

На правах рукописи



КРЮКОВ Александр Владимирович

**ШИРОКОУГОЛЬНЫЕ РЕВЕРСИВНЫЕ ТЕЛЕОБЪЕКТИВЫ
НА БАЗЕ ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2003

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана Министерства образования РФ.

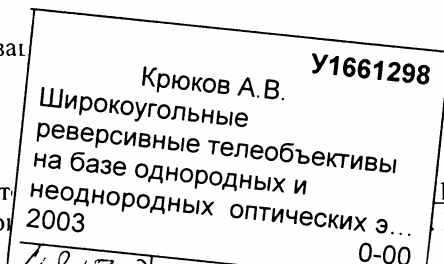
Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Ровенская Т.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бездидько С.Н.

кандидат технических наук
Савоскин В.И.

Ведущая организация

Защита состоит
заседании диссертационной
по адресу:



10 часов на
Н.Э. Баумана

Y1661298

лиотеке

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Б-ка МГТУ им. Н.Э. Баумана



1661298

Крюков А.В. Широкоугольные

ласов И.Б.

Актуальность работы

В современных условиях высокой опасности террористических актов актуальной является задача обеспечения безопасности населения, частной и муниципальной собственности, промышленных и военных объектов. В связи с этим, актуальное направление современной вычислительной оптики связано с разработкой объективов для систем замкнутого телевидения, в частности, объективов с вынесенным зрчком для проведения скрытой телевизионной съемки.

Успех разработки таких систем может быть обеспечен только при использовании комплексного подхода, учитывающего особенности применения новых многоэлементных приемников излучения (ПИ) и современные возможности оптической элементной базы, наряду с грамотным владением известными методами проектирования оптических систем (ОС) и новейшими компьютерными технологиями. Современный этап вычислительной оптики предполагает активное использование нетрадиционной элементной базы, в частности, градиентных элементов и линз с асферическими и дифракционными поверхностями. Это делает актуальным создание новых методик и отработку подходов в проектировании таких систем.

Объективы систем скрытого наблюдения характеризуются миниатюрной конструкцией и наличием специальных маскирующих диафрагм в пространстве предметов перед объективом. Достаточная информативность и небольшие габариты объектива могут быть обеспечены, если плоскость апертурной диафрагмы (АД) располагается в пространстве предметов, т.е. в объективах с вынесенным входным зрчком.

В современных объективах для ПЗС-камер используются дополнительные оптические фильтры и призмы, устанавливаемые в сходящиеся пучки лучей между последней поверхностью объектива и плоскостью изображения; в конструкциях ПЗС-матриц используется блок микролинз для улучшения фактора заполнения светочувствительных элементов ПИ. В связи с этим, оптическую схему объектива целесообразно рассчитывать из условия обеспечения телецентрического хода главных лучей в пространстве изображения.

Миниатюризация конструкции оптико-электронного прибора (ОЭП) скрытого наблюдения приводит к уменьшению продольной длины объективов и переходу к миниатюрным форматам ПИ. Для согласования входных и выходных присоединительных характеристик ОС требуется уменьшение фокус-

ного расстояния при сохранении достаточной величины заднего отрезка объектива. При использовании ПЗС-матриц форматов 1/2", 1/3", 1/4" задний фокальный отрезок s'_F сопоставим или превосходит фокусное расстояние f' ОС, т.е. решение находится в области реверсивных телеобъективов, для которых коэффициент $k_t = s'_F / f' \geq 1$.

Целью диссертационной работы является разработка методик проектирования и расчет новых конструкций миниатюрных телевизионных широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком, оптическая схема которых построена с использованием однородных и неоднородных оптических элементов.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Проведена оценка работы ОС с позиций высшего уровня проектирования всего ОЭП наблюдения. Исследованы оптические, габаритные, присоединительные характеристики и качество изображения объективов, работающих с ПЗС-матрицами различных форматов и разрешения.
2. Проанализированы структура оптических схем объективов для систем скрытого наблюдения, принципы построения и методы расчета реверсивных телеобъективов и объективов с вынесенным входным зрачком. Сформирована новая структурная схема реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком и выбран метод ее расчета.
3. Разработаны методики проектирования широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком из однородных и неоднородных оптических элементов со сферическими поверхностями.
4. Оценена эффективность разработанных методик проектирования; рассчитаны новые ОС телевизионных широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным зрачком на базе однородных и неоднородных оптических элементов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена новая структурная схема широкоугольного реверсивного телеобъектива с вынесенным входным зрачком, введена классификация схемы по четырем типам и выявлен принципиально новый тип структурной схемы реверсивного телеобъектива с исправленной кривизной поверхности изображения на основе двух положительных компонентов.
2. Разработаны методика синтеза однородного широкоугольного реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком, основанная на описании предложенной структурной схемы с помощью модифицированного метода разделения

переменных, и методика синтеза объектива с неоднородными оптическими элементами, основанная на методе модификации характеристик однородного прототипа и ориентированная на использование серийно производимых марок градиентных материалов.

