Исследования в области расчёта объектива с широкой областью ахроматизации

09, сентябрь 2012

DOI: 10.7463/0912.0455859

Поспехов В. Г., Крюков А. В., Матвеев Д. С.

УДК 535.317

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vychposp@yandex.ru

alex_krioukov@mail.ru

Введение

До недавнего времени для обнаружения объектов при низких уровнях освещённости и в темноте наибольшее распространение получили приборы ночного видения (ПНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) поколений 2+, 3, фотокатоды которых работают в области спектра от 0,4 до 0,9 мкм [1]. Последние несколько лет у нас и за рубежом ведутся работы по созданию неохлаждаемых сенсоров, имеющих спектральный диапазон чувствительности от 0,8 до 1,7 мкм (2,5 мкм), получивший название *SWIR* (англ. *Short Wave Infrared* – коротковолновая ИК область спектра). Освоение данного спектрального диапазона, по мнению специалистов, имеет определённые преимущества и может быть использовано как для военных, так и гражданских целей.

По сравнению с традиционной для ПНВ областью от 0,4 до 0,9 мкм в диапазоне *SWIR* достигаются более высокие уровни природных контрастов, в пять-семь раз большая величина естественной ночной освещённости, чем освещённость от звёзд, лучшее пропускание атмосферы [2].

Кроме того, камуфлирующие покрытия, эффективные в области спектра от 0,4 до 0,9 мкм, теряют свои маскирующие свойства в диапазоне длин волн от 1,0 до 1,7 мкм. Это позволяет, в частности, распознать фигуры людей в камуфлирующей форме на фоне зелени. Спектральный диапазон от 0,9 до 1,7 мкм характерен для линеек и матриц на базе InGaAs, на основе которых разрабатываются инфракрасные (ИК) телевизионные камеры [1].

Большого успеха по созданию камер для диапазона *SWIR* добилась фирма *Goodrich* [3]. Фирмой разработан целый ряд модификаций камер на базе матриц различного формата SU640 KTSX-1.7RT, SU320 KTSW-1.7RT. Неохлаждаемая ИК-камера высокого разрешения SU320 KTSW-1.7RT на основе InGaAs матрицы формата 320×256 для области спектра от 0,9 до 1,7 мкм имеет удельную обнаружительную способность равную $6 \times 10^{12} \text{ см} \times \text{Гц}^{0,5} \times \text{Вт}^{-1}$, размер пикселя 25×25 мкм, размер матрицы 16×12,8 мм (диагональ 20,5 мм), габариты ИК-камеры 158×76,2×76,2 мм. ИК-камера SU320 KTSWVIS-1.7RT имеет расширенный в видимую область спектральный диапазон чувствительности. На рис. 1 приведены графики относительной спектральной чувствительности модификаций камеры, указанных выше. В отличие от очков ночного видения, построенных с использованием ЭОП, камера преобразует сигнал в электрический и пригодна для хранения и передачи изображения.

Рис. 1. Относительная спектральная чувствительность камер фирмы *Goodrich*

Кроме ИК-камер на основе InGaAs в *SWIR* диапазоне существуют детекторы *MARS SW* на основе CdHgTe с матрицей формата 320×256, размерами 9,6×7,68 мм (диагональ 12,3 мм), с размерами пикселя 30×30 мкм, график относительной спектральной чувствительности которых показан на рис. 2. К недостаткам этого типа камер относится необходимость термоэлектрического охлаждения для достижения приемлемого отношения сигнал/шум (рабочая температура от 200 до 250 K) [4].

Расширение традиционного для ПНВ спектрального диапазона и смещение чувствительности камер в ИК-область спектра приводят к необходимости предъявления

новых требований к объективам для таких камер. Это в свою очередь, делает актуальной задачу разработки специальных оптических систем с широкой областью ахроматизации, согласованной со спектральным диапазоном чувствительности камер.

Фирма «Navitar» объявила о создании набора объективов «*SWIR Hyperspectral lenses*» с фокусными расстояниями от 8 до 50 мм, с относительными отверстиями 1:1,4, работающих в спектральном диапазоне от 0,5 до 1,7 мкм для камер с форматом кадра 1/3", 1/2", 2/3", 1" [5]. Оптические схемы и методы их проектирования неизвестны.

Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность камер *MARS SW*

Фирма «*Coastal Optical Systems*» сообщила [6] о создании высокоразрешающего объектива, ахроматизованного для спектрального диапазона от 0,4 мкм до 1,7 мкм, имеющего следующие оптические характеристики: $f' = 25$ мм, $D/f' = 1:2$, $2\omega = 27,6^\circ$ ($2y' = 12,3$ мм). Значение контраста для частоты $N = 50$ мм⁻¹ составляет 0,55 для центра поля и 0,3 для зоны поля $\omega = 0,8\omega_{кр}$, интегральный коэффициент пропускания в заданном спектральном диапазоне составляет 0,87. Габаритные размеры — 52×46 мм, присоединительная резьба — *C-mount*. Объектив предназначен для камеры *Indigo Systems*.

Определённые успехи по разработке методов ахроматизации и созданию мультиспектральных оптических систем достигнуты в России, о чём можно судить по материалам научно-технических конференций, прошедших в 2010 году [7].

Целью настоящей работы является создание высококачественного объектива с расширенным спектральным диапазоном работы от 0,48 до 2,1 мкм, который может найти применение в телевизионных устройствах обнаружения объектов в сложных фоновых обстановках, устройствах машинного зрения и оптических системах, работающих при низких уровнях освещённости.

В настоящей статье представлены результаты проведенного авторами исследования по созданию такого объектива. В разделе 1 сформулированы требования к оптическим и габаритным характеристикам оптической системы. В разделе 2 рассмотрены вопросы методики синтеза окончательного варианта схемы на основе метода модификации объектива-аналога, представлены особенности оптимизации схемы с использованием программ *OPAL* и *ZEMAX* [8, 9], проведен подробный анализ оптических, габаритных и качественных характеристик двух вариантов объектива: на основе зарубежных и отечественных марок оптического стекла. Кроме того, оценена возможность повышения коэффициента пропускания объектива путём нанесения просветляющих покрытий. В разделе 3 рассмотрено использование просветляющих покрытий.

1. Постановка задачи

Известно, что цена многоэлементного приемника излучения напрямую зависит от геометрических размеров его светочувствительной области, поэтому одним из наиболее распространенных форматов камер является формат 1/3" с диагональю кадра $2y'=6$ мм, сочетающий относительно высокое качество изображения с невысокой ценой.

В рамках данного исследования была поставлена задача создания широкоугольного объектива с углом поля $2\omega=90^\circ$, ахроматизованного в спектральном диапазоне от 0,48 до 2,1 мкм. При данных соотношениях углового поля, диагонали приемника излучения и возможной отрицательной дисторсии фокусное расстояние объектива лежит в диапазоне от 3,0 до 4,1 мм. Одним из наиболее важных требований являлось получение существенного заднего фокального отрезка $s'_F=6$ мм. В этом случае отношение заднего фокального отрезка к фокусному расстоянию должно составлять 1,5...2,0. Оптическая схема объектива такого типа структурно относится к реверсивным телеобъективам [10].

Большинство известных фотообъективов по совокупности параметров не отвечают предъявляемым требованиям, и их оптические схемы не могут быть положены в основу при разработке требуемой системы.

Разработке конкретной схемы объектива предшествовала работа по анализу дисперсионных характеристик оптических стекол ведущих производителей *LZOS*, *SCHOTT*, *OHARA* в выбранном спектральном диапазоне. Для этого были построены диаграммы $P-\nu$, которые были использованы для выбора пар стекол, пригодных для уменьшения вторичного спектра. Значения P – относительной частной дисперсия и ν – коэффициента Аббе определялись для широкого спектрального диапазона ахроматизации.

2. Параметрический синтез объективов

В качестве метода синтеза окончательного варианта решения был выбран метод модификации объектива-аналога, а в качестве исходной оптической системы использовался модифицированный вариант одной из оптических схем трёхгруппового широкоугольного объектива из базы данных кафедры РЛ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Первая группа исходного объектива имела отрицательную оптическую силу и была построена из двух одиночных линз и склеенного элемента. Вторая и третья группы положительной оптической силы каждая были построены из двух склеенных элементов. Апертурная диафрагма размещалась между второй и третьей группами.

