

На правах рукописи



Горячева Варвара Александровна

**Объектив с переменным фокусным расстоянием для телевизионной
камеры обзорно-поисковой информационно-измерительной системы**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие
системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Тула, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель:

Погорельский Семен Львович,
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Бусурин Владимир Игоревич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)», профессор

Курт Виктор Иванович,
доктор технических наук, АО «Научно-
производственное объединение
«Государственный институт прикладной
оптики», начальник отдела – главный
метролог, г. Казань

Ведущая организация:

АО «Центральное конструкторское бюро
«Фотон», г. Казань

Защита состоится 02 апреля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92, ауд. 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

https://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-07/Goryacheva_VA_/

Автореферат разослан «01» февраля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маслова Анна Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время обзорно-поисковые информационно-измерительные системы (ОПИИС) содержат канал технического зрения, что позволяет широко использовать их в различных отраслях – в геодезии и картографии, кинематографии, инфраструктуре, общественной безопасности, транспорте и т.д. В зависимости от выполняемой задачи ОПИИС оснащается соответствующим оптическим блоком. Для выполнения комплекса задач, необходимо, чтобы оптический блок обладал как большим полем зрения, так и достаточным увеличением, для чего используются многоканальные системы. Однако использование многоканальных систем не всегда позволяет выполнить требования к габаритам и массе, а также стоимости ОПИИС. Альтернативной заменой служит телевизионная система с объективом переменного фокусного расстояния, обеспечивающая требования, предъявляемые к ОПИИС.

В настоящее время проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием является актуальной научной и практической задачей, поскольку единых методов проектирования не существует. Однако имеются основные этапы проектирования, присущие любой оптической системе (ОС) – синтез, анализ и оптимизация. Как отмечается в некоторых работах, именно этап синтеза исходной ОС является определяющим при проектировании ОС, в частности объектива с переменным фокусным расстоянием (ОПФР). Этап синтеза, как правило, начинается с расчета системы в параксиальной области, для которой определяются габариты и оптические силы ее компонентов.

Анализ литературных источников свидетельствует, что существуют несколько подходов к нахождению начальной ОС на этапе синтеза. К одному из существующих подходов следует отнести методы, основанные на поиске наиболее соответствующего аналога и его дальнейшей оптимизации. Метод позволяет исключить начальный этап расчета системы в параксиальной области. Однако, при проектировании новой системы, в некоторых случаях возможно не получить удовлетворительного результата.

Другой подход основан на применении методов нелинейного программирования, для этого требуется некоторая стартовая система, которая во многих случаях отсутствует либо требует трудоемкого патентного поиска.

К третьей группе можно отнести методы, основанные на разработке специализированных алгоритмов, учитывающих специфику решаемых задач. Однако эти методы не могут применяться в решении других задач.

Таким образом, актуальной научной и практической задачей является габаритный синтез ОПФР, т.е. нахождение исходной ОС при минимальных начальных данных.

Разработкой ОПФР занимаются следующие фирмы и организации ПАО «Красногорский завод имени С. А. Зверева» (г. Красногорск, Россия), АО «ЛОМО» (г. Санкт-Петербург, Россия), ОАО «Ростовский оптико-механический завод» (г. Ростов, Россия), ОАО «Пеленг» (Беларусь), «Sony» (Япония), «Fujifilm» (Япония), «Nikon» (Япония), «Canon» (Япония) и др. Однако в настоящее время актуальной задачей остается поиск общих методов расчета ОС ПФР.

Теоретические предпосылки к разработке таких систем были созданы трудами отечественных и зарубежных ученых: Пахомов И.И., Русинов М.М., Волосов Д.С., Шпякин М.Г., M.J. Kidger, M. Laikin и др.

Объектом исследования является ОПФР с высоким качеством формируемого им изображения для телевизионной камеры ОПИИС.

Предметом исследования является методика расчета ОПФР телевизионной камеры из состава ОПИИС.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является повышение функциональных характеристик ОПИИС за счет применения телевизионной камеры с ОПФР, обеспечивающим высокое качество изображения.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. проанализирована двухканальная телевизионная ОПИИС, состоящая из разработанного и запатентованного объектива для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) и разработанного термостабилизированного объектива видимой и ближней ИК-области спектра. Выявлены достоинства и недостатки двухканальной ОПИИС, предложена одноканальная ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния;
2. выполнены обзор и анализ существующих ОПФР;
3. проанализированы существующие методы синтеза ОПФР;
4. разработана математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную ОПФР в параксиальной области, с учетом ограничений, применяемых к этой системе, и решаемая методом вариации параметров;
5. разработан алгоритм и реализована программа синтеза исходной трех- и четырехкомпонентной ОПФР;
6. разработана методика расчета n -компонентной ОПФР;
7. проведена верификация разработанной методики расчета на примере ОПФР для телевизионной камеры ОПИИС.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную оптическую систему переменного фокусного расстояния (ОСПФР) в параксиальной области, отличающаяся от известных накладываемыми ограничениями на оптическую силу третьего компонента и

световой диаметр первого компонента, позволяющая синтезировать исходные данные для проектирования ОПИИС.

2. Разработан алгоритм синтеза исходной ОС трех- и четырехкомпонентного ОПФР в параксиальной области, отличающийся от известных применением метода вариации параметров, и позволяющий автоматизировать процесс расчета оптических сил, относительных отверстий и законов перемещения компонентов объектива ОПИИС.

3. Предложена методика расчета n -компонентного ОПФР, отличающаяся от известных автоматизацией этапа синтеза исходной ОС ОПФР, позволяющая повысить функциональные характеристики ОПИИС.

Теоретическая значимость работы: метод структурно-габаритного синтеза ОПФР, для телевизионной камеры ОПИИС, дополняет теорию и расчет оптических систем.

Практическая значимость работы: предложенный алгоритм синтеза ОС трех- и четырехкомпонентного ОПФР ОПИИС, в основу которого положен метод вариации параметров, позволяет решить проблему выбора оптической схемы на этапе ее синтеза. Реализация предложенного алгоритма в программе расчета ОС позволяет существенно сократить время габаритного синтеза такой системы. Удобство предложенной программы расчета заключается в ее наглядности, поскольку разработчик самостоятельно задает закон движения компонентов и сразу получает результаты расчета. В результате применения методики, в основу которой положена предлагаемая программа расчета, получен ОПФР телевизионной камеры высокого разрешения ОПИИС.

Методы исследования. В данной работе использованы аналитические методы, основанные на применении теории параксиальной оптики, численные методы, компьютерное программирование, компьютерное моделирование и оптимизация ОСПФР.

Личный вклад автора определяется общей формулировкой и обоснованием целей и задач исследований, выбором методов их решения, разработкой методики синтеза исходной ОС на примере трех- и четырехкомпонентного ОПФР в параксиальной области, в основу которой положен метод вариации параметров, реализованный в программе расчета ОС; разработкой примерной методики расчета ОПФР.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждена моделированием в программном пакете по расчету оптических систем. Результаты работы внедрены на АО «Конструкторское бюро приборостроения им. Академика А.Г. Шипунова» в отделе расчета и конструирования оптических систем. Получен патент на изобретение 2690098 РФ Объектив для ближней ИК-области спектра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную оптическую систему переменного фокусного расстояния в параксиальной области, учитывающая ограничения, применяемые к этой системе, искомые переменные которой находятся методом вариации параметров.