3. Получены новые формулы, представляющие собой модификацию дисперсионной модели Герцбергера, для полихроматического описания оптических материалов с осевым распределением показателя преломления (РПП).

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. В возможности использования полученных результатов при разработке объективов и компонентов с вынесенным входным зрачком для систем видеонаблюдения, подводной фотографии, сканирующих устройств, наблюдательных приборов и т.д.
2. В расчете новых оптических схем реверсивных телеобъективов для ПЗС-матриц формата 1/2", отличающихся высокой защищенностью от визуального обнаружения, технологичностью конструкции и возможностью универсального использования с цветными и черно-белыми ПЗС-матрицами.
3. В увеличении эффективности процедур нелокальной оптимизации градиентных ОС при использовании предложенной модификации дисперсионной модели Герцбергера за счет ее более простого описания по сравнению с моделями Бухдала и Зельмейера; а также в возможности описания дисперсионных характеристик материалов GRADIUM® в отечественных пакетах прикладных программ (ППП).

Результаты работы использованы при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ (НИР) ГРЛ 209/96, ГРЛ-705, ГРЛ 708, Г4Е9/99, Г14Е, проводимых кафедрами РЛ-2 и РЛ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана за период с 1997 по 2002 годы.

Апробация работы и публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 2 статьи, 1 методическое пособие к выполнению курсовых и дипломных работ и 7 тезисов докладов.

Материалы работы обсуждались на заседании кафедры РЛ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана, докладывались автором на конференциях «Прикладная оптика-98» (С. Петербург, 1998), «Оптика-99» (С. Петербург, 1999), «Технология производства и обработки оптического стекла и материалов» (Москва, 2000), «170-лет МГТУ им. Н.Э. Баумана» (Москва, 2000), «Оптика-2001» (С. Петербург, 2001), «Прикладная оптика-2002» (С. Петербург, 2002), «Оптика-2003» (С. Петербург, 2003).

На защиту выносятся следующие положения:

- 1) Методика определения присоединительных, габаритных, оптических характеристик и требований к качеству изображения объективов для ОЭП скрытого наблюдения позволяет устанавливать требования технического задания на проектирование объектива с позиций высшего уровня проектирования.
- 2) Алгоритм определения внешних и внутренних параметров структурной схемы реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком позволяет синтезировать структурную схему объектива с заданными значениями выноса плоскости АД и плоскости изображения, телецентрическим ходом главного луча в пространстве изображения и заданной степенью коррекции комы, астигматизма, кривизны поверхности изображения и хроматизма увеличения.
- 3) Методики проектирования телевизионных широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком обеспечивают возможность расчета объективов с заданным набором характеристик из однородных и неоднородных оптических элементов.
- 4) Модифицированная математическая модель Герцбергера позволяет описывать дисперсионные характеристики материалов с осевым РПП и повышает эффективность процедур нелокальной оптимизации градиентных ОС.
- 5) Новые объективы для ОЭП скрытого наблюдения, работающие с ПЗС-матрицами формата 1/2", построенные с использованием однородных и неоднородных оптических элементов, отличаются высокой защищенностью от визуального обнаружения, технологичностью конструкции и возможностью универсального использования с цветными и черно-белыми ПЗС-матрицами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит список цитируемых литературных источников из 103 наименования, изложена на 197 страницах машинописного текста и содержит 78 рисунков и 29 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения диссертации.

Глава 1 «Характеристики объективов телевизионных систем скрытого наблюдения»

В первой главе рассмотрены входные и выходные присоединительные характеристики объективов для ОЭП скрытого наблюдения и систематизированы требования к величинам 2ω углового поля объектива в пространстве предметов, диаметру D и положению s_p входного зрачка, к

величине заднего фокального отрезка s'_F в случае установки защитного стекла ПЗС-матрицы или дополнительных оптических фильтров и призм (рис. 1). Рассмотрена область ахроматизации $[\lambda_1 \dots \lambda_2]$ объектива, учитывающая спектральные характеристики черно-белых и цветных ПЗС-матриц.

Миниатюризация конструкции ОЭП скрытого наблюдения проявляется как в уменьшении продольной длины L объективов, так и в переходе к миниатюрным форматам ПИ с диагональю $2y'$. Согласование входных и выходных присоединительных характеристик широкоугольных объективов с вынесенным входным зрачком предлагается проводить путем определения фокусного расстояния f' объектива по формуле, учитывающей величину характерной для систем данного класса отрицательной дисторсии $\Delta y'_{\text{дист}} = y' - y'_0$:

$$f' = \frac{y'}{\left(1 + \frac{\Delta y'_{\text{дист}} [\%]}{100\%}\right) \operatorname{tg} \omega}. \quad (1)$$

Для систематизации требований к качеству изображения ОС для ПЗС-матриц рассмотрены критерии оценки качества изображения, основанные на модуляционной передаточной функции (МПФ), размерах пятна рассеяния и функции концентрации энергии (ФКЭ).