Параметрический синтез объектива проводился с использованием программ оптимизации широко известных отечественного и зарубежного пакетов прикладных программ *OPAL* и *ZEMAX* [8, 9].

Различные варианты оптимизаторов, отличающиеся числом лучей в осевом и наклонных пучках, а также требованиями к значениям исправляемых aberrаций, были опробованы в процессе поиска оптимального варианта оптической схемы объектива. Практика показала, что при оптимизации необходимо задавать желаемое значение дисторсии отличное от нуля. В противном случае, трудно получить оптимальное решение. Параллельно проводилась оптимизация aberrаций по волновому критерию [8, 9].

Модификация двух последних групп проводилась с помощью специальной программы, вклад в хроматические aberrации каждой из групп определялся расчётом их aberrаций [11, 12].

С целью уменьшения хроматической aberrации положения и вторичного спектра выбирались пары стекол с близкой по значению P относительной частной дисперсией. Для поиска оптимального решения, с точки зрения ахроматизации, стёкла выбирались как из отечественного каталога *LZOS*, так и из зарубежных каталогов *SCHOTT* и *OHARA*. Исследования показали, что использование стекол с особым ходом дисперсии (марки ФК-14, ОФ-6, ОК-4, ФФС-2) затруднительно, так как приводит к усложнению оптической схемы из-за малых значений показателей преломления. В связи с этим диаграмма P - ν относительных частных дисперсий от коэффициента средней дисперсии была построена для широкого спектрального диапазона ахроматизации. Это позволило подобрать пары стекол с традиционным значением дисперсии в видимом диапазоне, но с лучшим соотношением относительной частной дисперсии в широком спектральном диапазоне ахроматизации.

На конечных этапах проектирования использовалась программа *ZEMAX*. Для контроля дисторсии в оптимизационной модели программы *ZEMAX* были заданы ограничения на ее значения. Максимальное значение дисторсии, лежащее в диапазоне от минус 18 % до минус 20 %, задавалось с помощью оператора *DIMX* для крайнего и зонального значения углового поля объектива. Дополнительно был использован метод *Hammer* оптимизации с заменой марок оптического стекла [9].

Оценка качества изображения исходной схемы и полученных вариантов проводилась с использованием таких критериев, как среднеквадратичный (СКВ) радиус пятна рассеяния и значение полихроматической модуляционной передаточной функции (МПФ) для меридиональной и сагиттальной ориентации штрихов на пространственных частотах $N = 40 \text{ мм}^{-1}$ и $N = 60 \text{ мм}^{-1}$. Выбранные значения частот соответствуют частотам разрешения зарубежных многоэлементных приемников излучения, работающих в спектральных диапазонах от 0,48 до 1,7 мкм и от 0,9 до 2,2 мкм с размерами отдельной светочувствительной ячейки (пикселя) от 25 до 30 мкм [3, 4].

Сравнительные результаты оценки качества изображения вариантов объектива для трёх диапазонов ахроматизации сведены в таблицы 1, 2. Полученные варианты отличаются использованными марками стекол. Основные оптические и габаритные характеристики вариантов объектива представлены в таблице 3.

Таблица 1

СКВ радиус пятна рассеяния вариантов объектива

Вариант	СКВ радиус пятна рассеяния (мкм) в функции углового поля ω , (градус)											
	0	20,60	30,02	37,12	0	20,60	30,02	37,12	0	20,60	30,02	37,12
	$\lambda = 0,48 \dots 2,1 \text{ мкм}$				$\lambda = 0,48 \dots 1,7 \text{ мкм}$				$\lambda = 0,9 \dots 2,1 \text{ мкм}$			
21N3	15,40	16,74	17,08	17,11	8,81	10,90	11,40	11,49	17,89	19,28	19,49	19,19
21N4	14,24	16,66	17,85	18,54	8,88	12,09	13,63	14,63	15,25	17,75	18,76	19,02
21NR	11,11	13,58	15,00	16,44	7,61	9,96	11,24	12,85	12,56	15,29	16,32	16,71
22D	13,48	14,47	14,76	15,16	7,29	9,14	9,35	9,20	11,19	12,78	12,92	12,73