2. Алгоритм синтеза исходной оптической системы трех- и четырехкомпонентного объектива с переменным фокусным расстоянием в параксиальной области, реализованный в программе по расчету оптических систем, в основу которого положен метод вариации параметров.

3. Методика расчета n -компонентного объектива с переменным фокусным расстоянием, в основу которой положена разработанная программа синтеза исходной оптической системы такого объектива, что повышает функциональные характеристики ОПИИС.

4. Верификация разработанной методики расчета на примере объективов с переменным фокусным расстоянием для телевизионной камеры ОПИИС.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования (п.6 «Исследование возможностей и путей совершенствования и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, а также разработка новых принципов построения и технических решений») специальности 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления движением и навигация. Современное состояние и перспективы», 2017; Всероссийская научно-техническая конференция «Информационно-измерительные системы комплексов навигации и управления движением», 2019; 15 Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2022», 2022.

Публикации. Результаты диссертации отражены в 10 печатных работах: 3 работы, входящие в перечень рекомендованных ВАК РФ, 6 работ в иных изданиях, из них имеются работы в сборнике трудов международной и в сборнике трудов всероссийской научно-технических конференциях, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, включая 51 рисунок, 9 таблиц, 63 наименование используемых источников. Отдельные выводы даны в конце

каждого раздела, основные теоретические и практические результаты – в заключении диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первой главе отмечается интенсивное развитие обзорно-поисковых информационно-измерительных систем, которые широко используются в местах повышенной опасности и сложности, в гражданской и коммерческой сферах, например, для охраны и мониторинга объектов, ликвидации ЧС, в поисково-спасательных работах, картографировании и т.д.

На рис. 1 приведена структурная схема ОПИИС.

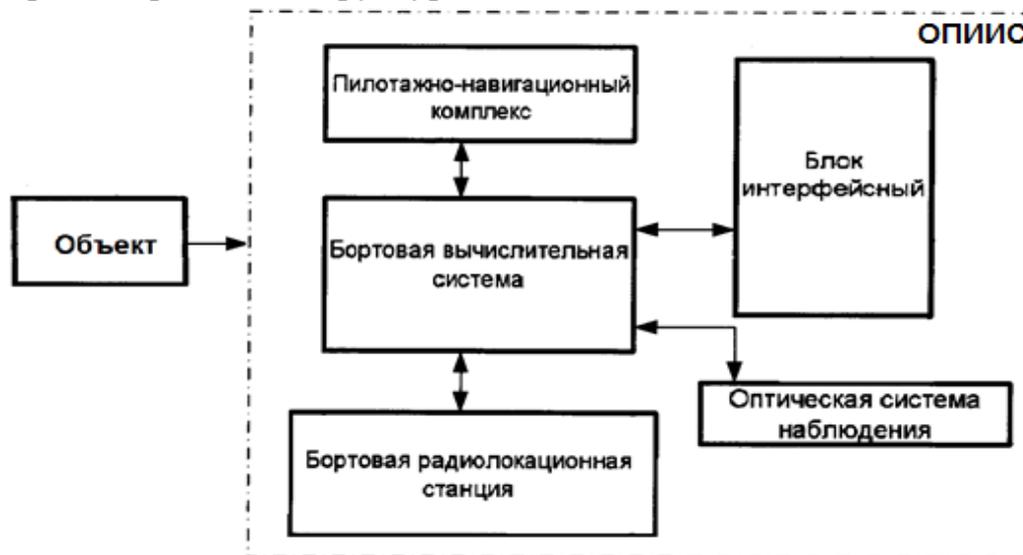


Рисунок 1 – Структурная схема ОПИИС

Для расширения возможностей ОПИИС, в частности выполнения комплекса задач, необходимо применять ОС, обладающую как большим полем зрения, так и достаточным увеличением. В этих целях применяется двухканальная телевизионная ОС, включающая разработанный и запатентованный нами объектив для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) и разработанный термостабилизированный объектив видимой и ближней ИК-области спектра. Система имеет хорошие функциональные характеристики, что позволяет эффективно решать задачи по обнаружению, опознаванию и идентификации предмета даже в сумеречное время суток. К недостаткам относятся сложность совмещения оптических осей отдельных каналов, массогабаритные параметры и стоимость. Поэтому предлагается одноканальная телевизионная ОПИИС. В качестве телевизионного канала ОПИИС выберем ОПФР, что позволит улучшить функциональные характеристики ОПИИС, за счет расширения характеристик ОС.

Исходя из этого, рассмотрены особенности расчета ОПФР в России и за рубежом; проведен обзор некоторых ОПФР, как отечественных, так и

зарубежных, и существующие методы расчета ОПФР. Отмечается, что основными источниками сведений о конструкциях таких объективов являются патентные материалы, заводская документация и образцы объективов. Все эти источники дают разрозненные сведения о конструкциях и их отдельных элементах, не содержат анализа или обобщений и рекомендаций, способствующих рациональному выбору конструкций.

В зарубежных фирмах по производству оптических приборов, продукция которых широко востребована, при расчете оптики используют собственные программные пакеты. Проектирование осуществляется на основе многолетнего опыта и обширной базы накопленной информации, поэтому более конкретно ознакомиться или заимствовать у них что-либо не представляется возможным.

При этом, отмечается сходство в проектировании таких ОС как в России, так и за рубежом: разработчики выделяют основные этапы проектирования, являющиеся общими при расчете любых других ОС – синтез, анализ и оптимизация. Выявляют, что именно этап синтеза исходной ОС является определяющим при проектировании ОС, в частности ОПФР. На основании этого, выделяют несколько подходов к нахождению начальной ОС на этапе синтеза.

К одному из существующих подходов относят методы, основанные на поиске наиболее соответствующего аналога и его дальнейшей оптимизации. Метод позволяет исключить начальный этап расчета ОС в параксиальной области. Однако, при проектировании новой ОС, в некоторых случаях возможно не получить удовлетворительного результата. Другой подход основан на применении для синтеза методов нелинейного программирования. Подобный подход требует наличия некоторой стартовой системы, которая во многих случаях отсутствует либо требует трудоемкого патентного поиска. К третьей группе относят методы, основанные на разработке специализированных алгоритмов, учитывающих специфику решаемых задач, которые содержат трудоемкий математический расчет. Однако эти методы не могут применяться в решении других задач.

Выявлено, что на сегодняшний день актуальной задачей остается нахождение более удобных и простых способов расчета исходной системы ОПФР, что позволит успешно выполнить проектирование такого объектива и обеспечить требования, предъявляемые к ОПИИС.

Во **второй** главе выбран метод расчета исходной системы ОПФР, который можно отнести к третьей группе подходов, обозначенных выше. В основу синтеза положен расчет хода нулевого луча через ОС.