Проанализировано выражение для пространственно-частотного спектра (ПЧС) сигнала на выходе матричного ПИ и показана необходимость ограничения спектра сигнала на входе ПИ частотой ν_N Найквиста, связанной с периодом $d_{x'(y')}$ дискретизации матрицы соотношением $\nu_{x'(y')} N = 1/(2d_{x'(y')})$. Ограничение спектра обеспечивает устранение нежелательных муаров в изображении объекта с мелкой периодической структурой и достигается за счет установки оптиче-

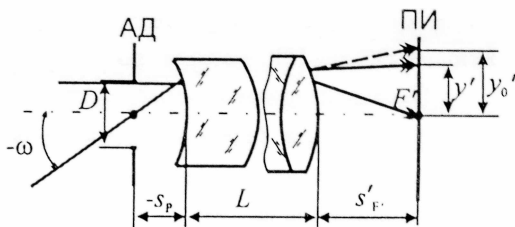


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема объектива с вынесенным входным зрачком

ских фильтров низких частот (НЧ) между последней поверхностью объектива и плоскостью изображения. Частоту Найквиста в данном случае целесообразно принять в качестве характеристической частоты и оценивать качество изображающей ОС для ПЗС-матрицы по значениям МПФ на выбранной частоте.

Проанализирована возможность использования формулы профессора Г.Г. Слюсарева для определения значения T МПФ на частоте ν_N Найквиста в случаях соответствия размеров $a_{x'(y')}$ светочувствительного элемента ПЗС-матрицы геометрическому δ или среднеквадратическому $\delta_{\text{скв}}$ размеру пятна рассеяния:

$$\delta = \frac{2}{\pi \nu_N} \sqrt{2,5[1 - T(\nu_N)]}. \quad (2)$$

Это позволило определить численные значения выбранных критериев для ОС с отличным, хорошим и удовлетворительным качеством изображения (по аналогии с классификацией, использованной профессором Д.С. Волосовым для фотографических объективов в книге «Фотографическая оптика») (табл. 1).

Рассмотрены вопросы корреляции критериев, основанных на МПФ и размерах пятна рассеяния, со значениями ФКЭ η , приведенными в книге М.Н. Сокольского «Допуски и качество оптического изображения» (табл. 1). Подтверждено хорошее соответствие выработанных значений для систем с отличным, хорошим и удовлетворительным качеством изображения.

Таблица 1

качество из-ния критерий оценки	отличное	хорошее	удовлетворительное
δ	$\delta = a_{x'(y')}$	$\delta_{\text{скв}} = a_{x'(y')}$	$\delta_{\text{скв}} > a_{x'(y')}$
$T(\nu_N)$	$\geq 0,75$	$\geq 0,45$	$\geq 0,2$
$\eta, \%$	≥ 80	≥ 60	≥ 40

Глава 2. «Аналоги и прототипы объективов систем скрытого наблюдения и методы их расчета»

Вторая глава диссертации посвящена поиску аналогов и выбору прототипов объективов для ОЭП скрытого наблюдения. Для решения данной задачи проанализированы два класса систем – реверсивные телеобъективы и объективы с вынесенным входным зрчком. Выявлены два варианта структурных схем реверсивных телеобъективов. Первая структурная схема состоит из двух компонентов, расположенных на конечном расстоянии d друг от друга; первый компонент обладает отрицательной, второй – положительной оптической си-

лой. Вторая структурная схема состоит из телескопической системы с увеличением $\Gamma < 1$ и расположенного за ней положительного компонента (объектива). Выявленные структурные схемы реализованы в объективах для зеркальных фотокамер и гидрообъективах с внутренним расположением АД.

Оценка систем с вынесенным зрачком в составе сложной ОС, в наблюдательных приборах, в сканирующих устройствах и гидрообъективах позволила сделать вывод о том, что такие системы не могут рассматриваться в качестве прототипов телевизионных широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком.

Обзор литературы и патентный поиск показали отсутствие специализированной методики проектирования реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком. Это потребовало поиска метода расчета ОС для синтеза систем данного класса. Проанализированы метод развития характеристик прототипа ОС, метод профессора Д.С. Волосова для расчета сложных анастигматов, содержащих компоненты конечной толщины, метод композиции ОС профессора М.М. Русинова, метод разделения переменных профессора Г.Г. Слюсарева и модифицированный метод разделения переменных. В результате выбраны метод композиции ОС и модифицированный метод разделения переменных.