Таблица 2

Значения МПФ вариантов объектива

Вариант	Простр. частота N , мм^{-1}	Значение МПФ (мер/саг) в функции углового поля ω , (градус)								
		0	20,60	37,12	0	20,60	37,12	0	20,60	37,12
		$\lambda = 0,48 \dots 2,1 \text{ мкм}$			$\lambda = 0,48 \dots 1,7 \text{ мкм}$			$\lambda = 0,9 \dots 2,1 \text{ мкм}$		
21N3	40	0,51	0,41/ 0,47	0,42/ 0,46	0,59	0,48/ 0,54	0,50/ 0,53	0,43	0,38/ 0,40	0,39/ 0,40
	60	0,40	0,25/ 0,33	0,29/ 0,32	0,46	0,28/ 0,39	0,33/ 0,38	0,36	0,26/ 0,30	0,27/ 0,30
21N4	40	0,49	0,40/ 0,46	0,38/ 0,42	0,58	0,50/ 0,54	0,46/ 0,50	0,45	0,93/ 0,41	0,37/ 0,40
	60	0,40	0,27/ 0,34	0,25/ 0,32	0,48	0,33/ 0,41	0,30/ 0,38	0,37	0,27/ 0,31	0,24/ 0,30
21NR	40	0,46	0,40/ 0,43	0,23/ 0,41	0,53	0,46/ 0,51	0,27/ 0,48	0,37	0,32/ 0,34	0,35/ 0,36
	60	0,31	0,25/ 0,28	0,18/ 0,28	0,35	0,30/ 0,32	0,22/ 0,32	0,23	0,20/ 0,22	0,25/ 0,22
22D	40	0,50	0,39/ 0,46	0,43/ 0,45	0,63	0,54/ 0,61	0,57/ 0,61	0,47	0,42/ 0,45	0,44/ 0,45
	60	0,47	0,25/ 0,41	0,35/ 0,41	0,50	0,36/ 0,45	0,42/ 0,45	0,39	0,29/ 0,34	0,32/ 0,34

Таблица 3

Основные характеристики вариантов объектива

Вариант	Основные оптические характеристики				Примечания
	Фокусное расстояние f' , мм	Задний фокальный отрезок $s'_{F'}$, мм	Относительное отверстие D/f'	Угловое поле 2ω , град.	
21NR	4,1289	5,5156	1:2,10	86,53	Исходный вариант
21N3	4,1082	4,8759	1:2,11	86,53	Замена: ТБФ10 (LZOS) $\rightarrow$ S-LAN55 (OHARA)
21N4	4,1307	5,5588	1:2,12	86,53	Замена отн. 21N3: ТФ10 (LZOS) $\rightarrow$ LASF32 (SCHOTT)
22D	3,9259	5,7756	1:2,01	90,00	<i>Hammer optimization</i>

Анализ приведенных результатов позволяет оценить уровень абберационной коррекции каждого из полученных вариантов. Из рассмотрения результатов видно, что лучшее качество достигнуто в варианте **22D**, полученном с помощью *Hammer* оптимизации. Для точки на оси значение МПФ составляет 0,47 на пространственной

частоте $N = 60 \text{ мм}^{-1}$, а для точки вне оси для угла поля $\omega = 0,866\omega_{\text{max}}$ значения МПФ равны 0,43/0,45 (мер/саг) на частоте $N = 40 \text{ мм}^{-1}$. СКВ радиус пятна рассеяния составляет для точки на оси 13,48 мкм, а для точки вне оси для угла поля $\omega = 0,866\omega_{\text{max}}$ – 15,16 мкм в широком спектральном диапазоне от 0,48 до 2,1 мкм. Как видно из таблиц 1, 2 работа в более узком спектральном диапазоне приводит к повышению контраста и уменьшению СКВ радиуса пятна рассеяния.

Недостатком варианта **22D** является использование большого числа различных марок стекол (девять марок) зарубежного производителя (*SCHOTT*).

Оптическая схема варианта объектива **22D** представлена на рис. 3. Объектив включает 17 сферических поверхностей, образующих 10 линз, три склеенных элемента. Оптическая схема объектива обеспечивает следующие оптические и габаритные характеристики: $f' = 3,93 \text{ мм}$, $s'_F = 5,81 \text{ мм}$, $L = 42,77 \text{ мм}$, $D/f = 1:2,01$, $2\omega = 90^\circ$ ($2y' = 6 \text{ мм}$). Дисторсия на краю поля составляет минус 24,0 %.