Задавались условия (1), накладываемые на ОПФР, и формирующие соответствующие структурно-габаритные параметры:

$$\begin{cases} \varphi_I = \alpha_{k+1} = \alpha_k + h_k \varphi_k, \\ \varphi_{II} = \bar{\alpha}_{k+1} = \bar{\alpha}_k + \bar{h}_k \varphi_k, \\ L_I - L_{II} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где α_k и α_{k+1} – углы падения параксиального луча на k -ый компонент в начальном и конечном состояниях системы соответственно; h_k и h_{k+1} – высоты параксиального луча, падающего на k -ый компонент в начальном и конечном состояниях системы соответственно; φ_k – оптическая сила k -ого компонента; L_I и L_{II} – длины ОС в начальном и конечном состояниях соответственно.

Т.о., преобразуя систему (1), была получена математическая модель для трех- и четырехкомпонентного ОПФР (2):

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1 \varphi_4 (L - d_4) + \varphi_2 (\varphi_1 d_1 - 1) (\varphi_4 (d_2 + d_3) - 1) + n \varphi_2 d_2 (\varphi_4 d_3 - 1) \times \\ \times ((1 - \varphi_1 d_1) (\varphi_2 - 1 / d_2) + \varphi_1) - \varphi_I = 0, \\ \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1 \varphi_4 (L - s_4) + \varphi_2 (\varphi_1 \bar{d}_1 - 1) (\varphi_4 (\bar{d}_2 + \bar{d}_3) - 1) + n \varphi_2 \bar{d}_2 (\varphi_4 \bar{d}_3 - 1) \times \\ \times ((1 - \varphi_1 \bar{d}_1) (\varphi_2 - 1 / \bar{d}_2) + \varphi_1) - \varphi_{II} = 0, \\ s_4 = \varphi_{II} \left(1 - \varphi_1 (\bar{d}_1 + \bar{d}_2 + \bar{d}_3) + \varphi_2 \bar{d}_3 \left((\varphi_1 \bar{d}_1 - 1) (n (1 - \varphi_2 \bar{d}_2) + 1 + \bar{d}_2 / \bar{d}_3) + n \varphi_1 \bar{d}_2 \right) \right), \\ d_4 = \varphi_I \left(1 - \varphi_1 (d_1 + d_2 + d_3) + \varphi_2 d_3 \left((\varphi_1 d_1 - 1) (n (1 - \varphi_2 d_2) + 1 + d_2 / d_3) + n \varphi_1 d_2 \right) \right), \\ L = \bar{d}_1 + \bar{d}_2 + \bar{d}_3 + s_4, \\ d_2 = L - d_1 - d_3 - d_4, \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi_3 = n \cdot \varphi_2$, n – коэффициент равный, например, -0,9; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – оптические силы первого, второго, третьего и четвертого компонентов ОС соответственно; d_1, d_2, d_3 – расстояния между компонентами в начальном состоянии ОС; $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$ – расстояния между компонентами в конечном состоянии ОС, d_4 и s_4 – расстояния между четвертым компонентом и плоскостью изображений в начальном и конечном состояниях соответственно.

Габариты системы и закон движения компонентов уточнялись, исходя из конструктивных требований к габаритам системы, при этом считалось, что апертурная диафрагма располагается в главной плоскости четвертого компонента.

Световые радиусы компонентов находились по следующей формуле (3):

$$\begin{cases} R_1 = R_2 + \bar{d}_1 \left[(y' + R_4 \cdot (1 - s' \cdot \varphi_4)) / s' - R_3 \cdot \varphi_3 - R_2 \cdot \varphi_2 \right], \\ R_2 = R_3 \cdot (1 - \bar{d}_2 \varphi_3) + \bar{d}_2 (y' + R_4 \cdot (1 - s' \cdot \varphi_4)) / s', \\ R_3 = R_4 + \bar{d}_3 (y' + R_4 \cdot (1 - s' \cdot \varphi_4)) / s', \\ R_4 = s' / (2 \cdot K), \end{cases} \quad (3)$$

где s' – расстояние от четвертого компонента до плоскости изображения, K – диафрагменное число оптической системы; R_1, R_2, R_3, R_4 – световые радиусы

первого, второго, третьего и четвертого компонентов соответственно, y' - половина диагонали приемника излучения.

Закон движения компонентов системы уточнялся, считая, что световой радиус первого компонента $R_1 < 45$ мм.

При этом зависимость расстояния между первым и вторым компонентами в конечном состоянии системы \bar{d}_1 от светового радиуса R_1 имеет вид (4):

$$\bar{d}_1 = (R_1 - R_2) / \left[(y' + R_4 \cdot (1 - s' \cdot \varphi_4)) / s' - R_3 \cdot \varphi_3 - R_2 \cdot \varphi_2 \right]. \quad (4)$$

Нахождение искоемых переменных математической модели, а именно φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 , осуществлялось с учетом формул (3) – (4), используя метод вариации параметров, т.к. данный метод оказался прост в реализации и эффективен.

Данный метод известен: в системе уравнений (2) в качестве параметра рассматривается $\varphi_2 = p$, и получается первое разрешающее уравнение (5):

$$\delta_1(p) = p - \varphi_2(p) = 0, \quad (5)$$

где $\varphi_2(p)$ – корень уравнения системы (2). Вводится новое обозначение (6):

$$u = u(\varphi_2) = \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1 \varphi_4 (d_1 + d_2 + d_3) + \varphi_2 (\varphi_1 d_1 - 1) (\varphi_4 (d_2 + d_3) - 1) + \\ + n \varphi_2 d_2 (\varphi_4 d_3 - 1) ((1 - \varphi_1 d_1) (\varphi_2 - 1 / d_2) + \varphi_1) - \varphi_1 = 0, \quad (6)$$

и также в системе уравнений (7):

$$\begin{cases} v = v(\varphi_1, \varphi_4, p) = \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1 \varphi_4 (\bar{d}_1 + \bar{d}_2 + \bar{d}_3) + p (\varphi_1 \bar{d}_1 - 1) (\varphi_4 (\bar{d}_2 + \bar{d}_3) - 1) + \\ + n \cdot p \cdot \bar{d}_2 (\varphi_4 \bar{d}_3 - 1) ((1 - \varphi_1 \bar{d}_1) (p - 1 / \bar{d}_2) + \varphi_1) - \varphi_{II} = 0, \\ w = w(\varphi_1, \varphi_4, p) = -((M - 1)(1 / p) + d_2 - d_3 (x' \cdot n - 1) + M (\bar{d}_3 (y' \cdot n - 1) - \bar{d}_2)) / \\ / (\bar{d}_3 M (\bar{d}_1 (1 + n + \bar{d}_2 / \bar{d}_3) - \bar{y}' n \cdot \bar{d}_2) - d_3 (d_1 (1 + n + d_2 / d_3) + \bar{x}' n \cdot d_2) + (L - s_4) / (\varphi_2 (1 - M))) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $M = \varphi_{II} / \varphi_I$; $x' = d_2 p - 1$; $y' = \bar{d}_2 p - 1$; $\bar{x}' = 1 - d_1 p$; $\bar{y}' = 1 - \bar{d}_1 p$; φ_1 и φ_4 – корни системы.