Вопросы проектирования объективов с вынесенным зрачком с использованием метода композиции ОС достаточно подробно изучены в работах П.П. Ангелова, А.Г. Серебрякова, В.А. Зверева, А.В. Фролова, Т.С. Ровенской. Таким образом, наибольший интерес представляет использование модифицированного метода разделения переменных.

Глава 3. «Синтез широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным зрачком из однородных оптических элементов»

Третья глава посвящена разработке методики проектирования широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком с использованием модифицированного метода разделения переменных. Особенности модифицированного метода разделения переменных связаны с представлением ОС в виде совокупности тонких и толстых компонентов. Исследование известных соотношений для оптической силы линзы конечной толщины и четвертной суммы простой линзы в воздухе выявило возможность исправления кривизны поверхности изображения системы за счет использования положительных менисков конечной толщины, т.е. без использования отрицательных линз.

Оптические схемы объективов для систем скрытого наблюдения исследованы на наличие отдельных линз или групп линз, действие которых эквивалентно действию мениска, для чего исследовано положение главных плоскостей в линзах и компонентах схемы. Во всех рассмотренных схемах действие фронтального компонента эквивалентно действию мениска конечной толщины, в ряде случаев указанный мениск является положительным. Второй характерной особенностью данного компонента является значительная разность высот по ходу главного луча, приводящая к высокой чувствительности абберационной коррекции схемы к изменению толщины фронтального компонента. Последующая часть характеризуется малым перепадом высот по ходу главного луча и невысокой чувствительностью к изменению осевой толщины.

Проведенное исследование привело к формированию структурной схемы телевизионного широкоугольного реверсивного телеобъектива с вынесенным входным зрачком в виде положительного, отрицательного или афокального фронтального мениска конечной толщины, обращенного вогнутостью к пространству предметов, и расположенного на конечном расстоянии от него тонкого последующего компонента (рис. 2).

По сравнению с описанной в диссертационной работе А.Г. Серебрякова структурной схемой объектива с вынесенным зрачком предлагаемая схема обладает рядом существенных отличий, позволяющих удовлетворить дополнительным требованиям к объективам систем скрытого наблюдения.

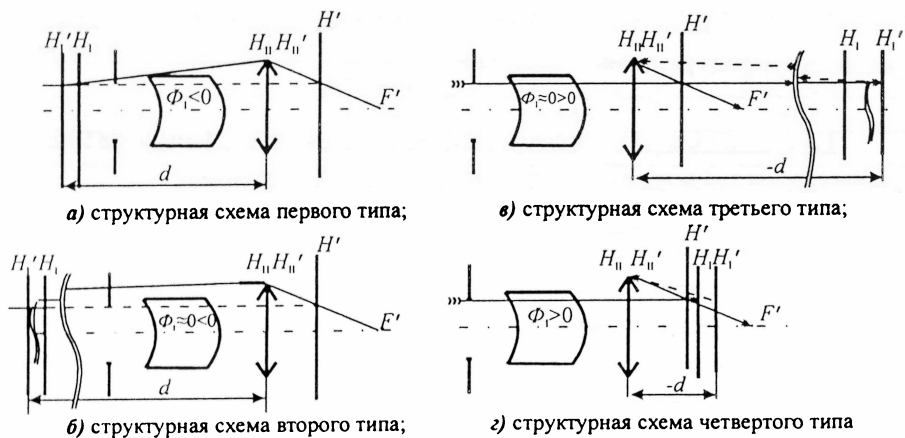


Рис. 2 Типы структурной схемы реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком в зависимости от модуля и знака оптической силы фронтального мениска

Для предложенной структурной схемы введена классификация по четырем типам в зависимости от модуля и знака оптической силы фронтального мениска (рис. 2). Специфическое расположение главных плоскостей мениска для схем третьего и четвертого типов обеспечивает возможность построения принципиально нового типа структурной схемы реверсивного телеобъектива с исправленной кривизной поверхности изображения из двух положительных компонентов.

Для предложенной структурной схемы разработан алгоритм определения внешних и внутренних параметров, позволяющий выполнить расчет любого из перечисленных типов структурной схемы в два этапа. Получены новые формулы для определения внешних параметров структурной схемы, позволяющие рассчитать конструктивные параметры r_1 , r_2 , $d_{\text{мен}}$ мениска из стекла с ПП n , расстояние d между ним и последующим компонентом и оптические силы Φ_I , Φ_{II} компонентов. Формулы обеспечивают выполнение условия масштаба, условия получения заданного коэффициента k_t реверсивного телеобъектива, условия требуемой коррекции кривизны поверхности изображения ($S_{IV}=A^*=A+\pi_{II}^{\text{тонк}}\Phi_{II}$) и условия телецентричности:

