоматизации на предприятии.

В этом контексте семантическая интероперабельность приобретает особенно важное значение как средство взаимодействия между системами и метод реализации онтологического проектирования [1,2]. Когда взаимодействующие системы имеют разные представления о знаниях или по-разному интерпретируют цели, понятия предметной области или контекст, они не смогут прийти к взаимопониманию относительно сообщений друг друга. В некоторых ситуациях их модели знаний, цели, предметные области и контексты могут перекрываться, что приводит к низкому уровню общего понимания. Это может вызвать неправильное истолкование сообщений друг друга из-за возможности получения совершенно разных результатов вследствие незначительных расхождений в значении схожих понятий, используемых в сообщениях. Рассматриваемые ниже материалы являются продолжением работы [3].

Задача обеспечения семантической интероперабельности

Семантическая интероперабельность достигается благодаря использованию стандартов и методов, которые обеспечивают семантическое структурирование и описание данных, что позволяет системам распознавать типы данных, их значения и взаимосвязи между ними. Один из методов основан на использовании графов знаний [4]. Благодаря этому системы могут успешно обмениваться информацией.

Преимущества, которыми обладает методология обеспечения семантической интероперабельности, изложены в [5].

Рассмотрим построение онтологии характеристик SCADA-систем. Ниже приведен пример, показывающий иерархию классов онтологии, а

также свойства объектов, что в целом следует рассматривать как базовый вариант онтологии характеристик SCADA-систем.

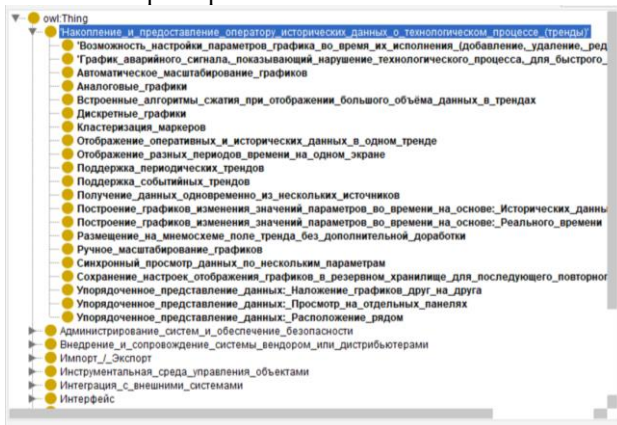


Рис. 1. Состав класса «Накопление и предоставление оператору...» как пример иерархического описания в онтологии

Оценка онтологии касается проверки ее функциональности, включая демонстрацию ее непротиворечивости. Предложение оценивается с использованием механизма рассуждения (например, Pellet, который входит в инструментальную систему Protégé) и проверяет согласованность в отношениях подклассов и классов, отношениях экземпляров с классами, связи экземпляров со свойством и классами. Такие возможности создают условия для разработки интеллектуальных систем работы с характеристиками SCADA-систем, основанных на формализации семантики.

Одна из традиционных задач, решаемых SCADA-системами, состоит в получении данных реального времени от устройств более низкого уровня - обычно это промышленные контроллеры [6], тем самым реализуется доступ к данным реального времени.

Реализация и доступ к данным реального времени

Использование производственной базы знаний при работе с данными реального времени связано с решением задач, которые характерны для АСУ ТП: определение периода дискретизации и объема данных, передаваемых в единицу времени, определение требований к точности, алгоритмам предобработки и т.п. Подготовка таких данных для базы знаний проводится с использованием SCADA-системы.

В качестве компонентов реализованной системы рассматриваются промышленные контроллеры Owen и Modicon, в качестве OPC-серверов — Owen OPC-сервер и OPC Factory Server, в качестве SCADA-систем —

Альфа-платформа и Citect SCADA, база знаний представлена в форме RDF-триплетов.

Семантическая интероперабельность обеспечивается программой в C#, которая использует модель RDF. Для работы с RDF-файлами была использована библиотека dotNetRDF. Это позволяет хранить данные в базе знаний и обеспечивает возможность их интеграции с другими системами. Приложение принимает и записывает данные из файла, содержащего исторические данные, в базу знаний и использует вышеописанную онтологию для стандартизации и описания данных. В программу загружается RDF-файл онтологии объекта управления, в соответствии с ним обрабатываются датасеты из входного файла, таким образом достигается единообразное представление информации.

Благодаря применению этой методологии достигается семантическая интероперабельность между различными системами. Это гарантирует унифицированный обмен данными, улучшает коммуникацию между системами и даёт возможность продуктивно использовать информацию для анализа и принятия решений.

1. **Загорулько, Ю.А.** Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования / Ю.А. Загорулько, Е.А. Сидорова, Г.Б. Загорулько, И.Р. Ахмадеева, А.С. Серый // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). – С.500-520. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.
2. **Lambrix, P.** The Materials Design Ontology / P. Lambrix, R.Armiento. – 2024. – 20 p. – Текст : электронный <https://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj3037.pdf>.
3. **Шкодырев, В.П.** Семантическая интероперабельность SCADA-приложений / В.П. Шкодырев, В.Н. Хохловский, И.Ю. Бурячек // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультиконференции. В 4-х томах. Ред.: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград, 2023. – Т.2. – С. 96–99.
4. **Zhong, L.** A Comprehensive Survey on Automatic Knowledge Graph Construction / L. Zhong, J. Wu, Q. Li, H. Peng, X. Wu // ACM Computing Surveys. – 2023. – vol. 56. no. 4. – pp. 1–62.
5. **N.M.Hamdan.** Towards a Reference Architecture for Semantic Interoperability in Multi-Cloud Platforms. – 2023.
6. **Борисов, Е.А.** Использование унифицированного подхода для разработки SCADA-приложений / Е.А. Борисов, В.С. Олейников, В.Н. Хохловский // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультиконференции. В 4-х томах. Ред.: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград, 2023. – Т. 2. – С. 57–59.

РАЗДЕЛ 3
ПРОБЛЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ
И ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ
РЕСУРСОВ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАЗМЕЩЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПЛИС РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону,
dichenko@sfedu.ru,*

²НИЦ СЭ и НК, Таганрог, jotun@inbox.ru

В настоящее время реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) [1] на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) успешно применяются для решения задач математической физики, криптографии, машинного обучения, цифровой обработки сигналов и многих других. Благодаря адаптации вычислительной структуры к информационному графу решаемой задачи [2], РВС демонстрируют высокую реальную производительность (более 50% от пиковой), в то время как реальная производительность традиционных высокопроизводительных систем на базе центральных и графических процессоров не превышает 10-15%. Такая эффективность РВС, как правило, обеспечивается за счёт работы на высоких по меркам ПЛИС тактовых частотах (выше 300 МГц) при использовании не менее 60% аппаратного ресурса.

Однако время разработки прикладных программ для современных РВС, обеспечивающих высокую реальную производительность, даже высококвалифицированными специалистами-схемотехниками составляет, как правило, от нескольких месяцев до года (иногда и больше). Это обусловлено не только применением низкоуровневых языков описания цифровых схем, таких как VHDL или Verilog, но и синтезом вычислительной структуры, оптимальной по композиции двух параметров: объёму занимаемого аппаратного ресурса (утилизации) и тактовой частоте. При этом стандартные средства САПР [3,4] автоматически не обеспечивают требуемых тактовых частот в вычислительных структурах с высокой утилизацией аппаратного ресурса.

В современных методологиях проектирования для ПЛИС [5-7] процесс оптимизации вычислительной структуры выполняется вручную путём разработки топологических ограничений. При этом время разработки топологических ограничений может быть сопоставимо со временем разработки самой вычислительной структуры, а иногда может и превышать его. Количество примитивов в ПЛИС, которые необходимо обработать, составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч штук. Более того, с каждым новым поколением степень интеграции ПЛИС неуклонно растёт,

а при переходе на новую элементную базу время разработки имеет тенденцию к увеличению. Поэтому разработка методов автоматизации процесса создания топологических ограничений при решении вычислительно трудоёмких задач на РВС является особо актуальной задачей.

Предлагается метод размещения вычислительных структур, в котором топологические ограничения накладываются на примитивы ПЛИС с учётом функциональных зависимостей между ними. При этом пространственное положение функциональных узлов вычислительных структур в поле ПЛИС определяется на основе типовых схем размещения, свойственных предметным областям решаемых задач. Также данный метод учитывает архитектурные и геометрические особенности ПЛИС.

При разработке топологических ограничений сначала выполняется размещение функциональных узлов и производится проверка возможности их функционирования на целевой тактовой частоте. Затем осуществляется мультиплицирование функциональных узлов в соответствии с выбранной схемой и стратегией размещения.

Для достижения базовых целевых характеристик производительности и времени синтеза в рамках метода предлагается использовать три стратегии разработки схемы размещения.

Для быстрого синтеза параллельно-конвейерной программы (производительность РВС на уровне 50% от максимальной для задач предметной области), применяется стратегия жёсткого размещения. Если необходим баланс между длительностью разработки и производительностью (50-75%), то применяется стратегия полугибкого размещения. Для достижения максимальной производительности (75%-100%) используется стратегия гибкого размещения, однако время разработки топологических ограничений в данном случае будет наибольшим. В случае выявления ошибок схема размещения корректируется, и цикл разработки повторяется до достижения требуемых характеристик.

Для автоматизации предлагаемого метода в НИЦ СЭ и НК разрабатывается препроцессор топологических ограничений ПЛИС «ТС-Creator» [8], который позволяет генерировать в автоматическом режиме файлы топологических ограничений при выбранной схеме размещения, исключая влияние человеческого фактора.

Исследования были проведены при разработке прикладных программ решения ряда задач для реконфигурируемого компьютера «Терциус-2» [9]. Результаты исследований показали, что предлагаемый метод размещения вычислительных структур на ПЛИС позволяет сократить время разработки эффективных прикладных программ для РВС до трёх раз. Кроме того, данный метод за счёт применения различных стратегий размещения позволяет получать приложения, которые от полутора раз

производительнее, чем приложения, созданные САПР в автоматическом режиме компиляции.

В настоящее время развиваются эвристические алгоритмы разработки схем размещения вычислительных структур в ПЛИС, дальнейшее внедрение которых в «ТС-Creator» позволит еще больше повысить автоматизацию синтеза вычислительных структур и сократить время разработки высокопроизводительных параллельно-конвейерных программ для РВС.

1. **Каляев И.А., Дордопуло А.И., Левин И.И., Федоров А.М.** Развитие отечественных многокристалльных реконфигурируемых вычислительных систем: от воздушного к жидкостному охлаждению // Труды СПИИРАН. – Санкт-Петербург: Изд-во СПИИРАН ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 2017. – №1(50). – С. 5-31. – DOI: 10.15622/sp.50.1.
2. **Каляев А.В., Левин И.И.** Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М.: Янус-К, 2003. – 380 с.
3. Vivado Overview. – URL: <https://www.amd.com/en/products/software/adaptive-socs-and-fpgas/vivado.html> (дата обращения: 08.11.2024).
4. FPGA Design Software – Quartus Prime. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime.html> (дата обращения: 08.11.2024).
5. Vivado Design Suite User Guide: Using Constraints (UG903). – URL: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug903-vivado-using-constraints> (дата обращения: 20.11.2024).
6. Vivado Design Suite User Guide: Design Analysis and Closure Techniques (UG906). – URL: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug906-vivado-design-analysis> (дата обращения: 20.11.2024).
7. Intel Quartus Prime Standard Edition User Guide: Design Constraints. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683492/18-1/constraining-designs.html> (дата обращения: 21.11.2024).
8. **Диченко А.А., Сорокин Д.А., Левин И.И.** Принципы размещения вычислительных структур на ПЛИС реконфигурируемых вычислительных систем // Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft. – 2024. – № 79. – С. 54-63. – DOI: 10.5281/zenodo.11127391.
9. Терциус-2 | НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров. – URL: <https://superevm.ru/index.php?page=tertsius-2> (дата обращения: 14.01.2025).

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ РЕСУРСНОЙ СТОИМОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва,
anna_klimenko@mail.ru*

Введение

В настоящее время одной из интенсивно развивающихся тенденций в области распределенных вычислений является реализация краевых вычислений на основе сообществ ресурсно-ограниченных автономных устройств (например, группы и рои БЛА, сети датчиков). Особенный интерес представляет сценарий, когда возникает необходимость распределенного выполнения вычислительной задачи (ВЗ) [1,2]. Данное исследование посвящено разработке математической модели планирования вычислений для систем на основе ресурсно-ограниченных устройств с ограничением на время выполнения задачи в условиях применения концепции краевых/туманных вычислений. Новизну предлагаемой модели составляет учет ресурсной стоимости информационных обменов между задачами, размещения задач по узлам, а также непосредственно процедуры распределения вычислительных ресурсов. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают актуальность введенных параметров и их учета.

Модель распределения вычислительных ресурсов с учетом ресурсной стоимости передачи данных и процедуры планирования

Полагаем, что заданы: множество графов задач, реализующих одну пользовательскую задачу с возможностью выбора для решения: $G_I = \{\{G_{Is}\}_v\}$, $G_{Is} = \{g_j, R\}$, где G_{Is} – ациклический орграф, g_j – ресурсные требования задачи, включая прием и передачу данных в сеть; R – множество ребер, взвешенных значениями объемов передаваемых данных между задачами [байт]. R также может быть описано ранее введенной матрицей смежности V , определяющей объемы информационных обменов между задачами.

В рамках $\{G_{Is}\}_v$ графы отличаются значениями g_i и весами g_i , матрица смежности задач одна. Каждое множество $\{G_{Is}\}_v$ описывает семейство графов, семейства могут иметь различную матрицу смежности.

Граф доступного фрагмента сети представляется неориентированным графом $G_2 = \{Y, C\}$, $Y = \{y_i\}$ – известные характеристики узла,

$i=1..M$; $VC = \{vc_{kl}\}$ – скорости каналов связи, $k=1..Z$, $l=1..Z$, где M – количество узлов подлежащих рассмотрению, Z – количество каналов связи.

Рассмотрим переменные математической модели ИПРВР.

- Вычислительная сложность ИПРВР g_r .
- Матрица назначения подзадач ВЗ на устройства:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

где $a_{ij} = \begin{cases} t_{ij}, & \text{если задача } j \text{ назначена на узел } i, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$

t_{ij} – время назначения задачи j на узле i .

Ранее введенная матрица назначений задач на узлы H также может быть получена из матрицы A соответственно:

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если задача } a_{ij} \neq 0, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

- Матрица распределения ресурсов вычислительных устройств:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nm} \end{bmatrix},$$

где u_{ij} – количество вычислительных ресурсов, выделяемых устройством i для решения задачи j , $0 \leq u_{ij} \leq 1$.

- множество Ro маршрутов передачи данных между задачами, закрепленными за узлами, $Ro = \{Ro_{jk}\}, j \leq N, k \leq N$.

Кроме того, вводятся дополнительные матрицы, которые также будут использованы в качестве переменных.

- A_Φ , которая представляет собой матрицу A , расширенную моментами времени передачи данных для всех узлов, принимающих участие в вычислениях.

- U_Φ , которая представляет собой расширенную матрицу U значениями ВР выделенными для передачи данных.

В общем случае, имеется множество ограничений $constr = \{constr_k\}$, которые формируются на основании особенностей используемых вычислительных устройств. Также обязательными будем считать следующие ограничения:

Время начала выполнения j -й задачи на i -м устройстве не может быть меньше, чем время окончания предшествующих задач и время передачи данных по сформированному маршруту Ro_{kj} :

$$\forall t_{ij}^\Phi, t_{ik}^\Phi \text{ из } A_\Phi \max \left(\left(t_{ik}^\Phi + \frac{g_k^\Theta}{u_{ik}^\Phi v_l} \right) + \tau(Ro_{kj}) \right) \leq t_{ij}^\Phi, \text{ где } \tau(Ro_{kj}) -$$

время передачи данных по маршруту от задачи k к задаче j , $i, l \in [1..M]$, g_k^Θ – вычислительная сложность задачи, предшествующей задаче i в

графе Θ задач, полученном путем модификации исходного графа задач с учетом маршрутов передачи данных.

Каждый вычислительный узел сети не должен бы перегружен, т.е. загруженность его процессора должна быть менее 100%. При этом, если вычислительный узел участвует в транзите данных, такая нагрузка тоже учитывается и суммируется с нагрузкой по решению В3.

$$\forall u_{ij}^{\Phi} \text{ из } U_{\Phi} \sum_{j=1}^N u_{ij}^{\Phi} \leq 1.$$

Ограничение на время выполнения В3:

$$\forall i, j, \max\left(t_{ij}^{\Phi} + \frac{g_j^{\Theta}}{u_{ij}^{\Phi} p_j}\right) \leq T_0$$

Результатом процесса распределения вычислительных ресурсов является принятие решения о выборе таких значений переменных A , U , Ro , A_{Φ} , U_{Φ} , g_r таких, что:

$$I = \min_{A, U, Ro, A_{\Phi}, U_{\Phi}, g_r} \prod_{z=1}^{|S_0|} \mu(s'_{0z} s_z) \prod_{x=1}^{|P_t^0|} \prod_{l=0}^{M-1} \mu(p'_{0[x+l \cdot |P_t^0|]} p_{[x+l \cdot |P_t^0|]}) + \alpha(g_r)$$

Заключение

В данном исследовании предложена новая модель процесса распределения вычислительных ресурсов, которая отличается от аналогов учетом вычислительной сложности распределения ресурсов и учетом вычислительной сложности транзита данных между задачами. Такая модель актуальна для групп ресурсно-ограниченных устройств, поскольку позволяет учитывать актуальное использование ресурсов. Проведенное экспериментальное исследование показывает целесообразность использования предложенной модели.

1. **Jingke Tu, Lei Yang, and Jiannong Cao.** 2025. Distributed Machine Learning in Edge Computing: Challenges, Solutions and Future Directions. *ACM Comput. Surv.* 57, 5, Article 132 (May 2025), 37 pages. <https://doi.org/10.1145/3708495>
2. **P. Peng et al.,** "Blocked Job Scheduling and Redundant Computing Resource Allocation in Edge Computing Systems," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 11, pp. 15572-15586, 1 June1, 2025, doi: 10.1109/IJOT.2025.3530478.

АНАЛИЗ РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ ЛАМАРКА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва,
anna_klimenko@mail.ru*

Введение

В настоящее время одной из интенсивно развивающихся тенденций в области распределенных вычислений является реализация краевых вычислений на основе сообществ ресурсно-ограниченных автономных устройств (например, группы и рои БЛА, сети датчиков) [1,2]. В рамках данного исследования рассмотрен случай, когда в рамках сообщества автономных и ограниченных в ресурсах устройств возникает необходимость распределенного решения вычислительной задачи и, соответственно, планирование распределенного вычислительного процесса.

Анализ публикаций показал, что результаты исследований в области применения меметичных алгоритмов противоречивы и в основном посвящены сравнению времени сходимости и достигаемой при этом точности [3]. На этом основании можно сделать предварительные выводы о том, что за счет локальных улучшений и интеграции ламарковской эволюции в эволюцию Дарвина ожидается общее снижение ресурсоемкости получения решений достаточной точности.

Постановка задачи планирования вычислений и разработка алгоритма на основе интеграции ламарковской и дарвиновской эволюций

Даны:

- Гетерогенное множество вычислительных узлов, с полносвязной коммуникационной средой. Каждый узел характеризуется производительностью P_i и некоторым средним энергопотреблением на процессорную операцию e_i , а также максимальным запасом энергии E_{max_i} .
- Множество задач $G=\{X\}$, где $X=\{x_i\}$ – вычислительные сложности, млн.проц.операций.
- Переменные представлены матрицей A с бинарными значениями, означающими закрепление задач за узлами:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Где:

$$a_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{если задача } n \text{ расположена на узле } m \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

В качестве ограничения для модели были введены:

- Время выполнения описанного комплекса задач - T
- Ограничение на загруженность каждого узла:

$$\frac{T_k}{T} < 1, \forall k, \quad (3)$$

где: T_k – время занятости k -ого узла

- Возможный максимальный расход электроэнергии узла:

$$\forall m \ E_m < E_{max_m}, \quad (4)$$

Энергозатраты каждого узла рассчитываются следующей формулой:

$$E_m = \left(\sum_{k=1}^n a_{km} * x_k \right) * e_m, \quad (5)$$

В качестве показателей эффективности распределения вычислительных ресурсов выбирается энергозатраты системы и выравнивание вычислительной нагрузки. Соответственно, критерии оптимизации будут иметь вид:

$$L_{avg} = \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M \frac{T_k}{T} \right) \rightarrow MIN, \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M E_m \rightarrow MIN \quad (7)$$

Экспериментальное исследование ресурсной эффективности эволюционных принципов Ламарка

Для проведения экспериментального моделирования использовались следующие данные:

- Массив задач: 250 задач со сложностью от 500 до 5000 млн оп-й,
- Массив исполнителей: 10 узлов с производительностью, назначенной случайным образом, от 500 до 5000 млн оп-й/с и энергопотреблением от 20 до 100 мДж/с.

Для решения задачи был выбран алгоритм NSGA-II, каждая особь (хромосома) в генетическом алгоритме представляет собой распределение задач между исполнителями. Алгоритм реализован со следующими параметрами: размер популяции = 50 особей, вероятность скрещивания двух особей = 90%, вероятность мутации = 10%, ограничение по времени работ роя = 100 секунд.

Для реализации NSGA-II с принципами Ламарковской эволюции, была добавлена возможность локального поиска (метод наискорейшего

спуска). Результаты, по данным серии в 1000 экспериментов, представлены на рис. 1.

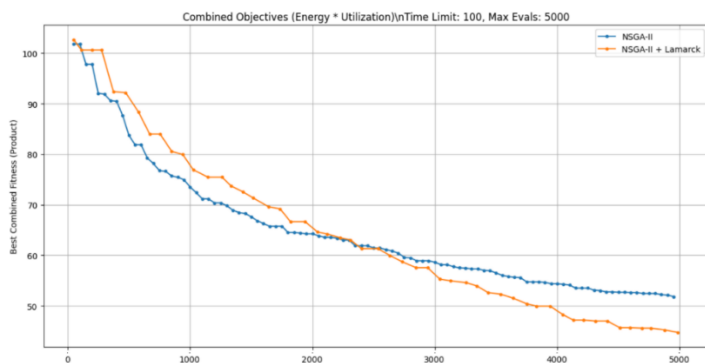


Рис. 1. 5 итераций ламарковского улучшения с вероятностью применения 0,2

На рис. 1 с выбранными параметрами (0,2 – вероятность применения ламарковского улучшения особи и 5 итераций этих улучшений) получено улучшение точности решения относительно простого ГА, но начиная с 2400 вызовов фитнес-функции. На меньшем количестве вызовов фитнес-функции использование эволюционных принципов Ламарка не будет целесообразным, поскольку не позволяет получить результат более точный, чем ГА.

Заключение

Основным результатом исследования является частичное подтверждение выдвинутой гипотезы для выбранных параметров моделирования. При этом интеграция дарвиновской и ламарковской эволюций может быть целесообразна для ограниченного ряда случаев и, следовательно, необходимо дальнейшее исследование с целью поиска областей параметров, для которых есть целесообразность использования меметичных алгоритмов, а также автоматизации принятия решения о выборе алгоритмов с точки зрения ресурсной стоимости планирования.

1. **Tu J., Yang L., Cao J.** Distributed machine learning in edge computing: Challenges, solutions and future directions // ACM Comput. Surv. 2025. Vol. 57, № 5. P. 1–37.
2. **Zhang C., Yang J.** Multi-Tree Genetic Programming with Elite Recom-

bination for dynamic task scheduling of satellite edge computing // Future Gener. Comput. Syst. 2025. Vol. 166, № 107700. P. 107700.

N. I. Kurniati, A. Rahmatulloh, and D. Rahmawati, “Perbandingan Performa Algoritma Koloni Semut Dengan Algoritma Genetika – Tabu Search Dalam Penjadwalan Kuliah,” Comput. Eng. Sci. Syst. J., vol. 4, no. 1, p. 17, 2019.

В.Б. Коваленко, Д.А. Сорокин

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ДАННЫХ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, г. Таганрог,
pharaonovich@yandex.ru*

Вычислительные системы, основанные на графических ускорителях (GPU), поддерживают логарифмический рост производительности при решении нейросетевых задач. Проведенные исследования показывают, что, в отличие от GPU, использование реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) позволяет получить линейный рост производительности при наращивании аппаратного ресурса [1], что особенно хорошо проявляется при решении вычислительно трудоемких сильносвязанных задач. Высокая реальная производительность РВС обеспечивается при использовании структурной парадигмы вычислений, если отсутствуют разрывы в информационных потоках обрабатываемых данных. Информационные разрывы встречаются в большинстве задач математической физики, при решении СЛАУ прямыми и итерационными методами, криптографии, обучении нейронных сетей. Исследование информационных графов задач перечисленных областей позволило выделить три типа разрывов информационных потоков. К информационным разрывам первого типа относятся разрывы, которые могут быть устранены путем математических преобразований. При этом используются математические преобразования, при которых реализуемая проблемная функция несколько изменяется, но остаётся в области допустимых значений исходной функции. К информационным разрывам второго типа относятся разрывы, которые не могут быть устранены полностью, однако их влияние может быть сокращено путем распараллеливания потоков данных. К третьему типу разрывов относятся разрывы, влияние которых не может быть устранено в рамках решения одной задачи.

В задачах обучения сверточных нейронных сетей информационный разрыв первого типа связан с наличием процедуры нормализации, ускоряющей обучение и влияющей на вычислительную устойчивость архитектуры нейронной сети. На данный момент все методы нормализации можно разделить на три основных вида: нормализацию данных, нормализацию весов, нормализацию градиентов [2]. Кроме того, существует отдельный класс сетей, называемых «самонормализуемые нейронные сети» [3]. При реализации сверточных нейронных сетей чаще всего используется метод нормализации данных и его модификация, называемая батч-нормализацией (БН). Основные преимущества батч-нормализации заключаются в хороших показателях обучаемости, стабильности моделей, универсальности и относительной простоте реализации.

Входными данными для функции БН является минибатч $B = \{x_1 \dots x_m\}$ и обучаемые параметры γ, β . Выходными данными для БН является модернизированный минибатч $y_i = BN_{\gamma, \beta}(x_i)$. Ниже приведены формулы БН для выполнения прямого хода задачи обучения [4]:

$$\mu_B \leftarrow \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i; \quad (1)$$

$$\sigma_B^2 \leftarrow \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \mu_B)^2; \quad (2)$$

$$\hat{x}_i \leftarrow \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \varepsilon}}; \quad (3)$$

$$y_i \leftarrow \gamma \hat{x}_i + \beta \equiv BN_{\gamma, \beta}(x_i), \quad (4)$$

где μ_B – математическое ожидание, рассчитанное от минибатча, σ_B^2 – дисперсия, рассчитанная от минибатча, \hat{x}_i – нормализованный минибатч, y_i – масштабирование и сдвиг в соответствии с обучаемыми коэффициентами.

В процессе нормализации данные модифицируются с использованием статистических характеристик (1) и (2), рассчитанных от всего минибатча. По этой причине невозможно приступить к модернизации минибатча и получению (3), пока не рассчитаны параметры характеристик μ_B и σ_B^2 . Образующаяся обратная связь приводит к необходимости остановки информационного потока и простоя оборудования.

С учетом того, что процедуры нормализации входят в состав каждого сверточного слоя нейросети, наличие обратной связи приводит к катастрофическому снижению производительности РВС при обработке изображений. Избежать остановки вычислительного конвейера позволяет метод, основанный на накоплении статистических характеристик от всех прошедших данных и использовании их для модернизации текущего

набора данных. Такой подход увеличивает значение ошибки на первых эпохах обучения, однако после накопления некоторой статистики, позволяет достигать точности, сопоставимой со стандартной реализацией процедуры нормализации.

Информационный разрыв второго типа при решении задач обучения нейросетей образуется во внешнем информационном контуре и связан с расчетом и обновлением коэффициентов обучения.

Пока процесс обратного распространения ошибки не будет полностью завершен, и все обучаемые коэффициенты не будут обновлены, новый набор изображений не может быть передан на обработку. Полностью устранить информационный разрыв второго типа, используя современные подходы структурной реализации вычислений на ПЛИС невозможно. Однако существенно уменьшить его влияние на производительность вычислительной системы позволяет использование многоканальной передачи данных между памятью, хранящей текущие коэффициенты обучения, и памятью с рассчитанными градиентами. При этом время передачи зависит от количества коэффициентов, степени параллелизма, вычисляемого отдельно для каждого слоя нейронной сети, и доступных аппаратных ресурсов для организации многоканальной передачи данных.

Для управления потоками данных при тестировании работы СНС на РВС разработан комплекс программного обеспечения, который включает в себя: функциональную модель СНС, логическую модель СНС, управляющую программу. Функциональная модель предназначена для моделирования вычислений на уровне функциональных блоков. Логическая модель предназначена для моделирования вычислений на уровне логических операций. Она в точности до бита повторяет вычисления, реализуемые на РВС, и используется для проверки работоспособности схемы. Управляющая программа отвечает за управление потоками данных при решении задачи на РВС.

Разработанный программный комплекс позволяет выполнять тестирование РВС при реализации сверточных нейронных сетей за счет введения функциональной модели, позволяющей за короткое время получить представление о работоспособности функциональных блоков СНС.

1. **Левин, И.И.** Реконфигурируемые вычислительные системы. Ресурснезависимое программирование: монография / И.И. Левин, А.И. Дордопуло. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2025. – 361 с. – ISBN 978-5-9275-4899-6
2. **Huang, Lei** Normalization Techniques in Deep Learning. Synthesis Lectures on Computer Vision. 2022 Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-031-14595-7. ISBN 978-3-031-14594-0.

3. **Günter Klambauer, Thomas Unterthiner, Andreas Mayr**, Sepp Hochreiter Self-Normalizing Neural Networks URL: <https://arxiv.org/abs/1706.02515> (дата обращения: 27.05.2025)
4. **Sergey Ioffe, Christian Szegedy** Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. URL: <https://arxiv.org/abs/1502.03167> (дата обращения: 27.05.2025).

Н.В.Колесов, Е.Г.Литуненко, М.В.Толмачева, В.С.Тюльников

ПЛАНИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ НЕТОЧНО ИЗВЕСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНОСТЯХ ЗАДАЧ

ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», г. Санкт-Петербург,

Введение

Вопросы организации вычислений остаются в центре внимания разработчиков вычислительной техники. При этом для решения возникающих проблем привлекаются методы теории планирования [1 – 3]. Обсуждаемый в настоящей работе подход принадлежит к области так называемого Permutation Flow Shop (PFS) планирования [3 – 5]. В качестве примера PFS системы можно привести конвейерную обработку информации.

Используемый в работе подход к планированию заданий основан на так называемых разрешимых классах систем – РКС-подход [5]. В настоящем докладе предлагается алгоритм PFS планирования в недетерминированных системах.

Математическая постановка задачи. Пусть вычислительная система представлена ориентированным ациклическим графом

Планированию подлежат n заданий $\tau_j, j = \overline{1, n}$, каждое из которых состоит из множества задач $\tau_j = \{\tau_{j,k} | j = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}\}$, где $\tau_{j,k}$ – k -я задача j -го задания; m – число задач в каждом задании (равное числу процессоров P в системе), связанных отношением предшествования. Произведенное назначение заданий соответствует случаю PFS системы [2]. Графы заданий являются направленными, ациклическими, содержащими в общем случае не один путь между любыми вершинами. Считаем, что задания имеют равный приоритет и порядок их выполнения одинаков. Предполагается, что время выполнения задачи $\tau_{j,k}$ задается временным

интервалом $\tilde{e}_{j,k} = [\underline{e}_{j,k}, \bar{e}_{j,k}]$, где $\underline{e}_{j,k}$ и $\bar{e}_{j,k}$ – нижняя и верхняя границы интервала соответственно.

Задача состоит в том, чтобы определить такой порядок выполнения заданий, чтобы оптимизировать критерий – минимум среднего времени пребывания заданий в системе.

Далее для рассматриваемой системы используется обозначение $C(P, \tau)$.

РКС-подход. Каждый входной процессор P_i связан с выходным процессором P_0 некоторым вычислительным путем (последовательностью процессоров) $p_q = P_i, P_j, \dots, P_0$. Обозначим интервал $\tilde{E}_j(p_q)$ как время выполнения пути p_q на j -м задании:

$$\tilde{E}_j(p_q) = \sum_{i=1}^{m_q} \tilde{e}_{j,i},$$

где i – номер процессора вычислительного пути, m_q – число процессоров, принадлежащих пути p_q , а при суммировании используется интервальная операция:

$$\tilde{e}_a + \tilde{e}_b = [\underline{e}_a, \bar{e}_a] + [\underline{e}_b, \bar{e}_b] = [\underline{e}_a + \underline{e}_b, \bar{e}_a + \bar{e}_b].$$

Определение 1. Интервал $\tilde{e}_a = [\underline{e}_a, \bar{e}_a]$ не меньше интервала $\tilde{e}_b = [\underline{e}_b, \bar{e}_b]$, т.е. $\tilde{e}_a \geq \tilde{e}_b$, если $\underline{e}_a \geq \bar{e}_b$.

Таким образом, зоны неопределенности сравниваемых интервалов не должны пересекаться.

Назовем вычислительный путь p_j^* критическим для j -го задания, если время его выполнения на j -м задании является наибольшим среди всех остальных путей в системе. Для разных заданий, выполняемых в одной и той же системе, критические пути могут быть различными.

Определение 2. Процессор P_q доминирует над процессором P_r ($P_q > P_r$), если $\min_j \underline{e}_{q,j} \geq \max_j \bar{e}_{r,j}$.

Классы определяются характерными упорядоченностями процессоров критического пути по отношению доминирования. Более подробно определения классов приведены в [5]. В настоящей работе рассматриваются классы 1–3.

Условия оптимальности планов в системах из разрешимых Классов

Условия оптимальности планов при неопределенных длительностях задач и при использовании в качестве критерия минимума среднего по заданиям времени пребывания заданий в системе с точностью до обозначений совпадают с соответствующими условиями для случая, когда длительности задач известны точно [5]. Таким образом, для любого набора

представителей из этих интервалов, а значит, и для интервалов в целом, алгоритм, основанный на известных условиях, будет формировать оптимальный план.

Таким образом, минимальное значение среднего по заданиям времени пребывания заданий в системе достигается в плане π , в котором задания упорядочены следующим образом для каждого из классов:

- класс 1: $\tilde{e}_{1,1}^* \leq \tilde{e}_{2,1}^* \leq \dots \leq \tilde{e}_{n,1}^*$.
- класс 2: $\tilde{e}_{1,m^*}^* \leq \tilde{e}_{2,m^*}^* \leq \dots \leq \tilde{e}_{n,m^*}^*$, при этом первое задание плана π удовлетворяет условию $j^* = \arg \min_j \sum_{i=1}^{m^*-1} \tilde{e}_{j,i}^*$.
- класс 3: $\tilde{e}_{1,h^*}^* \leq \tilde{e}_{2,h^*}^* \leq \dots \leq \tilde{e}_{n,h^*}^*$, при этом первое задание плана π удовлетворяет условию $j^* = \arg \min_j \sum_{i=1}^{h^*-1} \tilde{e}_{j,i}^*$ (h^* – номер процессора стыковки двух последовательностей).

Алгоритм планирования в системах общего вида

Предварительно отметим, что для недетерминированной системы может не существовать оптимального плана, поскольку описание ее экземпляров может значительно различаться. Детерминированные экземпляры системы получаются из недетерминированных систем путем замены интервала времени выполнения каждой задачи на конкретное значение из этого интервала, поэтому разным экземплярам системы могут соответствовать разные оптимальные планы.

На практике для PFS системы общего вида, описанной в постановке задачи, условия ее принадлежности к тому или иному разрешимому классу чаще всего не выполняются. В результате исчезают гарантии оптимальности используемых алгоритмов и в связи с этим для системы общего вида, планирование осуществляется в соответствии с положениями РКС-подхода [2]. При этом алгоритмы планирования являются приближенными, но справедливыми для любой из рассматриваемых систем. Они имеют рекурсивный характер и выполняются за число шагов, не большее, чем число заданий.

Алгоритм планирования заданий в недетерминированной системе общего вида имеет вид:

Шаг 1. Найти в системе $C' = (P, \tau')$ (при условии $\tau' = \tau$, $C' = C$) на каждом шаге рекурсии вычислительный путь p_q , который характеризу-

ется наибольшим значением суммы $\tilde{E}(p_k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_k} \tilde{e}_{j,i}^*$.

Шаг 2. Определить, к какому разрешимому классу наиболее близка рассматриваемая на шаге 1 система $C' = (P, \tau')$ на основе геометрического

классификационного правила [2], предполагающего аппроксимацию зависимости средней длительности решаемых задач от номера машины и формирование оценки достоверности классификации (δ). В случае, если достигнутая на k -м шаге δ окажется меньше значения на предыдущем шаге, то планирование завершается с сохранением упорядоченности $(k-1)$ -го шага, иначе перейти к шагу 3.

Шаг 3. Определить с использованием соответствующих алгоритмов, основанных на приведенных выше условиях оптимальности, упорядоченность оставшихся заданий на интервале свободных позиций формируемого плана. Исключить первое задание в этой упорядоченности из множества τ' планируемых заданий. Если результирующее множество планируемых заданий непустое, то перейти к шагу 1, иначе завершить выполнение алгоритма.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы планирования вычислительных процессов в распределенных системах РВС, для которых время решения задач задано интервалами. Особенностью предложенного алгоритма являются простота. При планировании использован критерий минимума среднего времени пребывания заданий в системе.

1. **Toporkov V., Yemelyanov D., Toporkova A.** Coordinated global and private job-flow scheduling in grid virtual organizations // *Simulation Modeling Practice and Theory*, Elsevier BV (Netherlands). 2021.V. 107.
2. **Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В.** Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование // СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. 185 с.
3. **Sayali D. Choudhari, Dr. Ritu Khanna.** Flow shop scheduling problem with loading and unloading time // *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference* 2017.
4. **Kurniawan D., Radja A.C., Suprayogi A.H. Halim A.** Flow Shop Batch Scheduling and Operator Assignment Model to Minimise Actual Flow Time // *7-th International Conference on Recent Trends in Engineering, Science and Management*, Pune, 2017.
5. **Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М.** Маршрутизация сообщений в сетях автономных необитаемых подводных аппаратов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 6. С. 767–773.

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ К ТРЕБОВАНИЯМ КОМПЛЕКСА ВЫСОКОУРОВНЕВОГО СИНТЕЗА «ТЕСЕЙ»

*Инженерно-технологическая академия ЮФУ, г. Таганрог,
ikuznesova@sfnedu.ru,*

*МИРЭА - Российский технологический университет, г. Москва,
dordopulo2017@yandex.ru,*

Комплекс средств высокоуровневого синтеза (High Level Synthesis, HLS) «Тесей»[1] преобразует последовательные программы на языке С в стандарте ISO/IEC 9899:1999 в конфигурационные файлы многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем (PBC), сокращая время разработки и снижая требования к квалификации разработчиков. Как и для большинства известных HLS-компиляторов[2,3], входная последовательная программа при трансляции комплексом должна соответствовать следующим критериям:

1) Текст входной программы должен быть написан в процедурном стиле с наибольшей наглядностью, без использования объектно-ориентированной парадигмы и оптимизаций кода, учитывающих архитектурные особенности процессора;

2) Программа не должна содержать операторов безусловного перехода **goto**, операторов **switch**, конструкций **union** и **struct**, функций **strlen** и функций работы с памятью (**malloc/calloc**, **memcpy** и др), циклов **while**, а также директив условной компиляции для кроссплатформенных программ вида **#if (Def_WinOrLin == 1)**;

3) Желательно избегать использования операторов **break** и **return** для немедленного выхода из циклов, а также переменных с косвенной адресацией для счетчиков циклов и индексации массивов, которые нельзя рассчитать на этапе трансляции;

4) Для определения входных и выходных переменных в тексте программы должны **обязательно** присутствовать процедуры загрузки и сохранения данных с фиксированными именами (**load_data/save_data**, **load_data32/save_data32**, **load_data64/save_data64**), соответствующие заданному шаблону.