Для решения системы уравнений (7) вводится второй параметр $\varphi_4 = q$, так что вторым разрешающим уравнением является (8)

$$\delta_2(p, q) = q - \varphi_4(p, q) = 0, \quad (8)$$

где $\varphi_4(p, q)$ – корень первого уравнения системы (7), а φ_1 определяется из второго уравнения системы (7):

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{II} - \varphi_I + d_4 - s_4 - p (k_2 \cdot \bar{d}_3 \cdot \varphi_{II} - k_1 \cdot d_3 \cdot \varphi_I)}{p (\varphi_I d_3 (k_1 \cdot d_1 + n \cdot d_2) - \varphi_{II} \bar{d}_3 (k_2 \cdot \bar{d}_1 + n \cdot \bar{d}_2)) + (L - s_4) \varphi_{II} - (L - d_4) \varphi_I}, \quad (9)$$

где $k_1 = n(1 - p \cdot d_2) + 1 + d_2 / d_3$, $k_2 = n(1 - p \cdot \bar{d}_2) + 1 + \bar{d}_2 / \bar{d}_3$.

Корни разрешающих уравнений (5) и (8) находятся по методу полиномиальной аппроксимации (МПА), а каждое уравнение с одним неизвестным, к которым пришли, решается по методу Ньютона.

Исходя из приведенных формул, составлен макрос в программе по расчету ОС, блок-схема работы которого приведена на рис.2. Данный макрос позволяет рассчитать трех- или четырехкомпонентную ОС, представленную главными плоскостями. Макрос написан на макроязыке программы по расчету ОС. Для реализации синтеза ОПФР задается система в программе расчета ОС, состоящая из четырех параксиальных поверхностей, имеющая две конфигурации, которые позволяют задавать параметры системы в начальном и конечном состояниях. Далее вызывается макрос, по завершении работы которого получаем исходную ОС ПФР, что позволяет перейти к следующим этапам проектирования.

Т.о., этап синтеза автоматизирован, что упрощает расчет ОПФР телевизионной системы ОПИИС, и позволяет составить примерную методику проектирование такого объектива.

На рис.3 представлена схема предлагаемой методики расчета ОПФР.

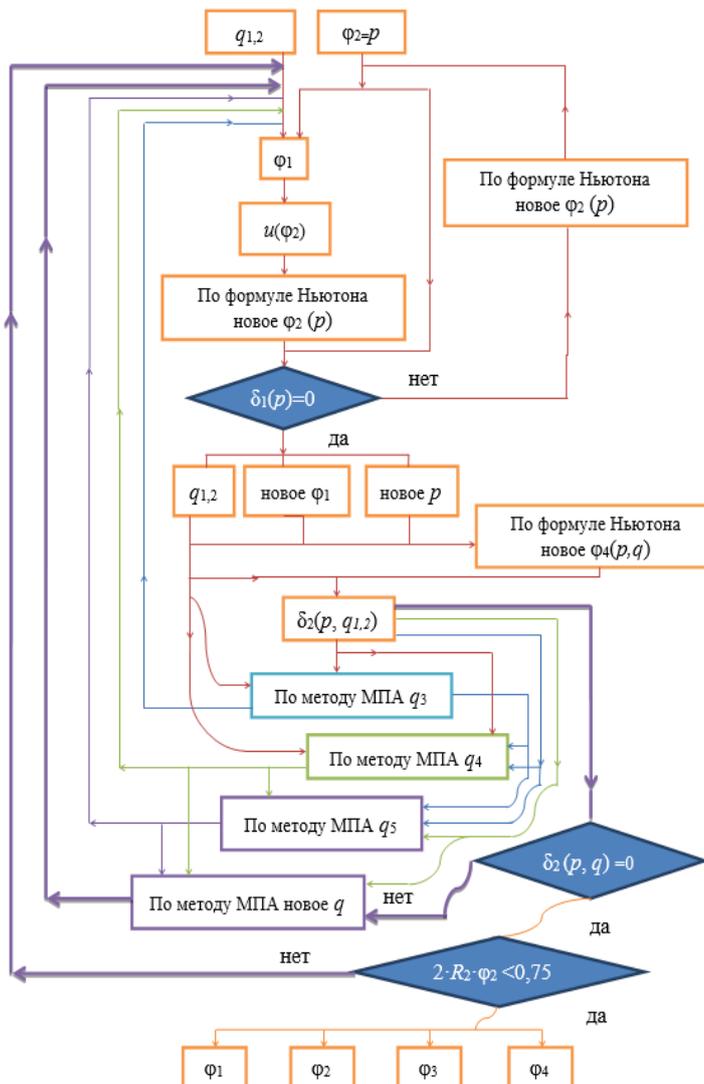


Рисунок 2 – Блок-схема поиска корней системы (2) методом вариации параметров

Этап синтеза осуществляется с помощью полученного макроса. По завершении работы макроса имеем объектив, представленный главными плоскостями с уточненными законом перемещения компонентов и исходными габаритами. Параксиальные компоненты затем последовательно заменяются стандартными линзами с параметром среды *Model*, учитывая относительное отверстие компонентов. Следует отметить, что при относительном отверстии компонента $D/f' < 0,7$, он заменяется одной линзой или склейкой, при относительном отверстии компонента $D/f' > 1$, оптимальной заменой служат три одиночных линзы. На этапах анализа и оптимизации усложняется система, добавляются коррекционные элементы, переходя из среды *Model* к реальным стеклам, и система оптимизируется в программе расчета ОС.

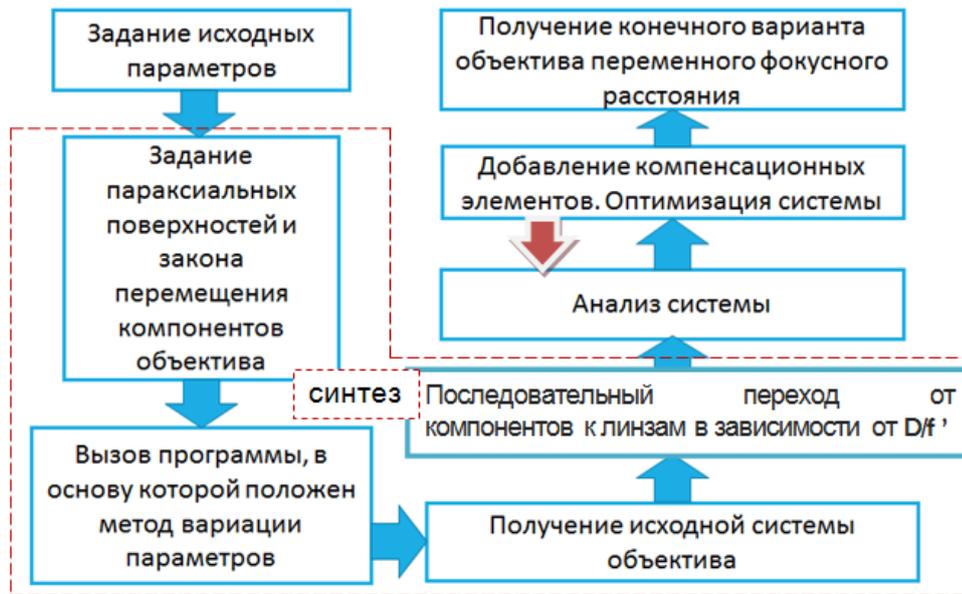


Рисунок 3 – Схема предлагаемой методики расчета ОПФР

В **третьей** главе приведены результаты применения методики расчета ОПФР для телевизионной камеры высокого разрешения ОПИИС с матрицей, размер пикселя которой составляет $5,86 \times 5,86$ мкм. Отмечается, что в ходе проектирования ограничивались несколькими линзами с асферической поверхностью и минимально возможным количеством линз, также использовались стекла отечественных марок.