$$\begin{aligned} r_1 &= ks_p, \quad r_2 = \frac{r_1(n-1)}{(n-1)-nr_1A}, \quad d_{\text{мен}} = \frac{nr_1r_2[(1-k_t)-nA(s_p k_t + 1)]}{(n-1)[r_1 k_t + (s_p k_t + 1)(n-1)]}, \\ \Phi_I &= nA + \frac{(n-1)^2}{nr_1r_2} d_{\text{мен}}, \quad \Phi_{II} = \frac{1-\Phi_I}{k_t}, \\ d &= \frac{1-k_t}{\Phi_I}, \quad d^* = d - \frac{(n-1)d_{\text{мен}}}{n\Phi_I r_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Разработаны новые формулы для определения внутренних параметров структурной схемы: уравнения (4) для расчета абберационных параметров последующего компонента получены из условий обеспечения заданной коррекции комы, астигматизма и хроматизма увеличения системы: $C^*=S_{II}$, $B^*=S_{III}$, $X^*=S_{IIxp}$:

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{h_3}{H_3^2}(\Phi_{II} - B) + \frac{2C}{H_3}, \quad W_3 = -C - \frac{h_3}{H_3}(\Phi_{II} - B), \\ C_3 &= \frac{X}{H_3}, \quad \pi_3 = \frac{S_{IV}^{\text{тонк}}}{\Phi_{II}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $C=C^*-S_{II}^{\text{мен}}$, $B=B^*-S_{III}^{\text{мен}}$ и $X=X^*-S_{IIxp}^{\text{мен}}$ – значения сумм тонкого компонента, $S_{II}^{\text{мен}}$, $S_{III}^{\text{мен}}$, $S_{IIxp}^{\text{мен}}$ – значения сумм мениска рассчитываются при известных углах α_i , β , и высотах h_i , H_i первого и второго вспомогательных лучей.

На основании исследований коррекционных возможностей структурной схемы в области аберраций третьих порядков, влияния аберраций высших порядков и оценки структурных схем с фронтальными менисками из изопланатических поверхностей обнаружены области конструктивной реализуемости схемы, выявлены перспективные типы структурных схем и выработаны рекомендации по оптимальным исходным параметрам синтеза.

На основании алгоритма определения внешних и внутренних параметров структурной схемы разработана методика синтеза широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком на основе однородных оптических элементов. Методика включает в себя следующие этапы:

Этап 1. Синтез базовой схемы реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком.

Синтез на основе модифицированного метода разделения переменных. Рассчитанные по формулам (3) и (4) параметры полностью определяют структурную схему реверсивного телеобъектива. По значениям аберрационных параметров тонкого компонента (формулы (4)) и величине оптической силы Φ_{II} судят о возможной конструкции последующего компонента и переходят к синтезу его конструктивных параметров, который может быть проведен по известному алгоритму или с использованием специальных прикладных программ (например, OSS, разработанной в ГОИ им. С.И. Вавилова).

Синтез на основе метода композиций профессора М.М. Русинова. На основе обзора литературы для проектирования телевизионного объектива с вынесенным входным зрачком выбрана схема на основе двух базовых линз: $K(кк)+B(ак)+B(ак)$, отличающаяся большим выносом зрачка и близким к телецентрическому ходом главного луча в пространстве изображений.

Этап 2. Параметрический синтез реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком.

Этап параметрического синтеза завершает процесс работы над схемой и может быть проведен с использованием одной из прикладных программ оптимизации ОС, например Zemax® (Focus Software, Inc.) или ОПАЛ (СПИТМО, С. Петербург). В рамках данного этапа предложено проводить поиск нелокальных минимумов оптимизируемой функции за счет локальной оптимизации базовых схем объективов, полученных различными методами. Выработаны рекомендации по построению оптимизационной модели и выбору математического аппарата оптимизации для коррекции базовых схем, построенных на основе модифицированного метода разделения переменных и метода композиции.

Глава 4. «Широкоугольные объективы с вынесенным зрачком из однородных оптических элементов»

В четвертой главе продемонстрирована эффективность разработанной методики проектирования широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком путем реконструкции работающего в спектральном диапазоне $F' \dots C'$ светосильного объектива-аналога с вынесенным зрачком с угловым полем $2\omega=100^\circ$, относительным отверстием $D/f'=1:2,8$ и близким к единице коэффициентом реверсивного телеобъектива: $k_t=0,99$.

Исследование характеристик известных объективов выявило их недостатки, связанные с малыми величинами выноса плоскостей входного зрачка и изображения. В связи с этим, задача расчета новых ОС заключалась в создании объектива, обеспечивающего высокую защищенность от визуального обнаружения, возможность установки дополнительных элементов и высокую технологичность конструкции.