Эти требования обусловлены спецификой используемой в «Тесее» концепции высокоуровневого синтеза решений для многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем[4], но при этом сокращают круг прикладных задач, которые могут быть преобразованы комплексом.

Так, большинство программ из наборов тестов для HLS-компиляторов, таких как ChStone[2] или Rosetta[3], содержат одну или сразу несколько групп операторов (таблица 1), исключающих их трансляцию в комплексе «Тесей», что не позволяет сравнить эффективность трансляции тестов ChStone «Тесеем» и другими HLS-компиляторами из [2,3]. Корректировка исходных текстов ChStone требует продолжительного времени даже при высокой квалификации программиста и не позволяет исключить субъективный человеческий фактор.

Таблица 1

| Тест | goto | switch | Union/ Struct | Malloc, memcpy и др. | Strlen | While |
|----------|------|--------|------------------|----------------------------|--------|-------|
| adpcm | - | - | - | - | - | - |
| aes | - | + | - | - | - | - |
| blowfish | - | - | - | - | - | + |
| dfadd | + | - | + | - | - | - |
| dfdiv | - | - | + | - | - | + |
| dfmul | - | - | + | - | - | - |
| dfsин | + | - | + | - | - | + |
| gsm | - | - | - | - | - | + |
| jpeg | + | + | - | + | - | + |
| mips | - | + | - | - | - | + |
| motion | - | - | - | - | - | + |
| sha | - | - | - | + | - | + |

С развитием больших языковых моделей для нейросетей, таких как ChatGPT, DeepSeek, QwenCoder и др., позволяющих не только создавать, но и корректировать исходные тексты, появилась возможность выполнять адаптацию автоматизированно с проверкой информационной эквивалентности исходных и адаптированных последовательных программ.

Для адаптации текстов исходных программ, входящих в набор тестов ChStone, был проведен эксперимент с использованием DeepSeek. Нейросеть DeepSeek использовалась в двух режимах: с одним интегральным запросом к модели, содержащим все необходимые преобразования, и с серией последовательных запросов, каждый из которых содержал не более одного преобразования. Примеры использовавшихся запросов (промптов), представлены в таблице 2.

По результатам анализа применения различных типов запросов к приведенным в таблице 1 тестовым программам тестирования можно сделать следующие выводы:

- преобразованные программы успешно проходят синтаксический контроль, но в общем случае требуется проверка их информационной эквивалентности программистом;
- запросы, содержащие в своей структуре несколько преобразований, выполняются в среднем менее точно, поэтому часть «нежелательных» операторов может оставаться в преобразованном тексте программы;
- запросы, содержащие в своей структуре только одно преобразование, выполняются достаточно точно и преобразованный код не содержит запрошенных операторов.
- последовательность запросов, удаляющих операторы, оказывает влияние на результат преобразования.

Таблица 2

Примеры запросов к модели DeepSeek

| Интегральный запрос | Серия последовательных запросов |
|--|--|
| Перепиши приложенный код в функциональном стиле на языке C, без использования классов, операторов goto, структур struct, объединений union, функций malloc, memcpu, free, функции strlen, циклов while | перепиши приложенный код на языке C без использования оператора goto |
| | перепиши приложенный код на языке C без использования структур struct |
| | перепиши приложенный код на языке C без использования объединений union |
| | перепиши приложенный код на языке C без использования функций malloc, memcpu, free |
| | перепиши приложенный код на языке C без использования функции strlen |
| | перепиши приложенный код на языке C без использования циклов while |

1. Дордопуло А.И., Левин И.И., Гудков В.А., Гуленок А.А. Комплекс средств высокоуровневого синтеза «Тесей» для многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем // В сб.: Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ’2025). Труды международной конференции. 2025. С.132-141.
2. M. W. Numan, B. J. Phillips, G. S. Puddy and K. Falkner, "Towards Automatic High-Level Code Deployment on Reconfigurable Platforms: A Survey of High-Level Synthesis Tools and Toolchains," in IEEE

Access, vol. 8, pp. 174692-174722, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3024098.

3. **R. Nane et al.** A Survey and Evaluation of FPGA High-Level Synthesis Tools / IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 35, no. 10, pp. 1591-1604, Oct. 2016. – DOI: 10.1109/TCAD.2015.2513673
4. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства Virtex-6 / И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников, А. И. Дордопуло // В сб.: Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011. Труды международной научной конференции. – Москва: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 203-210.

И.И. Левин, Е.А. Семерников

ПРИМЕНЕНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*ООО НИЦ СЭ и НК, г. Таганрог,
levin@superevm.ru, semernikov@superevm.ru*

Своевременное решение задач обработки аэрокосмической информации является принципиальным условием обеспечения безопасности государства и поступательного развития его экономики.

В настоящее время мониторингом поверхности Земли занимаются специализированные отечественные центры, использующие вычислительные комплексы на основе зарубежных универсальных процессоров и графических ускорителей. В современных условиях конфликта России и объединенного Запада доступность к вычислительным средствам и программному обеспечению затруднено, а иногда и невозможно. В то же время в ближайшее время прогнозируется значительный рост количества источников космической информации за счет расширения отечественных космических группировок. Поэтому насущной необходимостью становится использование в процессе обработки космических снимков отечественной высокопроизводительной вычислительной техники, которая сможет удовлетворить возрастающий поток запросов на обработку космических снимков земной поверхности. При этом с увеличением количества источников аэрокосмической информации пропорционально возрастают требования к скорости её обработки, особенно в условиях быстроменяющейся обстановки. Поэтому актуальной задачей становится

создание отечественных компактных аппаратно-программных комплексов (АПК) для обработки аэрокосмической информации, реальная производительность которых может практически линейно наращиваться путем комплексирования унифицированных модулей. Такими свойствами обладают реконфигурируемые вычислительные системы, позволяющие адаптировать свою архитектуру под информационную структуру решаемой задачи, в том числе под задачи обработки космических снимков.

НИЦ суперЭВМ и нейрокомпьютеров (НИЦ СЭ и НК), г. Таганрог, разрабатывает и серийно производит целый ряд многопроцессорных проблемно-ориентированных вычислительных комплексов на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Использование ПЛИС в качестве элементной базы связано с тем, что в отличие от элементной базы традиционных многопроцессорных вычислительных систем – универсальных процессоров, ПЛИС продолжают поддерживать рост производительности за счет сохранения темпов роста аппаратного ресурса и рабочей тактовой частоты.

Одной из последних разработок НИЦ СЭ и НК является универсальный реконфигурируемый вычислительный блок (РВБ) «Арктур», предназначенный для решения задач различных предметных областей: математической физики, цифровой обработки сигналов, а также задач искусственного интеллекта.

РВБ «Арктур» обладает уникальной плотностью компоновки вычислительного ресурса – 96 ПЛИС высокой степени интеграции (всего более 270 млн. логических ячеек) в одном блоке, что превышает мировой уровень. Конструктив РВБ «Арктур» 3U 19" содержит 16 вертикально расположенных вычислительных модулей по шесть ПЛИС XC6VU37P фирмы Xilinx семейства UltraScale+ в каждом.

РВБ «Арктур» обеспечивает уникальную реальную производительность, благодаря мощной подсистеме информационного обмена, которая представляет собой множественные каналы связи между ПЛИС в пределах платы, а также между ПЛИС соседних плат.

При реализации тестовой задачи цифровой обработки сигналов была достигнута производительность 230 Tflops (single precision). Таким образом, построение РВС из 16 РВБ «Арктур» обеспечит производительность при решении данной задачи 3,6 Pflops (single precision). Данная оценка подтверждает перспективность использования РВБ для решения вычислительно трудоемких задач. Исследования показали, что производительность РВС на основе 16 РВБ «Арктур» (одна стойка 19"), при решении задачи LU-разложения, являющейся алгоритмической основой теста LINPACK, достигает 0,9 Pflops (double precision).

Новые АПК различной производительности, созданные на основе РВБ «Арктур» или его компонентов для обработки аэрокосмической информации, позволят решить ряд важнейших задач, таких как:

- прием, подготовку и обработку аэрокосмических данных, полученных с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, с целью улучшения качества снимков и проведения анализа изменений на местности;

- взаимное совмещение мультиспектральных и панхроматических аэрокосмических изображений путем выполнения высокоточных геометрических преобразований, включая паншарпенинг. В результате чего формируется многоканальное изображение повышенного разрешения;

- автоматизированную проверку качества взаимного совмещения спектральных каналов в многоспектральном изображении;

- поиск изменений на аэрокосмических снимках по сравнению с предыдущими обзорами и их привязка к местности.

Кроме того, РВС на базе РВБ «Арктур» позволит более активно внедрить нейротехнологии в процесс мониторинга земной поверхности. Разработанные универсальные аппаратно-программные средства позволят выполнять анализ аэрокосмической информации за приемлемое для оперативного использования время, в том числе в полевых условиях с быстроменяющейся боевой обстановкой. В частности, могут быть созданы приложения средств поддержки нейроанализа космической информации, обеспечивающих

- улучшение качества изображений;
- обнаружение и концентрацию исходных данных для дальнейшей оценки, в том числе с помощью нейросетевых технологий;

- выделение малоконтрастных объектов на подстилающей поверхности;

- автоматизацию поиска объектов;

- отслеживание перемещения объектов и т.п.

Реальная производительность АПК на основе РВС при решении специальных задач обработки аэрокосмической информации составит не менее 60% от декларируемой пиковой производительности. Таким образом, РВС могут составить конкуренцию традиционным суперЭВМ, особенно при решении сильно связанных задач, в том числе задач обработки аэрокосмической информации и оперативного обучения нейронных сетей.

1. **Левин И.И., Доронченко Ю.И., Федоров А.М., Раскладкин М.К.** Перспективный суперкомпьютер «Арктур» XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультikonференции (г. Волгоград, 11–15 сентября 2023

- г.). В 4 т. Т. 2. Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС-2023) / редкол.: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград: ВолгГТУ, 2023. – С. 146-150.
2. **Левин И.И., Сорокин Д.А., Дордопуло Ю.И., Касаркин А.В.** Обучение нейронных сетей на реконфигурируемой вычислительной системе «Арктур», 18 Всероссийская научная конференция с международным участием «Параллельные вычислительные технологии 2024», г. Челябинск, 2–4 апреля 2024 г., Южно-Уральский государственный университет (национальный исследов. университет). – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2024. 196 с. – С. 108-116. ISBN 978-5-696-05450-6. <http://omega.sp.susu.ru/pavt2024/short/064.pdf>.

*И.И. Левин, А.И. Дордопуло,
В.А. Гудков, А.А. Гуленок, И.Ю. Кузнецова*

УПРАВЛЕНИЕ СТРАТЕГИЯМИ ВЫСОКОУРОВНЕВОГО СИНТЕЗА ДЛЯ МНОГОКРИСТАЛЛЬНЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*НИИ СЭ и НК, Таганроз, levin@superevm.ru, dordopulo@superevm.ru,
gudkov@superevm.ru, gulenok@superevm.ru, ikuznecova@sfedu.ru*

Средства высокоуровневого синтеза (High Level Synthesis, HLS) [1] преобразуют программы на языках высокого уровня в конфигурационные файлы специализированных аппаратных средств на языках описания аппаратуры HDL (Hardware description language), сокращая время разработки и снижая требования к квалификации разработчиков. Автоматизация создания HLS-компилятором сложного функционального блока (IP-ядра), представляющего собой цифровой автомат или специализированный процессор, облегчает портирование вычислений на другую вычислительную платформу, например, в архитектуру программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), но масштабирование и синхронизация IP-ядер требуют участия программиста. Для реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [2], содержащих множество ПЛИС, объединенных пространственной коммутационной системой, необходим синтез не одного, а нескольких (по количеству используемых кристаллов), связанных в единое решение, конфигурационных файлов. Синтез многокристалльных решений существенно сложнее, поскольку требует поддержки и синхронизации большого количества вычислительных устройств для различных форм организации вычислений, а также анализа и выбора рациональных

вариантов из множества возможных, поэтому по сложности сравним с автоматическим распараллеливанием.

Разработанный в НИЦ СЭ и НК комплекс средств высокоуровневого синтеза «Тесей» преобразует последовательную программу на языке С к доступному аппаратному ресурсу многокристалльных PBC. Отличием комплекса «Тесей» от наиболее известных HLS-компиляторов Xilinx Vivado HLS и Vitis являются полностью автоматическое преобразование входной программы без ручной разметки кода пользователем (директивами `#pragma` и др.), поддержка сложных форм параллелизма (макроконвейер, конвейер в конвейере), автоматическое масштабирование решения на заданный ресурс PBC и синхронизация информационных и управляющих сигналов.

Ключевые компоненты и схема работы комплекса «Тесей» представлены в [3]. Новым компонентом является «Ариадна», которая управляет последовательностью выполнения преобразований последовательной программы (стратегией) на основе анализа параметров параллелизма и информационных зависимостей кадровых структур. Основной задачей при формировании стратегии (рис.1) является сокращение количества синтезируемых кадровых структур с помощью исключения заведомо неэффективных преобразований, но с обеспечением заданного уровня производительности.

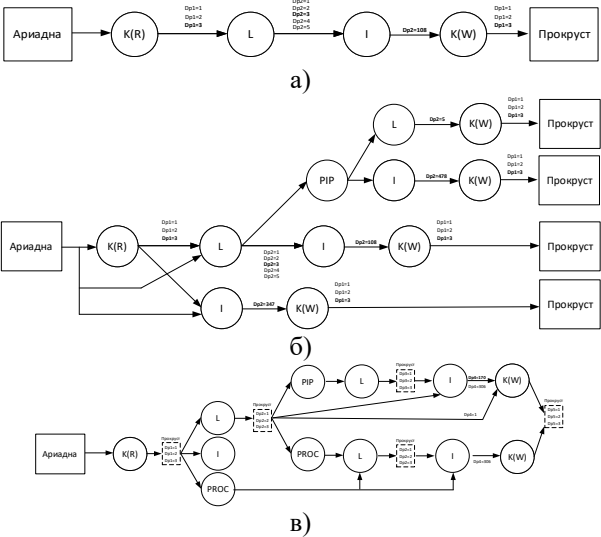


Рис. 1. Различные варианты синтеза стратегий преобразования кадровой структуры

Для синтеза стратегий «Ариадна» использует следующие преобразования кадровых структур: $K(R)$ – расчет и подбор количества каналов чтения из внешней памяти; L – расчет и подбор количества структурно реализованных информационно-независимых подграфов; I – расчет и подбор количества структурно реализованных информационно-зависимых подграфов; $K(W)$ – расчет и подбор количества каналов записи во внешнюю память; PIP – построение конвейера в конвейере; $PROC$ – процедурная реализация блоков и построение макроконвейера.

Порядок выполнения преобразований зависит от типа и предметной области решаемой задачи: для задач линейной алгебры и символьной обработки стратегии будут различаться. Стратегия преобразования кадровой структуры входной параллельной программы не фиксирована и определяется «Ариадной» в зависимости от информационной структуры и типа информационных зависимостей задачи.

Основная стратегия преобразования кадровой структуры (рис.1-а) состоит в структурной реализации базового подграфа и последующем масштабировании сначала количества слоев до ограничений максимального числа каналов в системе, затем – итераций, влияющих на занимаемый аппаратный ресурс, потом – сокращение интервала обработки данных с помощью автоподстановки и/или других оптимизационных преобразований. Приведенная на рис. 1-а схема соответствует наиболее часто встречающейся стратегии преобразования кадровой структуры – синтезу одной, наиболее рациональной, стратегии. Схема на рис. 1-б анализирует несколько наиболее перспективных стратегий для одной программы с запуском «Прокруста» для каждой из них, а схема на рис. 1-в реализует алгоритм перебора возможных вариантов с выбором наиболее рационального варианта преобразований на каждом шаге.

Если в результате выполнения всех преобразований стратегии полученное решение удовлетворяет требованиям занимаемого ресурса и заданного уровня производительности, то цель считается достигнутой, и дальнейшие преобразования прекращаются. В противном случае, если не удалось обеспечить заданный уровень производительности, происходит изменение приоритетов выполнения преобразований и переход к следующей стратегии. Если при полном переборе всех стратегий заданный уровень производительности так и не был достигнут, будет выбрано лучшее из проанализированных решений.

1. **M.W. Numan, B.J. Phillips, G.S. Puddy and K. Falkner**, "Towards Automatic High-Level Code Deployment on Reconfigurable Platforms: A Survey of High-Level Synthesis Tools and Toolchains," in IEEE Access, vol. 8, pp. 174692-174722, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3024098.

2. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства Virtex-6 / **И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников, А. И. Дордопуло** // В сб.: Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2011. Труды международной научной конференции. – Москва: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 203-210.
3. **Дордопуло А.И., Левин И.И., Гудков В.А., Гуленок А.А.** Программный комплекс высокоуровневого синтеза конфигурационных файлов для многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем // В сб.: Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2023). Труды международной конференции. 2023. С. 133-142.

И.И. Левин, Е.А. Дудников

УПРАВЛЕНИЕ СРЕДСТВАМИ СЖАТИЯ ДАННЫХ В ТЕМПЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА РВС

*Южный федеральный университет, Институт компьютерных
технологий и информационной безопасности, г. Таганрог,
levin@superevm.ru, edudnikov@sfedu.ru*

Современные реализации систем глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей, решающие задачи обнаружения, распознавания и классификации образов - это громоздкие многослойные архитектуры, которые требуют значительных вычислительных мощностей и пропускной способности каналов для перекачки огромных массивов данных [1]. Например, при обеспечении данными многослойной сверточной сети ResNet-50 для эффективного функционирования необходимо обеспечить передачу более 1,5 Тбайт обучающих данных и параметров из внешних накопителей [2]. Потребность в снижении объема задействованного моделью вычислительного ресурса и ускорении процесса обучения является актуальной задачей, над решением которой работают многие научные группы крупнейших технологических компаний. Применяются отличные от традиционных систем вычислительные комплексы. Все чаще в подобном качестве используются реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) на основе программируемых логических интегральных

схем (ПЛИС), позволяющие кратно повысить производительность [1]. Популярность применения ПЛИС обусловлена как возможностью адаптации архитектуры системы к структуре решаемых задач, так и сохранением тенденции роста реальной производительности за счет увеличения числа логических вентилях в новых поколениях выпускаемых устройств. При этом, в отличие от интегральных схем специального назначения (ASIC), ПБС обеспечивают работу с новыми или оптимизированными алгоритмами без дорогостоящего обновления оборудования за счет реконфигурации доступного аппаратного ресурса [3]. Например, в НИЦ СЭ и НК (г. Таганрог) в настоящее время разрабатывается модель сверточной нейронной сети ResNet-50 на базе реконфигурируемого вычислительного блока (РВБ) «Арктур», обладающего не только сверхплотной компоновкой (96 ПЛИС XCVU37P), но и расширенными возможностями информационного обмена с общей пропускной способностью каналов связи 15,6 Тбит/с в пределах вычислительных модулей (ВМ) и 9 Тбит/с между ВМ. Для реализации прямого и обратного хода модели нейросети потребуется задействовать вычислительный ресурс минимум двух ВМ. Загрузка коэффициентов, параметров и наборов данных для обучения должна производиться с внешних носителей (SSD) на скорости не менее 21,6 Гбит/с. При масштабировании вычислительной структуры на несколько ВМ в пределах РВБ «Арктур» требования к скорости доступа к данным будут расти пропорционально. Для используемых перспективных интерфейсов NVMe заявлены пиковые скорости чтения по шине PCIe 4.0 до 56 Гбит/с, а записи - до 32 Гбит/с, однако в реальных условиях эти характеристики снижаются в несколько раз, в первую очередь из-за повышения тепловой нагрузки, поэтому даже при двукратном масштабировании заявленной пиковой пропускной способности может оказаться недостаточно. Повысить пропускную способность каналов можно за счет использования средств сжатия данных. При идеальных условиях подобные средства позволяют повысить пропускную способность задействованных каналов передачи данных в m раз, где m – коэффициент сжатия алгоритма.

Схема применения системы сжатия поступающих с внешних накопителей наборов входных данных в модуле загрузки и управления (МЗУ) для разрабатываемой структурной реализации ResNet-50 представлена на рисунке 1. Сжатые входные данные поступают в вычислительные модули ВМ₁ и ВМ₂, которые объединены в единый вычислительный контур по кольцевой схеме.

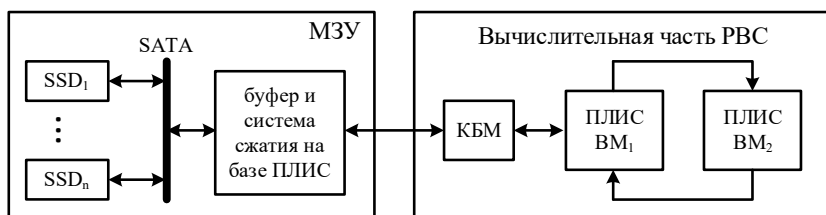


Рис. 1. Организация загрузки данных для структурной реализации сверточной нейронной сети ResNet-50

Средства сжатия также предполагается использовать для сокращения критического ресурса, такого как BRAM, LUT, затрачиваемого на организацию буферов для хранения и передачи промежуточных результатов вычислений между слоями сети, и памяти HBM, выделяемой на банки хранения загружаемых извне изображений. Для уменьшения объема передаваемых и обрабатываемых при машинном обучении данных зачастую применяют сформированные обрезкой (pruning) и квантованием (quantization) кодовые книги: если рассматривать позиции квантования как символы, то число элементов в каждой позиции соответствует частоте их появления, что делает возможным использование для их кодирования энтропийных методов, основанных на частоте появления символов в сообщении. Наиболее популярным из них является алгоритм Хаффмана. При реализации сверточных сетей применяются различные техники, основанные на классическом методе: кодировании длин последовательностей Хаффмана (Run-length Huffman, RLH), методе Хаффмана с разреженностью (Sample Huffman with Sparsity, SHS) и пр. Подобная стратегия позволяеткратно сократить занимаемый ресурс памяти без потери точности вычислений, причем кодирование методом Хаффмана обеспечивает 20-30 % от общей степени сжатия [4]. Однако для эффективного сжатия данных на РВС с помощью алгоритма Хаффмана с обеспечением высокой производительности и низкой латентности необходимо учитывать принципы структурной организации вычислений и особенности архитектуры ПЛИС. На этих принципах была разработана структурная реализация модернизированного метода Хаффмана, которая обеспечивает сжатие непрерывных плотных потоков данных, поступающих со скоростью 128 Гбит/с на РВС [5]. В отличие от известных решений, разработанная реализация характеризуется существенно меньшими аппаратными затратами и латентностью. Применение предложенного решения позволиткратно степени сжатия повысить пропускную способность каналов передачи данных без значительного увеличения аппаратных затрат, а также сократит объем

занимаемой памяти, что приведет к снижению затрат на обучение и повышению удельной производительности системы.

1. **Shawahna A., Sait S.M., El-Maleh A.** FPGA-Based Accelerators of Deep Learning Networks for Learning and Classification: A Review // IEEE Access, vol. 7, Dec. 2018, pp. 7823 – 7859.
2. **Zhang Z., Huang L., Pauloski J.G., et al.** Efficient I/O for Neural Network Training with Compressed Data // 2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), 2020, pp. 409 – 418.
3. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства Virtex-6 / **И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников, А. И. Дордопуло** // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): Труды международной научной конференции, Москва, 28 марта – 01 апреля 2011 года / Ответственные за выпуск: Л.Б. Соколинский, К.С. Пан. – Москва: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 203-210.
4. **S. Han, H. Mao, and W. J. Dally** Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and Huffman coding // conference paper at ICLR, 2016.
5. **Левин И.И., Дудников Е.А.** Структурная модификация метода Хаффмана для сжатия плотных потоков данных без потерь на РВС // Известия ЮФУ. Технические науки, 2024, no. 5 (241), с. 48 – 58.

И.И. Левин, Ю.И. Доронченко, Д.А. Сорокин

ПРИМЕНЕНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ

*Научно-исследовательский центр суперЭВМ и нейрокомпьютеров,
г. Таганрог,
levin@superevm.ru, doronchenko@superevm.ru, sorokin@superevm.ru*

Введение

Для решения современных сложно формализуемых задач, таких как анализ изображений, обработка естественного языка, автоматическое управление и других, в настоящее время зачастую используются нейросети, которые позволяют автоматически извлекать признаки из

данных и дообучаться при поступлении новых данных. Кроме того, обработка нейросетями легко распараллеливается по данным, поэтому появление мощных графических ускорителей, обеспечивающих несравнимо больший по сравнению с традиционными процессорами параллелизм вычислений, позволило поднять скорость решения актуальных задач на новый уровень.

Вычислительная сложность задач управления, использующих нейросетевые технологии, постоянно растёт, поскольку с появлением достаточных мощностей возрастают и требования к качеству их решения. В свою очередь производители вычислительной техники отвечают совершенствованием элементной базы. Разрабатываются аналоговые (оптические корреляторы, мемристорные и спайковые процессоры) и цифровые системы (GPU и TPU), которые позволяют, в том числе обучать нейросети с высоким качеством.

Указанные системы демонстрируют высокую скорость и точность при условии, что входная информация достаточно коррелирует с образцами, на которых выполнялось обучение. Для задач управления важнейшее значение имеет оперативность переобучения, которое необходимо выполнить за несколько дней или даже часов вне зависимости от объема данных. В настоящее время такое возможно только при линейном увеличении реальной производительности системы. При этом системы, построенные на GPU и TPU, при увеличении вычислительных ресурсов обеспечивают логарифмический, а не линейный, рост скорости машинного обучения в самом лучшем случае. Таким образом, в условиях появления новой информации переобучение нейронных сетей традиционными средствами с требуемым качеством за заданный промежуток времени может оказаться неразрешимой задачей.

Альтернативой традиционным системам для задач обучения нейросетей могут быть реконфигурируемые вычислительные системы (PVC) на базе ПЛИС [1, 2], которые обеспечивают возможность линейного масштабирования производительности. Для обучения нейросетей на PVC наиболее эффективной представляется парадигма структурной организации вычислений, которая позволяет распараллеливать процесс вычислений как по данным, так и по итерациям алгоритма, а обработку данных выполнять по схеме линейного или вложенного конвейера [3]. Это позволяет минимизировать требования к объёму оперативной памяти системы и информационным обменам.

РВБ «Арктур»

В настоящее время в ООО «НИЦ СЭ и НК» (г. Таганрог) ведутся исследования перспектив применения РВС на базе вычислительных блоков (ВБ) «Арктур» для решения различных нейросетевых задач, в том числе и задач обучения. В новом ВБ «Арктур» (рис.1-а) реализован ряд прорывных технических решений, которые позволят реализовывать крупные графы сложных задач в едином вычислительном контуре и без разрывов выполнять вычисления за счет мощной системы информационного обмена, обеспечивая при этом необходимый уровень энергопитания и охлаждения.

ВБ «Арктур» выполнен в конструктиве 3U 19" и обладает уникальной плотностью компоновки вычислительного ресурса – 96 ПЛИС семейства UltraScale+ сверхвысокой степени интеграции (около 3 млн. логических ячеек каждая), содержащих память НВМ, размещенных в вычислительном блоке на 16 платах (рис.1-б). Подсистема информационного обмена реализована с помощью множественных каналов связи между кристаллами по дифференциальным линиям с помощью встроенных в ПЛИС мульти-гигабитных трансиверов (MGT), что позволяет при построении вычислительных комплексов организовать информационное взаимодействие между ВБ через оптические каналы с пропускной способностью до 4,5 Тбит/с.

Максимальная потребляемая мощность ВБ «Арктур» – 25 кВт, поэтому охлаждение нагруженных электронных компонентов ВБ обеспечивается иммерсионной системой на основе диэлектрического хладагента, обладающего наилучшей электрической прочностью, высокой теплопроводностью, максимально возможной теплоемкостью при низкой вязкости.

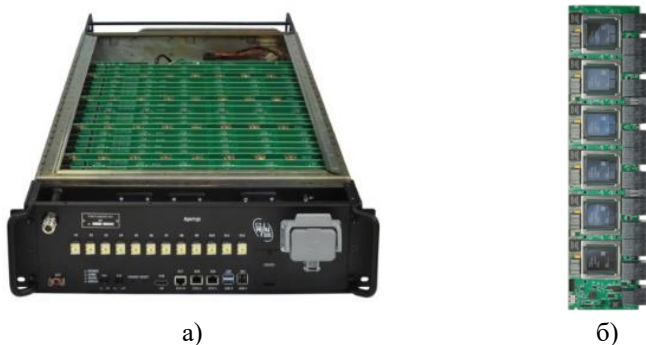


Рис. 1. Реконфигурируемый вычислительный блок «Арктур»:
а) ВБ в сборе; б) плата ВБ «Арктур»

Применение РВБ «Арктур» для решения задач управления позволяет максимально эффективно задействовать вычислительный ресурс даже при масштабировании ресурса до десятков и сотен РВБ. Все вычислители такого суперкомпьютера могут быть засинхронизированы от формирователя опорной тактовой частоты, которым может выступать даже один из РВБ. ПЛИС-технологии обеспечивают точность исполнения реализованного алгоритма во времени – количество тактов на распространение как управляющих сигналов, так и обрабатываемых данных, является полностью детерминированным.

Обучение нейросетей на РВС

Для исследования эффективности применения РВС при решении нейросетевых задач выбрана широко распространенная и достаточно подробно описанная в научных работах нейронная сеть ResNet50v1.5 из состава бенчмарка MLPerf, фреймворк TensorFlow. Вычислительная структура нейронной сети ResNet50v1.5 синтезирована на 2 платах ВБ «Арктур», содержащих 12 ПЛИС UltraScale+, на тактовой частоте 450 МГц [4]. Проведенный по результатам реализации анализ показал, что при увеличении вычислительного ресурса производительность РВС «Арктур» при обучения нейронной сети ResNet-50 будет расти практически линейно. В то же время современная вычислительная система Nvidia DGX A100 при линейном увеличении вычислительного ресурса обеспечивает существенно меньшую динамику роста производительности: в частности, при увеличении вычислительного ресурса до 4096 плат Nvidia A100 производительность возрастает только в 642 раза.

Поэтому при увеличении вычислительного ресурса для обучения ResNet50v1.5 на датасете ImageNet ВБ «Арктур» будет обеспечивать производительность 16960 fps, что, согласно открытым данным компании Nvidia, в 2,4 раза быстрее, по сравнению с DGX, содержащей восемь ускорителей NVidia A100.

Заключение

РВБ «Арктур» с размещенными в его конструктиве (3U 19") 96-ю ПЛИС высокой степени интеграции обладает уникальной плотностью компоновки вычислительного ресурса – всего более 270 млн. логических ячеек Logic Cells, что позволяет считать его перспективной вычислительной платформой для решения задач обработки информации и управления, требующих применения нейросетевых подходов.

Экспериментальные исследования подтверждают перспективность применения РВС для решения задач переобучения нейронных сетей за ограниченный промежуток времени вне зависимости от объема обрабатываемых данных.

1. **Каляев, И.А.** Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС : монография / Каляев И.А., Левин И.И. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2022. – 475 с. – ISBN 978-5-4358-0232-0. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49962846>.
2. **Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Дордопуло А.И.** Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства Virtex-6 // Сборник трудов Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии 2011» (ПАВТ 2011). – Челябинск-М.: Издательский центр ЮУрГУ [Электронный ресурс], 2011. - С. 203–210.
3. **Левин, И.И.** Реконфигурируемые вычислительные системы. Ресурснезависимое программирование : монография / И.И. Левин, А.И. Дордопуло. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2025. – 380 с.
4. **Коваленко В.Б., Сорокин Д.А.** Методы и алгоритмы устранения разрывов информационных потоков при реализации сверточных нейросетей на реконфигурируемых вычислительных системах // Международная конференция «XXVI Харитоновские тематические научные чтения «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах», 14 – 18 апреля 2025 г., г. Саров. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2025. – С. 79-80. – 196 с.

Д.В. Михайлов, М.Д. Чекина

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДА ЯКОБИ ПОСРЕДСТВОМ АУТОПОДСТАНОВКИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*Институт компьютерных технологий и информационной
безопасности ЮФУ, г. Таганрог, dmihaylov@sfnu.ru,
НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, г. Таганрог,
chekina@superevm.ru*

При дискретизации непрерывных математических моделей, используемых для описания различных физических процессов, образуются системы линейных алгебраических уравнений. На данный момент одним из самых популярных итерационных методов решения СЛАУ является метод Якоби, представляющий собой разновидность метода простой итерации. При решении СЛАУ при помощи итерационных методов вычисление n -го приближения вектора неизвестных в общем случае производится с опорой на значения, полученные на предыдущей итерации.

В то же время существуют алгоритмы, позволяющие добиться значительного ускорения вычислений путем разбиения входной последовательности напополам. Наиболее известными из них являются быстрое преобразование Фурье (БПФ) по отношению к дискретному преобразованию Фурье (ДПФ) и битовая сортировка (сеть Батчера) по отношению к сортировке пузырьком [1]. Несмотря на то что данные алгоритмы относятся к различным областям, их объединяет фундаментальный подход – исходный массив данных делится пополам по некоторым правилам (при необходимости эта операция повторяется), затем над частями разделенного массива выполняются необходимые операции, после чего результаты этих частных операций комбинируются для получения итогового результата. В результате данных преобразований достигается значительное сокращение числа выполняемых операций: так, для БПФ ускорение по сравнению с ДПФ составляет около $N/\log 2N$ раз, а для сети Батчера – $(N/\log 2N)^2$ раз.

Однако для итерационных методов метод деления пополам не применялся ранее, поскольку при программировании вычислительных систем традиционной архитектуры применяется процедурная парадигма вычислений, которая подразумевает последовательное описание операций выполняемого алгоритма. При последовательной обработке массива данных небольшим количеством процессоров методы деления пополам и «голова-хвост» не имеют существенного различия в скорости выполнения. При структурном подходе к вычислениям появляется возможность реализации всего информационного графа задачи без разбиения ее на отдельные компоненты, что в свою очередь позволяет преобразовывать информационный граф для оптимизации алгоритма [2].

При структурном подходе становится возможным сократить часть операций для итерационных методов, например метода Якоби, посредством автоподстановки [3], т.е. для вычисления n -го приближения вектора неизвестных уже используются не значения $n-1$ итерационного слоя, а $n-m$, где m – глубина автоподстановки. На рис. 1 показана последовательная подстановка значений вектора неизвестных с более глубоких итерационных слоев.

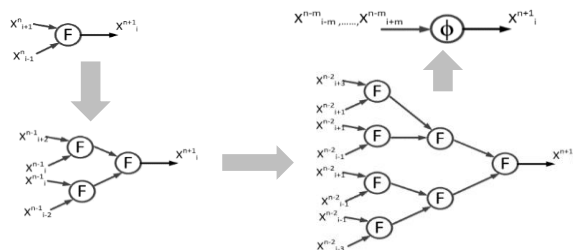


Рис. 1. Последовательное применение автоподстановки к итерационному процессу

При обычном вычислении вектора неизвестных с помощью итерационного метода требуется выполнить k итераций для всего вектора неизвестных. Применяя автоподстановку, можно получить значение для $X_{N/2}$, выполнив вычисления с глубиной итераций $N/2$, где N – размер СЛАУ. Для вычисления $X_{N/2 \pm N/4}$ потребуется глубина итераций $N/4$. Формула (1) иллюстрирует процесс вычисления n -го приближения вектора неизвестных, использующего значения не с предыдущей $n-1$ итерации, а с $n-2$.

$$X_i^n = \frac{1}{4} X_{i+2}^{n-2} + \frac{2}{4} X_i^{n-2} + \frac{1}{4} X_{i-2}^{n-2} - \frac{\Delta^2}{4} (C_{i+1} - C_{i-1}) - \frac{\Delta^2 C_i}{4}. \quad (1)$$

Таким образом, продолжается деление пополам вектора неизвестных. Для каждого нового деления уменьшается также и количество требуемых операций. Этот процесс проиллюстрирован на рис. 2.

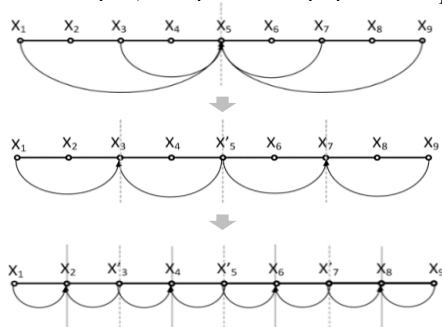


Рис. 2. Порядок вычисления вектора неизвестных при помощи быстрого метода Якоби

Данный подход позволяет значительно сократить количество операций, необходимых для решения СЛАУ методом Якоби. Число операций, необходимых для вычисления классическим способом, равно:

$$O_{classic} = k \cdot (4N - 2),$$

где N – размер матрицы, k – число итераций.

Число операций для модифицированного метода составляет:

$$O_{mod} = \frac{k}{p} \cdot \frac{13}{4} \cdot (N - 1) \cdot (\log_2(N - 1) - 1),$$

где p – число итераций, выполняемых при одном прогоне модифицированного метода.

Следовательно, сокращение количества операций составит:

$$E = \frac{O_{classic}}{O_{mod}} \approx 1.23 \cdot \frac{p}{\log_2 N}$$

Таким образом, применение данного метода в сочетании со структурным подходом к организации вычислений позволяет добиться значительного повышения производительности вычислительных систем при решении СЛАУ методом Якоби.

1. **Левин И.И., Алексеев К.Н., Гуленок А.А.** Преобразование простейших сортирующих сетей к нечетно-четной сети Батчера // Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2024. – С.50-63. https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/980/1167 DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-50-63.
2. **Левин, И.И.** Реконфигурируемые вычислительные системы. Ресурснезависимое программирование: монография / И.И. Левин, А.И. Дордопуло. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2025. – 361 с. – ISBN 978-5-9275-4899-6
3. **Михайлов Д.В.** Преобразование последовательного информационного графа метода прогонки в параллельную форму // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 7 (224). С. 177-188.

А.В. Подопригора

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ PAGERANK НА PBC

*НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, г. Таганрог,
podoprigora@superevm.ru*

В настоящее время объём данных, доступных в сети Интернет, исчисляется миллионами терабайт и хранится на персональных компьютерах и серверах по всему миру. Для поиска необходимой информации в таком объёме данных требуются специализированные инструменты, методы и оборудование. Для релевантного подбора запрашиваемых веб-страниц в поисковых системах Яндекс и Google используются методы ранжирования веб-страниц по степени их важности. В частности, в поисковых сервисах Google применяется алгоритм PageRank [1], в основе которого лежит поиск собственных векторов степенным методом. Как правило, матрица задачи PageRank - разреженная, поскольку домены сети не связаны по типу «каждый с каждым», а ее размерность составляет миллионы элементов. В связи с этим задача ранжирования веб-страниц по степени важности является весьма трудоёмкой с точки зрения вычислений и требует применения специализированных методов и средств.

Существует реализация алгоритма PageRank [2], в которой на кластерной многопроцессорной системе «Фугаку» [3] с 1024 процессорами Fujitsu A64FX реализована задача поиска собственных векторов. Неструктурированная разреженная матрица с более чем 2×10^8 ненулевыми элементами и размерностью 32×10^6 разделяется на части размером 5×10^5 х 2×10^6 для обработки каждой на соответствующем процессоре системы.

Однако производительность кластерной МВС «Фугаку» при решении задачи поиска собственных векторов степенным методом не превышает 15% от пиковой производительности.