Первый предлагаемый объектив (рис.4) имеет перепад фокусных расстояний $f'=25...200$ мм, т.е. 8 крат, и относительное отверстие $D/f'=1:4$, рабочий спектральный диапазон $\lambda=0,600...0,800$ мкм, поля зрения $2\omega=3,7^\circ...29,1^\circ$.

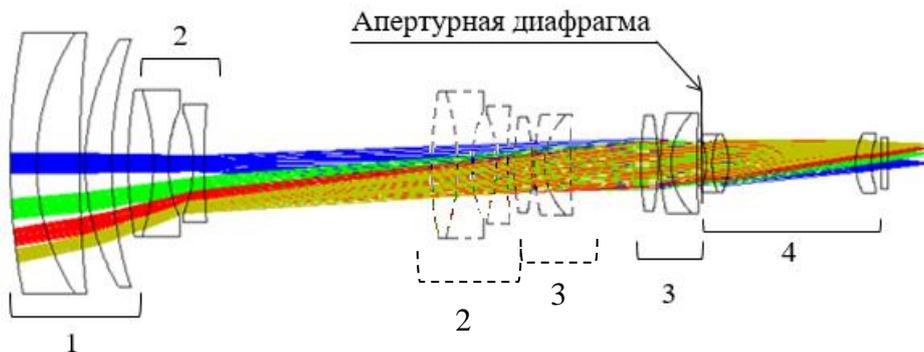


Рисунок 4 – Четырехкомпонентный ОПФР

Габариты ОС: общая длина системы не превышает 280 мм, диаметр первой линзы не более 80 мм. Апертурная диафрагма размещена перед неподвижным компонентом. Объектив термоскомпенсирован. Система состоит из первого, третьего и четвертого положительного компонента и второго отрицательного. Вторая линза первого компонента ОС имеет асферическую поверхность. Всего в системе имеется 12 оптических деталей не считая светофильтра. Второй и третий компоненты являются подвижными, движение

осуществляется навстречу друг другу. Закон движения второго и третьего компонентов показан на рис. 5.

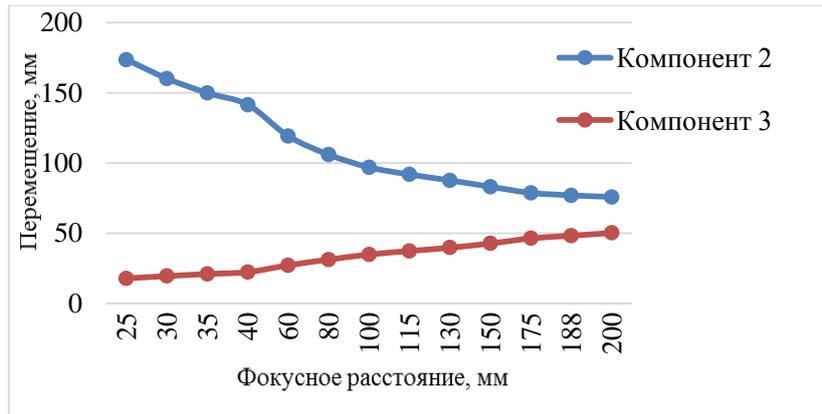


Рисунок 5 – График перемещения второго и третьего компонентов объектива

В зависимости от конфигурации aberrации системы изменяются. Система имеет незначительные сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля. В начальном состоянии дисторсия положительна, составляет 8,5%, в конечном состоянии – 1,3%.

На рис. 6 (а) представлен график частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рис. 6 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле задано с запасом. ЧКХ близка к идеальной для осевого пучка лучей.

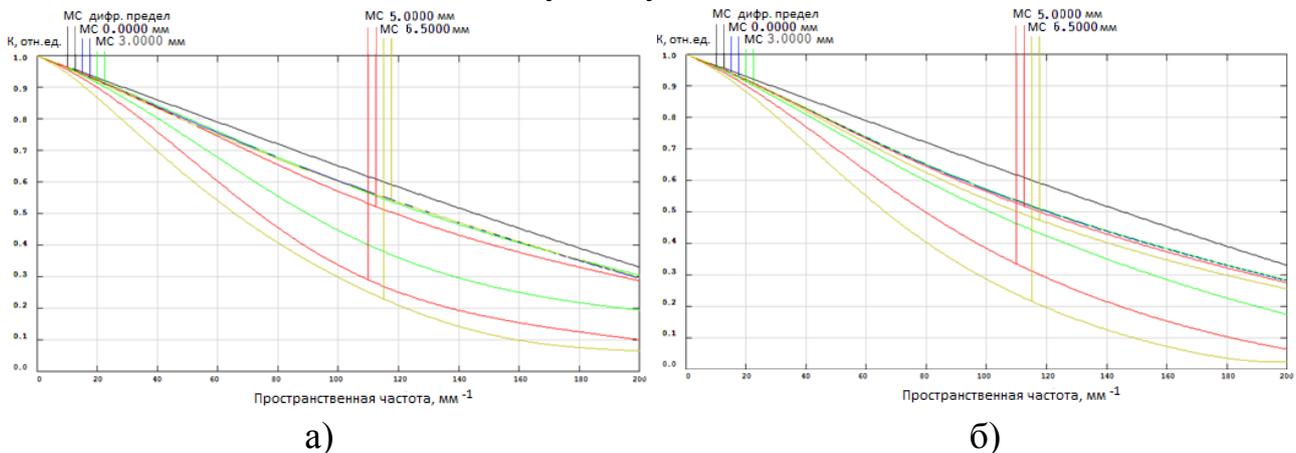


Рисунок 6 – График ЧКХ: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния составляет 2,685 мкм для средней точки поля. Система имеет плотность потока излучения, падающего на пиксель приемника, равную 72%. Величина контраста на частоте Найквиста для средней точки поля более 0,6 отн. ед., то есть полученная оптическая система для матрицы высокого разрешения с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям ОПИС.

Другой предлагаемый объектив (рис.7) имеет такие же оптические характеристики, что и первый. Габариты ОС: общая длина системы около

280 мм, диаметр первой линзы не более 80 мм. Данная система не содержит асферических линз. Апертурная диафрагма размещена перед неподвижным четвертым компонентом.