На основании разработанной методики синтезированы новые широкоугольные реверсивные телеобъективы с вынесенным зрачком для ПЗС-матрицы формата $1/2''$ стандартного (объектив Omega-1/2sr) и высокого (объектив Omega-1/2hr) разрешения. Рассчитанные объективы обеспечивают угловое поле $2\omega \approx 80^\circ$, относительное отверстие $D/f'=1:4,6$ и отличаются малыми продольными габаритами $L < 1,8f'$, значительным выносом входного зрачка $s_p = -2,5 \text{ мм} = -0,4f'$ и изображения $s'_F \geq 6,5 \text{ мм} = (1,02 \dots 1,1)f'$. Объективы построены на основе двух марок оптического стекла (ТФ5-ТК17 и ТФ10-СТК19), а в схеме Omega-1/2sr три из восьми поверхностей являются плоскими (рис. 3). Схема отвечает технологическим требованиям на наименьшую толщину по краю положительных и оси отрицательных линз, допуски на изготовление и сборку объектива выполнимы.

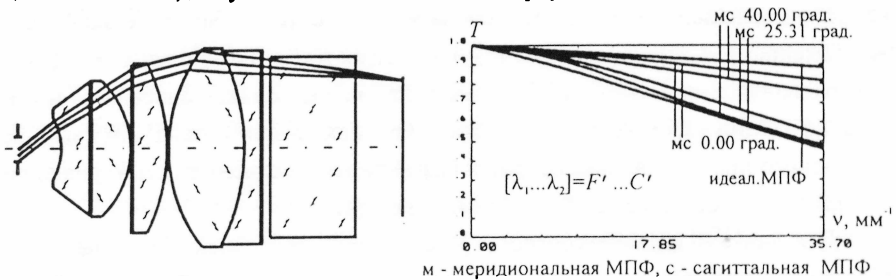


Рис. 3 Оптическая схема и МПФ объектива Omega-1/2sr

Объективы обеспечивают универсальность использования с цветными и черно-белыми ПЗС-матрицами за счет большой величины заднего отрезка и

близкого к телецентрическому хода главных лучей в пространстве изображения; сформированная абберационная коррекция схемы остается стабильной при введении дополнительного светофильтра и при расширении спектрального диапазона работы с $F \dots C'$ до $0,43 \dots 0,8$ мкм.

Значения полихроматической дифракционной МПФ на частоте Найквиста, равной $\nu_N = 35,7 \text{ мм}^{-1}$ для матрицы стандартного разрешения, превышают $T = 0,45$ для всего углового поля (рис. 3), а полихроматическая дифракционная ФКЭ составляет 70-90% для квадратного элемента матрицы с размерами 14×14 мкм. Это характеризует объектив Omega-1/2sr как систему с хорошим качеством изображения (табл. 1).

Переход к использованию ПЗС-матрицы высокого разрешения сопровождается увеличением частоты Найквиста с $\nu_N = 35,7 \text{ мм}^{-1}$ до $\nu_N = 59,5 \text{ мм}^{-1}$. При этом значения МПФ объектива Omega-1/2hr на частоте Найквиста составляют $T \geq 0,2$ для всего углового поля, а полихроматическая дифракционная ФКЭ составляет 50-65% для квадратного элемента матрицы с размерами $8,4 \times 8,4$ мкм, что характеризует рассчитанный объектив как систему с удовлетворительным качеством изображения (табл. 1). Таким образом, при переходе к использованию ПЗС-матрицы высокого разрешения возникает необходимость улучшения абберационной коррекции объектива при сохранении числа линз и компонентов ОС. Для решения данной задачи целесообразно использовать возможности новой элементной базы.

Глава 5. «Реверсивные телеобъективы с вынесенным зрачком с градиентными оптическими элементами»

Малые габаритные размеры линз и компонентов объективов систем скрытого наблюдения позволяют включать в их состав оптические элементы, изготовленные на основе серийно производимых марок градиентных материалов с радиальным или осевым РПП. Разработанная методика основана на методе модификации характеристик прототипа ОС и включает 3 этапа: этап выбора однородного прототипа, этап создания базы данных градиентных материалов и этап параметрического синтеза требуемого решения.

Для синтеза широкоугольного реверсивного телеобъектива с вынесенным входным зрачком в качестве однородного прототипа выбран рассчитанный по предложенной в главе 3 методике объектив Omega-1/2hr. Величины световых диаметров оптических элементов объектива находятся в диапазоне $3,7 \dots 11,3$ мм, что предопределило выбор градиентных материалов со световыми диаметрами более 5 мм, соответствующих области градиентной «макро-

оптики». Коррекция объектива в широком спектральном диапазоне определила необходимость изучения дисперсионных характеристик таких материалов. Соответствующий поиск проведен с ориентацией на серийно производимые градиентные материалы из оптического стекла и полимеров. В результате анализа отечественного и зарубежного рынка градиентных материалов в базу данных включены марки G1, GR1, GR2 стекла с радиальным РПП, производимые фирмой Olympus, и марки GRADIUM® G1SF–G5SF стекла с осевым РПП, производимые фирмой LightPath Technologies, Inc. Основное ограничение для включения в базу данных других материалов градиентной «макро-оптики» связано с недостатком информации по описанию их хроматических характеристик.