Рис. 3. Оптическая схема объектива **22D** из стекол производства *SCHOTT*

Более полное представление об абберационной коррекции можно получить из рассмотрения графиков aberrаций объектива **22D**, построенных в программе *ZEMAX* и представленных на следующих рисунках: зависимости астигматических отрезков и относительной дисторсии от углового поля объектива (рис. 4), распределение дифракционной функции концентрации энергии в пятне рассеяния (рис. 5), модуляционная передаточная функция для диапазонов от 0,48 до 2,1 мкм (рис. 6), от 0,48 до 1,7 мкм (рис. 7).

Рис. 4. Кривизна поля и дисторсия объектива 22D

Рис. 5. Полихроматическая дифракционная функция концентрации энергии в пятне рассеяния объектива 22D

Рис. 6. МПФ объектива **22D** для диапазона длин волн от 0,48 до 2,1 мкм

Рис. 7. МПФ объектива **22D** для диапазона длин волн от 0,48 до 1,7 мкм

Несколько худшие результаты получены при абберационной коррекции варианта **21NR** (табл.1, 2). Важным преимуществом этого варианта является использование марок стекол только отечественного производства, выпускаемых *LZOS*. Из рассмотрения результатов видно, что для спектрального диапазона от 0,48 до 2,1 мкм на пространственной частоте $N = 60 \text{ мм}^{-1}$ для точки на оси получено значение МПФ 0,31, а СКВ радиус пятна рассеяния составляет 11,11 мкм. Для точки вне оси на частоте $N = 40 \text{ мм}^{-1}$ значения МПФ равны 0,23/0,41 (мер/сиг), СКВ радиус пятна рассеяния – 16,44 мкм. При переходе в спектральный диапазон от 0,48 до 1,7 мкм несколько повышается контраст и уменьшается СКВ радиус пятна рассеяния.

Оптическая схема варианта объектива **21NR** представлена на рис. 8. Объектив включает 17 сферических поверхностей, образующих 10 линз, три склеенных элемента. Оптическая схема объектива обеспечивает следующие оптические и габаритные характеристики: $f'=4,13 \text{ мм}$, $s'_F=5,52 \text{ мм}$, $L=55,99 \text{ мм}$, $D/f'=1:2,06$, $2\omega=86^\circ 53'$ ($2y'=6 \text{ мм}$). Дисторсия на краю поля составляет минус 23,2 %.

Рис. 8. Оптическая схема объектива **21NR** (из стекол *LZOS*)

Ниже представлены построенные в *ZEMAX* графики зависимостей астигматических отрезков и относительной дисторсии от углового поля объектива (рис. 9), распределение дифракционной функции концентрации энергии в пятне рассеяния (рис. 10), модуляционная передаточная функция для диапазонов от 0,48 до 2,1 мкм (рис. 11), от 0,48 до 1,7 мкм (рис. 12).

Рис. 9. Кривизна поля и дисторсия объектива 21NR

Рис. 10. Полихроматическая дифракционная функция концентрации энергии в пятне рассеяния объектива 21NR

Рис. 11. МПФ объектива **21NR** для диапазона длин волн от 0,48 до 2,1 мкм

Рис. 12. МПФ объектива **21NR** для диапазона длин волн от 0,48 до 1,7 мкм

Использование просветляющих покрытий

Программа *ZEMAX EE* позволяет проводить расчёт коэффициента пропускания ОС по формуле Френеля с учётом поглощения в материалах линз реальной толщины как при отсутствии просветляющих покрытий, так и при нанесении покрытий. Характеристики некоторых просветляющих покрытий, представленных в программе *ZEMAX EE*, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики просветляющих покрытий

Тип покрытия	Материал	Толщина слоя, мкм
<i>AR</i> (однослойное)	MgF ₂	0,25
<i>WAR</i> (2х-слойное)	MgF ₂	0,25
	La2O ₃	0,50
<i>HEAR1</i> (3х-слойное)	MgF ₂	0,25
	ZrO ₂	0,50
	CEP3	0,25

Для оценки возможности повышения коэффициента пропускания объектива путём нанесения покрытий, представленных в табл. 4, были проведены расчёты коэффициента пропускания объектива при наличии и отсутствии покрытий, а также путём нанесения идеального широкополосного просветляющего покрытия с остаточным коэффициентом отражения $\rho=1\%$. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5