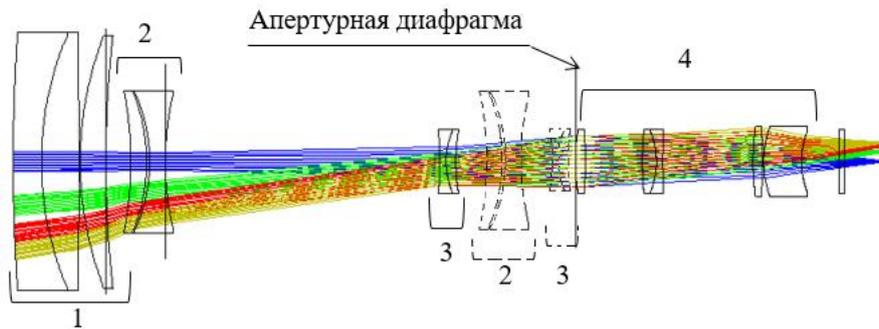


Рисунок 7 – Четырехкомпонентный ОПФР, имеющий два отрицательных компонента

Система состоит из первого и четвертого положительного компонента, второго и третьего отрицательного. Всего в системе имеется 12 оптических деталей без учета светофильтра. Второй и третий компоненты являются подвижными. На рис.8 показаны графики перемещения подвижных компонентов. Движение компонентов осуществляется в одном направлении – от первого компонента к четвертому. Представленная на графике (рис.8) пунктирная линия показывает, что при фокусном расстоянии $f'=110$ мм второй компонент начинает двигаться по пути третьего компонента.

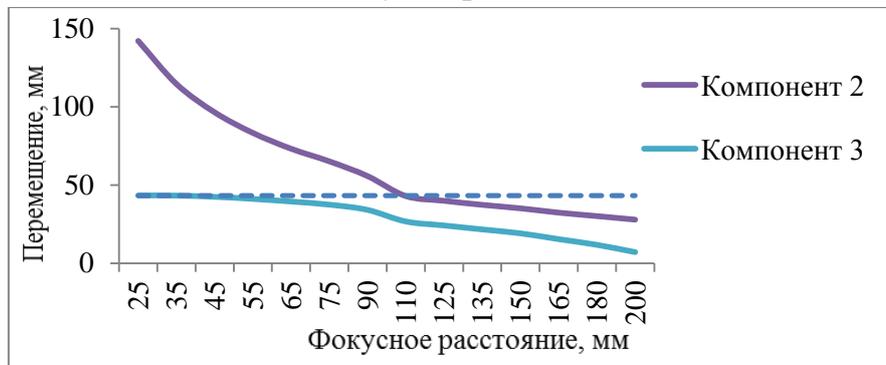


Рисунок 8 – График перемещения второго и третьего компонентов объектива

В зависимости от конфигурации аберрации системы изменяются. Система имеет незначительные хроматические и сферическую аберрации, астигматизм и кривизну поля. В исходной конфигурации – дисторсия отрицательна (около 10%), в конечном – дисторсия положительна (0,45%).

На рис.9 (а) представлен график ЧКХ для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рис.9 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле задано с запасом.

Как видно из рисунка, для осевого пучка лучей частотно-контрастная характеристика близка к идеальной. Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния, формируемого системой от точечного источника света, составляет 3,0 мкм для средней точки поля. Система имеет плотность потока

излучения, падающего на пиксель приемника, около 70%. Величина контраста на частоте Найквиста для средней точки поля более 0,6 отн.ед., то есть полученная ОС для матрицы высокого разрешения с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям ОПИИС.

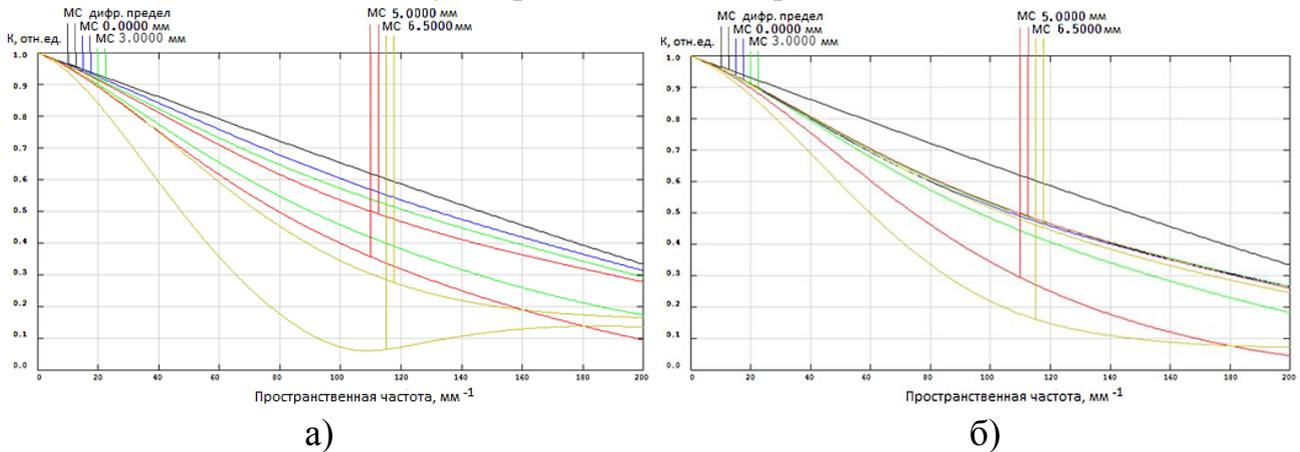


Рисунок 9 – График ЧКХ: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Третий предлагаемый объектив (рис.9) имеет следующие оптические характеристики: перепад фокусных расстояний $f'=15...300$ мм, т.е. 20 крат; относительное отверстие $D/f'=1:4$, диапазон длин волн $\lambda=0,600...0,850$ мкм, поле зрения $2\omega=2,0^\circ...36^\circ30'$.

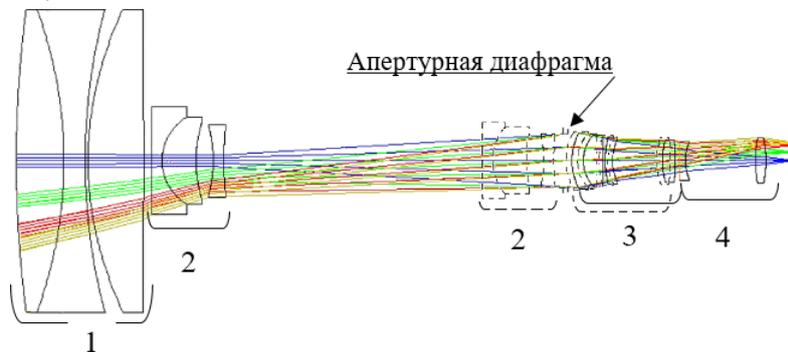


Рисунок 10 – Двадцатикратный ОПФР, имеющий два подвижных компонента

Габариты ОС следующие: общая длина системы не превышает 220 мм, диаметр первой линзы не более 90 мм. Система состоит из четырех компонентов, первый, третий и четвертый положительные, второй – отрицательный. Второй и третий компоненты являются подвижными. В системе имеется 12 оптических деталей, не считая светофильтра. Система содержит две асферические линзы. Апертурная диафрагма регулируемая, расположена между подвижными компонентами. В системе присутствует виньетирование: при фокусе системы $f'=300$ мм коэффициент виньетирования составляет 13,3% для крайнего пучка лучей, что несущественно.