На первом этапе параметрического синтеза исследована эффективность использования выбранных марок градиентного стекла и найдено оптимальное решение объектива с осевым РПП в отрицательной линзе фронтального компонента. Локальная оптимизация системы, проведенная на втором этапе параметрического синтеза, привела к созданию объектива Omega-1/2hr-AG.

По сравнению с однородным прототипом рассчитанный объектив обеспечивает существенное улучшение качества изображения при сохранении оптических, габаритных и присоединительных характеристик и технологичности конструкции. Значения МПФ на частоте Найквиста составляют $T(v_N=59,5 \text{ мм}^{-1})=0,44\dots 0,75$, причем увеличение значений МПФ по сравнению с однородным решением составляет 6% для точки на оси и 16–85% для зон и края углового поля. Значения полихроматической дифракционной ФКЭ составляют 68...78 % для зон и края углового поля и 85 % для точки на оси, улучшение ФКЭ по полю составляет 17–38%.

Представленные данные о МПФ и ФКЭ объектива Omega-1/2hr-AG характеризуют его как ОС с хорошим качеством изображения (табл. 1) при использовании с ПЗС-матрицей формата 1/2" высокого разрешения, подтверждая эффективность использования градиентных оптических элементов для улучшения абберационной коррекции объективов систем скрытого наблюдения без увеличения числа компонентов схемы.

Моделирование дисперсионных характеристик стекла с радиальным РПП проведено с помощью модели Герцбергера, стекла с осевым РПП – с помощью моделей Бухдала и Зельмейера. Исследование дисперсионных моделей показало, что по сравнению с моделью Бухдала модель Зельмейера обладает существенно более высокой точностью описания хроматических характеристик стекол GRADIUM с осевым РПП, но требует использования значительного числа констант (24). Это приводит к большому объему вычислений и критично при

выполнении нелокальной оптимизации градиентной ОС, используемой на этапе параметрического синтеза широкоугольного реверсивного телеобъектива с градиентными оптическими элементами. Таким образом, актуальной является задача поиска новой дисперсионной модели, обеспечивающей высокую точность моделирования ПП и использующей меньшее число констант. Для решения данной задачи в диссертации предложена новая дисперсионная модель, предназначенная для описания стекол с осевым РПП вида

$$n_d(z) = \sum_{i=0}^{11} n_{0i}(\lambda_d) \left(\frac{z + \Delta z}{z_{\max}} \right)^i :$$

$$n_{00}(\lambda) = 1 + [n_{00}(\lambda_{\text{осн}}) - 1] \left[1 + B(\lambda) + \frac{A(\lambda)}{V_{00}(\lambda_{\text{осн}})} \right],$$

$$n_{01}(\lambda) = n_{01}(\lambda_{\text{осн}}) \left[1 + B(\lambda) + \frac{A(\lambda)}{V_{01}(\lambda_{\text{осн}})} \right], \quad n_{0i}(\lambda) = n_{0i}(\lambda_{\text{осн}}) \left[1 + B(\lambda) + \frac{A(\lambda)}{V_{0i}(\lambda_{\text{осн}})} \right], \quad (5)$$

где

$$A(\lambda) = -1,294878 + 0,088927\lambda^2 + \frac{0,373490}{\lambda^2 - 0,035} + \frac{0,005799}{(\lambda^2 - 0,035)^2},$$

$$B(\lambda) = 0,001255 - 0,007058\lambda^2 + \frac{0,001071}{\lambda^2 - 0,035} - \frac{0,000218}{(\lambda^2 - 0,035)^2}.$$

Разработанная модель представляет собой модификацию дисперсионной модели Герцбергера, заключающуюся в следующем: значения дисперсии $V_{0i}(\lambda_{\text{осн}})$ коэффициентов n_{0i} приняты в данной модели постоянными и равными некоторому коэффициенту $V_{01}(\lambda_{\text{осн}})$, который назван общим коэффициентом дисперсии профиля ПП.

В диссертации получена новая формула для расчета указанного коэффициента. Для опорной длины волны d $V_{0i}(\lambda_{\text{осн}}) = V_{01}(\lambda_{\text{осн}}) = V_{01d}$:

$$V_{01d} = \frac{[A_F - A_C] \sum_{i=1}^{11} n_{0id}}{\left[\frac{1}{V_{0zd}} + B_C - B_F \right] \left(\sum_{i=0}^{11} n_{0id} - 1 \right) - [A_F - A_C] \frac{n_{00d} - 1}{V_{00d}}}. \quad (6)$$

При создании модели учтены рекомендации корпорации LightPath Technologies, Inc. о включении в описание данных об измеренных значениях хроматических констант V_{00d} и V_{0zd} материала.