Коэффициент пропускания объектива **21NR**

Длина волны, мкм	Тип покрытия				
	Без покрытия	<i>AR</i>	<i>WAR</i>	<i>HEAR1</i>	Идеальное ($\rho = 1\%$)
	Коэффициент пропускания				
0,480	0,339	0,368	0,207	0,153	0,822
0,546	0,358	0,363	0,345	0,343	0,850
0,768	0,372	0,708	0,602	0,365	0,852
1,050	0,376	0,927	0,927	0,847	0,849
1,300	0,382	0,854	0,952	0,921	0,852
1,700	0,384	0,690	0,584	0,341	0,847
2,100	0,389	0,512	0,360	0,160	0,848
Σ	0,372	0,643	0,568	0,447	0,846

Результаты расчёта показывают, что нанесение одно, двух и трёхслойных покрытий из-за их узкополосности не приводит к существенному увеличению коэффициента пропускания. С целью повышения коэффициента пропускания во всём спектральном диапазоне проведен синтез широкополосных покрытий на спектральные

диапазоны от 0,48 до 2,1 мкм и от 0,48 до 1,7 мкм, который показал, что существуют предпосылки по созданию широкополосных покрытий с коэффициентами отражений от 1 % до 1,5 %.

Заключение

В рамках создания широкоугольного реверсивного телеобъектива с широкой областью ахроматизации были решены задача оптимального выбора стекол с традиционным значением дисперсии в видимом диапазоне, но с лучшим соотношением относительной частной дисперсии в широком спектральном диапазоне ахроматизации, задача создания оптимизационных моделей для синтеза объективов в программах *OPAL* и *ZEMAX* и задача моделирования просветляющих покрытий в программе *ZEMAX*. Расчет коэффициента пропускания объектива показал актуальность более детального исследования в области создания многослойных широкополосных просветляющих покрытий с коэффициентами отражений от 1 % до 1,5 %.

Были рассчитаны два варианта (**22D** и **21NR**) объектива на основе зарубежного и отечественного каталогов стекол. Экспериментальный образец объектива **21NR** на основе отечественного каталога был разработан и изготовлен. Испытания объектива продемонстрировали хорошее соответствие расчетных и реальных параметров и подтвердили возможность разработки высококачественного объектива **22D** на основе зарубежных стекол, который может найти применение в телевизионных устройствах обнаружения объектов в сложных фоновых обстановках, устройствах машинного зрения и оптических системах, работающих при низких уровнях освещённости.

Настоящая работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Исследование возможности создания параметрического ряда объективов с расширенным спектральным диапазоном работы (№ государственной регистрации 01 2011 77489 от 01 ноября 2011 года)».

Список литературы

1. Белоконев В.В, Волков В.Г. Приборы ночного видения с фотоприёмниками на основе InGaAs // Электроника. 2009. № 2. С. 82-85.
2. Tech Briefs. Режим доступа: <http://www.defensetechbriefs.com/> (дата обращения 01.02.2012).
3. Goodrich Corporation SU640KTSX, SU320KTSW. Режим доступа: <http://www.sensorsinc.com/> (дата обращения 01.02.2012).

4. MARS SW 320x256. Режим доступа: <http://microbolometer.ru/catalog/2-irsensors/18-mars-sw.html> (дата обращения 01.02.2012).
5. Navitar. SWIR Hyperspectral Lenses. Режим доступа: <http://machinevision.navitar.com> (дата обращения 01.02.2012).
6. Hyperspectral Coastol Opt Lens. Режим доступа: <http://www.jenoptik-inc.com/> (дата обращения 01.02.2012).
7. Понин О.В., Архипова Л.Н., Тарабукин В.Н. Новые апохроматические объективы для аппаратуры широкозахватной мультиспектральной космической съёмки // Международная конференция «Прикладная оптика 2010»: тез. докл. Санкт-Петербург, 2010. С. 60.
8. Пакет программ автоматизированного проектирования оптических систем OPAL-PC : руководство для пользователя. Электрон. программа / Ленинград. инст. точной механики и оптики. Спб., 1992.
9. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation. 2008. 732 p.
10. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Проектирование реверсивных телеобъективов с вынесенным входным зрачком. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 36 с.
11. Крюков А.В., Поспехов В.Г., Ровенская Т.С., Сушков А.Л. Компьютерный синтез оптических систем : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 37 с.
12. А.В. Крюков, В.Г. Поспехов, Т.С. Ровенская, А.Л. Сушков. Компьютерный синтез оптических систем : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 62 с.