Для повышения реальной производительности при решении задачи с неструктурированными матрицами большой размерности автором применяются реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) и разработанный модернизированный метод обработки больших разреженных неструктурированных матриц, который позволяет достигать высокой реальной производительности [4]. Для реализации параллельно-конвейерной программы PageRank были использованы базовые матричные операции, реализованные на основе модернизированного метода обработки больших разреженных неструктурированных матриц. Однако для создания эффективного вычислительного конвейера необходимо изменить порядок операций и упростить систему управления потоками данных.

Степенной метод поиска собственных значений векторов заключается в итерационном умножении матрицы коэффициентов на предварительно заданный собственный вектор с последующей нормализацией полученного результата.

$$r^{k+1} = \frac{A \cdot r^k}{\|A \cdot r^k\|}, k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где r^{k+1} – искомый вектор собственных значений, полученный на $k+1$ итерации; r^k – текущий вектор собственных значений; A – матрица коэффициентов, $\|A \cdot r^k\|$ – норма произведения матрицы A на вектор собственных значений r^k .

Реализация вычислительной структуры задачи поиска собственных векторов неструктурированной и разреженной матрицы степенным методом на основе формулы (1) не позволяет эффективно организовать конвейер, так как при распараллеливании по итерациям информационного графа пропорционально растет ресурс системы управления данными нормализации вектора. Поэтому порядок операций был преобразован – нормирование произведения выполняется после выполнения ряда матричных умножений.

$$r^{k+1} = \frac{A^k \cdot r^0}{\|A \cdot r^0\| \cdot \prod_k G_k}, k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где G_k – коэффициент коррекции нормы произведения матрицы на вектор собственных значений.

На основании формулы (2) синтезирована вычислительная структура базового подграфа задачи вычисления собственных векторов неструктурированной матрицы A степенным методом (рис. 1).

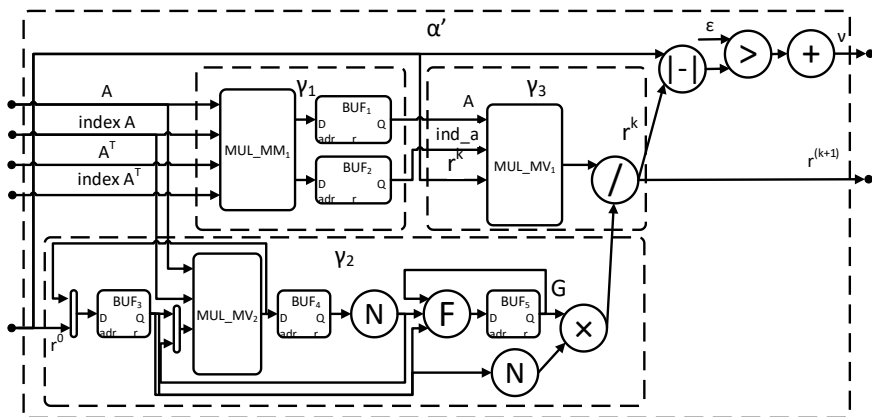


Рис. 1. Вычислительная структура базового подграфа задачи поиска собственных векторов степенным методом

Вычислительная структура состоит из трех блоков. **Блок γ_1** выполняет возведение матриц A в степень k с ускоренной базовой операцией умножения матриц. Операция умножения матрицы на матрицу MUL_MM_1 распараллеливается по итерациям, для выполнения k -й итерации потребуется $k-1$ блоков умножения. **Блок γ_2** выполняет вычисления нормы произведения матрицы A и вектора r^0 , которой записывается в BUF_3 . В блоке умножения MUL_MV_2 на каждой последующей итерации будет выполняться расчет нового вектора r^k параллельно с операцией возведения в степень. Промежуточные результаты r^k помещаются в BUF_4 , далее рассчитывается норма в блоке N . Блок управления F на каждой итерации получает: норму от вектора r^k , произведение вектора собственных значений r^0 и матрицы A , скорректированную норму предыдущей итерации для вектора r^{k-1} . На k -й итерации G корректирует норму от произведения r^0 и A для передачи в блок γ_3 . **Блок γ_3** выполняет операцию умножения матрицы на плотный вектор MUL_MV_1 и скалярного деления каждого элемента вектора собственных значений матрицы на полученную норму. Эти вычисления выполняются однократно для всей вычислительной структуры задачи.

Рассмотренный подход для задачи поиска собственных векторов степенным методом значительно упрощает систему управления потоками данных в вычислительной структуре за счет локализации ее в отдельном блоке. Распараллеливание по итерациям информационного графа задействует ресурс системы непосредственно для возведения матрицы в необходимую степень. Снижение накладных расходов на управление и увеличение степени распараллеливания вычислительных операций приводит к дополнительному увеличению реальной производительности на уровне 90–95% от пиковой.

1. **Page L.** The pagerank citation ranking: Bringing order to the web / L. Page, S. Brin, R. Motwani, T. Winograd// Tech. rep., Stanford InfoLab (1999).
2. **Vandromme M.** Scaling the PageRank Algorithm for Very Large Graphs on the Fugaku Supercomputer M. Vandromme, J. Gurhem, M. Tsuji, S. Petiton, M. Sato // Computational Science – ICCS 2022 (pp.389-402) January 2022 DOI:10.1007/978-3-031-08751-6_28.
3. Highlights - June 2023 [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.top500.org/lists/top500/>.
4. **Левин И.И.** Модифицированный метод обработки больших разреженных неструктурированных матриц на реконфигурируемых вычислительных системах //И.И. Левин, А.В. Подопригора// Вычислительные методы и программирование. 2024.25, No 2. 142–154. doi10.26089/NumMet.v25r212.

Е.А. Тименко

МУЛЬТИКОНВЕЙЕРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БИТОВЫХ ПОТОКОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*Юго-Западный государственный университет, г. Курск,
johntit@mail.ru*

Введение

Современные высокопроизводительные вычислительные системы и их элементы [1-2], создаются для эффективного решения вычислительно трудоемких задач реального уровня сложности [3, 4], что определяет поиск и разработку нестандартных архитектур и вычислительных структур, ориентированных на управление и обработку битовых потоком данных и обработку символьной информации. Структурно битовый поток выглядит как набор унитарных кодов (УК), каждый из которых представляет собой не весовой код, а его количественное значение определяется числом логических «1» в его составе. С другой стороны, эти биты по отдельности или группами задают структурно-лингвистические свойства УК как строки.

Известно, что обработка УК возможна в рамках однородных вычислительных структур – конвейеров, позволяющих за счет совмещения операций на различных ступенях, вести одновременную обработку нескольких УК из входного потока данных [5].

Исторически над УК в однородных ВС чаще выполняются арифметические операции, связанные с количественными оценками параллельно

выполняемых процессов, операции сравнения с числовым эталоном (порогом) и др. Тем не менее, в настоящее время вопросы структурно-лингвистической обработки групп бит (префиксов, суффиксов) в составе унитарного кода, являются наиболее значимыми для оценки результатов параллельных процессов проблемно-поисковых задач, задач искусственного интеллекта [6].

Эта особенность трактовки УК как битовой строки определяет актуальной задачу проектирования высокопроизводительных вычислительных структур конвейерного типа.

В таблице 1 приведены наиболее важные операции, выполняемые над УК, где ЧИ –числовая информация, СИ –символьная информация.

При выполнении данных операций над УК время T_{conv} работы конвейера рассматривается как целевая функция, зависящая от длины кода ($length$), количества потоков данных $thead$, многофункциональности ячеек (ступеней) конвейера $multi\ functions$, конфигурации самого конвейера $configuration$

$$T_{conv}(length, thead, multifunctions, configuration) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Таблица 1

Базовые операции над УК

| | Операция | Тип данных |
|---|--|------------|
| 1 | Нормализация УК | ЧИ |
| 2 | Подсчет количества логических «1» | ЧИ |
| 3 | Арбитраж (слева, справа) | СИ |
| 4 | Формирование правой/левой серии логических «1» | СИ |
| 5 | Формирование правой/левой серии логических «0» | СИ |
| 6 | Вычисление адреса первой правой/левой логической «1» | ЧИ |
| | Преобразование «весовой код → нормализованный УК» | ЧИ |
| 8 | Преобразование «нормализованный УК → весовой код» | ЧИ |
| 9 | Правая/левая инверсия УК | СИ |

Основная часть

Теоретической основой создания однородных конвейеров являются итеративные сети [7, 8] и однородные вычислительные структуры. Итеративная сеть – это однородная система вычислительных ячеек для передачи информационных, конфигурационных и управляющих сигналов в конвейере. На основе кода конфигурации и набора вычисляемых операций итеративная сеть формирует свою вычислительную структуру, далее

осуществляет прием входных операндов (унитарных кодов), и реализует рекуррентные вычисления по длине конвейера.

Тем не менее конвейер отличает последовательное срабатывание вычислительных ячеек, начиная со стартовой точки, которая задается на одной из граничных ячеек конвейера.

Применительно к обработке УК наибольшее распространение получили линейные итеративные сети с одним направлением передачи связей между вычислительными ячейками. Направление передачи, как правило, не регулируется, а директивно определяется исходя из предпочтений разработчика. При этом в большинстве случаев направление обхода УК не влияет на выходной код.

Эмерджентный эффект при конвейеризации может быть достигнут при двунаправленной обработке входных данных в рамках итеративной сети. В этом случае линейный конвейер будет иметь 2 стартовые точки. На рисунке 1 показана такая двунаправленная итеративная сеть.

В однонаправленных конвейерах время работы T линейно зависит от длины кода n и составляет $T = nt_{CELL}$, где t_{CELL} - время срабатывания одной вычислительной ячейки Z_i ($i=1 \dots n$). Напротив, в двунаправленном линейном конвейере (рисунок 1) в каждый момент времени формируется по 2 бита в выходных кодах $Y1 = y1_1y1_2 \dots y1_n$ и $Y2 = y2_1y2_2 \dots y2_n$. Следовательно, справедливо $T = 1/2nt_{CELL}$.

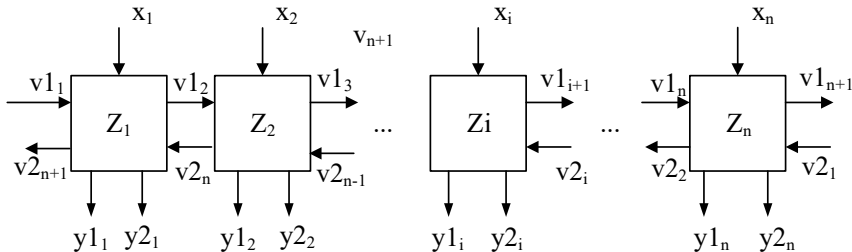


Рис. 1. Двунаправленной линейная итеративная сеть

Работа мультиконвейера заключается в параллельной подаче 2-х входных потоков УК – TheadIn 1, TheadIn 2, каждый из которых имеет специальную подготовку элементов УК в виде их диагонального размещения в потоке. Другая особенность мультиконвейера – задание в рамках ячеек итеративной сети двух встречных вычислительных процессов, что обеспечивает в каждом такте выдачу 2-х бит-результат в каждом из 2-х выходных потоков – TheadOut 1, TheadOut 2.

На рисунке 2 показана схема подготовки и выдачи входных и выходных потоков УК для мультиконвейера с двумя встречными вычислительными процессами по всем его ступеням (ячейкам сети).

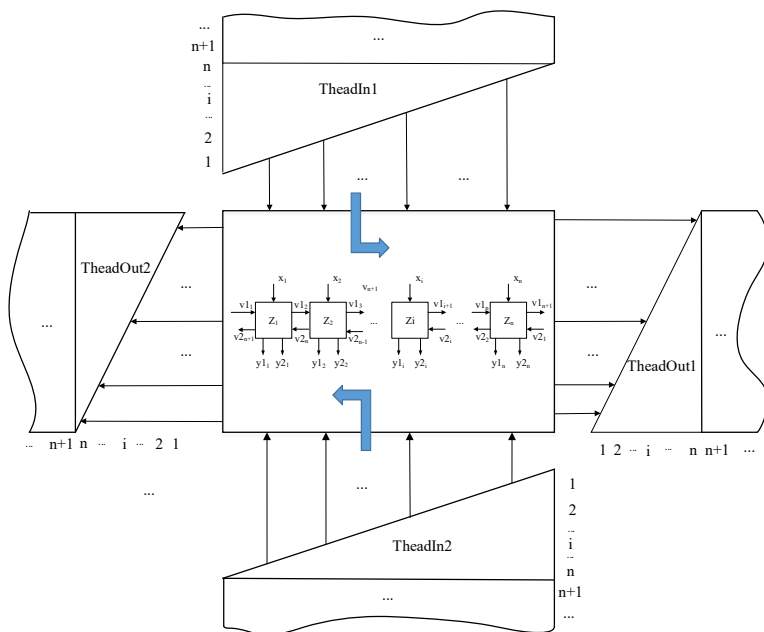


Рис. 2. Двухнаправленный мультиконвейер и схема потоков УК

В отличие от обычных конвейеров, имеющих единственную стартовую точку и фиксированное направление обработки, мультиконвейеры поддерживают двухнаправленную обработку. Это достигается за счет назначения нескольких (хотя бы 2-х) стартовых точек исходя из системных свойств отдельных фрагментов УК (префикс, тело, суффикс). Каждый локальный конвейер в составе мультиконвейера будет иметь по 2 стартовые точки на граничных элементах локального участка итеративной сети. Тогда общее время работы мультиконвейера определяется временем работы локальных конвейеров.

На рисунке 3 показана схема подготовки данных в двухнаправленную итеративную сеть, каждая вычислительная ячейка которой реализует несколько (не менее 2-х) операций.

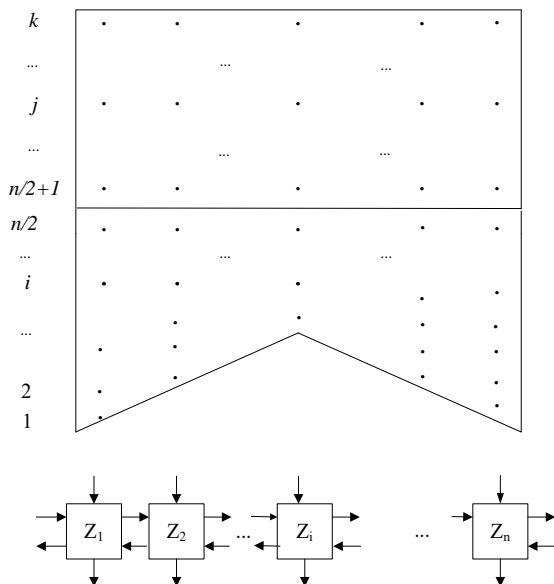


Рис. 3. Схема формирования входного и выходного потоков УК на двунаправленной итеративной сети (от центра)

Сравнение временных затрат на загрузку конвейера t_{fill} и его потактовую работу t_{work} показывает, что выигрыш достигается на каждом этапе. Тем не менее мульти функциональность конвейера приводит к увеличению аппаратных и временных затрат, в частности 2 времени работы ячейки принимаются как $\tau_{conv}=t_Z$, $\tau_{multiconv}=1,3t_Z$.

Действительно, для однонаправленного конвейера с 1 операцией время работы конвейера определяется как

$$T_{conv} = \underbrace{n + (n-1) + \dots + 2 + 1}_{t_{fill}} + \underbrace{1 + 1 + \dots + 1}_{t_{work}} = n! + k. \quad (2)$$

Для двунаправленного мультиконвейера с двумя операциями его время работы определяется как

$$T_{conv} = \underbrace{n/2 + (n-1)/2 + \dots + 2 + 0,5 + 0,5 + \dots + 0,5}_{t_{fill}} = (n!)/2 + k/2. \quad (3)$$

Заключение

Конвейерные схемы на базе однородных преобразователей УК (итеративных схем) позволили спроектировать мульти конвейерную организацию, отличающуюся совмещением во времени и пространстве битовых потоков и набора выполняемых операций. Мульти функциональность и многопоточность позволяют сократить время заполнения и работы конвейера по его ступеням в 1,5-1,7 раза при условии декомпозиции общего однонаправленного конвейера на 2 локальных конвейера с двунаправленными вычислительными процессами.

1. **Voevodin V.V., Voevodin V.I.V. Parallel computing.** St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2002. - 608 p.
2. **Гузик, В. Ф.** Реконфигурируемые вычислительные системы / В. Ф. Гузик, И. А. Каляев, И. И. Левин. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2016. – 472 с.
3. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. /М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с
4. **Каляев А.В., Левин И.И.** Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. М.: Изд-во "Янус-К", 2003. - 380 с.
5. Архитектура вычислительных систем с элементами конвейерной обработки: учебн. пособие / О.Я. Кравец, Е.С. Подвальный, В.С. Титов, А.С. Ястребов. – Воронеж, Курск, Санкт-Петербург: Политехника, 2009. – 151 с.
6. **Титенко, Е. А.** Высокопроизводительные вычислительные системы на основе ПЛИС / Е. А. Титенко, В. С. Титов, А. П. Коновальчик // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 4-2(43). – С. 73а-77.
7. Специализированные процессоры для высокопроизводительной обработки данных // О.Л. Бандман, Н.Н. Миренков, С.Г. Седухин. Москва: Радио и связь, 1988. – 208 с.
8. **Фет, Я. И.** Параллельные процессоры для управляющих систем. / Я. И. Фет. Москва: Энергоиздат, 1981. - 160 с.

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ВЫПОЛНЕНИЕМ НАУКОЕМКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА МУЛЬТИОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМАХ В МОДЕЛИ «ПОТОК РАБОТ КАК СЕРВИС»*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва,
ToporkovVV@mpei.ru, YemelyanovDM@mpei.ru, BulkhakAN@mpei.ru*

Введение

В работе рассматриваются вопросы управления выполнением и планирования сложно структурированных наукоемких приложений (например, CyberShake, Epigenomics, SIPHT, Montage, LIGO) на мультиоблачных платформах «поток работ как сервис» (Workflow as a Service - WaaS) [1]. Поток работ представляется в форме направленного ациклического графа (directed acyclic graph - DAG) (рис. 1).

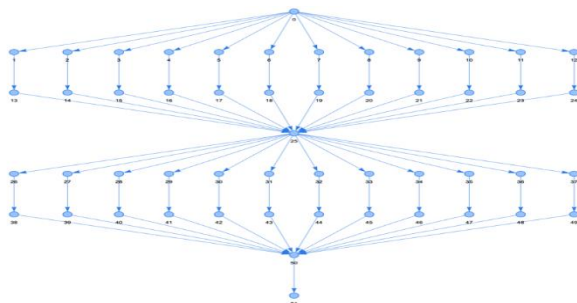


Рис. 1. Пример графа потока работ в проекте LIGO (50 задач)

При этом возникает ряд серьезных проблем, от решения которых критично зависит эффективность планирования процессов и использования ресурсов мультиоблачных платформ WaaS. Это задача отбора провайдеров инфраструктуры IaaS и формирования пула виртуальных машин (ВМ). В известных решениях, как правило, не рассматриваются вопросы одновременного выполнения на одной ВМ множества задач, принадлежащих разным потокам работ. Несмотря на то, что общим в потоках разнотипных работ является представление их в виде DAG, графовые структуры для различных приложений, например, Montage, CyberShake и

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-21-00372, <https://rscf.ru/project/22-21-00372/>)

SIPHT существенно различаются по вычислительной сложности составляющих их задач и видам информационных связей [1]. Еще один вызов – естественное наличие, помимо информационных связей, зависимостей по управлению и циклов в ряде приложений. В некоторых системах управления потоками работ (workflow management systems – WMS) (Pegasus, Apache Airflow, Taverna, Kepler) [2] прибегают к паллиативным приемам для их устранения, что приводит к увеличению времени планирования. Известные к настоящему времени исследования не охватывают всей совокупности указанных выше факторов. Необходимость создания принципиально новых технологий и методов выполнения наукоемких приложений на платформах WaaS определяет актуальность указанной выше проблемы.

Итеративная схема управления выполнением потоков работ

В работе предлагается комплексное решение проблемы выполнения приложений в модели WaaS на основе следующей схемы (рис. 2).

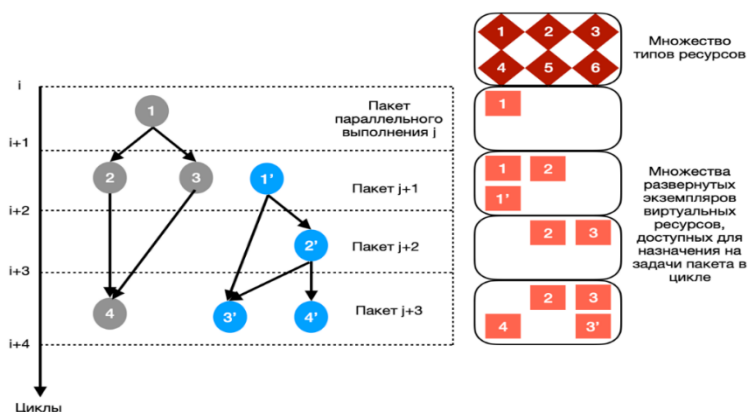


Рис. 2. Итеративная схема управления потоками работ

На платформу WaaS в любой момент времени поступает множество потоков работ. При этом каждая из задач потока может выполняться на некотором подмножестве типов ВМ, которые предоставляются провайдерами IaaS. Время выполнения отдельной задачи потока складывается из следующих составляющих: время обработки как отношение объема вычислений (например, в миллионах инструкций) к производительности процессора (например, в миллионах инструкций в секунду) на ВМ соответствующего типа; время на обмен данными между задачами потока (чтение и запись в глобальное хранилище, например Amazon S3); время на развертывание ВМ и контейнера в ВМ соответствующего типа. Монетарная стоимость выполнения задачи потока на ВМ определенного типа

определяется как отношение времени выполнения к периоду биллинга развернутых ВМ, умноженное на стоимость одного периода биллинга.

Планирование потоков работ и предоставление ресурсов в виде ВМ и контейнеров осуществляется итеративно. Итерация связана с назначением готовых к выполнению задач различных потоков. При этом делается попытка использовать уже развернутые ВМ и контейнеры соответствующего типа. Если это удастся, то из времени выполнения вычитаются время на развертывание ВМ и (или) контейнера в ВМ. В случае отсутствия активных ВМ назначение задач откладывается до следующей итерации.

При поступлении соответствующего потока работ до назначения задач на доступные ВМ выполняется его препроцессорная обработка - планирование по методу критических работ (МКР) с заданными критериями эффективности [3]. Суть МКР заключается в следующем. Выделяются так называемые критические работы - последовательности не назначенных задач с наибольшей суммой оценок длительности при использовании наиболее производительных ВМ из отобранного пула. Далее критические работы ранжируются по максимальной длительности. Процедура планирования очередной по рангу критической работы [3] может вызвать конфликты между параллельными задачами, конкурирующими за один и тот же ресурс и принадлежащими разным критическим работам. После разрешения конфликтов достигнутый промежуточный план должен сохраняться.

На основе предложенной схемы разработана совокупность технологий и средств управления выполнением междисциплинарных наукоемких приложений на мультиоблачных платформах WaaS. Программный код проекта размещен в репозитории GitHub (<https://github.com/Sorran973/Scheduling-in-Workflow-as-a-Service>).

1. **Toporkov, V.** Job Batch Scheduling in Workflow-as-a-Service Platforms / V. Toporkov, D. Yemelyanov, A. Bulkhak, M. Pirogova // Proc. PCT 2024. Communications in Computer and Information Science. - 2024. V. 2241, Springer, Cham. - P. 65–79.
2. **Amstutz, P.** Existing Workflow systems [Электронный ресурс] <https://s.apache.org/existing-workflow-systems> / P. Amstutz, M. Mikheev, M. R. Crusoe, et al. (дата обращения 18.08.2024).
3. **Toporkov, V.** Micro-scheduling for Dependable Resources Allocation / V. Toporkov, D. Yemelyanov // Performance Evaluation Models for Distributed Service Networks. Studies in Systems, Decision and Control. - 2021. V. 343. Editors: Bocewicz, Grzegorz, Pempera, Jarosław, Toporkov, Victor. Springer International Publishing. - P. 81-105.

РАЗДЕЛ 4
ПРОБЛЕМЫ СЕТЕВОГО
УПРАВЛЕНИЯ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ

ЧАСТИЧНО-ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ ИЗ ЕДИНОГО ЦЕНТРА*

*Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, k.amelin@spbu.ru, st062084@student.spbu.ru,
o.granichin@spbu.ru, st087340@student.spbu.ru, a.o.chernov@spbu.ru*

Введение

В последние годы активно развивается применение групп беспилотных роботов, способных покрывать большие площади, имеющие большую отказоустойчивость и масштабируемость, чем единичные роботы [1]. Подобные системы востребованы в сельском хозяйстве, поисково-спасательных операциях, экологическом мониторинге и других областях, где требуется скоординированное выполнение задач [2]. Одной из ключевых проблем при этом остается поддержание жесткой формации — сохранение взаимного расположения роботов, несмотря на внешние возмущения и различия в их динамике [3].

Традиционно для управления формацией используются два подхода: централизованный и децентрализованный [4]. В первом случае координация осуществляется через единый центр управления, вычисляющий целевые позиции для каждого робота и передающий соответствующие команды. Такой метод плохо масштабируется при увеличении числа агентов и становится уязвимым при нарушениях связи. Децентрализованные схемы, напротив, позволяют роботам самостоятельно согласовывать свои действия, взаимодействуя только с ближайшими соседями [5]. Часто для этого применяются консенсусные алгоритмы. Главным недостатком этого подхода является сложность реализации подобных систем [6].

В этой работе предлагается гибридный подход, сочетающий преимущества обоих методов. Глобальное целеполагание при таком управлении осуществляется централизованно, а поддержание формации — децентрализованно. Такой подход позволяет системе сохранять устойчивость даже при временных разрывах связи и внешних помехах при передаче данных.

В качестве основы для децентрализованного управления используется протокол локального голосования (LVP) — масштабируемый метод

*Работа выполнена в рамках гранта из федерального бюджета в форме субсидии федеральному государственному бюджетному образовательному учреждению высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» от 16 апреля 2025г. № 139-15-2025-007: ИГК 000000Ц313925РЗО0002

достижения согласия в распределенных системах [7]. Его ключевая особенность заключается в способности работать в условиях динамически изменяющейся сети, шумов и частичных потерь связи [8].

Предложенный подход позволяет объединить гибкость децентрализованного управления с возможностью внешнего контроля, что делает его перспективным для практического применения в сложных и изменчивых средах.

Частично-централизованное управление

В общем случае задача управления группой роботов в дискретном времени может быть сформулирована как следующая оптимизационная задача:

$$J_0(\{u_t^i\}) = \sum_{t=0}^T (X_t - X_t^*)^T Q (X_t - X_t^*) \rightarrow \min_{\{u_t^i\} \in \mathcal{U}}, \quad (1)$$

где X_t — состояние группы в момент времени t (объединение состояний всех роботов группы), X_t^* — целевая траектория группы, Q — положительно-определенная матрица, u_t^i — ограниченные управляющие стратегии, т.е. такие стратегии, что $\|u_t^i\| \leq c_U$.

При предлагаемом частично-централизованном управлении управляющая стратегия будет иметь следующий вид:

$$u_t^i = \chi_t^i U_t + \bar{u}_t^i, \quad (2)$$

где U_t — глобальное управление группой в момент времени t (следование по целевой траектории), χ_t^i — индикатор приема глобального управления i -м роботом, \bar{u}_t^i — локальное управление робота (поддержание формации).

Глобальное микроуправление — вычисление управляющих стратегий для каждого робота — ресурсозатратно. В [9] доказывается, что можно построить субоптимальное макроуправление для центра группы. В работе предполагается, что глобальное управление U_t существует и известно.

Локальное управление в простейшем случае описывается как $\bar{u}_t^i = ([\bar{u}_x]_t^i, [\bar{u}_y]_t^i, [\bar{u}_z]_t^i, [\bar{u}_h]_t^i)^T$, где компоненты вектора соответствуют подержанию формации в горизонтальной плоскости, по высоте и по курсу.

В предлагаемом решении высота и курс всех роботов группы должны совпадать. В этом случае синхронизация по этим параметрам с помощью LVP выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} [\bar{u}_z]_{t+1}^i = \gamma_z \sum_{j \in N_t^i} (z_t^j - z_t^i) \\ [\bar{u}_h]_{t+1}^i = \gamma_h \sum_{j \in N_t^i} (h_t^j - h_t^i) \end{cases}, \quad (3)$$

где z_t^i и $h_t^i \in [-180^\circ, 180^\circ]$ — высота и курс i -го робота в момент времени t , γ_z и γ_h — размеры шага протокола, \mathcal{N}_t^i — соседи i -го робота в момент времени t (т.е. роботы группы, с которыми i -й робот может обмениваться информацией).

Для синхронизации в горизонтальной плоскости необходимо определить паттерн формации. Простейший вариант — сетка. В ней любой робот i ожидает увидеть 8 соседей, расположенных квадратом вокруг него. Соответственно, зная положение (x_t^j, y_t^j) соседа j , он может вычислить местоположения, в которых его ожидал бы увидеть сосед. Среди них он выбирает ближайшее к своему текущему местоположению. Обозначим такое положение как $(\hat{x}_t^{i,j}, \hat{y}_t^{i,j})$. Управление примет вид:

$$\begin{cases} [\bar{u}_x]_{t+1}^i = \gamma_{xy} \sum_{j \in \mathcal{N}_t^i} (\hat{x}_t^{i,j} - x_t^i) \\ [\bar{u}_y]_{t+1}^i = \gamma_{xy} \sum_{j \in \mathcal{N}_t^i} (\hat{y}_t^{i,j} - y_t^i) \end{cases}, \quad (4)$$

где γ_{xy} — размер шага протокола.

Алгоритм был апробирован в симуляторе. В сценарии группа из 4 роботов-квадрокоптеров летела по сложной траектории (рис. 1, слева). На рис. 1, справа представлен график среднего отклонения положения роботов от идеального в 6 запусках сценария.

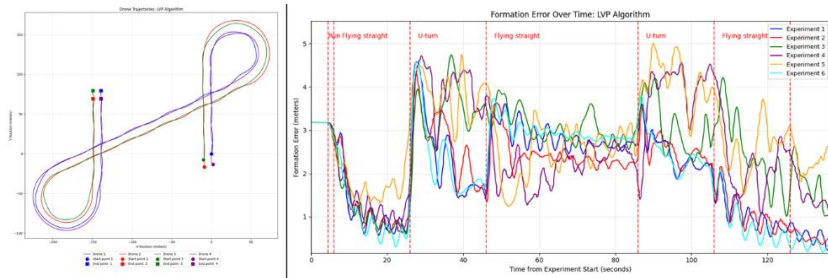


Рис. 1. Траектория полета и отклонение положения роботов

Можно видеть, что на поворотах группа распадалась, а затем восстанавливалась при движении по прямой.

Закключение

В работе представлено частично-централизованное управление группой роботов из общего центра. Поддержание формации обеспечивается при помощи протокола локального голосования. Эксперименты в симуляции показывают эффективность предложенного метода.

1. **Chen W., Liu J., Guo H., Kato N.** Toward robust and intelligent drone swarm: challenges and future directions // *IEEE Network*. – 2020. – Т. 34. – № 4. – С. 278–283.
2. **Bu Y., Yan Y., Yang Y.** Advancement challenges in UAV swarm formation control: a comprehensive review // *Drones*. – 2024. – Т. 8. – № 7.
3. **Do H., Hua H., Nguyen M., Nguyen V.-C., Nguyen H., Nga N.** Formation control algorithms for multiple-UAVs: a comprehensive survey // *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. – 2021. – Т. 8. – С. 170230.
4. **Амелин К. С., Амелина Н. О., Граничин О. Н., Сергеев С. Ф.** Децентрализованное групповое управление роем автономных роботов без маршрутизации данных // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2021. – Т. 9. – № 1. – С. 42–48.
5. **Каляев И. А., Капустян С. Г., Гайдук А. Р.** Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // *Управление большими системами*. – 2010. – № 30. – С. 605–639.
6. **Городецкий В. И., Бухвалов О. Л., Скобелев П. О., Майоров И. В.** Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // *Управление большими системами*. – 2017. – № 66. – С. 94–157.
7. **Amelina N., Fradkov A., Amelin K.** Approximate consensus in multi-agent stochastic systems with switched topology and noise // *2012 IEEE International Conference on Control Applications*. – 2012. – С. 445–450.
8. **Amelina N., Fradkov A., Jiang Y., Vergados D. J.** Approximate consensus in stochastic networks with application to load balancing // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2015. – Т. 61. – № 4. – С. 1739–1752.
9. **Erofeeva V., Granichin O., Uzhva D.** Meso-scale coalitional control in large-scale networks // *Automatica*. – 2025. – Т. 177. – С. 112276.

А.А. Баринов

УНИФИЦИРОВАННАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ FANET

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, BArсениyy@yandex.ru*

Введение

Эффективность функционирования беспилотных авиационных систем, объединенных в летающие самоорганизующиеся сети (Flying Ad

Нос Networks, FANET), в задачах мониторинга, связи и логистики критически зависит от архитектуры используемого протокола маршрутизации. К настоящему времени предложены многочисленные протоколы, реализующие принципиально различные архитектурные парадигмы (проактивные, реактивные, гибридные, на основе машинного обучения) [1]. Сравнительный анализ протоколов маршрутизации в FANET, как правило, ограничен оценкой по внешним показателям производительности, что не позволяет выявить, как именно архитектурные особенности протокола влияют на его итоговую эффективность, в том числе, с точки зрения ресурсных затрат устройств, составляющих сеть.

Таким образом, актуальной научной задачей является разработка инструментария, позволяющего проводить системный, компонентный анализ протоколов маршрутизации для объективной оценки их ресурсной эффективности.

Разработка унифицированной функциональной модели

Для решения поставленной задачи предлагается унифицированная модель, позволяющая декомпозировать процесс маршрутизации на стандартные функциональные компоненты. В основе подхода лежит представление протокола как совокупности функциональных блоков (ФБ), реализующих базовые функции: прием пакетов, анализ сетевого контекста, принятие решения и т.д. Концептуальная схема модели, где ключевым элементом является детализация блока «Анализ и поддержание сетевого контекста» (ФБ2), представлена на рис. 1.

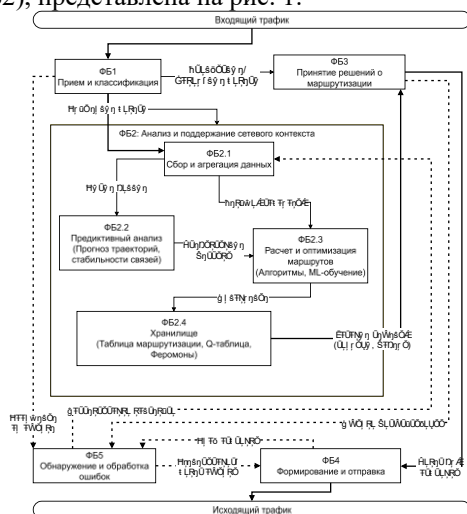


Рис. 1. Концептуальная схема унифицированной функциональной модели процесса маршрутизации

Для апробации предложенной модели был проведен аналитический эксперимент. Анализировался сценарий «восстановление связи после обрыва» в сети из 50 узлов со средней степенью связности 4, для двух протоколов, представляющих разные парадигмы: реактивного AODV и проактивного OLSR. Модель позволила зафиксировать количество активаций каждого функционального блока для обоих протоколов в данном сценарии (табл. 1).

Таблица 1

| Количество вызовов функциональных блоков (ФБ) | | |
|--|----------------------|----------------------|
| Функциональный блок | AODV: Кол-во вызовов | OLSR: Кол-во вызовов |
| ФБ ₁ | 48 | 6 |
| ФБ ₂ | 49 | 13 |
| ФБ ₃ | 43 | 4 |
| ФБ ₄ | 44 | 3 |
| ФБ ₅ | 7 | 1 |

На основе этих данных и заданных метрик ресурсной стоимости была произведена количественная оценка итоговой ресурсоемкости реакции на обрыв связи (табл. 2).

Таблица 2

| Итоговая ресурсная стоимость восстановления связи | | |
|--|-------------|--------------|
| Метрика | AODV | OLSR |
| Время восстановления (с) | 2.72 | 0.97 |
| Энергозатраты (ед.) | 3.93 | 1.175 |
| Объём трафика (байт) | 932 | 84 |

Результаты наглядно демонстрируют фундаментальные архитектурные компромиссы. Реактивный AODV, иницилируя поиск нового маршрута, показывает высокие транзакционные издержки: большое количество вызовов ФБ, что приводит к значительным задержкам и объему трафика. Проактивный OLSR, уже обладая информацией о топологии, реагирует значительно быстрее и экономичнее с точки зрения трафика. Таким образом, модель переводит качественные различия протоколов («реактивный»/«проактивный») в плоскость количественного анализа, позволяя обосновать выбор протокола для конкретных условий.

Заключение

В работе предложена унифицированная модель для анализа протоколов маршрутизации FANET, позволяющая декомпозировать их на стандартные компоненты и связать с метриками потребления ресурсов.

Научная значимость работы заключается в создании унифицированной модели, на основе которой может быть произведена количественная оценка ресурсной эффективности протоколов маршрутизации FANET, что позволяет принимать обоснованный выбор протокола при проектировании и реализации сетей.

1. **Баринов, А. А.** Проблемы маршрутизации в FANET и используемые решения / А. А. Баринов // Управление большими системами: Труды XX Всероссийской школы-конференции молодых ученых, Новочеркасск, 10–13 сентября 2024 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2024. – С. 108-114. – EDN YUNSOU.

Ж.В. Безбородова, Р.Р. Галин

АДАПТИВНЫЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ: МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва,
z_bezborodova@inbox.ru*

Введение

Современный мир динамично развивается, и технологии всё глубже проникают в сферы жизнедеятельности человека: от медицины до промышленности и образования. В этих условиях человеко-машинные интерфейсы (ЧМИ) становятся ключевым элементом взаимодействия между пользователем и технической системой. Особенно важную роль они играют в робототехнике — как в промышленных, так и в сервисных, медицинских и исследовательских системах. Человеко-машинный интерфейс - совокупность технических средств, обеспечивающих взаимодействие между устройством/программным обеспечением и человеком.. Эволюция ЧМИ прошла путь от командной строки до интуитивных мультимодальных решений, включающих голосовое управление, сенсорное взаимодействие, элементы дополненной и виртуальной реальности. Се-

годня мультимодальные интерфейсы позволяют повысить эффективность и безопасность работы операторов, а также адаптироваться к условиям окружающей среды и психофизиологическим особенностям пользователя. Хорошо организованный интерфейс делает рабочую обстановку более комфортной, помогает уменьшить число ошибок и таким образом ограничить возможный ущерб для управляемой системы.

Цель настоящего исследования — разработать методологию проектирования адаптивных мультимодальных ЧМИ в робототехнике с учётом когнитивной нагрузки и эргономических требований.

Классификация и принципы проектирования человеко-машинных интерфейсов

Интерфейсы классифицируются по модальности (GUI, VUI, TUI, AR/VR), типу представления информации (приборный, схематический, функциональный и др.), а также по способу отбора информации (обзорные, задачные, системные). Основными принципами эффективного ЧМИ являются простота, интуитивность, адаптивность, последовательность и наличие понятной обратной связи. Эти свойства минимизируют ошибки и когнитивную нагрузку при использовании систем управления, особенно в условиях высокой ответственности. Разработка любого пользовательского интерфейса включает в себя проектирование, реализацию и тестирование.

Обзор подходов к ЧМИ в робототехнике

В робототехнике наибольшее распространение получили графические интерфейсы (GUI), но с ростом задач увеличивается значимость мультимодального взаимодействия. Системы нового поколения сочетают голос, визуальные элементы, касания, жесты и тактильную обратную связь. Такие интерфейсы особенно важны в роботах для телеприсутствия, коллаборативных системах (cobots) и медицинских манипуляторах. Перспективные направления включают использование LLM, контекстно-зависимых подсказок и нейроинтерфейсов [1, 4-6].