На рис. 11 показаны графики перемещения подвижных компонентов при фокусировании системы от $f'=15$ мм к $f'=300$ мм. Второй и третий компоненты с некоторого момента начинают совместное движение к четвертому

компоненту, при этом второй компонент с определенного момента движется по пути третьего компонента.

Система имеет незначительные хроматические и сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну поля.

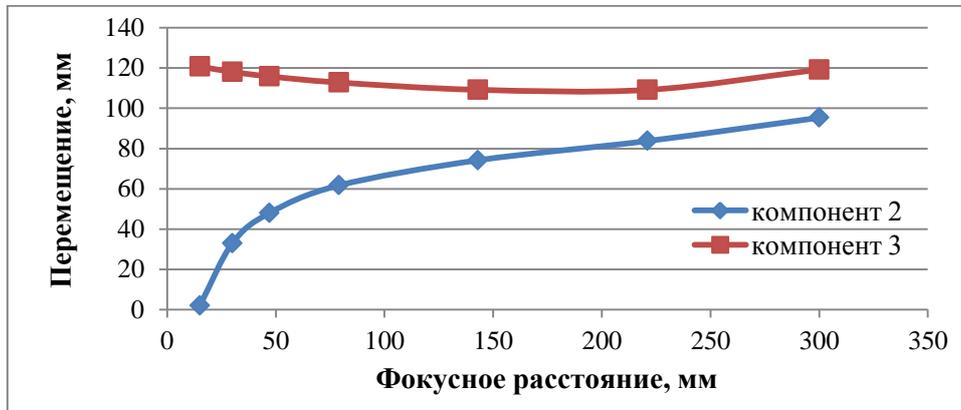


Рисунок 11 – График перемещения подвижных компонентов

В начальном состоянии дисторсия отрицательна (2%), в конечном состоянии дисторсия положительна (1,4%). На рис. 12 (а) представлен график ЧКХ для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рис. 12 (б) для конечного состояния.

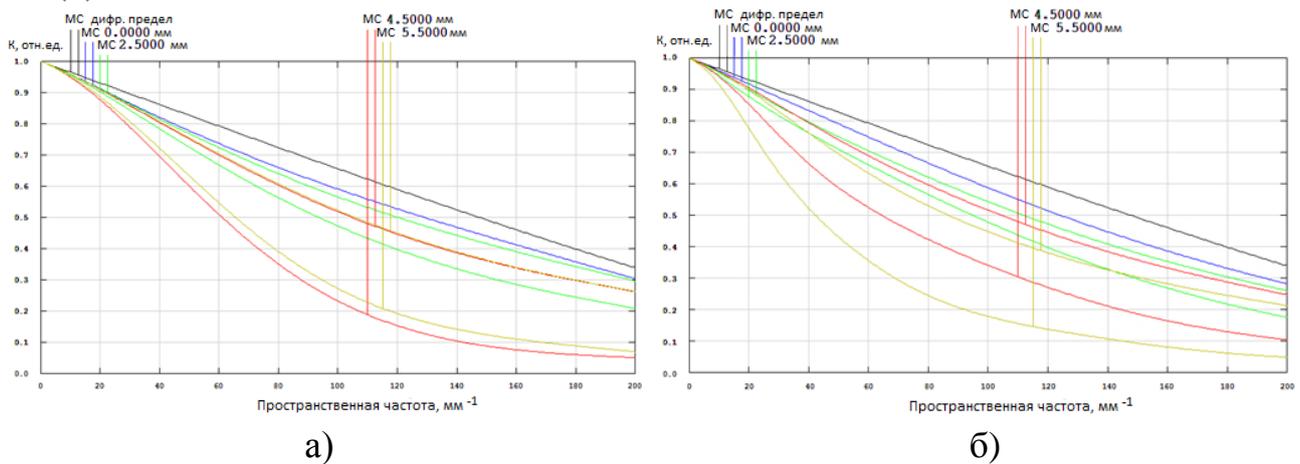


Рисунок 12 – График ЧКХ: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Крайнее поле задано с запасом. Как видно из рисунка, системы ЧКХ имеет хорошие значения.

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния, формируемого системой от точечного источника света, составляет 3,42 мкм для средней точки поля. Система имеет плотность потока излучения, падающего на пиксель приемника, около 73%. Величина контраста на частоте Найквиста для осевой точки поля более 0,6 отн.ед., то есть полученная ОС для матрицы высокого разрешения с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям ОПИС.

Четвертый предлагаемый объектив (рис.13) в ходе проектирования был преобразован из четырехкомпонентной в шестикомпонентную систему разделением второго и четвертого компонентов для улучшения абберационной коррекции системы в длиннофокусных конфигурациях.

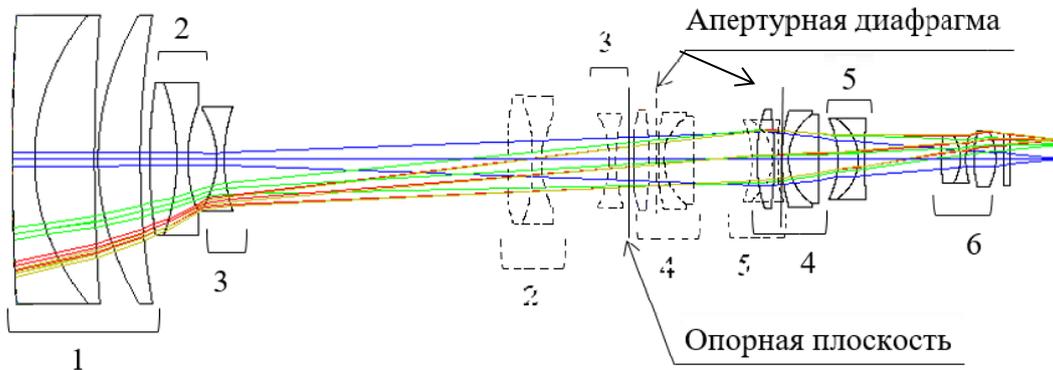


Рисунок 13 – Двадцатикратный шестикомпонентный ОПФР, имеющий четыре подвижных компонента

Объектив имеет следующие оптические характеристики: перепад фокусных расстояний $f'=17...350$ мм, т.е. 20 крат; относительное отверстие $D/f'=1:4$, диапазон длин волн $\lambda=0,600...0,850$ мкм, поле зрения $2\omega=2,1^\circ...42^\circ$.

Габариты ОС: общая длина системы около 282 мм, диаметр первой линзы не более 80 мм. Первый, четвертый, шестой компоненты системы положительные, второй, третий, пятый - отрицательные. Всего в системе имеется 14 оптических деталей, не считая светофильтра. Система содержит две асферические линзы. Апертурная диафрагма является регулируемой и подвижной, расположена между первой и второй линзой подвижного четвертого компонента. В системе присутствует виньетирование: при фокусе $f'=350$ мм коэффициент виньетирования равен 10,5% для осевого пучка лучей, при этом относительное отверстие становится равным $D/f'=1:4,5$. Второй, третий, четвертый и пятый компоненты являются подвижными.