Research in calculation of the lens with wide achromatization

09, September 2012

DOI: 10.7463/0912.0455859

Pospehov V.G., Kryukov A.V., Matveev D.S.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

vychposp@yandex.ru

alex_krioukov@mail.ru

The subject of the study is optical systems operating in the extended spectral range, including visible and near-infrared wavelengths. The article presents a review of foreign cameras and lenses that work in these areas of the spectrum, and the results of research in the field of designing a wide angle reversible lens for the 1/3 ² camera. The authors consider problems of optimal choice of lens materials from different catalogues of optical glass, problems of creating optimization models in OPAL and ZEMAX programs, modeling tasks of antireflection coatings for operation in a wide range of the spectrum. The authors also provide a comparative analysis and comprehensive assessment of the image quality of a number of decisions.

Publications with keywords: [SWIR](#), [chromatic aberration](#), [optical system design](#), [optical system optimization](#), [multispectral imaging](#), [hyperspectral lenses](#)

Publications with words: [SWIR](#), [chromatic aberration](#), [optical system design](#), [optical system optimization](#), [multispectral imaging](#), [hyperspectral lenses](#)

References

1. Belokonev V.V, Volkov V.G. Pribory nochnogo videniia s fotopriemnikami na osnove InGaAs [Night vision devices with photodetectors based on InGaAs]. *Elektronika*, 2009, no. 2, pp. 82-85.
2. *Tech Briefs*. Available at: <http://www.defensetechbriefs.com/> , accessed 01.02.2012.
3. *Goodrich Corporation SU640KTSX, SU320KTSW*. Available at: <http://www.sensorsinc.com/> , accessed 01.02.2012.
4. *MARS SW 320x256*. Available at: <http://microbolometer.ru/catalog/2-irsensors/18-mars-sw.html> , accessed 01.02.2012.
5. *Navitar. SWIR Hyperspectral Lenses*. Available at: <http://machinevision.navitar.com>, accessed 01.02.2012.
6. *Hyperspectral Coastol Opt Lens*. Available at: <http://www.jenoptik-inc.com/> , accessed 01.02.2012.

7. Ponin O.V., Arkhipova L.N., Tarabukin V.N. Novye apokhromaticheskie ob"ektivy dlia apparatury shirokozhvatnoi mul'tispektral'noi kosmicheskoi s"emki [New apochromatic objective lens for equipment for wide-cut multispectral space survey]. *Mezhdunarodnaia konferentsiia «Prikladnaia optika 2010»: tez. dokl.* [International conference «Applied optics 2010»: abstracts of the reports]. Sankt-Peterburg, 2010, p. 60.
8. *Paket programm avtomatizirovannogo proektirovaniia opticheskikh sistem OPAL-PC : rukovodstvo dlia pol'zovatel'ia. Elektron. programma* [Computer-aided design software package of optical systems OPAL-PC: user's guide. Electronic program]. Sankt-Peterburg, Leningrad Institute of Fine Mechanics and Optics, 1992.
9. *ZEMAX Optical Design Program. User's Guide*. Tucson, Arizona, USA, Zemax Development Corporation, 2008. 732 p.
10. Rovenskaia T.S., Kriukov A.V. *Proektirovanie reversivnykh teleob"ektivov s vynesennym vkhodnym zrachkom* [Designing of reverse telephoto lenses with removed entrance pupil]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 36 p.
11. Kriukov A.V., Pospekhov V.G., Rovenskaia T.S., Sushkov A.L. *Komp'iuternyi sintez opticheskikh sistem. V 2 ch. Ch. 1* [Computer synthesis of optical systems. In 2 parts. Pt. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 37 p.
12. A.V. Kriukov, V.G. Pospekhov, T.S. Rovenskaia, A.L. Sushkov. *Komp'iuternyi sintez opticheskikh sistem. V 2 ch. Ch. 2* [Computer synthesis of optical systems. In 2 pts. Pt. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 62 p.