Методология оценки эффективности ЧМИ

Для объективной оценки интерфейсов используются:

- производственные метрики (время реакции, ошибки);
- когнитивная нагрузка (NASA-TLX);
- юзабилити (SUS);
- адаптивность интерфейса;

- эффективность использования каналов восприятия.

Применение комбинированных полевых и лабораторных тестов позволяет выявить неочевидные слабые места в взаимодействии человека с роботизированной системой [2, 3].

Пример: голосовое управление в ЧМИ

Процесс взаимодействия при голосовом управлении включает:

1. Детекция сигнала и начало распознавания.
2. Предобработка: фильтрация шума, адаптация к голосу.
3. Распознавание речи с использованием акустических и языковых моделей.
4. Интерпретация команды с тематической классификацией.
5. Выдача отклика или выполнение действия системой.

Графическая схема, отображающая этапы работы ЧМИ с голосовым управлением представлена на рисунке 1.

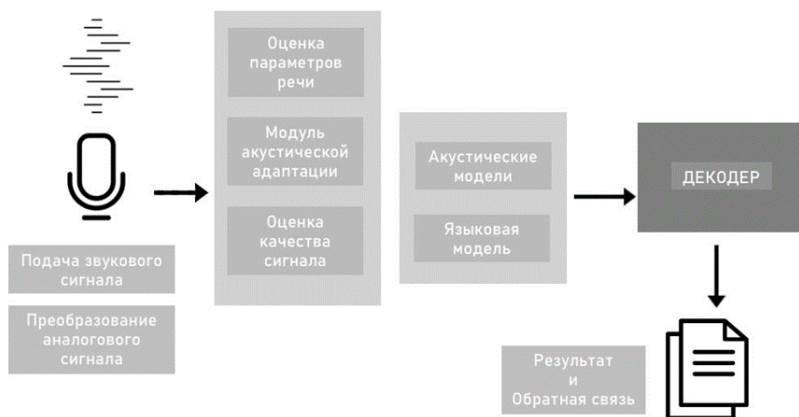


Рис. 1. Графическая схема, отображающая этапы работы ЧМИ

Выявление ограничений по эргономике и когнитивной нагрузке

Разработка и внедрение человеко-машинных интерфейсов в робототехнических системах сопряжены с рядом ограничений, напрямую влияющих на эффективность и безопасность взаимодействия оператора с машиной. Два ключевых фактора, определяющих пределы взаимодействия - эргономические характеристики интерфейса и уровень когнитивной нагрузки, возникающий у пользователя в процессе управления.

Эргономические проблемы особенно критичны в условиях работы с промышленными или дистанционно управляемыми роботами, где ошибки взаимодействия могут привести к повреждению оборудования или угрозе жизни [7]. К основным ограничениям относятся:

- Физическая неудобность интерфейса (размеры элементов управления, расположение экранов и контроллеров, углы обзора, доступность обратной связи).

- Неоптимальная визуальная организация информации — перегруженность экрана, низкий контраст, мелкий шрифт, отсутствие логической группировки данных.

- Отсутствие универсальности — интерфейс может быть неудобным или недоступным для пользователей с особыми потребностями (например, слабое зрение, нарушения моторики).

- Низкая чувствительность и избыточность тактильной или голосовой обратной связи — интерфейс не адаптируется к окружающим условиям (шум, вибрация, свет).

Когнитивная нагрузка — это объём ментальных ресурсов, необходимых для восприятия, понимания и принятия решений в интерфейсе. Она возрастает при:

- Избыточности или неоднозначности информации, требующей дополнительной интерпретации.

- Непредсказуемости поведения интерфейса, вызывающей недоверие и необходимость постоянной проверки.

- Несоответствии интерфейса ментальным моделям пользователя — если логика управления не интуитивна или нарушает ожидаемый сценарий.

- Одновременном использовании нескольких модальностей без согласованности, что приводит к перегрузке каналов восприятия.

Высокая когнитивная и физическая нагрузка приводит к росту ошибок, снижению скорости реакции, повышенной утомляемости и, в конечном счёте, — снижению надёжности работы робота. Особенно это критично для:

- Систем удалённого управления, где оператор полагается на ограниченные визуальные и аудиоканалы [8];

- Коллаборативных роботов, взаимодействующих с человеком в общем рабочем пространстве [9];

- Адаптивных интерфейсов, которые должны автоматически подстраиваться под пользователя, но без чёткой модели восприятия — могут ухудшать ситуацию.

Заключение

ЧМИ – это основа эффективного взаимодействия человека и машины, особенно в робототехнических системах, где важны точность, надёжность и безопасность. Мультимодальные интерфейсы позволяют расширить диапазон взаимодействия, снизить когнитивную нагрузку и повысить адаптивность под пользователя и контекст. Разработка таких интерфейсов требует учёта эргономических, технических и психологических аспектов. В дальнейшем перспективны исследования в области персонализированных и обучающихся ЧМИ, использующих возможности ИИ и сенсорной интеграции.

1. **Goodrich, M. A., & Schultz, A. C.** (2007). Human–robot interaction: a survey. *Foundations and Trends in Human–Computer Interaction*.
2. **Sutherland, J., & Szafir, D.** (2021). Evaluating multimodal input for controlling robotic swarms. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*.
3. **Zhao, Y., et al.** (2020). A survey on multimodal interaction for human–robot collaboration. *Robotics and Autonomous Systems*.
4. **Lee, J. D., & See, K. A.** (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*.
5. **Xu, W., & Dudek, G.** (2022). Deep learning in human–robot interaction: A review. *ACM Computing Surveys*.
6. **Simoens, P., Dragone, M., & Saffiotti, A.** (2018). *The Internet of Robotic Things*.
7. **Петров Ю.С., Шкляр А.В.** (2021). Принципы проектирования интерфейса управления устройством. *Современные технологии*.
8. **Сверчков Д.С.** (2020). Разработка человеко-машинного интерфейса и его применение в системах управления. *Проблемы управления*.
9. **Галина С.Б., Галин Р.Р.** Эффективность применения LLM в коллаборативных робототехнических системах / Труды 14-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 3483-3485.

*И.В. Белоконов, Л.И. Сеницын,
С.В. Шафран, И.А. Ломака, Н.А. Елисов*

ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАНО-СПУТНИКАМИ НАУЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МИССИИ САМСАТ-ИОНОСФЕРА*

*Самарский университет им. Королева, г. Самара,
belokonov.iv@ssau.ru*

Введение

На межвузовской кафедре космических исследований Самарского университета выполняется полный цикл разработки, испытаний наноспутниковой платформы «СамСат» и наноспутников на её базе. 5 ноября 2024 года с космодрома «Восточный» был запущен наноспутник научного назначения «СамСат-Ионосфера», предназначенный для геофизических исследований.

Для обеспечения операционного управления наноспутниками на межвузовской кафедре космических исследований Самарского университета создана наземная инфраструктура сопровождения малых космических аппаратов (МКА), позволяющая сопровождать несколько наноспутников в автоматическом режиме [1-3].

В процессе проведения летно-конструкторских испытаний наноспутника «СамСат-Ионосфера» был выявлен ряд особенностей операционного управления. Указанные особенности связаны прежде всего с отсутствием актуальной информации о параметрах орбиты в первые дни полета, а также неблагоприятной помеховой обстановкой в условиях полетного выведения большого количества МКА, запущенных одновременно в рамках программ «Универсат» и «Дежурный по планете».

Особенности операционного управления наноспутником

Одной из проблем на начальных этапах полета наноспутника «СамСат-Ионосфера» являлось определение параметров орбиты для прогнозирования и проведения сеансов связи в условиях отсутствия актуальной информации от систем мониторинга космического пространства NORAD. Для уточнения орбиты использовался оригинальный программный декодер с функцией измерения несущей частоты, который на основе принимаемого от наноспутника сигнала определял доплеровский сдвиг

* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>

на протяжении всего сеанса. Затем с помощью алгоритма дифференциальной эволюции отыскивались аргумент перигея, истинная аномалия, долгота восходящего узла, фокальный параметр, наклонение и эксцентриситет орбиты, при которых минимизировалось среднеквадратичное отклонение разницы между моделируемым и измеренным доплеровским смещениями.

Другой проблемой операционного управления являлась помеховая обстановка как на орбите, так и в районе наземной станции. Одним из источников помеховой обстановки на орбите являются другие МКА, приемопередатчики которых работают на частотах, близких к рабочим частотам командно-телеметрической радиолинии наноспутника «СамСат-Ионосфера», а также возможное применение на ряде МКА приемопередатчиков широкополосных систем, таких как LoRa. При сближении наноспутника «СамСат-Ионосфера» с другими МКА наблюдалось уменьшение количества ответов от наноспутника, принятых в центре управления полетами (ЦУП) Самарского университета. На рисунке 1 приведена зависимость количества полученных ответов при сближении наноспутника «СамСат-Ионосфера» с другими МКА.

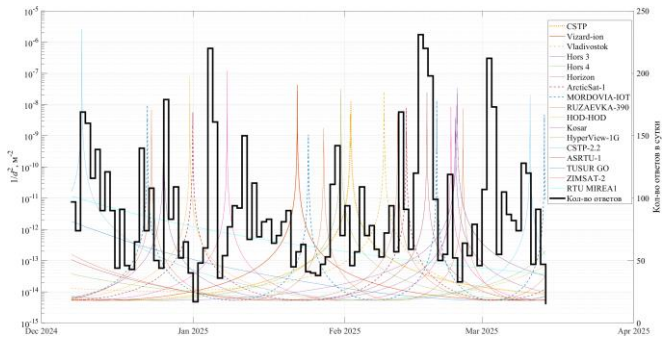


Рис. 1. Зависимость количества ответов от сближения МКА

Из рисунка 1 видно, что сближение с такими МКА, как CSTP, CSTP-2.2, ArcticSat 1, MORDOVIA-IOT, RUZAEVKA-390, HOD-HOD и HyperView-1G, приводит к заметному снижению полученных ответов в сутки. С другой стороны, например, МКА ZIMSAT-2 работает на частотах, близких к СамСат-Ионосфера, однако, он не оказывает существенного влияния на сеансы связи. Это обусловлено разнесением по времени проводимых сеансов связи.

Другим фактором, влияющим на качество сеансов связи, является наземная помеховая обстановка. На основе статистики полученных ответов от наноспутника за период с 05.11.2024 по 17.03.2025 была построена

карта распределения количества ответов от наноспутника, приведенная на рисунке 2, показывает, что наибольшее количество ответов от наноспутника было получено с южной и восточной стороны от Самары.

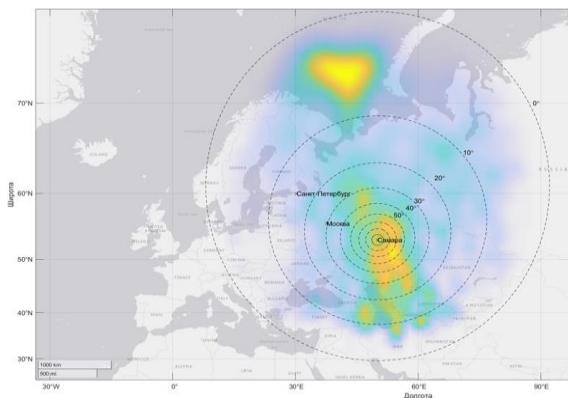


Рис. 2. Карта распределения полученных ответов

Заключение

Опыт эксплуатации наземной инфраструктуры подтвердил правильность принятых программных и аппаратных технических решений. Показано, что для определения параметров орбиты с погрешностью менее 5%, необходимо провести как минимум три сеанса связи. Целесообразно разработать технологию адаптивного планирования сеансов связи при необходимости передачи больших объемов информации и сложных команд управления с учётом вероятного возникновения помех.

1. **Belokonov I.V.** Mission of SamSat-ION for study of geophysical fields: concept and realization/ I.V. Belokonov, E.A. Boltov, I.A. Lomaka, N.A. Elisov, S.V. Shafran, L.I. Sinitsin, M.S Tsherbakov, P.N Nikolaev // Final papers of 74th International Astronautical Congress, October 2-6, 2023, Baku, Azerbaijan. IAC-23,B4,2,6,x77738.
2. **Belokonov I.V.** Lessons learned of nanosatellite SamSat-ION mission: preliminary results / I.V. Belokonov, E.A. Boltov, I.A. Lomaka, N.A. Elisov, S.V. Shafran, L.I. Sinitsin, M.S Tsherbakov, P.N Nikolaev, A.A. Kumarin, T.O. Berger // Final papers of 75th International Astronautical Congress, October 14-18, 2024, Milan, Italy. IAC-24,D1,7,4,x89537.
3. **Николаев П.Н.** Разработка наземного программного комплекса управления и связи наноспутников платформы СамСат / П.Н. Нико-

лаев, Н.С. Титов, С.В. Шафран // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67. – № 12. – С. 1030-1040. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1030-1040.

Н.Е. Бодунков, Д.С. Гиренко, Н.В. Ким, Н.А. Ляпин, Н.В. Удалова

ОЦЕНКА СХОДСТВА ПО СОСТАВУ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ НАБЛЮДАЕМЫХ СЦЕН В ЗАДАЧЕ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ*

*МАИ, г. Москва, bodunkovne@mai.ru, dima@webiceberg.com,
nkim2011@list.ru, lyapinna@mai.ru, udalovanv@mai.ru*

Для коррекции работы инерциальной навигационной системы (ИНС) беспилотного летательного аппарата (БЛА) [1] при отсутствии сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) широко используются методы визуальной навигации. Здесь, для оценки координат БЛА, необходимо определить положение текущего изображения (ТИ), принятого бортовой видеокамерой, на эталонном изображении (ЭИ – цифровой карты местности), хранящимся в бортовом вычислителе, что позволяет рассчитать координаты БЛА. Поиск положения ТИ на ЭИ на основе обработки и анализа растровых изображений имеет ряд недостатков. В частности, ТИ, получаемые в изменяемых условиях наблюдения (что характерно для БЛА высоких уровней автономности), может существенно отличаться от подготовленных ЭИ. Эти отличия могут привести к недопустимым навигационным ошибкам. Следующим недостатком, присущим обработке растровых изображений, является высокая вычислительная трудоемкость, например, корреляционно-экстремальных алгоритмов или алгоритмов, реализующих выделение сравниваемых признаков изображений.

Одним из перспективных направлений развития визуальной навигации является использование семантических описаний изображений [2]. Семантические описания позволяют оценивать сходство различных изображений в пространстве семантических признаков: классов и количестве присутствующих объектов, их атрибутов (координат, формы, размеров и пр.) и пространственных отношений (направлений и расстояний)

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России, № темы FSFF-2024-0001

между объектами, существенно сокращая использование растровой информации.

Сложность реализации алгоритмов оценки сходства изображений (по сути – задачи распознавания) по семантическим описаниям связана с необходимостью семантической сегментации изображений [3], выделения и оценки значений различных семантических признаков. Так как содержание наблюдаемой сцены ТИ заранее неизвестно, то выделение ее признаков должно производиться в процессе полета, что накладывает высокие требования на производительность бортового вычислителя.

В работе предлагается иерархический алгоритм оценки сходства семантических описаний ТИ и фрагментов ЭИ. Предлагаемый подход позволяет на каждом цикле поиска сокращать количество обследуемых фрагментов ЭИ путем последовательной отбраковки непохожих фрагментов и обновления рабочего словаря используемых семантических признаков.

Исходное семантическое сегментирование изображений, обеспечивающее выделение объектов из заранее задаваемого алфавита классов, осуществляется с помощью сверточных нейронных сетей, таких архитектур как: U-net, SegNet.

Семантическое описание ЭИ формируется из сегментированного изображения на этапе предполетного планирования. Для этого ЭИ с заранее определенными и выделенными классами объектов разбивается на фрагменты, размер которых зависит от высоты полета БЛА над рельефом местности.

Семантическое описание ТИ формируется во время полета на основе сегментированного изображения. На вход обученной сверточной нейронной сети подается ТИ, получаемое с видеокамеры, установленной на БЛА, на выходе (практически без временных затрат) получаем сегментированное ТИ.

На рис. 1 представлен пример ТИ и сегментированного ТИ. Классы объектов маркируются различными цветами.



Рис. 1. ТИ и сегментированное ТИ

На первом цикле поиска фрагмента ЭИ, идентичного принятому ТИ, производится перебор всех возможных фрагментов ЭИ. Сходство

изображений оценивается путем сравнения состава объектов (по классам и количеству), присутствующих на изображениях. Реализация данной процедуры не требует дополнительных временных затрат на выделение атрибутов объектов или отношений между ними, однако позволяет существенно сократить область поиска – количество обследуемых фрагментов ЭИ.

В качестве основной метрики оценки сходства предлагается модифицированная авторами парная критериальная функция Джеккарда [2]:

$$K_d = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left(\frac{a_i}{a_i + b_i + c_i} \right),$$

где N – кол-во присутствующих на ТИ классов объектов; a_i – кол-во совпадающих объектов i -ого класса, соответственно на ТИ и ЭИ (1,1); b_i – кол-во не совпадающих объектов i -ого класса (1,0) – на ЭИ объект отсутствует; c_i – кол-во не совпадающих объектов i -ого класса (0,1) – на ТИ объект отсутствует.

Отбраковка фрагментов ЭИ, содержащих объекты иных классов, чем в ТИ, требует: включения этих объектов в состав используемых классов или реализацию процедуры предварительной проверки фрагментов на наличие избыточных классов объектов.

Если после первого (или очередного) цикла поиска выявлены несколько альтернативных фрагментов ЭИ, то необходимо расширить словарь признаков и продолжить поиск [2].

Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предлагаемого подхода при решении задачи визуальной навигации.

1. **Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В. и др.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н.Красильщикова, Г.Г.Себрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556с.
2. **Н.Е. Бодунков, Д.С. Гиренко, Н.В. Ким, Н.А. Ляпин, Н.В. Удалова.** Визуальная навигация беспилотных летательных аппаратов с использованием семантических описаний местности / Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: 2025. - №2 (244). - С. 256-268.
3. **Liang-Chieh Chen, George Papandreou,** DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs, 2017. – S. 14.

КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
trv@ipu.ru*

Введение

Современные подходы к управлению различными объектами требуют совершенствования описания такого рода объектов. Вместе с тем физическая среда, в которой функционируют объекты, часто имеет существенную вариативность, недетерминированность и оказывается частью самого объекта. Ряд компонентов общей системы включают в себя вычислительные элементы и имеют в себе некоторые знания об окружающем мире и алгоритмы поведения (изменения состояния) по отношению к нему и указанную общую систему называют киберфизической системой (КФС). Некоторым аналогом КФС можно считать автоматизированную систему управления технологическим процессом.

Понятие киберфизической системы

Киберфизические системы (Cyber-Physical Systems, CPS) объединяют вычислители, сети и физические процессы. Они состоят из окружающей среды, датчиков, вычислительных элементов и исполнительных механизмов, в которых вычислители осуществляют мониторинг и управление физическими процессами с использованием обратной связи, а происходящее в физических системах оказывает влияние на вычисления. В них обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами.

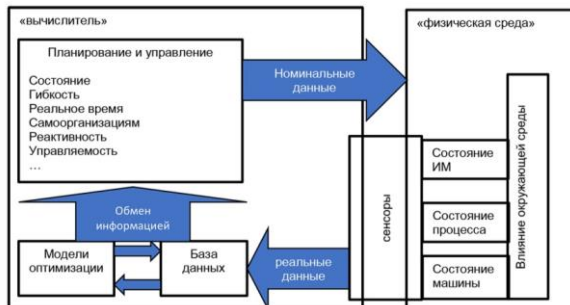


Рис. 1. Киберфизическая система

Развитие КФС неразрывно связаны с прогрессивными технологиями последних десятилетий, таких как туманные и облачные вычисления, Интернет вещей, межмашинное взаимодействие, методы интеллектуального анализа и распознавания. Существующие решения объединяются в рамках нового понятия и дополняются новыми кибернетическими подходами для решения важнейших задач оптимизации производства, энергетики, транспорта, сельского хозяйства и других важнейших отраслей жизни.

Существующие решения объединяются в рамках нового понятия и дополняются новыми кибернетическими подходами для решения важнейших задач оптимизации производства, энергетики, транспорта, сельского хозяйства и других важнейших отраслей жизни.

Управление

КФС представляет собой сложную систему, к которой может быть применена наука управления. Целью управления в нашем случае является нахождение, поддержание или перевод КФС в необходимое состояние. Таким образом, можно сформировать как целевую функцию состояния КФС, так и целевую траекторию изменения состояния КФС во времени и/или состоянии. Таким образом, цель управления КФС может быть формализована и задана.

В общем случае ресурсы, которые затрачиваются на управление КФС, могут быть определены (найжены) как внутри системы, так и получены извне. Получаем замкнутую или открытую системы. Особенностью управления КФС является множество элементов, к которым применяются различные законы и методы управления. Например, наличие мехатронных модулей в КФС требует соблюдение с одной стороны, законов механики и, с другой стороны, сопряжения с другими подсистемами КФС.

Для получения информации вычислительной подсистемой требуется иметь значительное количество датчиков (сенсоров), которые позволяют оценивать состояние физической среды по различным физическим параметрам, а также проводить их синхронизацию по времени (например, для «запоминания» состояний или использования машинного обучения). Для воздействия на среду используются различного рода исполнительные механизмы, которые позволяют изменять состояние КФС и физической среды.

Отличительной особенностью управления КФС является необходимость активного вовлечения в процесс управления различного рода интерфейсов, которые с одной стороны вносят в процессы задержки и ошибки, но, с другой стороны, сами являются элементами КФС и могут

являться управляемыми объектами. В данном случае указанные преобразователи информации и физических характеристик являются зависимыми и в полной мере отражают специфику КФС.

Отдельно следует отразить возможность использование телекоммуникационной среды, которая также может быть частью КФС (например, сеть Интернет). В этом случае получаем не только физически распределенную масштабируемую систему, но и необходимость учета информации различного уровня представления. Так, физический канал передачи информации дополняется другими каналами по модели открытых систем и это позволяет в КФС формировать команды на изменение состояния более высоких уровней с возможностью использования иерархических методов обработки и передачи информации [1]. Примером таких КФС являются системы типа «Интернет вещей» или «Интернет всего».

Нередко в состав КФС включается человек, например, который дистанционно управляет роботом или группой роботов. В этом случае системы называют социкиберфизические системы, в которых формирование команд управления для технических средств как человеком-оператором, так и в управляемых им технических системах. Как правило, в детерминированных средах достаточно обходиться разработанными математическими моделями и соответствующими алгоритмами управления, которые в целом дают приемлемый результат при должном уровне проработки математической модели объекта управления [2].

В последнее время для управления КФС активно применяют технологии искусственного интеллекта (в самом широком понимании этого термина), за счет которых происходит обработка информации и формирование управляющих команд. В этом случае, как правило, используются технологии больших данных и машинное обучение.

Таким образом, актуальным представляется разработка, практическая реализация и изучение систем различных технологий управления КФС и развитие самоорганизации для поддержания заданного состояния указанной системы, а также привлечение естественного интеллекта человека в случае выхода (или прогноза возможности выхода) системы за пределы управляемости.

Отметим, что представленные в настоящем разделе выделенные особенности требуют выполнения свойств системы, которые требуют управления и требования к методам управления.

Заключение

Представленный подход к рассмотрению КФС как сложной системы требует создание модели системы в различных описаниях в зависимости от рассматриваемых подсистем – физической или вычислительной.

Перспективой развития систем управления сложными системами, к классу которых относятся и КФС является построение методов и алгоритмов управления подсистемами на основании соответствующих моделей с учетом возможности самоорганизации и использования многоуровневого представления КФС.

1. **Мещеряков, Р.В.** Критерий структурной сложности информационных систем/ Р.В. Мещеряков // Труды СПИИРАН. – 2010. – № 3 (14). – С. 76–90.
2. **Мещеряков, Р.В.** Диалог как основа построения речевых систем/ Р.В. Мещеряков, В.П. Бондаренко // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – Т. 44 – № 10. – С. 30–42.

И.А. Горшенин, С.В. Марков, А.Г. Фандеев

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ОБЛАЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ПАО «НПО «Смпела», г. Тула, office@npostrrela.net

Опыт действий вооруженных сил развитых стран в локальных конфликтах последних лет свидетельствует о количественных и качественных изменениях в сфере создания и применения робототехнических комплексов (РТК) военного назначения. Важнейшей тенденцией является переход от действий одиночных РТК к групповому применению разнородных РТК, объединяемых в робототехническую систему (РТС) и действующих как самостоятельно, так и совместно с традиционными средствами управления и поражения. Оценка состояния и перспектив развития зарубежных РТК наземной разведки тактического уровня, выполненная по данным, приведенным в открытых источниках, в частности, [1, 2] позволяет выделить следующие основные направления развития разведывательных РТК (РРТК), применяемых в составе разведывательной РТС (РРТС):

- применение многоканальных систем разведки и навигации разведывательных робототехнических средств (РРТСр);
- наличие многоспектральных систем технического зрения РРТСр, способных работать в условиях низкой освещенности и сложных метеословиях;
- построение интеллектуальных систем управления и комплексной

обработки разведывательной информации автономных РРТСр по распределенному принципу с использованием как универсальных, так и специализированных вычислительных средств;

- использование мощной бортовой программно-аппаратной системы, способной обрабатывать большие потоки разнородной информации и производить универсальные алгоритмические вычисления;

- наличие высокоскоростных, помехозащищенных и криптостойких каналов связи, обеспечивающих устойчивый информационный обмен в РТС в различных геофизических условиях на значительных дальностях (на тактическом уровне - до десяти и более километров).

Анализ перечисленных направлений развития РРТК показывает, что технологии облачных вычислений являются ключевыми для создания и применения РРТК. Вместе с тем применение облачных технологий в военной области связано с решением ряда проблем, в том числе: интеграция разнородных информационно-вычислительных систем (ИВС); создание телекоммуникационных подсистем в системах облачных вычислений; обеспечение безопасности информации [3].

Одной из актуальных задач, решаемых при создании эффективно функционирующей ИВС, является рациональное распределение ресурсов ИВС с целью обеспечения максимальной результативности функционирования РРТС.

Максимальная результативность функционирования РРТС с точки зрения производительности ее ИВС достигается за счет:

- минимального времени обработки информации в РРТС;
- достижения заданного значения вероятности обработки информации при условии решения не менее требуемого количества информационных и расчетных задач;
- обязательного решения задач, критичных для функционирования РРТС.

При формулировании математической постановки данной задачи принимаются следующие допущения:

- топология вычислительной сети РРТС во время решения задачи не изменяется;

- расчетная (информационная) задача может передаваться для решения на узел вычислительной сети только целиком (параллельное решение частей задачи на распределенных узлах вычислительной сети не допускается);

- возможность передачи задачи для решения на другой узел вычислительной сети определяется наличием связи между узлами в сети заданной топологии;

- нагрузка на каждое вычислительное средство РРТС не должна превышать его возможностей.

Основным расчетным показателем в задаче является загрузка вычислительных ресурсов i -го вычислительного узла РРТС W_i .

Целевая функция записывается в виде:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^I \sum_{j=1}^J x_{jli} \rightarrow \max, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$W_i^* \geq W_i = \sum_{j=1}^J k_{ji} x_{iij} - \sum_{l \neq i}^I \sum_{j=1}^J k_{jl} x_{ilj} y_{li} + \sum_{l \neq i}^I \sum_{j=1}^J k_{jl} x_{ilj} y_{li}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

$$\exists \{X^*\} \subset \{X\}, \forall x \in \{X^*\} = 1, \quad (3)$$

где I – количество узлов в вычислительной сети РРТС,

J – количество информационных и расчетных задач в РРТС,

$$x_{ilj} = \begin{cases} 1, & \text{если } j - \text{я задача для } i - \text{го узла решается на } l - \text{м узле} \\ 0, & \text{если } j - \text{я задача для } i - \text{го узла не решается на } l - \text{м узле РРТС} \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{li} = \begin{cases} 1, & \text{если задача для } i - \text{го узла может быть передана на } l - \text{й узел,} \\ 0, & \text{если задача для } i - \text{го узла не может быть передана на } l - \text{й узел,} \end{cases} \quad (5)$$

k_{ji} – требуемая производительность для решения j -й задачи на i -м узле вычислительной сети РРТС;

W_i^* – номинальная производительность i -го узла вычислительной сети РРТС.

Физический смысл целевой функции (1) состоит в максимизации количества информационных и расчетных задач, одновременно решаемых в вычислительной сети РРТС.

Физический смысл ограничения (2) состоит в том, что фактический объем вычислений, выполняемых i -м узлом вычислительной сети РРТС W_i , не может превышать его номинальную производительность W_i^* . Это условие должно выполняться для всех узлов вычислительной сети РРТС. При этом первое слагаемое в правой части выражения (2) соответствует собственно задачам i -го узла, решаемым непосредственно его вычислительными средствами. Второе слагаемое в правой части выражения (2) соответствует задачам i -го вычислительного узла, переданным на решение на другие вычислительные узлы. Третье слагаемое в правой части выражения (2) соответствует задачам i -го вычислительного узла, полученным на решение от других вычислительных узлов.

Физический смысл ограничения (3) состоит в том, что существует некоторое подмножество информационных и расчетных задач $\{X^*\}$, решение которых является обязательным для функционирования РРТС.

Сформулированная задача представляет собой задачу целочисленного программирования, решаемую известными методами.

1. **Степанов А.** Основные направления применения искусственного интеллекта в вооруженных силах ведущих зарубежных стран // Западное военное обозрение. 2021. №1. С. 30-35.
2. **Макаренко С.** Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/robototekhnicheskie-kompleksy-voennogo-naznacheniya-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 16.07.2023).
3. **Яковлева Н.К., Мухаметжанова А.О.** Возможности облачных технологий в военной сфере [Электронный ресурс] URL: <https://russianandrone.ru/publications/vozmozhnosti-oblachnykh-tehnologiy-v-voennoy-sfere> (дата обращения 13.07.2023).

В.В. Захаров, Б.В. Соколов

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВЫХ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ*

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург,
valeriov@yandex.ru*

Введение

В представленном докладе предложено полимодельное описание задач комплексного оперативного планирования функционирования многообъектной распределенной группировки (Гр) подвижных объектов (ПДО), включающей в себя группировку объектов обслуживания (ОБО), группировку активных подвижных объектов (АПО) первого и второго типов (АПО-I, АПО-II) [1-4]. В докладе также предлагается оригинальное логико-динамическое описание (ЛДО) процессов программного управления целевыми, обеспечивающими и вспомогательными операциями ЦО, ОО, ВО), лежащими в основе материального, энергетического и информационного взаимодействия данных Гр между собой и внешней средой. При таком динамическом описании задачи планирования функционирования Гр ОБО и АПО могут рассматриваться как задачи программного

* Исследование выполнено за счет госбюджетной НИР FFZF-2025-0020

управления данными объектами [5]. Рассматриваемы задачи планирования имеют большую практическую значимость для аэрокосмической сферы, для производственной сферы, для транспортно-логистических приложений [6-7].

Методология и технологии решения проблемы

К настоящему времени разработано несколько версий логико-динамического описания процессов программного управления ЦО, ОО, ВО при взаимодействии различных классов Гр ОБО, АПО-I, II [1-4]. В общем виде данное полимодельное описание представляет собой большеразмерную билинейную нестационарную конечномерную динамическую систему (1)-(4) со смешанными ограничениями (3)-(4) и краевыми условиями, а сама задача комплексного планирования операций сводится к многокритериальной задаче оптимального управления данной динамической системой:

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}, t); \quad (1)$$

$$\vec{h}_0(\vec{x}(t_0)) \leq \vec{0}; \vec{h}_1(\vec{x}(t_f)) \leq \vec{0}; \quad (2)$$

$$\vec{q}^{(1)}(\vec{x}, \vec{u}) = \vec{0}; \quad (3)$$

$$\vec{q}^{(2)}(\vec{x}, \vec{u}) \leq \vec{0}; \quad (4)$$

$$\vec{J}_{gen} = \|\vec{j}^{(o,\delta)T}, \vec{j}^{(f,\delta)T}\|^T, \quad (5)$$

где \vec{x}, \vec{u} – обобщенные вектора состояния и управления Гр ОБО, АПО-I, II; \vec{h}_0, \vec{h}_1 – известные векторные функции, задающие граничные условия; $\vec{q}^{(1)}, \vec{q}^{(2)}$ – известные векторные функции, которые устанавливают основные ограничения, накладываемые на процесс функционирования Гр АПО; $\vec{j}^{(o,\delta)T}, \vec{j}^{(f,\delta)T}$ – показатели качества управления операциями, ресурсами, управления потоками. В ранее выполненных исследованиях было показано, с помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина и метода локальных сечений В.Г. Болтянского рассматриваемые задачи планирования можно свести к многоточечной краевой задаче с промежуточными условиями [1,5,7]. Для ее решения в работах [3,4,7] были предложены несколько вариантов использования комбинированных методов, одним из самых эффективных в вычислительном плане оказался метод, базирующийся на комбинации метода последовательных приближений Крылова-Чернуосько с методом ветвей и границ. В ранее опубликованной статье [8] было показано, что для аналогичной большеразмерной задачи теории расписаний (более конкретно - нестационарной задачи о назначении) вычислительная эффективность данного комбинированного метода на одной итерации приближённо может быть оценена по следующей формуле

$$\bar{N} \leq C(\bar{m}_1) \bar{K}_1 \bar{K}_2 \left(\frac{\bar{\sigma}}{\Delta t} \right), \quad (6)$$

где \bar{N} – среднее число операций типа сложения на одной итерации; $\bar{C}(\bar{m}_1) = \frac{11\bar{m}_1^3 + 12\bar{m}_1^2 + 2\bar{m}_1}{6}$ – максимальное число операций типа сложения, выполняемых при решении задачи о назначениях венгерским методом в каждый текущий момент времени [при максимизации функции Гамильтона] на интервале планирования; \bar{m}_1 – максимальная размерность указанной задачи о назначениях (назначения ОБО на обслуживание группировки АПО -I, которая, в свою очередь, обслуживается группировкой АПО-II), определяемая числом независимых путей в заданном сетевом графике комплекса работ; σ – длина интервала планирования, Δt – шаг интегрирования основной и сопряжённой систем уравнений; \bar{K}_1 – максимальное число прерываний на одной итерации ($\bar{K}_1 = \frac{\sigma}{\Delta t}$); \bar{K}_2 – максимальное число ветвлений при каждом прерывании ($\bar{K}_2 = ns$). Таким образом, мы имеем полиномиальную трудоемкость (полиномиальную вычислительную сложность) разработанного метода и алгоритма динамического планирования (программного управления) ЦО, ОО и ВО при взаимодействии ОБО, АПО -I, АПО-II.

Заключение

Анализ результатов решения рассматриваемых задач планирования ЦО, ОО, ВО с использованием ранее предложенного комбинированного метода показал, что его скорость сходимости в наибольшей степени зависит от выбора первого приближения значений компонент вектора сопряжённой системы в момент начала интервала планирования (момент t_0) задание которого, в свою очередь, определяется «диспетчерским» (допустимым) управлением, формируемым на первой итерации. Для его формирования могут использоваться большое разнообразие эвристических алгоритмов, разрабатываемых в настоящее время в рамках такого направления искусственного интеллекта (ИИ), как вычислительный интеллект. При этом, в процессе решения задачи планирования ЦО, ОО, ВО и ресурсов, требуемых для их выполнения в каждый момент времени предпочтение отдается тем операциям, чей «динамический» приоритет в данный момент времени больше. В этом случае «динамический» приоритет трактуется значительно шире, чем это делалось во всех предыдущих работах по данной тематике [3,4,7]. Другими слова вектор сопряжённой системы в каждый момент времени представляет собой вектор координирующих сигналов, согласующих автономное функционирование ОБО, АПО -I, АПО-II, если оно реализуется в рамках агентно-ориентированной парадигмы.

1. **Калинин В.Н.** Теоретические основы управления активными подвижными объектами. М.: Министерство обороны СССР, 1974. 130 с.

2. **Калинин В.Н., Соколов Б.В.** Многомодельное описание процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. №1. С. 149.
3. **Калинин В.Н., Соколов Б.В.** Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1987. Вып. 1. С.106–114.
4. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
5. **Болтянский В. Г.** Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
6. **Жук К.Д., Тимченко А.А., Доленко Т.И.** Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наукова думка, 1975. 197 с.
7. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. №5. С. 103–117.

С.Г. Капустян

ИНФРАСТРУКТУРА ТУМАННЫХ И КРАЕВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ¹

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук» (ЮНЦ РАН), г. Ростов-на-Дону,
kar56@mail.ru*

Введение

Мобильные роботы (МР) находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности [1, 2], например, в таких как: промышленное производство, складская логистика, бытовая сфера, медицина, военная сфера, транспорт, сельское хозяйство, экологический мониторинг, ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций и др. Для эффективного решения многих задач в этих сферах требуется применение одновременно нескольких МР, которые должны функционировать согласовано, то есть требуется групповое применение МР [3, 4].

¹ Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гр. проекта 125011200147-2.

В настоящее время широкое распространение получил Интернет вещей (Internet of Things (IoT)) [5]. Под эти термином понимается сеть физических предметов («вещей»), подключенных к Интернету и взаимодействующих между собой и/или с внешней средой. Непосредственное отношение к IoT имеют и группы роботов и робототехнических устройств, которые могут автономно выполнять сложные задания, формируемые пользователями через сеть Интернет, будь то роботизированные обрабатывающие центры или робототехнические ячейки на безлюдных производствах [6, 7], группировки беспилотных летающих аппаратов [8], осуществляющие мониторинг обширных территорий, или складские роботы, транспортирующее и грузораспределительное оборудование крупных автоматизированных транспортно-складских комплексов [9].

В статье [10] авторы отмечают, что с развитием технологии IoT во всех сферах возникают следующие проблемы: недостаток на устройствах вычислительных ресурсов и информационная безопасность данных, содержащихся в сети. Проблема недостатка вычислительных ресурсов касается и задач управления группами МР, автономно выполняющими сложные задания в интересах пользователей-заказчиков. В настоящее время данная проблема решается, в основном, за счет облачных, туманных и краевых (граничных) вычислений.

В докладе предлагается решать задачу управления группами МР, как неотъемлемой частью IoT, с использованием инфраструктуры туманных и краевых вычислений.

На рис. 1 представлена концептуальная схема управления группой МР, иллюстрирующая предлагаемый подход на примере задачи управления группой складских МР.

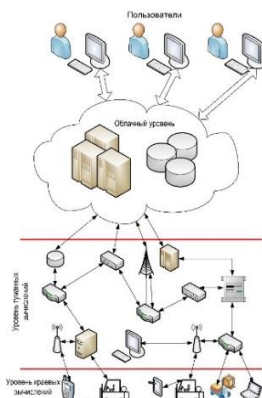


Рис. 1. Концептуальная схема управления группой МР

В основу представленной схемы положена эталонная архитектура туманных вычислений OpenFog RA [11].

В докладе подробно описывается инфраструктура туманных и краевых вычислений, принципы организации вычислений и информационного взаимодействия при решении задач управления группами МР, а также преимущества предлагаемого подхода.