Апробация предложенной модели проведена для стекла марки GRADIUM® G41SFN, выбранного производителем в качестве основного при проведении измерений. Максимальная погрешность δn моделирования ПП составляет $\delta n = 3,3 \times 10^{-4}$ для видимой области спектра и возрастает до $\delta n = 13 \times 10^{-4}$

для ИК области спектра $\lambda < 2,5$ мкм. Таким образом, новая дисперсионная модель обеспечивает высокую точность моделирования ПП указанного материала при использовании в описании всего лишь 8 констант.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена и исследована новая структурная схема широкоугольного реверсивного телеобъектива с вынесенным входным зрачком, введена классификация схемы по четырем типам и выявлен принципиально новый тип структурной схемы реверсивного телеобъектива с исправленной кривизной поверхности изображения на основе двух положительных компонентов.
2. Разработана методика проектирования широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком из однородных оптических элементов, основанная на описании предложенной структурной схемы с помощью модифицированного метода разделения переменных. Создана методика определения оптических, габаритных, присоединительных характеристик и требований к качеству изображения объективов с позиций высшего уровня проектирования ОЭП скрытого наблюдения.
3. Разработана методика синтеза широкоугольных реверсивных телеобъективов с градиентными оптическими элементами, основанная на методе модификации характеристик прототипа из однородных сферических линз и ориентированная на использование серийно производимых марок градиентных материалов.
4. На основании разработанных методик рассчитаны новые широкоугольные реверсивные телеобъективы с вынесенным зрачком для работы с ПЗС-матрицами формата 1/2 дюйма стандартного и высокого разрешения. По сравнению с аналогами новые объективы обеспечивают высокую защищенность от визуального обнаружения, технологичность конструкции и возможность универсального использования с цветными и черно-белыми ПЗС-матрицами. Продемонстрированы потенциальные возможности использования градиентных оптических элементов с осевым РПП для улучшения качества изображения однородного прототипа при работе с ПЗС-матрицами формата 1/2 дюйма высокого разрешения.
5. Предложена новая дисперсионная модель, представляющая собой модификацию модели Герцбергера для описания хроматических характеристик материалов с осевым РПП. Продемонстрирована целесообразность использования разработанной модели в случае выполнения процедур нелокальной оп-

тимизации градиентных ОС и показана возможность описания дисперсионных характеристик материалов GRADIUM® в отечественных пакетах прикладных программ.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Проектирование широкоугольных реверсивных телеобъективов // Международная конференция Прикладная оптика-98: тезисы доклада. - Санкт-Петербург, 1998. - С. 132.
2. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Широкоугольные реверсивные телеобъективы на базе градиентных оптических элементов // Международная конференция Оптика-99: тезисы доклада. - Санкт-Петербург, 1999. - С. 146.
3. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Методика расчета оптических схем широкоугольных реверсивных телеобъективов несимметричной конструкции // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2000. - №3(40). - С. 109-116.
4. Ровенская Т.С., Крюков А.В., Кольчугина Н.Ю. Технологические аспекты в проектировании изображающих градиентных оптических систем // Научно-техническая конференция Технология производства и обработки оптического стекла и материалов: тезисы доклада. - Москва, 2000. - С. 62.
5. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Аналитический метод расчета реверсивного широкоугольного телеобъектива с вынесенным входным зрачком // Научно-техническая конференция 170 лет МГТУ им. Н.Э. Баумана: тезисы доклада. - Москва, 2000. - С. 97.
6. Крюков А.В. Широкоугольный реверсивный телеобъектив с вынесенным зрачком на базе элементов из градиентного стекла с радиальным распределением показателя преломления // II-ая международная конференция молодых ученых и специалистов Оптика-2001: тезисы доклада. - Санкт-Петербург, 2001. - С. 227.
7. Градиентные элементы в оптических системах / В.И. Кузичев, Т.С. Ровенская, Р.Е. Ильинский, А.В. Крюков // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2001. - №3(44). - С. 44-52.
8. Крюков А.В. Проектирование широкоугольных реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком // V-ая международная конференция Прикладная оптика-2002: тезисы доклада. - Санкт-Петербург, 2002.- С. 130.
9. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Проектирование реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 36 с.
10. Крюков А.В. Математическое моделирование дисперсионных характеристик градиентных оптических материалов марки GRADIUM® с осевым распределением показателя преломления // III-я Международная конференция молодых ученых и специалистов Оптика-2003: тезисы доклада. - Санкт-Петербург, 2003. - С. 169-170.

Подписано в печать 29.12.2003 г. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