На рис. 14 показаны графики перемещения подвижных компонентов. Пунктирной линией показана опорная плоскость. Второй и третий, четвертый и пятый компоненты движутся навстречу друг другу. Второй и пятый следуют за третьим и четвертым компонентами соответственно.

Система имеет незначительные сферическую абберацию, кому, астигматизм и кривизну поля. В начальном состоянии дисторсия положительна, около 18%, в конечном состоянии – 1,4%.

На рис. 15 (а) представлен график ЧКХ для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рис.15 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле задано с запасом. Т. о., ЧКХ имеет хорошие значения.

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния составляет 3,05 мкм для осевой точки поля. Плотность потока излучения, падающего на пиксель

приемника системы, равна 65% в конечном состоянии системы. Величина контраста на частоте Найквиста для осевой точки поля выше 0,5 отн.ед., то есть полученная система удовлетворяет предъявляемым требованиям ОПИИС.

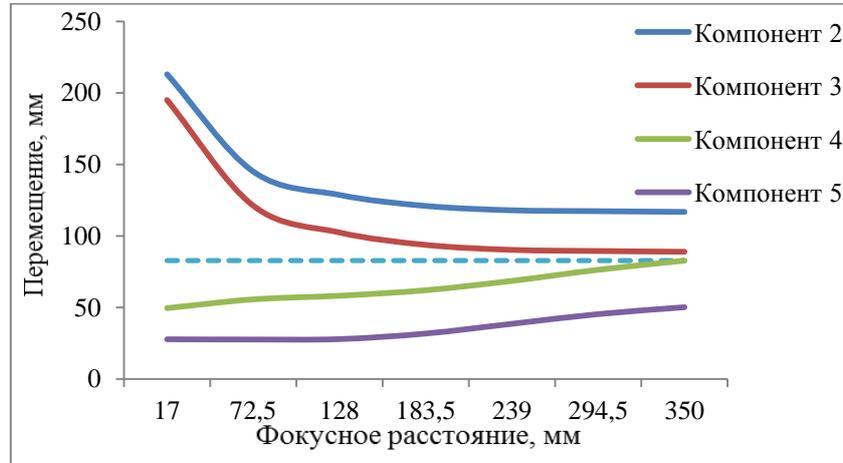


Рисунок 14 – График перемещения подвижных компонентов

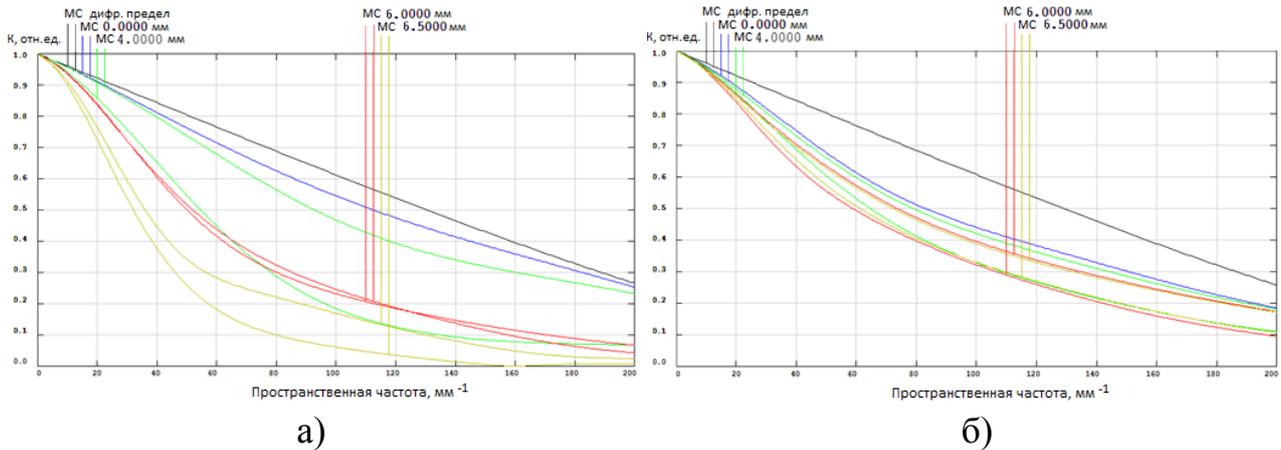


Рисунок 15 – График ЧКХ: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Таким образом, характеристики ОПФР позволяют их использовать для камеры ОПИИС, что служит альтернативной заменой двухканальной ОПИИС.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показана актуальность, сформулированы цели и задачи исследования ОПИИС.
2. Проанализирована двухканальная телевизионная ОПИИС, выявлены ее достоинства и недостатки, предложена одноканальная ОПИИС с ОПФР.
3. Выполнен обзор и проведен анализ существующих ОПФР.
4. Проанализированы существующие методы синтеза ОПФР.

5. Разработана математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную ОПФР в параксиальной области, с учетом ограничений, применяемых к этой системе, и решаемая методом вариации параметров.

6. Разработан алгоритм и реализована программа синтеза исходной трех- и четырехкомпонентной ОПФР.

7. Разработана методика расчета n -компонентной ОПФР.

8. Проведена верификация разработанной методики расчета на примере ОПФР для телевизионной камеры ОПИИС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Горячева В.А. Обзор панкратических объективов для телевизионных систем. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 9: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 202 – 210.

2. Горячева В.А. Математическая модель объектива с переменным фокусным расстоянием/ Горячева В.А. // Приборы. 2023. № 11. С.26-28.

3. Горячева В.А. Оптический канал обзорно-поисковой информационно-измерительной системы// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 86. С.38 – 44.

Публикации в иных изданиях

4. Горячева В.А., Мазаев В.Л. Макрос для моделирования наклона зеркала в программе *Zemax*. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 210 – 212.

5. Горячева В.А., Мазаев В.Л. Программа расчета основных характеристик компонентов оптической системы в *Zemax*. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 194 – 199.

6. Горячева В.А., Мазаев В.Л. Термостабилизированный объектив видимой и ближней инфракрасной области спектра. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 298 – 303.

7. Горячева В.А. Проектирование объективов с переменным фокусным расстоянием. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 28 – 30.

8. Горячева В.А. Расчет оптических сил компонентов панкратического объектива в *Zemax*. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 143 – 146.

9. Горячева, В. А. Объектив с переменным фокусным расстоянием / Zoom lens / В. А. Горячева // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года,

Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. С. 85-87.

Объекты интеллектуальной собственности

10. Пат. 2690098 РФ Объектив для ближней ИК-области спектра. МПК⁹ G02B 13/14; G02B 9/12; G02B 11/16; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество "Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова"/ Бушмелев Н.И., Горячева В.А. [и др.] - №2018135891; заявл. 11.10.2018; опубл. 30.05.2019, Бюл. № 16.