1. **Михайлов, Б.Б.** Автономные мобильные роботы – навигация и управление [Текст] / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016, №1. – С. 48-67.
2. **Поляков, Р.Ю.** Робот-инсектоптер для мониторинга окружающей среды [Текст] / Р.Ю. Поляков, С.В. Ефимов, С.Ф. Яцун // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – Вып. 3(15). – 2015. – С. 48-51.
3. **Каляев, И. А.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / **И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян.** – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 278 с.
4. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения [Текст] / **[В. С. Боровик, В. И. Гуцул, С. А. Клецов и др.]** ; под ред. В. И. Сырямкина ; Нац. исслед. Том. гос. ун-т. - Томск : СТТ, 2018. – 140 с.
5. **Лагутенков, А.** Тихая экспансия интернета вещей [Текст] // Наука и жизнь. – 2018, № 5. – С. 38-42.
6. **Каляев, И.А.** Метод мультиагентного управления «умным» интернет-производством [Текст] / И.А. Каляев, С.Г. Капустян // Робототехника и техническая кибернетика. – №1(18). – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2018. – С. 34-48.
7. **I.A. Kalyaev, S.G. Kapustyan, A.A. Dyachenko, L.Zh. Usachev.** Multiagent Management of Smart Internet Production. Proceedings of 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). IEEE. DOI:10.1109/GloSIC.2018.8570119.
8. **Каляев, И.А.** Метод решения задачи распределения целей в группе БЛА сетевцентрической системой управления [Текст] / И.А. Каляев, С.Г. Капустян, Л.Ж. Усачев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016, №12(185). – С. 55-70.
9. **Капустян, С.Г.** Распределенная информационно-управляющая система автоматизированного мультиробототехнического транспортно-складского комплекса [Текст] / С.Г. Капустян, А.А. Дьяченко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012, №7. – С. 34-39.
10. **Пименов, А.В.** Построение архитектуры туманных вычислений с использованием технологии блокчейн [Текст] / А.В. Пименов, И.Р.

Федоров, С.В. Беззатеев // Информационно-управляющие системы. – 2022, № 5. – С. 40–48.

11. Abdulkareem K. H., Mohammed M. A., Gunasekaran S. S., Almhiqani M. N., Mutlag A. A., Mostafa S. A., Ali N. S., Dheyaa A. I. A Review of fog computing and machine learning: Concepts, applications, challenges, and open issues. IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM), 2019, pp. 116.

К.А. Кулагин, Р.О. Даукаев, А.А. Ярыгин,

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ UWB-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ *

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
kka86@bk.ru*

Введение

Развитие систем автономной навигации и управления роботизированными комплексами требует высокоточного определения координат объектов в ограниченных пространствах. Существующие решения на основе глобальной навигационной спутниковой системы не обеспечивают необходимой точности в помещениях, а методы, использующие измерение уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator – RSSI), характеризуются значительными погрешностями из-за многолучевого распространения и затухания сигналов. Технология сверхширокополосной связи (Ultra-Wideband – UWB) предоставляет возможности для создания высокоточных систем локального позиционирования благодаря временным измерениям с наносекундным разрешением.

Постановка задачи и методы решения

Задача исследования заключается в разработке распределенной системы локального позиционирования, обеспечивающей точность определения координат автономных объектов не хуже 10 сантиметров в помещениях площадью до нескольких тысяч квадратных метров.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00671, <https://rscf.ru/project/24-29-00671/>

Предлагаемое решение основано на измерении времени распространения радиосигналов между специализированными устройствами (Рис. 1). Система функционирует в диапазонах 6,5 и 8 ГГц с шириной полосы 500 МГц. Архитектура предусматривает разделение функциональных ролей между тремя типами устройств: якорные станции размещаются в известных координатах и служат опорными точками; мобильные теги выполняют измерения дальности до якорей и вычисление координат методом трилатерации; серверные модули обеспечивают централизованную обработку данных и координацию системы.



Рис. 1. Фотографии модулей: а) якорные станции; б) USB для сервера.

Каждое устройство представляет собой аппаратно-идентичную платформу, функциональность которой определяется специализированной микропрограммой. Система реализует адаптивный алгоритм фильтрации измерений расстояний с автоматической компенсацией систематических погрешностей радиотракта и задержек антенных систем. Для обеспечения устойчивости работы применяется метод взвешенной трилатерации с динамической корректировкой весовых коэффициентов на основе оценки качества измерений. Разработана методика автоматической калибровки системы, исключая необходимость предварительного измерения характеристик каждого устройства.

Для валидации разработанной системы позиционирования были проведены экспериментальные исследования в контролируемых условиях закрытого помещения площадью 6×6 метров. Использовались три якорные станции с фиксированными координатами и один мобильный тег. Измерения расстояний выполнялись с частотой 7-8 Гц.

Эксперимент

В первом эксперименте якорные станции располагались в вершинах треугольника с длиной стороны 1 метр в координатах $A_1\{0;1\}$, $A_2\{1;1\}$, $A_3\{1;0\}$ (Рис. 2, Табл. 1). Мобильный тег размещался в центре треугольника в точке с координатами $\{0.5;0.5\}$.

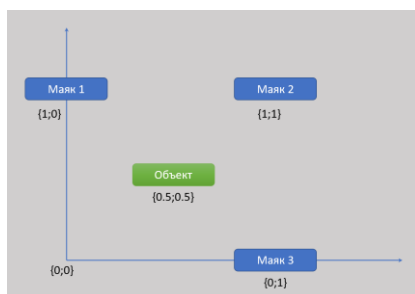


Рис. 2. Схема расположения элементов при эксперименте 1.

Результаты первого эксперимента показали значительные погрешности измерений дальности, достигающие 8.7 см при теоретическом расстоянии 70.7 см. Средняя абсолютная погрешность составила 5.8 см, что соответствует относительной погрешности 8.2%.

Во втором эксперименте расстояние между якорными станциями было увеличено до 5 метров. Якоря располагались в координатах $A_1 \{0;5\}$, $A_2 \{5;5\}$, $A_3 \{5;0\}$, а мобильный тег - в центральной точке $\{2.5;2.5\}$ (Табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений координат (эксперимент 2)

| Время, с | X вы- числ., м | Y вы- числ., м | Погреш- ность X, см | Погреш- ность Y, см | Общая по- грешность, см |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 0.125 | 2.486 | 2.512 | 1.4 | 1.2 | 1.8 |
| 0.25 | 2.478 | 2.495 | 2.2 | 0.5 | 2.3 |
| 0.375 | 2.505 | 2.487 | 0.5 | 1.3 | 1.4 |
| 0.500 | 2.492 | 2.508 | 0.8 | 0.8 | 1.1 |
| 0.625 | 2.481 | 2.504 | 1.9 | 0.4 | 1.9 |
| 0.750 | 2.496 | 2.491 | 0.4 | 0.9 | 1.0 |
| 0.875 | 2.489 | 2.517 | 1.1 | 1.7 | 2.0 |
| 1.000 | 2.503 | 2.486 | 0.3 | 1.4 | 1.4 |

Истинные координаты: $X = 2.500$ м, $Y = 2.500$ м

Экспериментальные исследования продемонстрировали существенное влияние геометрии расположения якорных станций на точность позиционирования.

Заключение

Результаты экспериментов подтверждают теоретические предположения о критической важности геометрической конфигурации якорных станций для обеспечения высокой точности UWB-позиционирования. Рекомендуемое минимальное расстояние между якорями должно составлять не менее 3-5 метров для достижения сантиметровой точности в задачах управления автономными объектами.

Система ориентирована на решение задач высокоточной навигации автономных объектов: автоматическое управление беспилотными летательными аппаратами при точной посадке, навигационное обеспечение мобильных роботов в складских помещениях, системы позиционирования для автоматизированной парковки транспортных средств.

Представленное решение демонстрирует перспективы применения UWB-технологии для создания высокоточных систем локального позиционирования. Разработанные архитектурные и алгоритмические решения обеспечивают возможность построения масштабируемых навигационных систем для управления автономными объектами. Практическая значимость работы заключается в создании технологической основы для высокоточной навигации без привлечения внешних навигационных систем.

А.Г. Подвесовский, М.В. Мамченко

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ЕЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
podvesovskii@yandex.ru, mmv@ipu.ru*

Введение

В настоящее время в Российской Федерации наблюдается активное развитие и внедрение беспилотных авиационных систем, предназначенных для транспортировки грузов воздушным способом (беспилотных авиационных транспортных систем – БАТС). При проектировании подобных систем важной задачей представляется рациональный выбор характеристик информационного обеспечения (ИО) системы управления

(СУ), т.е. оценка влияния характеристик ИО СУ БАТС на показатели функционирования целевой системы [1, 2].

Формализованное описание методики

Методика оценки влияния характеристик ИО СУ БАТС на ее показатели функционирования возможно представить в виде двух основных этапов: этапа структуризации набора показателей Q и пространства критериальных оценок по набору C , а также этапа анализа альтернатив.

Формализованное представление задачи оценки влияния характеристик ИО на показатели функционирования СУ БАТС представим в следующем виде [3–6]:

$$\langle G, X, Q, R_G, C, F \rangle, \quad (1)$$

где G – обобщенный показатель;

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ – множество альтернатив;

$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_p\}$ – набор показателей функционирования;

$R_G = R_G(G, Q)$ – отношение, отражающее структуру взаимосвязи показателей, составляющих набор Q , а также их влияния на обобщенный показатель G ;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – набор базовых показателей для оценивания альтернатив ($C \subset Q$);

$F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ – способы оценки альтернатив по критериям из набора C .

Формализованное представление этапа структуризации набора показателей Q , и пространства критериальных оценок по набору C зададим следующим образом [3–5]:

$$\langle R_G \leftarrow \bar{R}_G, F \leftarrow \bar{F} \rangle, \quad (2)$$

где знак « \leftarrow » означает введение формализованной структуры;

\bar{R}_G, \bar{F} – представляют отношение R_G и набор F соответственно, при этом:

$$\bar{F} = \{\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n\}; \bar{F}_j = \langle E_j, M_j, f_j \rangle (j = 1, \dots, n), \quad (3)$$

где E_j – множество возможных оценок по критерию C_j ; M_j – представление элементов множества E_j ; f_j – отображение альтернатив X в критериальные оценки E_j .

Этап оценивания альтернатив и формирования критериальных оценок имеет следующее формализованное представление:

$$\langle X, C, \bar{F}, C(X) \rangle, \quad (4)$$

где $C(X) = \|C_j(X_i)\| (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$ – матрица с формализованными оценками альтернативы X_i по критерию C_j .

На этапе анализа альтернатив решаются следующие основные задачи [3–5]:

1. Формирование оценок альтернатив по обобщенным показателям из набора $Q \setminus C$.

2. Удаление нерациональных по одному или нескольким показателям из набора Q альтернатив (синтез множества допустимых альтернатив X_U из набора X).

3. Формирование оценок альтернатив X_U по обобщенному показателю G .

Дальнейшие этапы методики включают:

1. Классификацию показателей функционирования СУ БАТС.

2. Задание модели показателей, включающей способ формирования числовых оценок из множества значений и их нормировки.

3. Формирование модели взаимосвязи показателей с их соответствующими моделями.

4. Вычисление интегральных оценок показателей – на основе соответствующих моделей показателей.

Для получения выводов о влиянии отдельных характеристик ИО СУ БАТС на целевые показатели функционирования системы управления возможно применение, например, когнитивного подхода, основанного на построении нечетких когнитивных карт, – для обоснования требований к характеристикам ИО СУ БАТС в виде соответствующих количественных значений (диапазонов значений) [3–6].

Заключение

Применение методики оценки влияния характеристик ИО СУ БАТС на ее показатели функционирования позволяет осуществлять распределение приоритетов функциональных требований на целевые показатели функционирования системы, а также оценивать соответствие характеристик ИО требованиям назначения СУ БАТС при ее проектировании.

1. **Захарова, А.А.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе/ А.А.Захарова, В.П.Култахов, Р.В.Мещеряков, А.Г.Подвесовский, А.Л.Смолин// Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3–15.
2. **Смолин, А.В.** Модель исходных данных, цели и критерии качества функционирования СУ БАТС /А.В. Смолин, М.В. Мамченко,

- М.А. Романова, Р.Р. Галин // Перспективные системы и задачи управления: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодёжной школы-семинара. – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2022. – С. 420 – 424. – Текст : электронный.
3. **Захарова, А.А.** Нечеткие когнитивные модели в управлении слабо структурированными социально-экономическими системами / А.А.Захарова, А.Г.Подвесовский, Р.А.Исаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 4(20). – С. 5–23.
 4. **Podvesovskii, A.** Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs with Different Priority Schemes for Delivery Tasks / A.Podvesovskii, A.Zakharova // Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. – 2024. – Vol. 554. – P. 165–177.
 5. **Подвесовский, А.Г.** Модель принятия решений для задачи реконфигурации гетерогенной группы взаимодействующих объектов киберфизической системы / А.Г.Подвесовский, А.А.Филонов, В.И.Венец, Г.Н.Настас, А.А.Захарова // Управление большими системами. – 2025. – № 113. – С. 346–379.
 6. **Zakharova, A.** Application of Visual-Cognitive Approach to Decision Support for Concept Development in Systems Engineering / A. Zakharova, A. Podvesovskii // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54(13). – P. 482 – 487. – Текст : электронный.

А.Г. Подвесовский¹, Д.Д. Хадорич², О.Д. Шелепина², А.А. Захарова¹

ПРОГРАММНАЯ ПОДДЕРЖКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНА ТРАНСПОРТИРОВКИ РАЗНОРОДНЫХ ГРУЗОВ В БЕСПИЛОТНОЙ АВИАТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ВРЕМЕНИ *

¹*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,*

²*Брянский государственный технический университет, г. Брянск,
a.podvesovskiy@gmail.com*

Введение

Практика применения специализированных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для транспортировки грузов имеет множество ак-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 23-19-00342, <https://rscf.ru/project/23-19-00342/>

туальных и востребованных приложений [1]. Поэтому среди задач автоматизации управления беспилотными авиатранспортными системами важная роль принадлежит задачам оптимального планирования полетных заданий для групп БЛА, осуществляющих доставку грузов. К этим задачам относятся построение оптимального плана транспортировки грузов, выбор БЛА с заданными характеристиками, формирование плана загрузки БЛА с учетом различных видов грузов и комплекса требований к условиям их транспортировки и др. Некоторые общие подходы к моделированию перечисленных задач рассматривались и обсуждались в [2].

Рассмотрим подробнее задачу построения оптимального плана транспортировки грузов. В основе оптимизационной модели для нее в общем случае лежит многопродуктовая транспортная задача в матричной или сетевой постановке [3]. При этом, в зависимости от текущего состояния маршрутной сети и различных внешних факторов, могут вводиться различные дополнительные условия и ограничения: ограниченная пропускная способность маршрутов, различие в приоритетности отдельных задач доставки грузов и др.

В работе [4] рассматривалась задача формирования плана транспортировки с максимизацией суммарного потока грузов с учетом информации о приоритетности задач доставки. Была построена оптимизационная модель этой задачи, и для нее был разработан алгоритм нахождения оптимального плана. Далее, в работе [5] были рассмотрены особенности программной реализации оптимизационной модели, и описан прототип программной системы планирования и оптимизации параметров полетных заданий для БЛА, в рамках которого эта реализация была выполнена.

В работе [6] была рассмотрена ситуация, когда эффективность плана транспортировки оценивается временем, затрачиваемым на его реализацию, т.е. временем прохождения БЛА наиболее продолжительного маршрута. Была рассмотрена соответствующая задача оптимизации, для которой была предложена модель, основанная на транспортной задаче по критерию минимума времени, однако, в отличие от существующих аналогов, она рассматривает более общий класс задач – многопродуктовые транспортные задачи в сетевой постановке. Для данной модели был также предложен алгоритм нахождения оптимального плана.

В докладе рассматриваются особенности программной реализации оптимизационной модели в среде упомянутой программной системы планирования и оптимизации параметров полетных заданий для БЛА.

Модель и алгоритм формирования плана транспортировки разнородных грузов, оптимального по критерию минимума времени

Пусть $\Gamma = \langle A, W \rangle$ – ориентированный граф, задающий структуру маршрутной сети, где A – множество вершин, соответствующих узлам любого типа (источники, стоки, промежуточные пункты); W – множество дуг, соответствующих коммуникациям между узлами. Для каждого узла $i \in A$ можно выделить из множества A следующие два ассоциированных с данным узлом подмножества: подмножество $A_i^{IN} = \{j \in A \mid (j, i) \in W\}$, содержащее узлы, связанные дугой с узлом i ; подмножество $A_i^{OUT} = \{j \in A \mid (i, j) \in W\}$, содержащее узлы, с которыми связан дугой узел i .

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ – множество грузов, которые в общем случае являются разнородными и могут характеризоваться различными условиями транспортировки.

$T = \{T_i^k \mid i \in A; k = 1, \dots, p\}$ – множество значений мощности узлов для каждого k -го типа груза. Если $T_i^k > 0$, то i -й узел является источником k -го груза, если $T_i^k < 0$ – стоком, если $T_i^k = 0$ – транзитным пунктом.

Задан набор $L = \{l_{ij} \mid (i, j) \in W\}$, где l_{ij} – время, затрачиваемое БЛА на перелет между пунктами i и j (данная величина может рассчитываться как сумма времени выполнения непосредственно перелета и операций, необходимых для подготовки к нему, а также после его завершения).

Далее, пусть $X = \{x_{ij}^k \mid (i, j) \in W; k = 1, \dots, p\}$, где x_{ij}^k – количество единиц груза G_k , транспортируемых по дуге (i, j) , т.е. X задает план транспортировки грузов.

$U = \{u_{ij} \mid (i, j) \in W\}$ – пропускные способности дуг, которые могут быть обусловлены, например, ограниченной грузоподъемностью БЛА.

$D = \|d_{ij}\| \mid (i, j) \in A$ – матрица длин кратчайших (по суммарному времени перелета) маршрутов между парами узлов маршрутной сети.

Задача оптимизации имеет следующую целевую функцию:

$$\max_{(x_{ij}^k > 0)} d_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

а система ограничений имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k = T_i^k, i \in A; \\ \sum_{k=1}^p x_{ij}^k \leq u_{ij}, (i, j) \in W'; \\ x_{ij}^k \geq 0, (i, j) \in W; k = 1, \dots, p. \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм построения оптимального плана транспортировки основан на адаптации метода последовательного сокращения невязок для

классической однопродуктовой транспортной задачи по критерию минимума времени [3] на более общий случай многопродуктовой задачи в сетевой постановке, задаваемой моделью (1)-(2). Подробное описание алгоритма приведено в [6].

Программная реализация оптимизационной модели и алгоритма построения оптимального плана

Рассмотренная оптимизационная модель и связанный с ней алгоритм построения оптимального плана транспортировки грузов были реализованы в составе программной системы планирования и оптимизации параметров полетных заданий для БЛА, которая, в свою очередь, входит в состав разрабатываемого программного комплекса моделирования сценариев управления групповым взаимодействием объектов киберфизических систем. На момент реализации в системе уже поддерживались разработанные ранее модели и алгоритмы формирования оптимального плана транспортировки разнородных грузов в условиях ограниченной пропускной способности маршрутной сети с учетом различных схем приоритетности задач доставки [6]. Таким образом, поддержка нового, рассматриваемого в данной работе, типа задач расширила функциональные возможности программной системы.

Структура процесса формирования плана транспортировки представлена на рис. 1 в виде BPMN-диаграммы, отражающей логическую структуру взаимодействия модулей программной системы и внешних библиотек при решении оптимизационной задачи, а также принципы взаимодействия программной системы с пользователем (ЛПР).

Программная реализация выполнялась на языке Python, с использованием внешних библиотек. Так, для реализации этапа, связанного с нахождением кратчайших цепей с помощью модифицированного алгоритма Флойда-Уоршелла, использована библиотека NetworkX¹, а для решения задачи о максимальном потоке – библиотека Gurobi Optimization².

¹ <https://networkx.org>

² <https://www.gurobi.com>

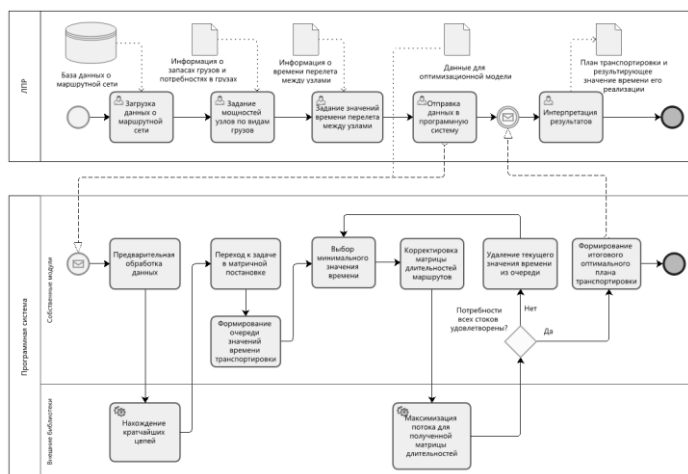


Рис. 1. Диаграмма процесса построения плана транспортировки с применением программной системы.

Остальные модули системы, отвечающие за реализацию общей логики оптимизационной модели, в соответствии с диаграммой на рис. 1, были разработаны без применения сторонних библиотек. Также, с учетом особенностей задачи, были доработаны модули для импорта данных о маршрутной сети и экспорта результатов построения плана.

На рис. 2 показаны промежуточные результаты этапов построения оптимального плана транспортировки в программной системе.

Заключение

Рассмотрены особенности программной реализации модели построения оптимального плана транспортировки разнородных грузов с использованием группы БЛА, с учетом требования минимизации времени реализации плана. К направлениям совершенствования модели можно отнести учет условий транспортировки грузов различных типов и ограничений по совместимости определенных типов, а также учет возможной зависимости между пропускной способностью участка маршрутной сети и временем перелета по нему. Разработка и программная реализация механизмов учета указанных условий являются предметом дальнейших исследований.

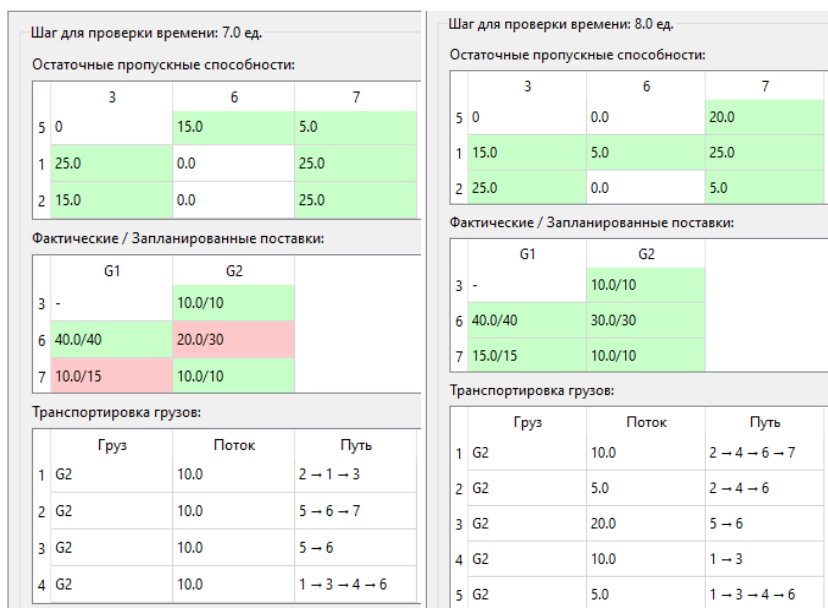


Рис. 2. Этапы построения оптимального плана транспортировки.

1. **Матюха, С.В.** Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках / С.В. Матюха // Транспортное дело России. – 2022. – № 1, – С. 141-143.
2. **Захарова, А.А.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиатранспортной системе / А.А. Захарова, В.П. Кутахов, Р.В. Мещеряков, А.Г. Подвесовский, А.Л. Смолин // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3-15.
3. **Триус, Е.Б.** Задачи математического программирования транспортного типа / Е.Б. Триус. – М.: Советское радио, 1967. – 208 с.
4. **Podvesovskii, A.** Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs with Different Priority Schemes for Delivery Tasks / A. Podvesovskii, A. Zakahrova // Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control, vol 554. Springer, Cham, 2024. P. 165-177.
5. **Подвесовский, А.Г.** Программная поддержка оптимизации плана транспортировки разнородных грузов с учетом приоритетности задач доставки / А.Г. Подвесовский, О.Д. Шелепина, Д.Д. Хадорич, А.А. Захарова // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: труды X Междунар. науч. конф. Т. 1. – Уфа: УУНиТ, 2024. – С. 215-222.

6. **Podvesovskii, A.** Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Plan in Unmanned Air Transportation System by the Criterion of Minimum Time / A. Podvesovskii, R. Meshcheryakov, A. Zakharova // 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10739506>

А.А. Саломатин

ПОСТРОЕНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ БАС С ИНТЕРВАЛЬНЫМ ОЦЕНИВАНИЕМ ПРОГНОЗНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
karateka30@mail.ru*

В наше время всё более востребованным становится применение беспилотных авиационных систем (БАС) в различных сферах человеческой деятельности. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используют для транспортировки грузов, выполнения функций мониторинга и разведки и др. задач [1].

В задачах логистики планирование и оптимизация транспортировки грузов является несомненно важным шагом в принятии управленческих решений о распределении групп БПЛА. Обобщенная постановка задачи представлена в [2]. Маршрутная сеть с метеорологическими ограничениями строится на основе исходных данных [3]:

$$R = \langle S, D, Q, \Gamma, C, U \rangle, \quad (1)$$

где $\Gamma = \{ \Gamma_f \}$ – граф маршрутов с привязкой к координатам;

$C = \{ \|C_f(A_l, Y_p)\| \}$ – множество матриц, задающее затраты ресурсов;

$U = \|U(A_l, \Gamma_f)\|$ – матрица метеорологических ограничений маршрутной сети, при формировании которой учитываются также данные W^* — множества метеорологической информации, содержащего информацию о наличии дождя и снега, типе облачности, температуре.

Последние исследования в области разработки алгоритмов построения маршрутной сети БАС предлагают возможность последовательного построения сети даже в случае неблагоприятных условий функционирования автоматизированной метеорологической измерительной подси-

стемы: формируется граф и матрица затрат, прогнозируются метеорологические индикаторы, определяются индексы выполнимости критериев и метеорологические ограничения.

В текущей работе предлагается использование интервальной оценки вместо точечной, поскольку это может обеспечить более высокую точность прогнозов. Преимущества и недостатки наиболее распространенных методов интервального прогнозирования отражены в Табл. 1.

Таблица 1

Методы интервального прогнозирования

| Метод | Преимущества | Недостатки |
|---|--|---|
| Доверительные интервалы | Простота, широкая применимость | Требование к нормальности распределения и наличию знаний стандартного отклонения от генеральной совокупности |
| Интервалы правдоподобия (байесовский метод) | Высокая эффективность со сложными моделями, гибкость в моделировании | Зависимость от выбора априорных распределений, высокая вычислительная сложность, выбор априорного распределения |
| Фидуциарные интервалы | Отсутствие зависимости от предположений о распределении, простота | Относительно высокая сложность и эффективность (по сравнению с доверительными интервалами) |

Таким образом, с учетом сведений Табл. 1 получим следующие предложения для интервального прогнозирования метеорологических индикаторов (см. Табл. 2).

Методы для прогнозирования метеорологических индикаторов

| Метеорологический индикатор | Метод(ы) прогнозирования | Формула(ы) |
|-----------------------------|---|--|
| Индикатор дождя | Интервалы правдоподобия – для большей точности, фидуциарные интервалы – для большей оперативности | $\left(\left[\frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \right] - \Delta_r; \left[\frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \right] + \Delta_r \right)$ $(a_r; b_r), \quad \text{где}$ $\int_{a_r}^{b_r} p(u^r \{r_i\}) du^r = 1 - \alpha_r$ |
| Индикатор снега | Интервалы правдоподобия и фидуциарные интервалы | $\left(\left[\frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n} \right] - \Delta_s; \left[\frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n} \right] + \Delta_s \right)$ $(a_s; b_s), \quad \text{где}$ $\int_{a_s}^{b_s} p(u^s \{s_i\}) du^s = 1 - \alpha_s$ |
| Индикатор облачности | Интервалы правдоподобия и фидуциарные интервалы | $\left(\left[\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \right] - \Delta_c; \left[\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \right] + \Delta_c \right)$ $(a_c; b_c), \quad \text{где}$ $\int_{a_c}^{b_c} p(u^c \{l_i\}) du^c = 1 - \alpha_c$ |
| Индикатор температуры | Доверительные интервалы | $\left(T_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (T_{i+1} - T_i)}{n-1} \right.$ $\left. - f_\alpha S_{u^T}; T_n + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (T_{i+1} - T_i)}{n-1} \right.$ $\left. + f_\alpha S_{u^T} \right)$ |

В дальнейшем планируется разработка алгоритма распределения групп БПЛА с учетом маршрутной сети с интервальными метеорологическими ограничениями, а также проведение вычислительных экспериментов для оценки эффективности алгоритмов.

1. **Гаджиева С.А., Курбанов С.К.** Беспилотные летательные аппараты применение и перспективы их развития // Компьютерные технологии и моделирование в науке, технике, экономике, образовании

- и управлении: тенденции и развитие: материалы международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 140-142.
2. **Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. №3. – С. 3-15.
 3. **Саломатин А.А.** Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений о распределении группы БПЛА при транспортировке грузов с учетом метеорологической информации: дис. ... канд. техн.наук. – М.: 2025. – Режим доступа: https://www.ipu.ru/news/dissertation_councils.

Су Дандань, К.А. Неусытин, Ли Фу

ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИЗБЕГАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, г. Москва,
sudandan.xa@foxmail.com*

Введение

Операции космических аппаратов сталкиваются с растущими вызовами, это связано с распространением космического мусора и насыщением ценных орбитальных режимов, особенно на низких околоземных орбитах (ЛЕО) [1]. Даже маленькие обломки размером всего 0,2 мм представляют угрозу для космических аппаратов и деятельности человека в космосе из-за высоких орбитальных скоростей. Уклонение от столкновений космических аппаратов в космическом пространстве стало ключевой задачей в развитии космической техники.

В последние годы развитие космических систем, состоящих из N систем Эйлера–Лагранжа (EL), приобретает ключевое значение для будущих космических исследований [2], и их координационное управление становится основным объектом исследования. Учитывая уничтожения космического мусора, вся система сталкивается с динамичной и сложной средой, что требует большей интеллектуальности и робастности. В настоящей работе вводится понятие усиленного обучения (RL) для ите-

рационального процесса оптимизации, что способствует улучшению и вычислений глобальной оптимизации, а также находит широкое применение.

В данной работе предложен алгоритм координационного управления групповым полётом космических аппаратов на основе обучения с подкреплением при наличии динамических подвижных препятствий, использующий min-max стратегию оптимизации управления actor-critic, с динамической корректировкой траектории посредством сочетания МПУ (модель-прогнозирующего управления) и менеджера событийно-управляемой передачи (ERG) в реальном времени.

Моделирование

Мы предполагаем, что опорная орбита космического аппарата является околоземной круговой орбитой без учета каких-либо возмущений. Относительное движение космического аппарата описывается следующим уравнением Clohessy–Wiltshire:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 2n_0\dot{y} + 3n_0^2x + u_x \\ \ddot{y} &= -2n_0\dot{x} + u_y \\ \ddot{z} &= -n_0^2z + u_z\end{aligned}\quad (1)$$

Где x, y, z — точные координаты космического аппарата, расположенные в системе отсчета Эйлера-Гилла, u_x, u_y, u_z — отдельные манипуляционные входы. $n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a_0^3}}$, $\mu = 3.986 \times 10^{14}$ служит символом гравитационной постоянной.

Если имеется i космических аппаратов, определите переменную $\zeta_i = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ для выяснения его кинематической модели, в частности:

$$\dot{\zeta}_i = A_i \zeta_i + B_i u_i, \quad (2)$$

$$\text{где } A_i = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_3 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, A_{21} = \begin{bmatrix} 3n_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n_0^2 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 2n_0 & 0 \\ -2n_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В данной статье предлагается новый регулятор опорных команд, основанный на механизме триггера событий. Это новшество облегчает обратный процесс, позволяя регулировать опорные команды на основе выполнения команд последователей.

$$u_i = \mathcal{I}_i(\zeta_i, \eta_i), \quad (3)$$

где η_i — контрольный сигнал.

Объективная функция:

$$\min_{\mathbf{u}} \sum_{k=0}^N \left(\|\zeta_{t+k|t} - \zeta_{\text{ref}, t+k|t}\|_Q^2 + \|\mathbf{u}_{t+k|t}\|_R^2 + \lambda \text{Cost}(\zeta_{t+k|t}) \right), \quad (4)$$

где $Cost(\zeta_{t+k|t})$ — затраты на устранение барьеров, Q, R - весовая матрица. Ем у также необходимы ограничения, связанные с обходом препятствий:

$$\|D_{i0} - D_{j0}\| > r_{ij}^{obs}, \quad (5)$$

Где r_{ij}^{obs} — выполняет роль радиуса безопасности, D_{i0} — обобщенный вектор положения космического аппарата, выполняющий роль радиуса безопасности.

Установите функцию вознаграждения и наказания r_i ,

$$r_i = w_1 \cdot r_{\text{avoid}} + w_2 \cdot r_{\text{formation}} - w_3 \cdot r_{\text{fuel}}, \quad (6)$$

где r_{avoid} — награда за преодоление препятствий. Положительная награда присуждается, когда расстояние от другого космического аппарата превышает безопасное расстояние, в противном случае присуждается отрицательная награда. $r_{\text{formation}}$ — делается для поддержания вознаграждения за формирование и измерения отклонения между текущим формированием и ожидаемым формированием. r_{fuel} — штраф за расход топлива, который зависит от величины управляющего ускорения. w_1, w_2, w_3 — весовой коэффициент.

Механизм Min-max Actor-Critic задает стратегию: максимизация собственного ожидаемого вознаграждения при минимизации стратегий других космических аппаратов и, в зависимости от функции стратегии, выбор действия. Для интеллекта i , стратегия заключается в следующем:

$$\pi_{\theta_i}(a_i | s_i) \quad (7)$$

Ожидаемые стимулы:

$$\theta_i^* = \arg \max_{\theta_i} \min_{\{\theta_j\}_{j \neq i}} \mathbb{E}_{\tau \sim \pi} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_i(s_t, a_t) \right] \quad (8)$$

Обновление функции стоимости действия $Q_{\phi_i}(s_i, a_i)$ достигается путем минимизации следующей функции потерь:

$$\mathcal{L}^{Q_i}(\phi_i) = \mathbb{E}_{(s_i, a_i) \sim \mathcal{D}} \left[\left(Q_{\phi_i}(s_i, a_i) - \left(r_i + \gamma \min_{\phi'_i} Q_{\phi'_i}(s'_i, a'_i) \right) \right)^2 \right], \quad (9)$$

где s'_i, a'_i — следующие состояния и действия.

При обновлении параметров стратегии учитывается влияние стратегий других интеллектов, и поправочный член для градиента стратегии имеет вид:

$$\nabla_{\theta_i} J(\theta_i) = \mathbb{E}_{s_i, a_i} \left[\nabla_{\theta_i} \log \pi_{\theta_i}(a_i | s_i) \cdot \left(Q_{\phi_i}(s_i, a_i) - \mathbb{E}_{a'_i \sim \pi_{\theta_i}(\cdot | s_i)} [Q_{\phi_i}(s_i, a'_i)] \right) \right] \quad (10)$$

Заключение

В данной работе предлагаем алгоритм управления координацией полета группового космического аппарата на основе обучения с подкреплением, который первоначально устанавливает траекторию обхода препятствий путем создания кинематической модели группы космических аппаратов с ограничениями в присутствии динамически движущихся препятствий, а затем динамически корректирует траекторию с помощью комбинации MPC (Model Predictive Control) и управляющей передачи в реальном времени (ERG), и вводит механизм Min-max Actor-Critic для придания модели хорошей устойчивости и реакции в реальном времени на сложную и динамически меняющуюся космическую среду. Механизм Min-max Actor-Critic вводится для оценки стратегии действий космического аппарата, чтобы модель обладала хорошей устойчивостью и реактивностью в реальном времени и могла лучше справляться со сложной и динамично меняющейся космической средой.

1. **W. Tang et al.**, "Fuel-optimal spacecraft cluster flight around an ellipsoidal asteroid," *J. Guid., Control, Dyn.*, vol. 44, no. 10, pp. 1875–1882, 2021.
2. **Q. Hu, X. D. Shao, and L. Guo**, "Adaptive fault-tolerant attitude tracking control of spacecraft with prescribed performance," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 23, no. 1, pp. 331–341, Feb. 2017.
3. **Y. Meng, C. Liu, et al.**, "Obstacle-Avoidance Distributed Reinforcement Learning Optimal Control for Spacecraft Cluster Flight," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 1, pp. 443–456, Feb. 2025.

О.А. Тельминов

ОСОБЕННОСТИ НЕЙРОПОДОБНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
otelmi@mail.ru*

Введение

Актуальность проблемы заключается в повышении объяснимости и верификации работы системы управления.

При традиционном подходе элементы каждого уровня разрабатываются в виде черных ящиков с учетом входов, выходов и передаточных функций. В живых системах воздействие на любой из уровней может привести к изменению работы остальных уровней. Для повышения объяснимости принимаемых решений в системах управления следует выполнять декомпозицию таких систем по крайней мере по двум измерениям.

Первое измерение — разделение задач управления на автономно действующих программных агентов, каждый из которых является моделью физического объекта. Управляющий агент запрашивает и получает необходимую информацию о текущем и предсказанном статусе от других агентов — цифрового двойника [1] робота, модели объекта воздействия робота, модели соратников робота, модели соперников робота, моделей окружающей среды.

Второе измерение — иерархичное представление функции поведения робота, возможность ее модификации и/или генерации новой модели поведения) в процессе жизненного цикла изделия.

Основная часть

Варианты многоагентных систем

Развитие нейросетевых многоагентных систем последних лет можно проследить по следующим вехам. Алгоритм игры в Го AlphaZero [2] основан на работе двух нейросетевых агентов-соперников, обладающих знаниями правил игры. В результате множества партий после каждой из них нарабатываются успешные ходы — целевая Policy, к которой и будет стремиться система в дальнейшем. При диверсификации агентов по модальности — видео, аудио и тексту [3] формируется обобщенный результат. Ролевые агенты объяснимо решают сложные задачи [4].

Компания NVIDIA [5] предлагает полный стек для реализации агентов, каждый из которых содержит модули восприятия, планирования, навигации, управления и взаимодействия с обучением в средах симуляции (Isaac Sim), визуализации и кооперации (Omniverse) с подготовкой к использованию в реальном мире (Domain randomization).

Такие подходы могут быть реализованы при построении цифрового двойника робота с прямой и обратной связями с системой управления, а также моделями окружающих его объектов реального мира.

Варианты программно-аппаратной реализации поведенческих функций агентов

Аппаратная реализация с учетом необходимости динамической генерации и адаптации работы алгоритмов должна быть реализована на нейросетевой модели.

Выполнен анализ особенностей аппаратной реализации нейросетей с точки зрения физики работы и схемотехники на традиционной элементной базе, изготовленной по классической КМОП-технологии (транзисторы, конденсаторы), по перспективным технологиям (конденсаторы), а также на элементной базе на новых физических принципах (ReRAM[6,7,8,9], MRAM[10]). Ключевыми требованиями к реализации таких вычислителей являются способность совмещать функции вычисления и хранения в одном элементе, возможности масштабирования нейросети с помощью увеличения размера матрицы чипов вычислителей, способности к обучению на чипе, быстродействие, площадь на кристалле, а также технологические и надежность характеристики.

Из анализа решаемых задач управления следует, что их можно визуализировать в виде многомасштабных ресурсных кластеров задач управления. Стратегические задачи управления выполняются в режиме мягкого реального времени (единицы секунд) и реализуются на миллионах нейронов. Tактические задачи реального времени (доли секунд) в свою очередь требуют тысяч нейронов, а для рефлексных задач жесткого реального времени достаточно сотен нейронов.

Новизна предложенного подхода заключается в комплексной декомпозиции сложной системы управления взаимодействующих систем реального мира в двух направлениях: с помощью многоагентного представления и аппаратной реализации их поведенческих функций с учетом многомасштабных кластеров ресурсов задач управления.

Заключение

Для робота и взаимодействующих с ним физических объектов рассмотрены подходы к реализации многоагентной системы управления на основе их моделей и цифрового двойника, а также многоуровневые адаптивные поведенческие модели с реализацией на нейроподобной вычислительной аппаратуре. В дальнейшем планируется доведение исследований до практически применения.

Научная значимость заключается в развитии теории распределенных систем управления в части коллективного взаимодействия агентов с элементами объяснимого и адаптивного поведения. Практической значимостью является возможность создания распределенных систем управления для автономного взаимодействия мобильных роботов в реальном времени.

1. ГОСТ Р 577000.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М. : Российский институт стандартизации, 2021.

2. **Лапань, М.** Глубокое обучение с подкреплением. AlphaGo и другие технологии / М. Лапань. – Санкт-Петербург: Питер, 2020. – 496 с.
3. **Zeng A. и др.** Socratic Models: Composing Zero-Shot Multimodal Reasoning with Language // 2022.
4. **Barkol D.** Agentic AI Explained: A Philosophical Framework for Understanding AI Agents // All things Azure [Электронный ресурс]. URL: <https://devblogs.microsoft.com/all-things-azure/agentic-philosophers/> (дата обращения: 25.05.2025).
5. World Leader in AI Computing // NVIDIA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/> (дата обращения: 25.05.2025).
6. Mehonic A. и др. Roadmap to neuromorphic computing with emerging technologies // APL Materials. 2024. № 10 (12). С. 109201.
7. **Krishnan G. и др.** SIAM: Chiplet-based Scalable In-Memory Acceleration with Mesh for Deep Neural Networks // ACM Transactions on Embedded Computing Systems. 2021. № 5s (20). С. 1–24.
8. **Telminov O., Gornev E.** Possibilities and Limitations of Memristor Crossbars for Neuromorphic Computing Kaliningrad, Russian Federation: IEEE, 2022. С. 278–281.
9. На пути к реализации высокопроизводительных вычислений в памяти на основе мемристорной электронной компонентной базы / Михайлов А.Н., Грязнов Е.Г., Лукоянов В.И., Коряжкина М.Н., Борданов И.А., Щаников С.А., Тельминов О.А., Иванченко М.В., Казанцев В.Б. // Физмат. – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 42–64.
10. **Rzeszut P. и др.** Multi-state MRAM cells for hardware neuromorphic computing // Scientific Reports. 2022. № 1 (12). С. 7178.

А.А. Филонов, А.Г. Подвесовский, А.А. Захарова

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНФИГУРИРОВАНИЯ ГРУППЫ ТРАНСПОРТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ВИДЕ МОДЕЛИ ДВУСТОРОННЕГО МАТЧИНГА

*ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
afilonovcontact@gmail.com*

Введение

В последние годы одно из перспективных направлений применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) связано с их использова-

нием в логистике, в том числе при решении задач доставки грузов в труднодоступные регионы, не обладающие развитой транспортной инфраструктурой [1]. Рост интереса к использованию БПЛА в грузоперевозках, особенно в динамичной среде с ограниченными ресурсами, актуализирует проблему разработки моделей и алгоритмов управления, обеспечивающих адаптивность, устойчивость и эффективность функционирования беспилотных авиационных транспортных систем.

В докладе предлагается подход к конфигурированию группы транспортных БПЛА, основанный на использовании модели двустороннего матчинга. Под конфигурацией понимается устойчивое соответствие между множеством транспортных задач (элементов плана транспортировки) и множеством доступных БПЛА, с учетом ограничений по грузоподъемности и предпочтений, которые определяются технической совместимостью, логистическими затратами и релевантностью задач.

Существуют алгоритмы, позволяющие эффективно находить такие соответствия, в том числе в условиях динамического изменения параметров среды, например, алгоритм, рассмотренный в работе [2].

Целью исследования является разработка формального подхода к формированию устойчивого распределения задач транспортировки в группе БПЛА, обеспечивающему адаптивность к изменениям, минимизацию логистических затрат и соответствие заданным предпочтениям и техническим ограничениям.

Задачи исследования включают:

- описание содержательной постановки задачи формирования сценария транспортировки грузов группой БПЛА;
- описание формальной постановки задачи матчинга;
- обсуждение результатов и направлений дальнейшей работы.

Содержательное описание задачи формирования сценария транспортировки грузов группой БПЛА

Рассматриваемая задача конфигурирования является частью общей задачи формирования сценария транспортировки грузов в труднодоступные районы с помощью транспортных БПЛА, описанной в работе [1].

Задано множество потребителей материально-технических средств, распределенных в пространстве. Далее будем называть материально-технические средства грузами, а места нахождения потребителей стоками.

На местности располагаются пункты хранения грузов (склады), которые характеризуются местоположением и объемами хранящихся грузов различных типов. Такие пункты будем называть *источниками*.

Имеется множество БПЛА, относящихся к конечному числу типов.

Задана маршрутная сеть воздушного транспорта в виде набора *маршрутов* со стоками, источниками и транзитными пунктами, имеющих привязку к координатам.

Конечным результатом решения описанной задачи является *сценарий* транспортировки грузов из *источников* в *стоки*, сформированный с учетом их территориального положения, состояния маршрутной сети и характеристик доступных БПЛА. Сценарий должен быть эффективным по таким критериям, как соответствие элемента плана характеристикам БПЛА; степень загрузки БПЛА; минимизация «накладных расходов».

В докладе рассматривается задача распределения БПЛА по маршрутам в соответствии со сформированным ранее *планом транспортировки*. Под *элементом плана* транспортировки будет понимать предписание о транспортировке заданного количества единиц груза определенного типа из фиксированного источника в фиксированный сток.

Конфигурацией будем называть распределение элементов плана между транспортными БПЛА в пределах одного источника. Процесс формирования конфигурации в рамках планирования сценария будем называть *конфигурированием*.

Далее покажем, что задача формирования конфигурации может быть представлена в виде задачи о паросочетаниях между двумя различными множествами агентов, в роли которых выступают БПЛА и элементы плана транспортировки. Одним из подходов к решению данной задачи, который будет рассмотрен далее, основан на применении модели и алгоритмов двустороннего матчинга.

Об алгоритмах двустороннего матчинга

Алгоритмы двустороннего матчинга – группа алгоритмов нахождения оптимальных (в некотором смысле) паросочетаний между элементами одного или нескольких (двух или более) множеств. В классической постановке задачи двустороннего матчинга, также известной как задача о марьяже [3], каждому объекту одного множества назначается единственный объект другого множества. Ключевым требованием, предъявляемым к распределению, является *устойчивость*. Распределение является устойчивым, если не существует возможной пары двух агентов, которая была бы для них обоих более предпочтительной, чем их пары в заданном распределении.

Для задачи о колледжах, обобщающих назначение агентов на случай отношений «один ко многим» или «многие к одному», вводится понятие *квоты* – числовой характеристики, задающей число агентов другого множества, с которым может образовать пару заданный агент. Постановка задачи, обобщающая понятие квоты для вещественных величин, рассмотрена в работе [4].

Таким образом, для представления задачи формирования конфигурации группы транспортных БПЛА в виде задачи двустороннего матчнга необходимо выделить множества агентов, участвующих в распределении, задать интерпретацию понятия квоты и определить критерии, которые будут формировать предпочтения агентов.

Формализованная постановка задачи конфигурирования

С учетом приведенного содержательного описания, рассмотрим формализованную постановку задачи конфигурирования группы транспортных БПЛА. Введем следующие обозначения.

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_k\}$ – множество грузов.

$H = \{H_1, H_2, \dots, H_t\}$ – множество стоков, в которые необходимо доставить груз из заданного источника согласно плану транспортировки.

$N = \{n_1, n_2, \dots, n_\eta\}$ – множество транспортных средств (БПЛА).

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_\mu\}$ – множество элементов плана, где m_j означает необходимость доставки груза $G_m^j \in G$ в сток $H_m^j \in H$.

С каждым БПЛА n_i связано значение квоты $q(n_i)$, характеризующее его грузоподъемность и имеющее вещественную природу. С другой стороны, для каждого элемента плана $m_j \in M$ известно пороговое значение $q(m_j)$, характеризующее массу транспортируемого груза.

Введем отношение назначения $S \subseteq N \times M$, представляющее собой бинарное отношение, такое что если существует пара $\langle n, m \rangle \in S$, то это означает, что элемент плана m будет выполняться БПЛА n .

Таким образом, задача реконфигурации сводится к формированию отношения S , удовлетворяющего критериям рациональности, которые были на содержательном уровне описаны выше.

На множество S для каждого агента заданы следующие отношения предпочтения:

Отношение предпочтения для элемента плана транспортировки – бинарное отношение, допускающее следующую интерпретацию: $\langle n_1, m \rangle > \langle n_2, m \rangle$ тогда и только тогда, когда доставка транспортным средством n_1 более предпочтительно для элемента плана m , чем доставка транспортным средством n_2 .

Отношение предпочтения для БПЛА – бинарное отношение, допускающее следующую интерпретацию: $\langle n, m_1 \rangle > \langle n, m_2 \rangle$ тогда и только тогда, когда исполнение элемента плана m_1 более предпочтительно для БПЛА n , чем доставка m_2 .

Предпочтения складываются из соответствия каждой возможной пары следующему набору критериев:

$$C = \langle C_s, C_q, C_s \rangle, \quad (1)$$

который включает в себя:

1. $C_t(n, m)$ – критерий релевантности по характеристикам. Он характеризует способность БПЛА n выполнять элемент плана m , т.е. транспортировать груз G_m в источник H_m .

2. $C_q(n, m)$ – критерий предоставляемой квоты, определяет запас грузоподъемности БПЛА n , который будет выделен на выполнение элемента плана m .

3. $C_s(n, m)$, $C_s(m, n)$ – критерии накладных расходов элемента плана m и БПЛА n . К накладным расходам при реализации элемента плана может относиться время, которое будет различным для разных транспортных средств.

Один из возможных способов задания предпочтений агента может быть основан на лексикографическом порядке важности критериев [2]. Так, применительно к критериям из набора (1) лексикографический порядок для агента-кандидата может иметь вид:

$$C_t(m, n) \succ^L C_q(m, n) \succ^L C_s(m, n) \quad (2)$$

Это означает, что безусловным приоритетом для него будут пользоваться те БПЛА, имеющие наибольшее значение показателя релевантности, следовательно, наиболее соответствующие условиям реализации данного элемента плана.

Распределение задач между агентами с учетом предпочтений может быть реализовано с использованием различных алгоритмов. Классический алгоритм Гейла-Шепли обеспечивает стабильный двусторонний матчинг по схеме «многие-к-одному». Однако он не применим к распределению на основе вещественных динамически меняющихся требований.

В рамках имеющихся наработок можно выделить алгоритм, рассмотренный в работах [2] – он позволяет находить решение с учетом вещественных квот. Однако в них рассматривается только модификация «многие-к-одному», когда заявки подают подчиненные агенты. Если рассматривается назначение БПЛА элементам плана, то при выполнении реконфигурации может потребоваться выполнение распределения по схеме «один-ко-многим», когда заявки будут подавать ведущие агенты (БПЛА).

В связи с изложенным, актуальной задачей является разработка алгоритма, поддерживающего схему распределения «один-ко-многим» и допускающего использование вещественных квот.

Выводы и направления дальнейших исследований

Рассмотрена новая постановка задачи конфигурирования группы транспортных БПЛА, возникающая в условиях динамически меняющейся операционной обстановки. Показано, что данную задачу целесообразно представлять в виде модели двустороннего матчинга между множеством агентов (БПЛА) и множеством задач. Предложена формальная

постановка, учитывающая предпочтения обеих сторон, а также ограничения на количество агентов, которые могут быть задействованы в выполнении каждой задачи.

Предполагается разработка расширенной системы предпочтений, которая будет учитывать характеристики нагрузки, дальности полёта, приоритет задач и прочие параметры. Кроме того, требуется построение вычислительно эффективного алгоритма, способного решать задачу распределения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и изменяющейся информации. Снятие ограничений на ресурсные возможности при реконфигурации и рассмотрение задачи распределения для совокупности всех источников позволит приблизить модель к условиям реального применения.

Работа формирует задел для комплексного исследования реконфигурации в многоагентных транспортных системах.

1. **Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2023. – № 3. – С. 3–15. – DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2023.1326.
2. **Подвесовский А.Г., Филонов А.А., Венец В.И., Настас Г.Н., Захарова А.А.** Модель принятия решений для задачи реконфигурации гетерогенной группы взаимодействующих объектов киберфизической системы // *Управление большими системами*. – 2025. – Вып. 113. – С. 346–379.
3. **Gale D., Shapley L.S.** College Admissions and the Stability of Marriage // *The American Mathematical Monthly*. – 1962. – Vol. 69, No. 1. – P. 9–15.
4. **Liu D., Du Z., Liu X., Luan H., Xu Y., Xu Y.** Task-Based Network Reconfiguration in Distributed UAV Swarms: A Bilateral Matching Approach // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2022. – Vol. 30. – P. 1–13. – DOI: 10.1109/TNET.2022.3181036.

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР* В СИСТЕМЕ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
hsp61@ipu.ru*

Введение

Сложность и ответственность решаемых с использованием групп роботов задач, с одной стороны, и уровень развития технологий групповой робототехники, с другой, актуализировали вопрос уточнения функций человека в системе группового управления роботами [1, 2, 3].

При этом полное исключение человека из контура управления группой роботов как лица, принимающего управленческие решения (ЛПР), не представляется возможным по ряду следующих причин: возникновением недопустимых от плана выполнения задания отклонений; появлением непредвиденных, не учтенных программой управления обстоятельств и нештатных ситуаций; возникновением отказов (неисправностей) бортовой аппаратуры роботов, программных сбоев, аварийных, опасных или критичных состояний; ограниченностью сенсорики роботов; совершением роботами неверных (ошибочных) действий или выходом из-под контроля; внезапным возникновением новых задач или непредусмотренных программой действий событий или условий функционирования; невозможностью роботами самостоятельно парировать проблемную ситуацию (роботы «не знают» что делать) и др.

Вместе с тем, возлагать на человека полное управление сразу несколькими роботами видится весьма проблематичным вследствие ограниченности возможностей человека по числу одновременно управляемых объектами (4–5 единиц); многозадачности группового управления; многофакторности условий принятия решений и большой комбинаторикой возможных управленческих решений; высокой цены ошибочных действий; стресс-факторной уязвимости и др. [4].

В этих условиях наиболее действенной мерой обеспечения рационального баланса между способностями человека и возможностями групп роботов видится закрепление за человеком – ЛПР организационно-управленческих функций, а за роботами – исполнительных действий.

* Понятие «человеческий фактор» рассматривается в контексте деятельности человека в качестве лица, принимающего решение (ЛПР) при управлении группой роботов.

Система группового управления роботами

В выше обозначенном порядке распределения функций система группового управления роботами (см. рис.) включает систему поддержки принятия решений, обеспечивающую ЛППР решениями-рекомендациями U_A о наиболее предпочтительных (в сложившихся условиях) вариантах тактики действий роботов [5], и информационно-измерительную управляющую систему, формирующую командное управление U роботами группы ($X_{ГР}$, $X_{ОИ}$, $X_{СФ}$ – векторы состояния группы роботов (ГР), объекта интереса (ОИ) и среды функционирования (СФ) соответственно, $D_{ГР}(U)$, $D_{ОИ}(U_{ОИ})$ – действия группы роботов и объекта интереса согласно управлениям U и $U_{ОИ}$ соответственно, I'_S , I_S^* , \tilde{I}_S – количественная (измеряемая), качественная (вербальная), нечеткая (количественно-качественная) ситуационная информация, U^* – решения ЛППР, φ' , φ^* , $\tilde{\varphi}_A$ – правила (алгоритмы) вывода решений расчетные (аналитические), эвристические (экспертные), комбинированные (аналитико-эвристические) соответственно.

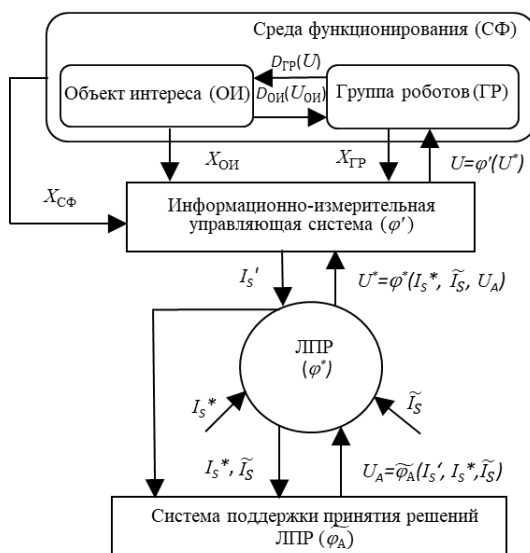


Рис. 1. Система группового управления роботами

В качестве основных аргументов в пользу участия человека в управлении группами роботов, можно выделить следующие: многомодальность восприятия окружающей среды; помехоустойчивость к средствам

противодействия; ответственность за последствия принимаемых решений (этичность); гибкость «перенастройки» на неожиданные изменения обстановки (адаптивность); устойчивость к неопределенностям («эластичность» рассуждений); защищенность от взломов; использование в качестве резервной, дублирующей системы управления, что повышает надежность руководства; нестандартность и креативность мышления, возможность импровизация, интуиция, хитрость, рефлексия; рискованность, инициативность, взвешенная смелость; эффективная самообучаемость (эмпиричность познания).

Заключение

Реализация предложенной системы управления предъявляет следующие основные требования к роботам группы: повышенная надежность и устойчивость функционирования; высокая автономность (самостоятельность исполнения заданий); наличие систем опознавания «свой-чужой»; слаженность действий в составе группы; удобство «общения» с ЛПР; самосохраняемость и самозащищенность; безопасность для окружения и наличие аварийной блокировки; самоликвидируемость ключевых агрегатов при угрозе захвата; оснащенность средствами самоконтроля.

1. **Каляев И.А.** Модели и алгоритмы управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
2. **Хрипунов, С.П.** Проблемные вопросы применения роботов в техногенной конфликтной среде. – Информационные технологии и технические средства управления (ICST-2024): материалы VIII Международной научной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2024. с. 180–181.
3. **Хрипунов, С.П., Граськин С.С.** Технологии интеграции беспилотных авиационных систем с пилотируемыми авиационными комплексами военного назначения. – Москва: Труды Академии наук авиации и воздухоплавания №4, 2024. с. 24-32.
4. **Величковский Б.Б.** Психологические проблемы когнитивной эргономики. – Мир психологии, издательство Моск. психол.-соц. ун-т (М.), том 96, № 4, 2018. с. 102–115.
Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Возможный подход к синтезу тактики действий РТК в составе групп, Робототехника и техническая кибернетика, 11 (3), 2023г., с. 215–223.

МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ МЕЖДУ РОБОТАМИ ГРУППЫ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ПЛОДОВОГО САДА

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
shiras@ipu.ru*

Введение

Интенсивное развитие роботизированных технологий в сельском хозяйстве связано с необходимостью повышения производительности, сокращения зависимости от ручного труда и оптимизации использования ресурсов в условиях растущих требований к качеству и устойчивости агропроизводства. Автоматизация процессов в садоводстве, как одной из наименее механизированных отраслей, становится приоритетным направлением [1]. В последние годы активное распространение получили гетерогенные робототехнические системы, включающие наземные и воздушные платформы, способные выполнять широкий спектр операций в аграрной среде. Их координированное применение требует разработки методов управления, обеспечивающих эффективное распределение задач с учётом особенностей среды, технических характеристик роботов и внешних ограничений [2, 3].

Описание метода распределения задач

Предложенный метод предназначен для управления распределением задач в гетерогенной группе роботов, функционирующих в условиях плодового сада. Группа включает беспилотные наземные роботы (БНР) и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), выполняющих различные операции по обслуживанию сада. Метод реализует адаптивное многозадачное планирование с учётом временных, пространственных, технических и климатических ограничений.

Работа системы организована по циклам, соответствующим операционному дню. В начале каждого дня строится распределение на основе плановых задач на день и не выполненных задач в предыдущие циклы. В дальнейшем план задач корректируется исходя из выполнения задач и результатов мониторинга. Все задачи имеют индивидуальные приоритеты, которые могут быть скорректированы по мере выполнения операций. Это обеспечивает динамическое перераспределение усилий на основе актуального состояния объектов.

Весь операционный цикл разбивается на интервалы времени, каждый из которых характеризуется доступностью тех или иных типов операций. В рамках каждого временного интервала выполняется планирование задач с учётом типов доступной техники, технических характеристик каждого робота (выполняемый тип задач, скорость, продолжительность автономной работы и др.), а также условий среды (геометрические характеристики сада, объем работ и др.).

Сад представляется в виде структурированной сетки: территория разделена на сектора, деревья в которых расположены по регулярной схеме. Пространственная модель используется для построения маршрутных сетей, которые формируют графы маршрутов перемещения роботов, отличающиеся для БНР (ограниченных дорожной инфраструктурой) и БПЛА (свободных в движении). Эти маршруты включают возможные точки старта, целей и возвращения в пункт технического обеспечения.

Представим решаемую задачу как задачу планирования и оптимизации транспортировки, в которой «грузами» выступают исполнительные действия, а БПЛА и БНР — средства доставки этих действий к объектам сада [4].

Целью планирования является минимизация совокупных затрат на выполнение всех назначенных задач в пределах рассматриваемого временного интервала, включая затраты на перемещения, обслуживание и исполнение операций. При этом решение строится как вариация задачи многокоммивояжёра с множеством агентов, каждый из которых ограничен ресурсами и способен выполнять лишь конечное число переходов и задач.

Формируются сценарии перемещений и взаимодействия, в которых оптимизируются следующие аспекты:

- назначение задач конкретным исполнителям с учётом их характеристик;
- маршруты перемещения с минимальными затратами на передвижение;
- соблюдение ограничений по времени, энергоресурсам и количеству доступных действий;
- необходимость возврата в пункт базирования после завершения работ;
- допустимость операций по условиям среды, технической совместимости и взаимосвязи с другими операциями;
- корректировка приоритетов задач по мере выполнения.

Для поиска оптимального решения могут использоваться различные алгоритмические подходы: при малом числе роботов и задач допускается полный перебор, при больших масштабах применяется эвристика (например, алгоритм ближайшего соседа) или метаэвристика (например, генетические алгоритмы, алгоритмы муравьиной колонии).

Метод поддерживает как первичное распределение задач в начале интервала, так и их адаптивную корректировку при наступлении событий: завершение задач, изменение погодных условий, появление новых приоритетов. Это позволяет поддерживать устойчивую и эффективную работу всей роботизированной группы в условиях изменяющейся среды.

Заключение

Предложенный метод обеспечивает согласованное распределение задач между гетерогенными мобильными роботами с учётом топологии сада, характеристик исполнителей, а также временных и ресурсных ограничений. Его применение позволяет минимизировать затраты при выполнении операций, поддерживать адаптивность при изменяющихся условиях и тем самым повышать эффективность функционирования автоматизированного плодового сада как целостной роботизированной системы.

1. **Змушко А.А.** Роботы в сельском хозяйстве. // Плодоводство. – 2023. – № 35(2). – С.186-192. – DOI: 10.47612/0134-9759-2023-35-186-192
2. **Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачёв А.Н.** Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // Проблемы управления. – 2019. – № 5. – С. 3–18.
3. **Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачёв А.Н.** Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 2. Беспилотные летательные аппараты и роботизированные фермы // Проблемы управления. – 2019. – № 6. – С. 3–10.
4. **Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3-15.

РАЗДЕЛ 5

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

РАСПРЕДЕЛЕННОГО

И СЕТЕВОГО

УПРАВЛЕНИЯ

ВИБРАЦИОННАЯ ЦИФРОВАЯ ТЕНЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА: ОТ МОНИТОРИНГА ДО ПРЕДИКТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

^{1,3}*Тульский государственный университет, г. Тула,*

²*АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева, г. Тула,*

¹*a.antsev@yandex.ru, 3es.yanov@mail.ru*

Введение

Современные производства сталкиваются с принципиальными сложностями при переходе к цифровым методам контроля состояния режущего инструмента. Существующие подходы к оценке износа демонстрируют существенные ограничения, особенно при обработке тонкостенных заготовок.

Большинство промышленных систем диагностики требуют глубокой интеграции с системами ЧПУ, что невозможно для устаревших станков и противоречит требованиям безопасности критически важных производственных объектов. При этом существующие предиктивные модели, основанные на упрощенных математических зависимостях, не учитывают индивидуальные особенности конкретных экземпляров инструмента и динамически изменяющиеся параметры обработки.

Экономические аспекты также создают существенные противоречия. С одной стороны, требуется постоянный контроль состояния инструмента, с другой - необходимо минимизировать технологические паузы и соблюдать жесткие ограничения по себестоимости обработки. Существующие системы не позволяют находить оптимальный баланс между этими требованиями. На большинстве предприятий накопленные данные мониторинга не используются для оптимизации процессов из-за отсутствия эффективных механизмов их анализа и интерпретации. Это создает "цифровой разрыв" между возможностями современного диагностического оборудования и реальной производственной практикой.

Разрабатываемая концепция вибрационной цифровой тени режущего инструмента предлагает принципиально новый подход к решению этих проблем. В основе методологии лежит создание динамической цифровой модели, отражающей состояние инструмента через анализ его вибрационных характеристик в реальном времени. Такой подход позволяет перейти от реактивного к предиктивному управлению технологическими процессами, обеспечивая существенное повышение эффективности производства.

Основная часть

Предложенная система мониторинга не требует подключения к СЧПУ, что важно для объектов критической информационной инфраструктуры и построена на основе MEMS-акселерометров, установленных на критических узлах технологического оборудования. Особенностью архитектуры является полная автономность от систем ЧПУ, что обеспечивает совместимость с оборудованием различных поколений и производителей. Сбор данных осуществляется с частотой 10 кГц, что позволяет анализировать как низкочастотные вибрации, связанные с общими динамическими характеристиками системы, так и высокочастотные составляющие, характерные для процессов изнашивания режущих кромок [1-2].

Использование быстрого преобразования Фурье (БПФ) выявило ключевые частотные диапазоны: нормальный режим (доминирующая частота 325-450 Гц; амплитуда 2.1-3.5 g), критический износ инструмента (появление гармоник 800-1200 Гц; рост амплитуды до 5.8-7.2 g).

На основе накопленных данных о вибрационных характеристиках различных режимов обработки и степенях износа инструмента построена система предиктивной аналитики. Использование рекуррентных нейронных сетей LSTM позволяет прогнозировать остаточный ресурс инструмента с точностью до 98,33%. Система автоматически формирует рекомендации по: оптимальному моменту замены инструмента; коррекции режимов резания для продления ресурса; профилактике вибрационной неустойчивости

Внедрение системы на АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н.Ганичева» продемонстрировало[3]:

- снижение затрат на инструмент на 15-18%;
- увеличение стойкости инструмента на 20-25%;
- сокращение времени переналадки на 30-35%;
- сокращение времени цикла обработки на 15-16%;
- сокращение энергопотребления на 18-20%;
- уменьшение брака по геометрическим параметрам на 12-15%.

Анализ причин возникновения брака позволил выявить следующее:

1. Человеческий фактор (ошибки контроля размеров, несвоевременная замена инструмента) - 34% случаев;
2. Технологические причины (неоптимальные режимы резания, нарушение технологической дисциплины) - 66%.

Дальнейшее развитие технологии вибрационной цифровой тени предполагает: интеграцию с системами автоматизированного проектирования технологических процессов (АСУТП); разработку самообучающихся алгоритмов адаптации к изменяющимся условиям обработки; создание распределенных систем мониторинга для всего парка оборудования.

Заключение

Проведенные исследования убедительно доказывают, что вибромониторинг представляет собой мощный инструмент анализа и оптимизации процессов механической обработки. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение для понимания физики процессов резания, так и практическую ценность для повышения эффективности производства. Особенно важно отметить, что разработанные методы анализа позволяют не только фиксировать уже возникшие проблемы, но и прогнозировать развитие износа инструмента. Дальнейшее развитие технологии направлено на создание комплексных систем управления жизненным циклом инструмента на основе данных вибромониторинга

Внедрение концепции вибрационной цифровой тени режущего инструмента открывает новые возможности для создания интеллектуальных производственных систем. Сочетание современных методов обработки сигналов с алгоритмами машинного обучения позволяет перейти от реактивного к предиктивному управлению технологическими процессами, что обеспечивает существенное повышение эффективности производства.

1. New system for indirect tool monitoring in industrial systems and processes / **E.S. Yanov, A.V. Antsev, M.S. Vorotilin, E.I. Minakov** // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44. No. 6. P. 868-870.
2. **Анцев А.В., Янов Е.С., Воротилин М.С.** Информационно-измерительные системы мониторинга работы станочного парка предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. No 9. С. 495-498.
3. **М.С. Воротилин, Е.И. Минаков, Л.А. Каравдин, Е.С.Янов.** Социально-психологические аспекты внедрения систем мониторинга технологического оборудования и их влияние на повышение эффективности машиностроительных предприятий // Электроника НТБ. – 2025. – №2. – С.74-78.

О ЗАДАЧЕ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
ipu31@mail.ru*

Актуальность

Верхний уровень современных промышленных систем управления – это распределенные сетевые системы, которые играют ключевую роль в управлении промышленными объектами: во-первых, они являются интегрирующими, поскольку собирают, объединяют и обрабатывают данные от всех систем нижнего уровня, и, во-вторых, именно на верхнем уровне находится человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), за которым оператор, используя эти данные, осуществляет контроль и управление технологическим процессом.

В области атомной энергетики системы верхнего уровня проектируются отдельно для каждого энергоблока (ЭБ) и называются системами верхнего блочного уровня (СВБУ). Основная информация и средства ее визуализации на ЧМИ, с которыми работает оператор СВБУ, образуют прикладное программное обеспечение (ППО).

Интеграционное начало СВБУ [1] делает ППО не только исключительно сложным и довольно объемным, но и приводит к необходимости его многократных изменений. Причины заключаются в том, что в процессе разработки, наладки и эксплуатации системы нижнего уровня модифицируются, устраняются ошибки как на нижнем уровне, так и на верхнем, корректируется информация, передаваемая на верхний уровень. В результате, жизненный цикл ППО становится итеративным.

Будучи частью жизненного цикла СВБУ жизненный цикл ППО повторяется на этапах его разработки, наладки и эксплуатации. При этом на каждой итерации создается не окончательная, но работоспособная версия ППО, которая необходима на каждом этапе жизненного цикла СВБУ: на этапе эксплуатации – для обеспечения функционирования СВБУ, на этапах разработки и наладки – для тестирования и отладки технических и программных средств систем нижнего уровня, а также испытаний СВБУ.

Для решения задачи внесения изменений в ППО необходима соответствующая методика, а для ее реализации – специализированный программно-технический комплекс (ПТК).

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) более 30 лет занимается разработкой систем верхнего блочного уровня. За это время созданы три различные реализации СВБУ для зарубежных АЭС: «Бушер» (Иран), «Куданкулам» ЭБ-1,2 и «Куданкулам» ЭБ-3,4 (Индия). Для каждой реализации разработано ППО, а для внесения в него изменений составлена методика и спроектирован ПТК, который получил название системы подготовки данных (СПД).

Прикладное программное обеспечение системы верхнего блочного уровня

Прикладное программное обеспечение СВБУ состоит из базы данных и множества видеокадров. Информация об оборудовании, сигнализации, аналоговых и дискретных параметрах содержится в базе данных, а ее представление реализовано на множестве видеокадров.

Особенность базы данных СВБУ заключается в том, что она не только изменяется сама в процессе функционирования АСУТП, но и воздействует на ход технологического процесса, т.е. позволяет осуществлять не только мониторинг, но и управление – называется она рабочей базой данных (РБД). Информация РБД представлена в текстовом виде, написана РБД на языке ABIS и имеет реляционную логическую структуру. РБД содержит более 100 тысяч сигналов.

Интегрирующий характер СВБУ определяет структуру РБД [2]: для каждой из систем нижнего уровня определена часть РБД, которая называется исходным проектом. Исходные проекты – это начальное, или промежуточное, состояние РБД. Для получения окончательного вида РБД, который используется для установки на серверы и рабочие станции СВБУ, исходные проекты объединяются с созданием инсталляционных проектов.

Видеокадры – графическое представление различной информации о производственном процессе – это основное средство ЧМИ, которое используется оператором для работы с информацией, содержащейся в РБД. Всего в ППО содержится более 1000 видеокадров.

Решение задачи внесения изменений в прикладное программное обеспечение системы верхнего блочного уровня

Для решения задачи внесения изменений в ППО разработана специализированная методика [3], основные идеи которой заключаются в том, что изменения вносятся в соответствии со специально структурированными заданиями по системам нижнего уровня с использованием исходных проектов, которые далее объединяются в инсталляционные проекты.

С задачей внесения изменений в ППО связаны другие смежные задачи, решение которых необходимо в процессе внесения изменений или после него: проверка исходных данных [4], тестирование ППО, выпуск эксплуатационной документации, работа с архивами СВБУ.

Методика внесения изменений в ППО, а также решение связанных с внесением изменений задач реализованы на ПТК СПД, который состоит из сервера, двух двух-дисплейных рабочих станций и цветного принтера, соединенных каналами связи.

Программное обеспечение (ПО) ПТК СПД включает системное, базовое и вспомогательное. За выполнение функций СПД отвечает базовое ПО: процедуры внесения изменений, процедуры сравнения версий исходных данных, процедуры выпуска документации. Системное ПО – операционные системы (ОС) LICS 1000 и Windows 10 – обеспечивает среду выполнения базового ПО. Составляющие вспомогательного ПО: VirtualBox, ZWCAD и MS Office реализуют виртуальную среду для ОС Windows 10, обеспечивают внесение изменений в видеокадры и выпуск обновленной документации соответственно.

ПТК СПД необходим для подготовки актуальной версии ППО на всех этапах жизненного цикла СВБУ. Но особо важную роль он приобретает на этапе эксплуатации, когда изменения в ППО необходимо внести непосредственно на энергоблоке АЭС.

1. **Полетыкин, А.Г.** Интеграционная платформа для АСУ ТП – система ОПЕРАТОР / А.Г. Полетыкин, Н.Э. Менгазетдинов, Е.Ф. Жарко, В.Г. Промыслов, М.Е. Бывайков, В.Н. Степанов, А.А. Байбулатов, К.В. Семенов, К.В. Акафьев // Труды 16-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2023). М.: ИПУ РАН, 2023. – С. 144-148.
2. **Бывайков, М.Е.** База данных системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС: структура и методика разработки / М.Е. Бывайков, К.В. Акафьев, А.А. Байбулатов, И.Н. Зуенкова // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2014. – № 4. – С. 24-31.
3. **Байбулатов, А.А.** Базы данных систем верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС: задача внесения изменений / А.А. Байбулатов, А.Г. Полетыкин, М.Е. Бывайков, К.В. Акафьев // Труды 17-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2024). М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 945-950.
4. **Голубев, П.А.** Особенности верификации и валидации заданий на прикладное программное обеспечение систем верхнего уровня АСУ ТП АЭС / П.А. Голубев, Е.Ф. Жарко // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 11. – С. 25-27.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СРЕДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ***

¹ *Институт динамики систем и теории управления
им. В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск,*

² *Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
г. Иркутск,
idstu@icc.ru*

Введение

Системы энергетики (СЭ) представляют собой сложные пространственно-распределённые инфраструктуры, обеспечивающие добычу, переработку, передачу и хранение энергоресурсов, а также снабжение ими потребителей [1]. Живучестью называется способность СЭ сохранять и восстанавливать управление над указанными процессами в условиях техногенных катастроф, стихийных бедствий, кибератак и террористических актов. Как правило, исследование живучести СЭ строится на многоуровневых оптимизационных подходах, в которых лежит моделирование сочетаний вышеперечисленных экстремальных условий и оценка их воздействия на системные возможности по управлению распределением потоков от источников до потребителей энергоресурсов. Общая схема исследования живучести СЭ приведена на рис. 1.

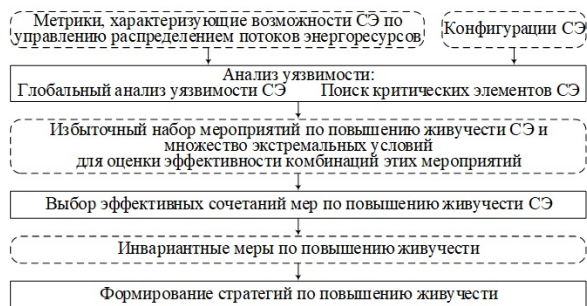


Рис. 1. Схема исследования живучести СЭ

К особенностям СЭ относятся их структурная и динамическая сложность, разнообразие взаимосвязей между ними, возможные погрешности

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (№ гос. рег. 124052100088-3)

или отсутствие ретроспективных или текущих данных, возможность внешних возмущений, воздействие климатических изменений и т. п. Эти особенности обуславливают необходимость детального всестороннего исследования живучести СЭ в условиях неопределённости. В данном контексте необходима интеграция различных методов исследования живучести, отличающихся своей вычислительной сложностью и характеризующихся различными требованиями к вычислительным ресурсам и способам организации и обработки расчётных данных.

Сервис-ориентированная среда исследования живучести СЭ

В работе предложен подход к автоматизации создания и применения сервис-ориентированной среды исследования живучести СЭ. Ее архитектура представлена на рис. 2. Приложения по исследованию живучести СЭ выполняются в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС), интегрирующей суперкомпьютерные ресурсы, ресурсы Grid-систем, ресурсы облачных и туманных платформ.

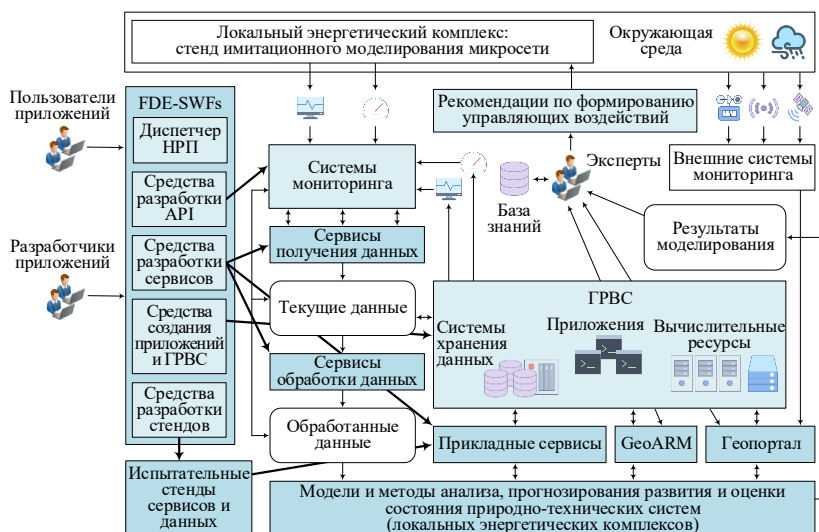


Рис. 2. Архитектура сервис-ориентированной среды исследования живучести СЭ

Разработка приложений и сервисов, реализующих модели и методы анализа, прогнозирования развития и оценки состояния природно-технических систем, осуществляется с помощью инструментального ком-

плекса FDE-SWFs [2], который относится к системам управления рабочими процессами (СУРП). Комплекс применяется также для организации самой ГРБС. В отличие от известных СУРП (см., например, [3]), FDE-SWFs обеспечивает поддержку ряда стандартов разработки и применения рабочих процессов. Он позволяет представлять рабочие процессы на языке BPEL и поддерживает WPS-сервисы, поддержка которых важна для решения задач экологического мониторинга при обработке и анализе пространственно-распределенных данных. FDE-SWFs обеспечивает создание испытательных стендов, ориентированных на валидацию данных, тестирование и анализ эффективности работы компонентов сервис-ориентированных приложений. В настоящее время в рамках ГРБС реализованы приложения для анализа уязвимости СЭ с целью выявления наихудших с точки зрения живучести недостатков в топологии и механизмах управления распределением потоков энергоресурсов [4], определения эффективных сочетаний мероприятий по повышению живучести СЭ на основе анализа их уязвимости [5] и формирования стратегий повышения живучести СЭ, реализующих выбранные инвариантные мероприятия [6].

Заключение

Предложен новый подход к автоматизации создания и применения сервис-ориентированной среды для решения важных практически значимых задач исследования живучести СЭ.

1. **Бычков, И.В. и др.** Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода [Текст] / И.В. Бычков, С.А. Горский, А.В. Еделев и др. // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – № 6. – С. 122–135.
2. **Воскобойников, М.Л.** Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs [Текст] / М.Л. Воскобойников, А.Г. Феоктистов, А.Н. Черных // Труды ИСП РАН. – 2024. – Т. 36. – № 6. – С. 195–214.
3. **Воскобойников, М.Л.** Сравнительный анализ систем управления научными рабочими процессами / М.Л. Воскобойников, А.Г. Феоктистов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 3(35). – С. 102–111.
4. **Еделев А.В.** Распределённая вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур в энергетике [Текст] / А.В.

- Еделев, С.М. Сендеров, Н.М. Береснева и др. // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 197–231.
5. **Edeleva, O.** Scientific Workflow-Based Synthesis of Optimal Microgrid Configurations [Текст] / O. Edeleva, A. Edelev, M. Voskoboinikov et al. // *Energies*. – 2024. – V. 17. – No. 23. – P. 1–25.
6. **Черных, А.Н.** Смягчение неопределенности при разработке и применении научных приложений в интегрированной вычислительной среде [Текст] / А.Н. Черных, И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов и др. // Труды ИСП РАН. – 2021. – Т. 33. – № 1. – С. 151–172.

А.И. Гайворонский^{1,2}, А.А. Кочкаров²

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ ПЛАТЕЖНОЙ СИСТЕМЫ

¹ *Московский физико-технический институт, г. Москва,
gayvoronskiy.ai@phystech.edu*

² *Финансовый университет, г. Москва,
akochkar@gmail.com*

Введение

В последние годы в финансовой отрасли наблюдается быстрый рост масштабов и сложности платёжных сервисов. Высоконагруженные платформы ежедневно обрабатывают сотни тысяч, а нередко — миллионы транзакций. Такой уровень активности предъявляет повышенные требования не только к производительности и отказоустойчивости, но и к устойчивости к киберугрозам. Нарастающее число целенаправленных атак, а также реализация всё более сложных сценариев мошенничества делают традиционные методы анализа и тестирования недостаточно эффективными. В этой связи становится актуальным создание комплексных исследовательских программных комплексов, предназначенных для имитационного моделирования работы платёжных систем в условиях интенсивной легитимной и аномальной нагрузки.

Данная работа посвящена описанию универсального программного комплекса, призванного служить платформой для анализа, оптимизации, тестирования и повышения защищённости высоконагруженных цифровых платёжных инфраструктур. Особое внимание в проекте уделено

принципам построения защищённых сетевых контуров, гибкости архитектуры, а также интеграции средств определения и анализа аномалий с помощью методов искусственного интеллекта.

Исследовательский комплекс

В основе программного комплекса лежит виртуализированная архитектура, моделирующая ключевые элементы современной платёжной системы [1]: процессинговый центр, банки-участники и конечных пользователей. Каждый компонент развёрнут в отдельном сетевом сегменте, что обеспечивает необходимую изоляцию и гибкость при отработке защищённых сценариев взаимодействия. Между сегментами реализовано туннелирование трафика с использованием современных криптографических стандартов (IPsec, OpenSSL), а также строгая фильтрация с помощью межсетевых экранов и систем WAF[4]. Это создает фундаментальную устойчивую основу для масштабируемых сценариев.

Имитация деятельности системы заключается в генерации большого массива транзакционных событий, каждый из которых реализован как последовательность стандартных REST-запросов и ответов, отражающих реальные операции перевода средств. Вся информация о транзакциях — параметры участников, суммы, каналы проведения, временные метки и статусы обработки — фиксируется в реляционной базе данных PostgreSQL, структура которой оптимизирована для поддержки большого количества одновременных операций и расширенного анализа накопленных данных. Архивное хранение для последующего анализа и построения выборок осуществляется в DWH на базе Greenplum.

Фоновая (номинальная) активность эмулируется на основе параметризованного нормального распределения суточной плотности событий:

$$f(t) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma^2}}$$

где A — среднее количество транзакций, t_m — час пиковой нагрузки, σ — ширина активного промежутка. Такой подход позволяет гибко подбирать сценарии под реальные или прогнозные рабочие нагрузки[3]. Для имитации аномальных событий используются дополнительные вероятностные модели: экспоненциальное и пуассоновское распределения для имитации всплесков и микротранзакционных атак, а также закон Парето для построения сценариев с тяжёлыми «хвостами».

Особое внимание уделено автоматизации обнаружения аномалий. Каждая транзакция снабжается меткой, определяющей её принадлежность к фоновому или аномальному процессу, тип и степень подозрительности. При разметке используется совокупность критериев: нехарактерно высокая активность определённого участника, превышение суммы, нетипичные пары плательщик—получатель или отклонения относительно

статистических норм. Эти данные формируют богатый и достоверный датасет для задач обучения и тестирования моделей машинного обучения любого уровня сложности: от простых классификаторов до современных нейросетевых архитектур, в том числе графовых нейронных сетей и трансформеров.

Комплекс поддерживает ускоренную генерацию событий, что позволяет моделировать сутки или даже больше операций всего за полчаса реального времени, не теряя при этом точности временной структуры событий. В состав комплекса включены системы мониторинга технического состояния инфраструктуры (мониторинг CPU, памяти, сети, диска через Zabbix), что позволяет контролировать стабильность эксперимента и быстро выявлять любые неоднородности в производительности под нагрузкой.

Проведённые на стенде тестирования подтверждают его эффективность при воспроизведении массовых сценариев, наращивании нагрузки и моделировании сложных атак с последующим анализом работы системы. На практике стенд позволяет аккумулировать гигантские массивы промаркированных событий, формируя основу для создания интеллектуальных антифрод- и анти-DDoS-решений нового поколения.

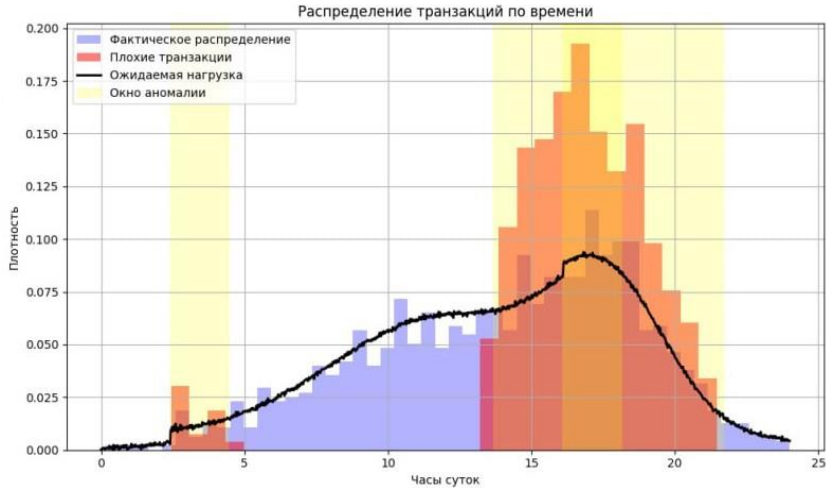


Рис. 1. Распределение имитирующих аномальных всплесков

Заключение

Разработанный исследовательский программный комплекс воспроизводит функционал и уязвимости высоконагруженных платёжных систем в виртуализированной среде с гибкой настройкой сценариев работы и уровня защиты. Комплекс обеспечивает масштабируемое моделирование повседневных и аномальных нагрузок, фиксирует и структурирует всю транзакционную активность, а также предоставляет широкие средства автоматизированной разметки и анализа данных для современных задач искусственного интеллекта и машинного обучения. Архитектура комплекса способствует быстрому внедрению новых методов защиты, адаптации к разнообразным сценариям внешнего воздействия и реалистичному обучению специалистов. Данный инструмент универсален — он пригоден как для прикладных исследований устойчивости и производительности платёжных платформ, так и для образовательных задач в области кибербезопасности и цифровых финансовых технологий.

1. **Гайворонский А.И., Кочкаров А.А.** Экспериментальная оценка имитационной модели СБП в условиях кибератак // Перспективные системы и задачи управления: Сборник трудов XX Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции. - 2025. - С. 310-317. - ISBN 978-5-6051865-8-8.
2. **Хританков, А.С.** Математическая модель характеристик производительности распределённых вычислительных систем / А. С. Хританков // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). – 2010. – Т. 2, № 1(5). – С. 110-115. – EDN MTGQXX.
3. **А.И. Гайворонский, А.А. Кочкаров, Е.Ю. Щетинин, С.В. Прокопчина** Компьютерное моделирование DDOS-атак на системы непрерывного мониторинга // Нелинейный мир. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 40-46. – DOI 10.18127/j20700970-202401-05. – EDN IBNRPP.
4. **Sina Ahmadi.** Next Generation AI-Based Firewalls: A Comparative Study. International Journal of Computer (IJC), 2023, 49 (1), pp.245-262. {hal-04456265}

АДАПТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ КОНТРОЛЯ ЗАТРАТ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
Elmircloud@gmail.com, bbc@ipu.ru*

Введение

Управляя нефтегазовыми проектам в России на условия соглашений о разделе продукции (СРП) Министерство энергетики РФ (Центр) привлекает Агента для контроля затрат компаний-операторов. Менеджеры компаний могут манипулировать затратами в свою пользу. В свою очередь, Агент также может завышать свои затраты. Развивая подходы, изложенные в [1], рассматривается модель контроля затрат в трехуровневой активной системе. Верхний уровень включает Центр и Советника, средний — Агента, нижний — Менеджера.

Введем обозначения: t – период времени, $t = 0, 1, \dots, H_t$ – затраты, $H_t = M_t + R_t$, $M_t \in \Psi_t = [m_t, \Omega]$, m_t – затраты, сообщаемые Менеджером Агенту, $m_t \in \psi = [\nu, \rho]$, $\nu > 0$, $\rho \leq \Omega$, $R_t \in X_t = [r_t, \zeta]$, r_t – затраты Агента, $r_t \in \chi = [\mu, \varphi]$, $\mu > 0$, $\varphi \leq \zeta$, m_t и r_t стационарные стохастические значения. Минимальные затраты системы $h_t = m_t + r_t$. Таким образом, $H_t \in \Xi_t = [h_t, \Omega + \zeta]$, $\Xi_t \subset \Xi = [\nu + \mu, \Omega + \zeta]$. При асимметричной информированности Центр и Советник не знают m_t, r_t и h_t , однако Агенту известны m_t, r_t до выбора H_t . При этом Менеджер может искажать значения m_t . Следовательно, Центр должен управлять Агентом, а последний, в свою очередь, – Менеджером, чтобы свести затраты H_t к минимуму h_t .

Обучение Центра с Советником. Центр классифицирует работу Агента как удовлетворительную ($e_t = 1$) или неудовлетворительную ($e_t = 0$), основываясь на заключении Советника z_t ($z_t = 1$ – затраты завышены, $z_t = 0$ – затраты не завышены). Ошибочная классификация приводит к потерям Центра. Для минимизации средних потерь воспользуемся алгоритмом обучения с учителем [2]:

$b_{t+1} = B(b_t, H_t) = b_t - \lambda_t \{b_t + [(w_{01} + w_{10})z_t - w_{01} - u]/l\}$, $b_0 = b^0$, (1)
где $l = \Omega + \zeta - \nu - \mu$, $u = [(\Omega + \zeta)^2 - (\nu + \mu)^2]/2$, w_{10} – потери при $e_t = 0$ (хотя Агент заслуживает $e_t = 1$), w_{01} – потери при $e_t = 1$ (хотя Агент заслуживает $e_t = 0$), $B(\cdot)$ – процедура оценки, λ_t – коэффициент

усиления, $0 < \lambda_{t+1} < \lambda_t$, $\sum_{t=0}^{\infty} \lambda_t < \infty$, $t = 0, 1, \dots$ Тогда ранг присваиваемый Центром Агенту e_t :

$$e_t = E(B_t, H_t) = \begin{cases} 1, & \text{если } H_t \leq b_t \\ 0, & \text{если } H_t > b_t \end{cases}, \quad (2)$$

где $E(\cdot)$ – процедура ранжирования.

Самообучение Советника. Неправильное заключение Советника наносит ущерб его репутации. Представим функцию ущерба в виде: $W_0(q, H_t) = H_t - \eta q$, $W_1(q, H_t) = \iota(q - H_t)$, $0 < \eta < 1$, $\iota > 0$, где q – настраиваемый параметр для минимизации среднего ущерба. Для настройки параметра q_t Советник применяет алгоритм самообучения:

$$q_{t+1} = Q(q_t, H_t) = \begin{cases} q_t + \eta \kappa_t, & \text{если } H_t \leq d_t \\ q_t - \iota \kappa_t, & \text{если } H_t > d_t \end{cases}, q_0 = q^0, t = 0, 1, \dots \quad (3)$$

где $d_t = q_t(\eta + \iota)/(\iota + 1)$ – параметр для формирования заключения; $Q(\cdot)$ – процедура аппроксимации. Советник формирует заключение:

$$z_t = Z(q_t, H_t) = \begin{cases} 1, & \text{если } H_t > d_t \\ 0, & \text{если } H_t \leq d_t \end{cases}, \quad (4)$$

где $Z(\cdot)$ – процедура заключения. Совокупность процедур $B(\cdot)$, $E(\cdot)$, $Q(\cdot)$ и $Z(\cdot)$, определяемые выражениями (1), (2), (3) и (4) соответственно, называется адаптивным механизмом ранжирования $G = (B, E, Q, Z)$.

Полезность Агента: $S_t = s(e_t, e_{t+1}, \dots, e_{t+\Omega})$, $S_\tau \uparrow e_\tau$, $\tau = \overline{t, t + \Omega}$, где σ – дальновидность Агента. В условиях неопределенности Агент выбирает H_t в периоде t , зная только h_t , но не зная будущих h_τ , $\tau = \overline{t + 1, t + \sigma}$. Соответственно целевая функция Агента $N_t(H_t)$:

$$N_t(H_t) = \min_{\tau = \overline{t+1, t+\sigma}} \min_{h_\tau \in \Xi} \min_{H_\tau \in \Xi_\tau} S_\tau \quad (5)$$

Примем гипотезу благожелательности Агента к Центру: если максимум $N_t(H_t)$ достигается при $H_t = h_t$, то $H_t^* = h_t$, $t = 0, 1, \dots$

Лемма 1. Адаптивного механизма ранжирования $G = (B, E, Q, Z)$ достаточно для снижения затрат, $H_t^* = h_t$, $t = 0, 1, \dots$

Оценка затрат. Менеджер сообщает Агенту затраты m_t , $m_t \in \theta_t = [d_t, \rho]$, $m_t > d_t$, $d_t \in \pi_t = [\nu, \Omega]$, $\Omega \leq \rho$, где d_t – потенциал. Агент должен мотивировать Менеджера выбирать $m_t = d_t$, $t = 0, 1, \dots$ Тогда оценка потенциала Агентом:

$$f_t = \arg \min_f A_t(f, m_t) = f_{t-1} - \gamma_t L'_f(m_t - f_{t-1}) \equiv A_t(f_{t-1}, m_t), \quad (6)$$

$$A = \{A_t(f_{t-1}, m_t), t = 0, 1, \dots\}, \gamma_t L''_f(m_t - f_{t-1}) < 1, f_0 = a^0, \quad (7)$$

где $A_t(\cdot)$ – процедура стандартизации, $L_f(m_t - f_{t-1})$ – выпуклая дважды дифференцируемая функция невязки $(m_t - f_{t-1})$, $L'_f(m_t - f_{t-1})$ – производная функции $L_f(m_t - f_{t-1})$ по f_{t-1} , γ_t – коэффициент усиления, $0 < \gamma_{t+1} \leq \gamma_t$, $\sum_{t=0}^{\infty} \gamma_t < \infty$, $t = 0, 1, \dots$

Стимулирование Менеджера. Менеджеру в начале периода t становится известно значение d_t и он выбирает m_t . Сравнивая m_t с оценкой f_{t-1} Агент назначает стимулы для Менеджера:

$$k_t = K(f_{t-1}, m_t), \quad \frac{\partial K(f_{t-1}, m_t)}{\partial m_t} \leq 0, \quad \frac{\partial K(f_{t-1}, m_t)}{\partial f_{t-1}} > 0 \quad (8)$$

где $K(\cdot)$ – процедура стимулирования. Совокупность процедур $A(\cdot)$ и $K(\cdot)$, определяемые (7) и (8) соответственно, называется адаптивным противозатратным механизмом и обозначается $V = (A, K)$.

Менеджер стремится к увеличению дисконтированной суммы:

$$D_t = \sum_{\tau=t}^{t+T} q^{\tau-t} k_{\tau}, \quad 0 < q < 1 \quad (9)$$

Менеджер руководствуется принципом максимального гарантированного результата при неизвестных d_{τ} , $\tau = t+1, t+T$:

$$\Delta_t(f_{t-1}, m_t, d_t) = \min_{d_{\tau} \in \pi, \varphi_{\tau} \in \Gamma, \tau = t+1, t+T} \min_{m_{\tau} \in \Theta_{\tau}, \tau = t+1, t+T} D_t \quad (10)$$

Примем гипотезу благожелательности Менеджера к Агенту: если максимум $\Delta_t(f_{t-1}, m_t, d_t)$ достигается при $m_t = d_t$, то $m_t^* = d_t$, $t = 0, 1, \dots$

Лемма 2. Адаптивного противозатратного механизма $V = (A, K)$ достаточно для снижения затрат, $m_t^* = d_t$, $t = 0, 1, \dots$, если:

$$\frac{\partial k_t}{\partial m_t} + \beta \gamma_t \frac{\partial k_{\tau}}{\partial f_{\tau-1}} \frac{\partial^2 L_f(t)}{\partial f_{t-1} \partial m_t} \frac{\left[1 - \beta^T \left(1 - \gamma_t \frac{\partial^2 L_f(\tau)}{\partial f_{\tau-1}^2} \right)^T \right]}{\left[1 - \beta \left(1 - \gamma_t \frac{\partial^2 L_f(\tau)}{\partial f_{\tau-1}^2} \right) \right]} \leq 0 \quad (11)$$

Теорема. Для минимизации затрат: $H_t^* = m_t^* + r_t$, $t = 0, 1, \dots$, достаточно адаптивного механизма контроля затрат $\Sigma = \{G, V\}$, включающего адаптивный механизм ранжирования $G = (B, E, Q, Z)$ и адаптивный противозатратный механизм $V = (A, K)$.

Пример: адаптивный механизм контроля затрат проекта «Сахалин-2». При ежемесячном контроле затрат Агент применяет механизм Σ с линейными процедурами $A(\cdot)$ и $K(\cdot)$:

$$f_t = A_t(f_{t-1}, m_t) = (1 - \gamma_t) f_{t-1} + \gamma_t m_t, \quad f_0 = f^0, \quad t = 0, 1, \dots, \quad (12)$$

$$K_t(f_{t-1}, m_t) = v(f_{t-1} - m_t) + const, \quad v > 0, \quad t = 0, 1, \dots, \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в (11), получаем:

$$q \gamma_t [1 - q^T (1 - \gamma_t)^T] \leq [1 - q(1 - \gamma_t)], \quad t = 0, 1, \dots, \quad (14)$$

На практике Агент очень плавно снижает затраты: $\gamma_t \ll 1$. В этом случае неравенства (14) и (11) выполняются.

Заключение. Разработан адаптивный механизм контроля затрат, позволяющий снижать затраты в условиях неопределенности. Функционирование механизма рассмотрено на примере нефтегазового проекта «Сахалин-2», реализуемого на условиях СРП.

1. **Джафаров, Э. И.** Модель контроля затрат по соглашению о разделе продукции / Э. И. Джафаров, В. В. Цыганов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Волгоград, 11–15 сентября 2023 года / Том 2. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 330-333.
2. **Tsyganov, V.** Mechanism of Energy Saving in Production with Machine Learning // Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2023): Proceedings of the 7th International Scientific Conference, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 2023. – P. 72-73.

Р.М. Закирзянов

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*ООО «НЕКСТ инжиниринг», г. Казань,
zr@nexteng.ru*

Введение

В настоящее время автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) крупных промышленных предприятий строятся, как правило, на базе программно-технических комплексов (ПТК) [1]. Компоненты таких ПТК серийно выпускаются промышленностью, поэтому функциональные возможности и характеристики получаемых систем управления во многом определяются их структурой. Для достижения требуемых показателей качества системы необходимо построить такую структуру из компонентов с известными характеристиками, которая была бы по возможности минимальной по стоимости и удовлетворяла заданным требованиям и ограничениям.

Описание исследования

Для постановки задачи поиска оптимальной структуры АСУТП представим ее структуру (рис. 1) в виде дерева (ациклического графа) $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, где $v \in \mathcal{V}$ – устройства (вершины графа), \mathcal{E} – ребра графа (каналы связи между устройствами). Количество уровней S в иерархии задается проектировщиком и может варьироваться. Методы оптимизации иерархических структур подробно рассмотрены в [2].

Зададим множество типов устройств $\mathcal{U} = \{u_1, \dots, u_U\}$. Примем, что каждый узел структуры (устройство) любого типа выполняет однотипные действия, состоящие из трех фаз цикла работы внутренней программы устройства:

- сбор (чтение) информации от объекта управления, либо от узлов предыдущего уровня иерархии;
- обработка информации (реализация алгоритмов управления);
- выдача информации (запись) на нижестоящий уровень, либо воздействие на объект управления.

Каждый тип $u_i \in \mathcal{U}$ узла структуры характеризуется следующими параметрами: стоимость устройства, количество подключаемых физических каналов, максимальный объем памяти, вероятность отказа устройства, производительность (время выполнения одной программной инструкции), режим работы, максимальное количество дочерних устройств, задержка передачи.

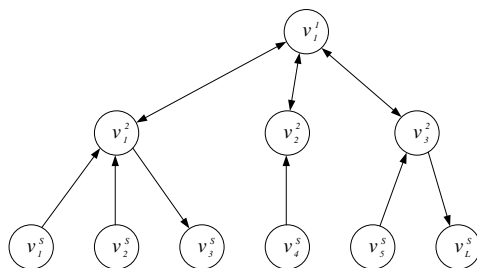


Рис. 1. Иерархическая структура РСУ

Зададим множество контуров управления $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_A\}$, состоящее из A контуров. Каждый контур $a_j \in \mathcal{A}$ характеризуется следующими параметрами: количество физических сигналов в контуре, количество памяти, требуемое для хранения всех инструкций и переменных контура, количество инструкций в программе обработки сигналов данного контура.

Устройство, которое обладает функцией обработки информации, будем называть *обработчиком*. Устройство, которое способно только передавать информацию, будем называть *ретранслятором*.

Принимаем, что только устройства уровня S (листья) непосредственно соединены с полевым оборудованием технологической установки. Также принимаем, что все устройства однотипны, различаются только величинами указанных выше параметров, горизонтальные связи между устройствами отсутствуют.

Ранее [3] были определены ключевые критерии оптимизации иерархической структуры АСУТП.

При синтезе важно учесть динамические свойства системы. На практике это является довольно сложной задачей [4]. В качестве показателя, характеризующего качество системы управления, примем максимальное время обработки одного контура T_{cont} .

Вероятность отказа системы P_{sys} не должна превышать заданной величины $P_{max} \in [0,1]$.

Также вводится ряд дополнительных ограничений.

Оптимальная иерархическая структура G_O должна минимизировать стоимость системы при заданных ограничениях. Таким образом, искомая структура может быть определена в результате решения задачи оптимизации:

$$C_O = \min_g \sum_{v \in V} C_v, \quad (1)$$

где C_O – оптимальная суммарная величина затрат на создание системы, C_v – стоимость устройства v .

Для решения данной NP-трудной задачи выбран алгоритм муравьиных колоний [5], так как он достаточно хорошо кодирует задачу, представленную в виде графа. Произведена реализация алгоритма на языке Python.

Для минимизации эффекта застревания на локальных оптимумах алгоритм был модифицирован дополнительным локальным поиском вблизи предполагаемого оптимума.

Проверка качества полученной системы управления может быть выполнена путем имитационного моделирования системы с конкретным объектом управления, например, технологической установкой химического предприятия.

Заключение

Задача поиска оптимальной структуры АСУТП, построенной на базе серийно выпускаемых компонентов, является чрезвычайно актуальной. В настоящее время синтез структуры таких систем выполняется в основном эмпирическим путем на основании опыта проектировщика и не

всегда является оптимальным. Реализованный алгоритм может быть использован инженерами АСУТП при проектировании крупномасштабных систем управления технологическими процессами.

1. **Федоров, Ю.Н.** Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Учебно-практическое пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 стр., 12 ил.
2. **Новиков, Д.А.** Методы оптимизации структуры иерархических систем / Д. А. Новиков, М. В. Губко // Управление развитием крупномасштабных систем: Современные проблемы / Под редакцией А. Д. Цвиркуна. Том Выпуск 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2015. – С. 359-377.
3. **Закирзянов, Р.М.** Критерии выбора оптимальной структуры распределенной системы управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий / Р. М. Закирзянов // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 10. – С. 17-23.
4. **Цвиркун, А.Д.** Основы синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун // М.: Наука, 1982. – 200 с.
5. **Штовба, С.Д.** Муравьиные алгоритмы: теория и применение / С. Д. Штовба // Программирование. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 3-18.

О.Ю. Марьясин, А.Н. Плехотнюк

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГООБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

*Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль,
maryasin2003@list.ru*

Введение

Успехи, достигнутые в последние годы в области одноагентного обучения с подкреплением (Reinforcement Learning – RL) для управления сложными техническими объектами и системами [1–3] мотивируют исследователей использовать потенциал этих методов для мультиагентного обучения с подкреплением (Multi-agent reinforcement learning – MARL) [4]. В данной работе описывается пример применения MARL для управления энергетическим объектом, в качестве которого выступает много-

зонное здание. Целью управления будет снижение энергозатрат на отопление и охлаждение здания с учетом сохранения комфортного микроклимата внутри помещений здания [5].

Управление энергопотреблением здания на основе MARL

В данной работе предполагается, что каждой из пяти зон здания соответствует свой агент. Состояние s_{it} для i -го агента в момент времени t представляет собой множество $\langle T_{it}, PMV_{it}, o_{it} \rangle$, где T_{it} – температура воздуха i -й зоны здания, PMV_{it} – показатель Predicted Mean Vote (PMV) i -й зоны здания [6], o_{it} – наличие людей в помещениях i -й зоны здания. Общее состояние $s_t = \{s_{t1}, \dots, s_{t5}\}$ будет складываться из отдельных состояний.

Функция вознаграждения r_{it} i -го агента будет иметь вид

$$r_{it} = -q_{it} - \lambda_1 p_{it}, \quad (1)$$

где q_{it} – суммарное количество энергии, затраченное на отопление и охлаждение i -й зоны здания в момент времени t , p_{it} – функция штрафа за нарушение ограничений по температуре i -й зоны здания, λ_1 – заданный коэффициент. Функция штрафа p_{it} зависит от величины отклонения от заданного температурного диапазона

$$T_{itl} \leq T_{it} \leq T_{itu}, \quad i = 1, \dots, Z, \quad t = 0, \dots, H, \quad (2)$$

где T_{itl} , T_{itu} – минимальное и максимальное значения температуры в i -й зоне здания в момент времени t , H – горизонт управления, Z – число зон здания.

Набор действий агента i -го $a_{it} = \{T_{itih}, T_{itic}\}$ включает задания на отопление T_{itih} , и охлаждение T_{itic} локальных регуляторов температуры зон здания. Таким образом, каждый i -й агент RL учится решать задачу максимизации функции вознаграждения агента (1), тем самым минимизируя количество энергии, затраченное на отопление и охлаждение i -ой зоны здания с учетом ограничения (2) [7].

Для управления микроклиматом и энергопотреблением здания использовались различные алгоритмы RL с непрерывным и дискретным множеством действий [9,10]. Авторы провели множество численных экспериментов по решению задачи управления микроклиматом и энергопотреблением многозонного здания с различными вариантами MARL. Значения суточного энергопотребления для отопления и охлаждения помещений здания для рассмотренных в работе вариантов MARL и алгоритмов RL с последовательным выполнением действий агентами приведены в таблице 1.

**Суточное энергопотребление для алгоритмов RL
при последовательном выполнении действий агентами**

| Алго- ритм | Вариант 1, кВт/час | Вариант 2, кВт/час | Вариант 3, кВт/час | Вариант 4, кВт/час | Вариант 5, кВт/час |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| PPO | 101.311 | 106.426 | 104.588 | 108.128 | 104.746 |
| A2C | 101.534 | 105.676 | 103.818 | 106.454 | 104.105 |
| DPG | 102.386 | 106.042 | 104.174 | 108.011 | 103.694 |
| DDPG | 100.365 | 104.690 | 103.033 | 106.487 | 102.973 |
| DQN | 95.978 | 98.665 | 96.793 | 99.225 | 96.665 |
| DDQN | 96.946 | 98.927 | 97.271 | 100.788 | 97.265 |

Анализ таблицы 1 показывает, что Вариант 1 с общим множеством состояний, независимыми действиями агентов и индивидуальной наградой (марковская игра), в целом, позволяет получить лучшие результаты по сравнению с одноагентным обучением (централизованное управление, Вариант 5). Вариант 2 с раздельным множеством состояний, независимыми действиями агентов и индивидуальной наградой (децентрализованное управление) приводит к повышению энергопотребления по сравнению с вариантами 1, 3 и 5. Использование общей награды (варианты 3 и 4) приводит к повышению энергопотребления по сравнению с соответствующими вариантами с индивидуальной наградой (варианты 1 и 2). Наименее привлекательным в точки зрения энергосбережения оказался Вариант 4. Это можно объяснить тем, что в данном случае агенты не только не владеют полной информацией о состоянии системы, но и получают одинаковую награду, что уравнивает агентов и снижает эффективность их действий.

Последовательное выполнение действий агентов хорошо подходит не для всех вариантов MARL. Например, для вариантов 3 и 4 с общей наградой оно приводит к ситуации, связанной с тем, что награда для последующего агента может немного отличаться от награды для предыдущего, т.е., на самом деле, награда не является одинаковой для всех агентов. Избежать отмеченную проблему с общей наградой можно, когда все агенты одновременно воздействуют на среду, т.е. при параллельном выполнении действий агентов. Значения суточного энергопотребления для Варианта 3 MARL и различных алгоритмов RL при параллельном выполнении действий агентов показаны в таблице 2.

Таблица 2

Суточное энергопотребление для алгоритмов RL при параллельном выполнении действий агентами

| Алгоритм | Вариант 3, кВт/час |
|-----------------|-------------------------------|
| PPO | 101.546 |
| A2C | 100.857 |
| DPG | 100.580 |
| DDPG | 99.895 |
| DQN | 96.219 |
| DDQN | 97.010 |

Данные таблицы 2 позволяют сделать вывод, что для Варианта 3 параллельное выполнение действий агентами позволяет достичь более низкого энергопотребления, или иными словами, повлиять на обучение агентов так, чтобы они за определенное время смогли получить более низкое энергопотребление.

Заключение

Таким образом, в работе приводится сравнение результатов, полученных с помощью различных алгоритмов RL и различных вариантов MARL, по значению суммарного энергопотребления для отопления и охлаждения помещений здания в течение суток. Установлено, что варианты с отдельным множеством состояний показали результаты несколько хуже, чем соответствующие варианты с общим множеством состояний. Использование общей награды также приводит к небольшому повышению энергопотребления по сравнению с соответствующими вариантами с индивидуальной наградой. Это объясняется тем, что получение одинаковой награды уравнивает агентов, что сказывается на эффективности их действий. В работе также на примере одного из вариантов показано, что параллельное выполнение действий агентами может повлиять на обучение агентов так, чтобы они за определенное время смогли достичь более низкого энергопотребления.

1. **Perera A.T.D., Kamalaruban P.** Applications of reinforcement learning in energy systems / A.T.D. Perera, P. Kamalaruban // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. Vol. 137. – P. 1–22.
2. **Wang Z., Hong T.** Reinforcement learning for building controls: The opportunities and challenges / Z. Wang, T. Hong // Applied Energy. – 2020. Vol. 269. – P. 1–8.

3. **Yu L., Qin S., Zhang M., Shen C., Jiang T., Guan X.** A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management / L. Yu, S. Qin, M. Zhang, C. Shen, T. Jiang, X. Guan // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. Vol. 8. Iss. 15. – P. 12046–12063.
4. **Алфимцев А.Н.** Мультиагентное обучение с подкреплением : учебное пособие / А.Н. Алфимцев. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 222 с.
5. **Day A.R., Ratcliffe M.S., Shepherd K.J.** Heating Systems, Plant and Control / A.R. Day, M.S. Ratcliffe, K.J. Shepherd // Blackwell Science Ltd. 2003. – 333 p.
6. **Dyvia H. A., Arif C.** Analysis of thermal comfort with predicted mean vote (PMV) index using artificial neural network / H. A. Dyvia, C. Arif // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. Vol. 622. – P. 1–12.
7. **Марьясин О.Ю., Плохотнюк А.Н.** Применение мультиагентного обучения с подкреплением для управления энергопотреблением здания / О.Ю. Марьясин, А.Н. Плохотнюк // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. – М: ИНУ РАН, 2024. – С. 3180–3184.
8. **Maryasin O.Yu., Plohotnyuk A.** Reinforcement Learning-Based Approach to Optimization of Energy Consumption in a Building / O.Yu. Maryasin, A. Plohotnyuk // 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, 2023. – P. 685–690.
9. **Лапань М.** Глубокое обучение с подкреплением. AlphaGo и другие технологии / М. Лапань. – СПб.: Питер, 2022. – 496 с.
10. **Гессер Л., Кенг В.Л.** Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python / Л. Гессер, В.Л. Кенг. – СПб.: Питер, 2022. – 416 с.

Е.Г. Мусатова, А.А. Лазарев

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
nekolyap@mail.ru, jobmath@mail.ru*

Введение

Рассматривается задача организации работы распределительного центра, возникающая в сфере доставки товаров при использовании кон-

солидированных перевозок. Предполагается, что товары с разными пунктами назначения, но общими частичными маршрутами следования объединяются в партии для максимальной загрузки транспортных средств, следующих по данному частичному маршруту. Подобный подход часто используется при грузовых железнодорожных перевозках [1], в работе маркетплейсов, доставке почтовых сообщений.

При управлении цепочками поставок в больших логистических сетях для оптимизации транспортных расходов, как правило, рассматривают постановки задач различного уровня планирования [2]: на стратегическом уровне решаются задачи поиска оптимального расположения перегрузочных терминалов, распределительных центров [3]; на следующем уровне рассматриваются задачи маршрутизации товаров [4]. Что касается работы промежуточных складов (распределительных центров), в последнее время наблюдается тенденция перехода к кросс-докингу, т.е. перегрузке товаров без долгосрочного хранения и использованию складов небольшой емкости [5], поэтому актуальной представляется организация перевозок с минимизацией времени хранения товаров в промежуточных пунктах. Наша работа посвящена задаче локального тактического планирования, когда маршруты движения товаров и точки расположения складов (распределительных центров) известны. Необходимо при ограниченном количестве транспортных средств решить, в какой момент и какую партию товаров необходимо отправить с рассматриваемого распределительного центра с тем, чтобы минимизировать загруженность склада и учесть требования, предъявляемые к доставке товаров.

Описание задачи

Базовая постановка задачи имеет следующий вид. Пусть задано множество $K = \{1, \dots, n\}$ направлений движения транспортных средств из рассматриваемого сортировочного центра. Иными словами, товары в данном терминале объединяются в n видов партий для дальнейшего следования по сети дорог. Все товары имеют стандартный размер упаковки, принимаемый за единицу. Заранее определено, в каком направлении далее должен двигаться тот или иной товар. На заданном горизонте планирования $[t_0, t_{max}]$ известно множество $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ моментов прибытия транспортных средств с товарами в сортировочный центр. Транспортное средство, пришедшее в момент t_i , привозит α_{ik} единиц товара, которые далее должны следовать в направлении $k \in K$, а само средство может быть использовано для дальнейшей перевозки партии товаров в некотором направлении. Кроме того, в начальный момент времени в сортировочном центре имеется r_0 свободных транспортных средств, а также α_{0k} единиц товаров, которые должны быть отправлены в направлении $k \in K$. Каждое транспортное средство может перевозить от l_{min} до

l_{max} единиц товаров. В базовой постановке будем пренебрегать временными затратами на погрузку-разгрузку товаров. Тогда несложно видеть, что моменты отправления транспортных средств с товарами из распределительного центра должны принадлежать множеству T .

Для формализации задачи введем следующие переменные:

- целочисленная переменная y_{ik} , $i \in I = \{1, \dots, m\}$, $k \in K$, равна количеству транспортных средств, отправляемых в направлении k в момент t_i ;

- целочисленная переменная x_{ik} , $i \in I$, $k \in K$, равна количеству единиц товара, отправляемого в направлении k в момент t_i .

Тогда ограничение на количество отправляемых товаров в каждом направлении в каждый момент времени можно записать как

$$x_{ik} \leq \sum_{j=0}^i \alpha_{jk} - \sum_{j=1}^{i-1} x_{jk} \quad \forall i \in I, \forall k \in K.$$

Баланс транспортных средств определяется как

$$\sum_{k \in K} y_{ik} \leq r_0 + i - \sum_{k \in K} \sum_{j=1}^{i-1} y_{jk} \quad \forall i \in I.$$

Ограничение на грузоподъемность машин имеет вид

$$l_{min} y_{ik} \leq x_{ik} \leq l_{max} y_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in K.$$

Условие целочисленности переменных:

$$x_{ik}, y_{ik} \in N_0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K.$$

Ставится задача минимизации загрузки сортировочного центра:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik} t_i + \left(\sum_{i=0}^m \sum_{k \in K} \alpha_{ik} - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik} \right) t_{max} \rightarrow \min.$$

В работе исследуется базовая постановка задачи, а также некоторые ее усложнения и модификации, в том числе онлайн постановка в предположении, что времена поступления товаров (и соответствующих транспортных средств) не известны, предлагаются подходы к ее решению. Вычислительный эксперимент подтверждает возможность решения данной задачи для достаточно высокой размерности, удовлетворяющей требованиям практики.

Заключение

Рассмотрена задача минимизации загрузки распределительного центра при ограниченном количестве транспортных средств для вывоза товара со склада, предложены алгоритмы ее решения. Данная модель может быть использована для организации работы перегрузочных терминалов при консолидированной доставке грузов на большой сети дорог при разветвленной системе поставщиков-заказчиков.

1. **Musatova, E.** The Problem of Dynamic Regulation of Train Formation on a Marshalling Yard / E. Musatova, A. Lazarev, A. Osminin, A. Baushev // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2024. – Т. 24, № 3 – С. 31–42.
2. **Gümüş, M.** Cross-docking and its implications in location-distribution systems / M. Gümüş, J. H. Bookbinder // *Journal of Business logistics*. – 2004. – Т. 25. – №. 2. – С. 199-228.
3. **Mangiaracina, R.** Distribution network design: a literature review and a research agenda / R. Mangiaracina, G. Song, A. Perego // *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. – 2015. – Т. 45. – №. 5. – С. 506-531.
4. **Wen, M.** Vehicle routing with cross-docking / M. Wen, J. Larsen, J. Clausen, J.F. Cordeau, G. Laporte // *Journal of the operational Research Society*. – 2009. – Т. 60. – №. 12. – С. 1708-1718.
5. **Guastaroba, G.** Intermediate facilities in freight transportation planning: a survey / G. Guastaroba, M.G. Speranza, D. Vigo // *Transportation Science*. – 2016. – Т. 50. – №. 3. – С. 763-789.

С.А. Петренко, Д.Д. Ступин

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Московский физико-технический институт (МФТИ), г. Москва,
s.petrenko@rambler.ru, ddstupin@yandex.ru*

Рассмотрены перспективы внедрения квантовых вычислений в работу критической информационной инфраструктуры (КИИ) Государства. Для определенного набора задач квантовые вычисления позволяют получить положительный эффект по сравнению с классическими вычислениями. Это может привести к попыткам недружественных вмешательств в работу КИИ с использованием квантовых технологий и создать проблемы в работе КИИ и, соответственно, проблемы для жизнедеятельности и устойчивого развития страны. Представляется необходимым проведение комплекса исследований потенциальных квантовых угроз для КИИ и выработка мер обеспечения ее устойчивой работы и устойчивого развития Государства.

Критическая информационная инфраструктура (КИИ), под которой понимают совокупность информационных систем, сетей и ресурсов, имеющих критически важное значение для устойчивого функционирования и безопасности страны, экономики и общества, играет важнейшую роль в обеспечении жизнедеятельности и устойчивого развития Государства и, как следствие, в обеспечении его безопасности и суверенитета. Очевидно, любое недружественное воздействие на КИИ может привести к нарушениям в функционировании критической инфраструктуры Государства с соответствующими негативными последствиями для жизнедеятельности и безопасности его населения [1]. Воздействие на КИИ негативно влияет на ключевые составляющие всего социально-экономического комплекса страны, включая:

- Обеспечение базовых социально-экономических процессов, определяющих жизнедеятельность и развитие Государства;
- Обеспечение жизнедеятельности и устойчивого развития основных Государственных институтов;
- Поддержание обороноспособности и, на этой основе, необходимого уровня стратегической безопасности Государства, его суверенитета и стабильности его положения в мировом сообществе.

Понимая под КИИ совокупность информационных систем, сетей и ресурсов, которые критически важны для устойчивой жизнедеятельности и безопасности Государства, экономики и общества, мы включаем в КИИ вычислительные процессы, необходимые для поддержания работы критической инфраструктуры и всего народно-хозяйственного комплекса. Соответственно, сюда относим и различные вычислительные структуры, которые эти вычислительные процессы реализуют. Важно отметить, что в задаче обеспечения работы КИИ, учитывая ее постоянное развитие, усложнение и ресурсоемкость, все большую роль играют высокопроизводительные вычисления. Повсеместная информатизация всех процессов, так или иначе связанных с мониторингом и управлением, приводит к существенному повышению требований к производительности вычислительных ресурсов, реализующих эти процессы. Можно выделить следующие группы задач, которые требуются для обеспечения эффективной работы КИИ:

1. Оценка и анализ характеристик многопараметрических процессов в природных и техногенных средах с использованием высокотехнологичных датчиков и сенсоров.
2. Обработка в реальном времени больших информационных массивов и потоков данных (технологии Data Science и Big Data).
3. Интерпретация результатов измерений и обработки данных и решение на этой основе задач распознавания, обучения, прогнозирования и т.д.

4. Моделирование многомерных процессов вероятностной природы, разработка различных сценариев реализации этих процессов.

5. Решение задач многомерной оптимизации при анализе сложных процессов и формировании стратегий поведения в неопределенных условиях.

Приведенные выше группы задач должны решаться при выполнении одного необходимого условия: обеспечении информационной безопасности, под которой в данном случае мы будем понимать возможность обеспечения устойчивой работы КИИ или ее какой-либо составной части в условиях недружественных внешних воздействий на вычислительный процесс либо на инфраструктуру, этот процесс реализующую [3]. Причем под понятием «инфраструктура» мы должны понимать не только вычислительную среду, реализующую соответствующие вычисления, но и телекоммуникационную инфраструктуру, обеспечивающую движение информационных потоков при выполнении вычислительных задач и информационное взаимодействие между элементами вычислительной инфраструктуры [7,8].

Развитие информационных технологий однозначно влияет на развитие и совершенствование КИИ, в том числе, в части повышения требований к эффективности вычислительных процессов. Одним из направлений повышения эффективности может считаться использование «неклассических» типов вычислений, например, аналоговых (оптических, нейроморфных и т.п.) или квантовых. Мотивация к использованию «неклассических» вычислений представляется понятной: целый ряд вычислительных задач, требующих сверхпроизводительных цифровых вычислений, может быть реализован с помощью аналоговых устройств. Для примера можно привести оптические линзы, реализующие пространственное преобразование Фурье, либо устройства на основе модуляторов Маха-Цендера, с помощью которых решаются задачи формирования многолучевых диаграмм направленности фазированных антенных решеток. В этот же ряд можно поместить квантовые вычисления, с помощью которых могут быть решены задачи, требующие сверхбольших вычислительных мощностей при использовании «классических» суперкомпьютеров [2].

Анализ публикаций по проблематике квантовых вычислений позволяет назвать, по крайней мере, два типа задач, эффективно решаемых с использованием квантовых технологий (по сравнению с «классическими» вычислениями) [2]:

- Моделирование многопараметрических вероятностных процессов;
- Многомерная оптимизация.

Оба типа задач могут применяться для исследований и оптимизации КИИ или ее элементов, в частности, анализа работы КИИ в экстремальных ситуациях, а также для прогнозирования вариантов развития и совершенствования КИИ. Заметим, что целесообразность применения квантовых вычислений для исследования и оптимизации КИИ пока не является полностью подтвержденной, в первую очередь, вследствие слабой воспроизводимости результатов. Это связано, во-первых, с высокой чувствительностью квантовых вычислений к внешним условиям и, соответственно, трудностями поддержания высокой стабильности параметров аппаратных устройств, а во-вторых, с принципиально статистическим характером вычислений, особенно, при вероятностном моделировании. Тем не менее, перспективы внедрения в практику новых типов высокопроизводительных вычислений для оптимизации КИИ не должны подвергаться сомнению. Соответственно, технологии обеспечения безопасности таких вычислений должны формироваться и отрабатываться уже на начальных этапах внедрения [3-6]. Поэтому представляется актуальным рассмотреть проблему организации и реализации недружественных воздействий на вычислительную инфраструктуру, в составе которой присутствуют квантовые элементы. Воздействие может реализовываться по трем направлениям [4, 9]:

- Воздействие на вычислительную среду, то есть на процесс вычислений;
- Воздействие на телекоммуникационную инфраструктуру, осуществляющую информационный обмен между вычислительными устройствами;
- Воздействие на управляющую инфраструктуру, то есть попытки вмешательства в процесс управления режимами вычислений.

Воздействие на процессы управления вычислениями, в обозримом будущем, видимо, не будет связано с квантовыми технологиями, а предполагает использование «классических» технологий, поэтому целесообразно этот тип воздействия исключить из рассмотрения [10]. Воздействие на телекоммуникационную инфраструктуру может предполагать использование квантовых технологий, например, для взлома шифров и кодов. Наконец, воздействие непосредственно на вычислительные процессы может рассматриваться в двух аспектах. Прежде всего, речь может идти о внесении намеренных искажений в процесс квантовых вычислений. Другой вариант – внесение помех в параметры работы аппаратных средств, обеспечивающих выполнение квантовых вычислений. Из-за высокой чувствительности кубитов к изменению внешних условий малые изменения параметров аппаратных средств могут приводить к искажениям результатов вычислений.

Вопрос об информационной безопасности квантовых вычислений, которые предполагается использовать для исследований и оптимизации КИИ, волнует пользователей, прежде всего, в плане возможных последствий для инфраструктуры в случае, если на эти вычисления осуществлялись целенаправленные воздействия. Учитывая вероятностный характер вычислений, вредные потенциальные последствия следует прогнозировать там, где результат имеет вероятностную природу. В частности, можно прогнозировать негативное влияние на следующие составные части КИИ:

- Финансово-экономическая подсистема, прежде всего, связанная с финансовыми потоками, генерируемыми физическими лицами;
- Экологическая подсистема, связанная с последствиями действий промышленных структур, генерирующих различные вредные выбросы;
- Социальная подсистема через различные когнитивные процессы, способные привести к критическим изменениям в различных социумах.

Необходимо отметить важную особенность всех составляющих КИИ: взаимосвязь процессов, происходящих в рамках этих составляющих. Так, процессы в финансово-экономической составляющей влияют на когнитивные процессы в социальных подсистемах. Взаимосвязь финансово-экономической подсистемы с экологическим сегментом можно проследить, например, через влияние различных «зеленых» повесток в политике на финансовые рынки. Изучение этих взаимосвязей потребует глубоких исследований и широкомасштабного моделирования процессов, происходящих в КИИ.

1. **Ступин Д.Д., Петренко А.С., Петренко С.А.** Развитие технологии квантовых вычислений и связанные с ним угрозы для критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. В сборнике: XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультikonференции. В 4-х томах. Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Волгоград, 2023. С. 168-172.
2. **Боев С.Ф., Петренко А.С., Петренко С.А., Ступин Д.Д.** Квантовый криптоанализ криптосхем блокчейн-платформ. В сборнике: Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы. Материалы Всероссийской научно-технической конференции (МВУС-2022). Ростов-на-Дону, 2022. С. 12-20.
3. **Боев С.Ф., Петренко С.А., Ступин Д.Д.** Возможности построения адаптивной защиты информации в масштабируемых вычислительных структурах информационных систем. В сборнике: Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы. Материалы

- Всероссийской научно-технической конференции (МВУС-2022). Ростов-на-Дону, 2022. С. 21-25.
4. **Петренко С.А., Ступин Д.Д.** Концепция обеспечения киберустойчивости цифровых платформ индустрии 4.0. В сборнике: XII Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019). материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019): в 4 томах. 2019. С. 200-205.
 5. **Петренко С.А., Ступин Д.Д.** Национальная система раннего предупреждения о компьютерном нападении (2-е издание). Научная монография под общей редакцией С.Ф.Боева. Санкт-Петербург, 2018.
 6. **Ступин Д.Д., Петренко С.А., Ломако А.Г.** Научная проблема раннего предупреждения о компьютерном нападении. В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XX Международной конференции. Под редакцией Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, С.Ю. Боровика. 2018. С. 499-504.
 7. **Петренко С.А., Ступин Д.Д.** Новая онтология кибербезопасности самовосстанавливающихся энергосистем SMART GRID. Часть I. Энергия единой сети. 2018. № 2 (37). С. 62-72.
 8. **Петренко С.А., Ступин Д.Д.** Новая онтология кибербезопасности самовосстанавливающихся энергосистем SMART GRID. Часть II. Энергия единой сети. 2018. № 3 (38). С. 50-56.
 9. **Petrenko S.A., Stupin D.D.** Assignment of Semantics Calculations in Invariants of Similarity. В сборнике: Proceedings - 2017 4th International Conference on Engineering and Telecommunication, En and T 2017. 4. 2017. С. 127-129.
 10. **Ступин Д.Д., Петренко С.А.** Концепция создания когнитивной системы раннего предупреждения о компьютерном нападении. В сборнике: Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2016). Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции. В 2-х томах. 2016. С. 103-107.

МНОГОЗАДАЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПОДСЧЁТА КОЛИЧЕСТВА, ДИАМЕТРА И ФОРМЫ ИКРИНОК

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
rusakov@ipu.ru, glebtev@ipu.ru*

Введение

Автоматизация контроля качества и количества икры осетровых рыб остаётся приоритетной задачей современных рыбоводных хозяйств. Традиционные методы учёта – объёмный, весовой и метод фон Бэра – предполагают ручной пересчёт икринок и требуют значительных трудозатрат, подвержены субъективным ошибкам оператора и не позволяют оперативно оценивать морфометрию каждой икринки [3], [4]. Попытки заменить человека компьютерным зрением основаны либо на классической обработке изображений (выделение суммарной площади икры с последующим делением на усреднённую площадь одной икринки) [5], либо на одно-задачных детекторах (Fast R-CNN, YOLOv5) для подсчёта центров объектов [6]. При плотном расположении и взаимном перекрытии яиц такие подходы теряют точность: сложно отделить соседние икринки, измерить их размеры и отфильтровать ложные срабатывания [7].

Многозадачное обучение (multitask learning, MTL) доказало эффективность в смежных задачах – от подсчёта пчёл до подсчёта клеток на микроскопических снимках – благодаря совместному извлечению общих признаков и одновременному решению взаимосвязанных подзадач [1], [2]. Настоящая работа посвящена разработке единой нейронной сети, которая параллельно:

- определяет координаты центров икринок и их количество,
- регрессирует диаметр каждой икринки,
- сегментирует форму каждой икринки на уровне пикселей.

Формальная постановка задачи

Пусть изображение $I \in \mathbb{R}^{H \times W \times 3}$ содержит N икринок. Требуется предсказать:

- множество центров $(x_i, y_i)_{i=1}^N$;
- вектор диаметров $d_{i=1}^N$;
- бинарную маску $\mathbb{M} \in 0,1^{H \times W}$, где $\mathbb{M}(u,v) = 1$, если пиксель (u,v) принадлежит хотя бы одной икринке.

Архитектура модели

В основу положен единая архитектура с кодировщиком и декодером с тройным «выходом»:

1. Детектор центров. Полносвёрточный блок прогнозирования тепловых карт (по типу CenterNet) прогнозирует тепловую карту центров объектов P_c [8].

2. Регрессор радиуса. Дополнительный регрессионный канал выдаёт радиус r_i (диаметр $d_i = 2r_i$) для каждого локального максимума тепловой карты.

3. Сегментатор формы. Декодер на основе архитектуры U-Net формирует маску ΔbM с последующей пороговой фильтрацией.

Суммарная функция потерь:

$$L = \lambda_1 * L_{det} + \lambda_2 * L_{rad} + \lambda_3 * L_{mask}; \quad (1)$$

где L_{det} – фокальная функция потерь BCE по P_c , L_{rad} – MSE по r_i , L_{mask} – комбинированный BCE+Dice; коэффициенты выбраны $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5, \lambda_3 = 1$.

Для обучения модели использовался датасет из 2418 изображений икры размером 1024×1024 px с полной разметкой центров, масок и радиусов; к исходным данным применялись цветовые сдвиги, повороты на $\pm 15^\circ$, масштабирование в диапазоне 0,8–1,2, а также метод MixUp [9]; оптимизация осуществлялась Adam при начальной скорости обучения $\eta_0 = 10^{-3}$ в течение 300 эпох при размере пакета 8.

Результаты

Таблица 1 демонстрирует выигрыш предложенной многозадачной модели (MTL) над однозадачными альтернативами как по точности определения количества икринок, так и по качеству оценки их размеров и формы. Особое преимущество наблюдается в условиях плотного расположения и частичного перекрытия объектов, где классические и детекторные подходы дают больше ошибок.

Таблица 1

| Сравнение методов (тест, $N=400S$) | | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------------|---------------------|-------------|
| Метод | Precision, % | Recall, % | MAE диаметра, px | IoU маски |
| YOLOv5-детектор | 95.1 | 87.3 | - | - |
| Классич. морфология | 92.5 | 78.4 | 5.8 | 85 |
| MTL-модель | 97.4 | 93.8 | 2.4 | 91.2 |

Заключение

Разработана и экспериментально обоснована многозадачная нейросетевая модель, совмещающая детекцию, регрессию размера и сегментацию формы икры осетровых. Совместное обучение позволило:

- точнее подсчитывать количество яиц (Recall поднять на 6,5 п.п. по сравнению с YOLOv5);
- измерять индивидуальный диаметр с MAE = 2,4 px;
- сегментировать форму с IoU = 91 %.

Научная новизна работы состоит в применении MTL к задаче анализа икры; практическая значимость – в возможности внедрения системы в инкубационные цеха, что снизит трудозатраты и повысит объективность контроля. Будущая работа направлена на расширение датасета и портирование модели на встраиваемое оборудование фермы.

1. **Caruana R.** Multitask Learning // Machine Learning. – 1997. – Vol. 28, № 1. – P. 41–75.
2. **Zhang Y., Yang Q.** A Survey on Multi-Task Learning // IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering. – 2022. – Vol. 34, № 12. – P. 5586–5609.
3. **Семенченко С.М.** Модификация объёмно-весаого метода учёта икры пеляди // Вестник рыбохозяйственной науки. – 2015. – № 2. – С. 56–62.
4. **Козлов В.И., Абрамович Л.С.** Краткий словарь рыборазводчика. – Москва: Россельхозиздат, 1982. – 160 с.
5. **Маслов Г.Г. и др.** Способ автоматизированного учёта икры // Политематич. сет. эл. науч. журн. КубГАУ. – 2022. – № 197(03). – С. 332–341.
6. **Redmon J. et al.** You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // Proc. CVPR. – 2016. – P. 779–788.
7. **Meshcheryakov R. et al.** Detection and Characterization of Caviar Using a Neural Network // LNCS, 2023. – Vol. 362. – P. 383–395.
8. **Zhou X. et al.** Objects as Points // arXiv preprint arXiv:1904.07850, 2019. – 12 p.
9. **Zhang H. et al.** Mixup: Beyond Empirical Risk Minimization // Proc. ICLR. – 2018. – 14 p.
10. **Javed N. et al.** EggCountAI: CNN-Based Tool for Counting Aedes aegypti Eggs // Parasites & Vectors. – 2023. – Vol. 16. – Art. 341.

МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ В МНОГОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСЕТИ*

*¹ФИЦ Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,*

*²Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород,
hramenkov.vlad@ipfran.ru, admitry@ipfran.ru, vnekorkin@ipfran.ru*

Ключевым условием нормальной работы энергосети является установление и поддержание синхронного режима работы генераторов для обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей [1]. Выпадение генераторов из синхронизма может приводить к значительным колебаниям токов и напряжений, вызывающим отключения линий электропередачи средствами релейной защиты, что приводит к расстройству энергоснабжения потребителей, при этом в сети устанавливается асинхронный режим, который является аварийным. В энергосетях могут сосуществовать несколько синхронных режимов, различающихся распределением потоков мощности, токов и узловыми напряжениями. Под действием возмущений возможно переключение из оптимального синхронного режима в аналогичный режим, но с неудовлетворительными характеристиками, или переход в асинхронный режим, то есть возникновение энергоаварии. Поэтому закономерно возникает задача исследования динамики энергосетей в условиях мультистабильности синхронных режимов.

Мы рассматриваем энергосеть, состоящую из нескольких синхронных генераторов, питающих общую пассивную линейную нагрузку (рис. 1а). Для описания ее динамики используется модель эффективной сети (effective network model [2]), в рамках которой энергосеть представляется как сеть из глобально связанных узлов-генераторов, взаимодействующих между собой (рис. 1б). Состояние i -го узла задается уравнением движения ротора соответствующего генератора

$$\begin{aligned} C_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} &= A_i - D_i \frac{d\delta_i}{dt} - \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{i,j} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{i,j}), i \\ &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

*Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 24-12-00245

где C_i – константа, значение которой определяется выбором системы отнесенных единиц, $A_i = P_{T,i} - |E_i|^2 |Y_{i,i}| \sin(\alpha_{i,i})$, $P_{T,i}$ – мощность турбины генератора, $|E_i|$ – модуль ЭДС генератора, D_i – демпферный коэффициент, $K_{i,j} = |E_i| |E_j| |Y_{i,j}|$ – сила связи i -го и j -го узлов эффективной сети ($i \neq j$), $Y_{i,i} = |Y_{i,i}| e^{-i\psi_{i,i}}$ и $Y_{j,i} = |Y_{j,i}| e^{-i\psi_{j,i}}$ – собственные и взаимные комплексные проводимости ветвей, содержащих i -ый и j -ый источники ЭДС (генераторы), $\alpha_{k,l} = \pi/2 - \psi_{k,l}$ – дополняющие углы, n – число генераторов.

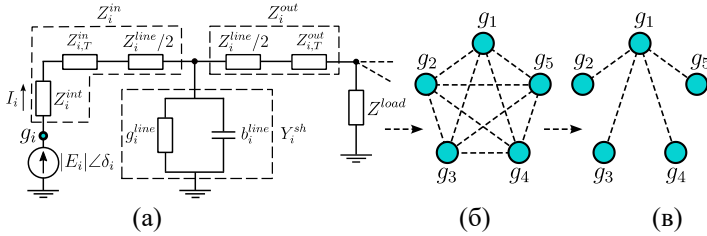


Рис. 1. Схема замещения участка многомашинной энергосети с общей нагрузкой (а). Эффективная сеть с глобальными связями (б) и хаб-топологией (в)

Получены условия на параметры схемы замещения многомашинной энергосети (рис. 1а), позволяющие перейти от эффективной сети с глобальными связями (рис. 1б) к эффективной сети с хаб-топологией (рис. 1в). Они выполняются, если линия электропередачи первого генератора значительно короче остальных или/и на ней выполнена продольная компенсация индуктивности. Тогда динамика энергосети при равенстве параметров всех генераторов и линий, кроме первой, задается уравнениями

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_i = y_i, \\ \dot{y}_i = \Delta - \mu y_i - \sin(\varphi_i + \alpha) - \sum_{j=1}^{n-1} \sin(\varphi_j - \alpha), \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi_i = \delta_1 - \delta_{i+1}$, $\Delta \sim P_{T,1} - P_T$, $P_{T,i+1} = P_T$, $\alpha_{1,i+1} = \alpha$, μ – новый демпферный коэффициент, $i = 1, 2, \dots, n-1$, точкой обозначена производная по времени.

Установлено, что система (2) может иметь одно устойчивое однородное состояние равновесия O_1^{hom} с одинаковыми координатами φ_i и

$n - 1$ устойчивых неоднородных – O_i^{inh} , имеющих одинаковые координаты φ_i , кроме одной. Эти состояния равновесия соответствуют одному однородному и $n - 1$ неоднородным синхронным режимам, которые отличаются распределениями токов по цепям сети и мощностями, выдаваемыми генераторами в сеть. Математическими образами асинхронных и квазисинхронных режимов являются вращательные и колебательные аттракторы системы (2).

Для сетей с разным числом генераторов построены разбиения плоскости параметров (α, Δ) на подобласти, соответствующие установлению только синхронных режимов или их сосуществованию с квазисинхронными или/и асинхронными режимами [3]. На примере трехмашинной энергосети определены границы устойчивости двух сосуществующих неоднородных синхронных режимов [4]. Изучены переходы между режимами под действием различных возмущений, приводящих к изменению относительных углов (φ_i) и частот (y_i) генераторов, а также при случайных колебаниях мощностей турбин генераторов, которые моделируются статистически независимыми стандартными виннеровскими случайными процессами. В последнем случае динамика энергосети задается системой стохастических дифференциальных уравнений.

Таким образом, рассмотрена модель эффективной сети для многомашинной энергосети с общей нагрузкой. Получены условия перехода к редуцированной эффективной сети с хаб-топологией. Установлена система дифференциальных уравнений, описывающих такую сеть. В ее рамках показана мультистабильность синхронных режимов с различными характеристиками. Рассмотрен вопрос об устойчивости синхронных режимов по отношению к возмущениям и переключениям между этими режимами.

1. **Андерсон, П.** Управление энергосистемами и устойчивость / П. Андерсон, А. Фуад – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
2. **Nishikawa, T.** Comparative analysis of existing models for power grid synchronization / T. Nishikawa, A.E. Motter // New J. Phys. – 2015. – V. 17, No 1. – P. 015012.
3. **Храменков, В.А.** Мультистабильность синхронных режимов в многомашинной энергосети с общей нагрузкой и их устойчивость в целом и в большом / В.А. Храменков, А.С. Дмитричев, В.И. Некоркин // Известия вузов. ПНД. – 2025. – Т. 33, № 1. – С. 38–68.
4. **Khramenkov, V.A.** Bistability of operating modes and their switching in a three machine power grid / V.A. Khramenkov, A.S. Dmitrichev, V.I. Nekorkin // Chaos. – 2023. – V. 33, No 10. – P. 103129.

ГРАФОВЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград,
maxim.shcherbakov@vstu.ru*

Введение

Современные энергетические системы представляют собой сложные технические комплексы с множеством взаимосвязанных компонентов, т.е. распределенные сетевые киберфизические системы (РСС). Особенностью таких систем является их гетерогенность и сложность в управлении техническим состоянием узлов и компонент. Высокая стоимость аварийных простоев, достигающая миллионов рублей в сутки, и приближение значительной части генерирующего оборудования к пределу остаточного ресурса подчеркивают актуальность разработки новых подходов проактивного управления техническим состоянием РСС [1].

Традиционные методы мониторинга и диагностики, основанные на анализе отдельных параметров оборудования, не учитывают топологические связи между узлами, или учитывают, как экзогенные переменные в моделях. Графовые нейронные сети (GNN) предоставляют уникальную возможность моделировать сложные взаимосвязи между элементами системы, интегрируя топологическую информацию и временные характеристики [2].

В докладе рассматривается задача оценки и прогнозирования состояния узлов распределённых энергетических систем (РЭС) за счёт разработки моделей GNN, учитывающих топологические связи и временную динамику, что способствует оптимизации технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и повышению надёжности энергоснабжения.

Графовые модели и их реализация

Рассмотрим формальное представление распределенной сетевой системы. Пусть система состоит из множества объектов (узлов) $O = \{o_i\}_{i=1}^{N_o}$, где N_o – количество объектов в множестве O . Объекты связаны между собой связями $R = \{r_j\}_{j=1}^{N_R}$, где N_R – количество связей во множестве R . Для каждого i -го объекта имеется множество сенсоров $M^{(i)} =$

$\{m_j^{(i)}\}_{j=1}^{N_M^{(i)}}$ фиксирующих множеств характеристик, описывающих состояние объекта $A^{(i)} = \{a_j^{(i)}\}_{j=1}^{N_A^{(i)}}$, где $N_A^{(i)}$ – количество характеристик i -го объекта, при этом для простоты изложения примем, что произвольный сенсор $m_j^{(i)}$ фиксирует значение только одной характеристики $a_j^{(i)}$. Таким образом, формальное представление распределенной системы есть кортеж вида:

$$DCFS = \langle \{o_i\}_{i=1}^{N_o}, \{r_j\}_{j=1}^{N_R}, \left\{ \left\{ m_j^{(i)} \right\}_{j=1}^{N_A^{(i)}} \right\}_{i=1}^{N_o}, \left\{ \left\{ a_j^{(i)} \right\}_{j=1}^{N_A^{(i)}} \right\}_{i=1}^{N_o} \rangle. \quad (1)$$

Считаем, что $\forall DCFS, \exists \Gamma = \langle V, E \rangle$ где $\forall o_j \in O \exists v_i \in V$, такой что $o_j \leftrightarrow v_i$, и $\forall r_j \in R \exists e_i \in E$, такой что $r_j \leftrightarrow e_i$, где \leftrightarrow знак однозначного соответствия. Таким образом любую РСС можно представить виде графа Γ .

Существует множество наблюдений за i -м объектом на разных временных интервалах времени $T^{(i)} = [t_B^{(i)}, t_E^{(i)}]$, где $t_B^{(i)}$ – первый временной отчет, в котором зафиксировано значение любой характеристики объекта, $t_E^{(i)}$ – соответственно последний временной отчет, с дискретным шагом $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Следовательно датафрейм, полученный в результате наблюдения за i -ым объектом можно представит в виде (2):

$$D^{(i)} = \left\{ \left\langle t, \left\{ a_t^{(i,j)} \right\}_{j=1}^{N_A^{(i)}}, s_t \right\rangle \right\}_{t=t_B^{(i)}}^{t_E^{(i)}} \quad (2)$$

где s_t – состояние объекта или зафиксированное событие, характеризующее состояние и принимающей в каждый момент времени одно значение из множества $S = \{s_I, s_{OS}, s_{NOS}, s_{DSF}, s_{MP}, s_{MR}, s_{EOL}\}$, s_I – начальное состояние объекта; s_{OS} – рабочее работоспособное состояние, s_{NOS} – нерабочее работоспособное состояние, s_{DSF} – неработоспособное состояние объекта, s_{MP} – состояние диагностики, технического обслуживания или ремонта -- нерабочее состояние работоспособного объекта, для которого проводится диагностика технического состояния, техническое обслуживание или ремонт; s_{MR} – состояние корректирующего технического обслуживания или ремонта -- нерабочее состояние неработоспособного объекта вызванное отказом, s_{EOL} – предельное состояние.

На рисунке 1 представлен граф, описывающий систему в работоспособном состоянии (1.а) и в состоянии отказа узла и ввода резервного узла o'_2 (1.б).

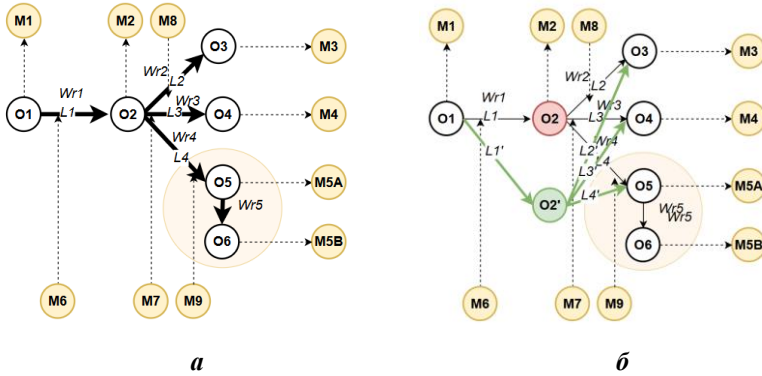


Рис. 1. Схема представления PCC в виде графа с шестью объектами, 5 связями и 9 датчиками: а) работоспособное и б) с отказом узла

Рассмотрим моделирование PCC графовыми нейронными сетями. Графовые нейронные сети обладают рядом ключевых особенностей, делающих их перспективными для задач прогнозирования и диагностики. Например, в отличие от классических методов машинного обучения, требующих преобразования графов в табличные форматы, GNN работают напрямую с графовой структурой, учитывая связи между узлами. А такие модели, как Graph Convolutional Networks (GCN) и Graph Attention Networks (GAT), агрегируют информацию от соседних узлов, что позволяет выявлять скрытые закономерности [2].

PCC представим в виде GNN, при этом для каждого узла зададим множество характеристик. Формально техническое состояние можно выразить следующей функцией, учитывающей как структурную, так и атрибутивную составляющие:

$$h^{(i)} \sim f(D^{(i)}, \Gamma). \quad (3)$$

Реализация и тестирование гибридных графовых нейронных сетей, интегрирующих графовые свертки, механизмы внимания и рекуррентные слои для обработки временных рядов осуществлялись на наборах данных распределенных энергетических системах: IEEE 39-Bus System,

IEEE 57-Bus System [3,4]. Проводились эксперименты для РСС с учетом связей в оценке технического состояния и без учета связей. На рисунке 2 показаны результаты оценки состояния, где 2а фактическое состояние, 2б модельное.

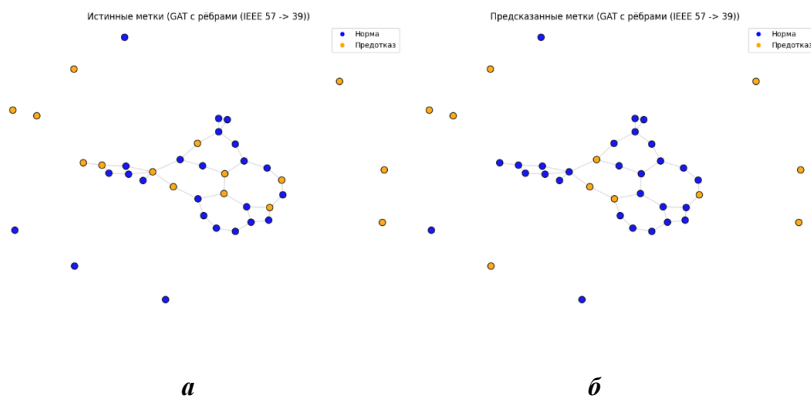


Рис. 2. Визуализация графа фактических состояний (а) и графа модельных состояний (б)

В целом наблюдалось повышение точности (F1-меры) для графовых моделей, учитывающих структуру РСС от 2,56% до 32,14%, что говорит о перспективности данного подхода.

Заключение

Разработанные методы на основе графовых нейронных сетей обеспечивают точность классификации состояния узлов РСС, что создаёт основу для создания интеллектуальных систем и эффективного управления техническим состоянием энергетического оборудования [5]. Интеграция топологических связей и временной динамики в графовое представление позволяет моделям адаптироваться к изменениям конфигурации системы и выявлять скрытые зависимости, недоступные традиционным методам.

1. **Сай Ван Квонг.** Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 / Сай Ван Квонг, М. В. Щербаков // Программные продукты и системы. – 2020. – № 2. – С. 186–194. – URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-sistemy-predskazatel'nogo-](https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-sistemy-predskazatel'nogo)

- tehnicheskogo-obsluzhivaniya-slozhnyh-mnogoobektnyh-sistem-v-kontseptsii-industrii-4-0 (дата обращения: 01.06.2025).
2. **Khemani, B., Patil, S., Kotecha, K. et al.** A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications, and future directions. *J Big Data* 11, 18 (2024). <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00876-4>
 3. IEEE 39-Bus System [Электронный ресурс] // Illinois Center for a Smarter Electric Grid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-39-bus-system/> (дата обращения: 01.06.2025).
 4. IEEE 57-Bus System [Электронный ресурс] // Illinois Center for a Smarter Electric Grid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-57-bus-system/> (дата обращения: 01.06.2025).
 5. **Щербаков М.В., Трубицин В.Н., Маликов В.П., Аль-Гунаид М.А.М.** Автоматизация проектирования информационных систем с компонентами искусственного интеллекта. XIV Всероссийское собрание по проблемам управления (ВСПУ-2024) : сборник научных трудов, 17-20 июня 2024 г., Москва / Под общ. ред. Д.А. Новикова; Ин-т Проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. – Электрон. текстовые дан. (824 файла: 433 МБ). – М.: ИПУ РАН, 2024. – 4160 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Windows 7/8 и выше; Acrobat Reader 4.0 или выше. – Загл. с экрана. – ISBN 978-5-91450-276-5. – № госрегистрации 0322402930 – Текст: электронный. Стр. 2712.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Амелин К.С. – 249
Анцев А.В. – 312
Арсеньев Д.Г. – 132, 139, 142
Архипов И.С. – 249

Б

- Бабилов В.Г. – 17
Байбулатов А.А. – 315
Баринев А.А. – 252
Баскаков Д.Е. – 132
Безбородова Ж.В. – 255
Белоконов И.В. – 260
Блинова О.В. – 171, 193
Бобцов А.А. – 24
Бодунков Н.Е. – 263
Булхак А.Н. – 245
Буркин И.М. – 63
Бывайков М.Е. – 315
Бычков И.В. – 318

В

- Венец В.И. – 266
Волощук В.И. – 181
Воскобойников М.Л. – 318
Вражевский С.А. – 108

Г

- Гайворонский А.И. – 321
Галин Р.Р. – 255
Галяев А.А. – 17
Гебель Е.С. – 139
Гежа В.Н. – 34
Герасимова А.П. – 146
Гиренко Д.С. – 263
Гисин В.Б. – 37
Горбанёва О.И. – 39
Горшенин И.А. – 269
Граничин О.Н. – 249
Григас С.Э. – 157
Грузликов А.М. – 163

Губанов А.В. – 34
Гудков В.А. – 233
Гуленок А.А. – 233
Гущин П.А. – 108

Д

Давыдов Е.Ю. – 193
Даукаев Р.О. – 278
Джафаров Э.И. – 325
Диб А. – 197
Дивеев А.И. – 46
Диченко А.А. – 201
Дмитричев А.С. – 347
Дордопуло А.А. – 217
Дордопуло А.И. – 223
Доронченко Ю.И. – 229
Дранко О.И. – 160
Дудников Е.А. – 226

Е

Еделев А.В. – 318
Елисов Н.А. – 260
Ельмекеев М.А. – 207
Емельянов Д.М. – 245

З

Закирзянов Р.М. – 328
Захаров В.В. – 272
Захарова А.А. – 284, 299

И

Иванов М.А. – 39

К

Капустян С.Г. – 275
Каравдин Л.А. – 312
Ким Н.В. – 263
Киселев В.А. – 249
Клименко А.Б. – 204, 207
Коваленко В.Б. – 210
Козицин И.В. – 34, 121
Колесов Н.В. – 163, 213

Котюков А.М. – 49
Кочкаров А.А. – 321
Кудряшова Е.В. – 63
Кузнецов Н.В. – 63
Кузнецов О.П. – 52
Кузнецова И.Ю. – 217, 223
Куклин Е.В. – 167
Кулагин К.А. – 278
Курков И.В. – 63

Л

Лазарев А.А. – 55, 335
Левин И.И. – 220, 223, 226, 229
Ли Фу – 293
Литовченко Д.Ц. – 157, 163
Литуненко Е.Г. – 213
Лищенко Е.В. – 181
Лобачев М.Ю. – 63
Ломака И.А. – 260
Лутовинова Н.А. – 68
Ляпин Н.А. – 263

М

Мальгина С.А. – 171
Мальцев А.С. – 146
Мамченко М.В. – 281
Маргун А.А. – 24
Марков С.В. – 269
Марьясин О.Ю. – 331
Мельник Я.Э. – 181
Мещеряков Р.В. – 266
Мингазов Д.Р. – 71
Михайлов Д.В. – 233
Мусатова Е.Г. – 335

Н

Некоркин В.И. – 347
Неусыпин К.А. – 293
Никаноров С.О. – 85

О

Орда-Жигулина М.В. – 174

Орда-Жигулина Д.В. – 174
Охтилев М.Ю. – 178

П

Павлов С.В. – 193
Павлова Н.Г. – 49
Панкратова Е.В. – 171
Петренко С.А. – 338
Плохотнюк А.Н. – 331
Подвесовский А.Г. – 281, 284, 299
Подопригора А.В. – 236
Полетыкин А.Г. – 315
Положенцев А.А. – 88
Потехин В.В. – 167
Пузанов И.И. – 88

Р

Рафик А. – 181
Раюшкин Э.С. – 350
Резчиков А.Ф. – 160
Рей А.С. – 91
Родина А.А. – 174
Русаков К.Д. – 344
Рыжов М.С. – 94

С

Саломатин А.А. – 290
Сафонова Е.В. – 350
Сеимов М.С. – 185
Семерников Е.А. – 220
Синицын Л.И. – 260
Скогликов И.А. – 197
Скородумов Ю.М. – 163
Сметанина В.Д. – 100
Соколов Б.В. – 178, 272
Сорокин Д.А. – 201, 219, 229
Софронова Е.А. – 46
Ступин Д.Д. – 338
Су Даньдань – 293

Т

Тарасова Е.Ю. – 188
Тевяшов Г.К. – 344
Тельминов О.А. – 296
Терехов Ю.Е. – 157
Титенко Е.А. – 239
Толмачева М.В. – 213
Топорков В.В. – 245
Трефилов П.М. – 191
Тюльников В.С. – 163, 213

У

Угольницкий Г.А. – 39
Удалова Н.В. – 263

Ф

Фандеев А.Г. – 193, 269
Фархадов М.П. – 199
Феоктистов А.Г. – 318
Филиппов Г.С. – 185
Филонов А.А. – 299
Фуртат И.Б. – 108

Х

Хадорич Д.Д. – 284
Хлебников М.В. – 118
Хлытчиев А.Д. – 121
Хохловский В.Н. – 197
Храменков В.А. – 347
Хрипунов С.П. – 305

Ц

Цыганов В.В. – 325

Ч

Чекина М.Д. – 233
Ченцов А.А. – 124
Ченцов А.Г. – 124
Ченцов П.А. – 124
Чернецов Р.А. – 185
Чернов А.О. – 249

Ш

Шабуров В.М. – 171

Шафран С.В. – 260

Шелепина О.Д. – 284

Шибалов А.И. – 167

Широкий А.А. – 128

Широков А.С. – 308

Шкодырев В.П. – 139, 142

Щ

Щербаков М.В. – 350

Я

Янов Е.С. – 312

Ярыгин А.А. – 278

Научное издание

**ХVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ
МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
(МКПУ–2025)**

(15 сентября – 20 сентября 2025 г.)

Том 2

*УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ (УРСС – 2025)*

Авторские редактирование
и художественное оформление

Принято 19.08. 2025. Подписано в печать 25.08.2025

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 29,4

Тираж 200 экз. (1-й з-д 1 –65). Заказ 108

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95