

ПАРАКСИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ПАНКРАТИЧЕСКОГО LWIR ОБЪЕКТИВА

Дмитрий Азатович Избульдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (909)531-46-55, e-mail: izhbuldin.dima@gmail.com

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Рассмотрены тенденции в развитии ИК объективов, возможные проблемы и решения, возникающие при разработке LWIR панкратических объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми матричными приемниками, продукция различных компаний и характеристики производимых ими объективов. Произведен анализ рассмотренной продукции, вследствие чего выявлены наиболее оптимальные характеристики для разработки. Целью исследования является получение в параксиальном приближении математической модели панкратического LWIR объектива, сопрягаемого с неохлаждаемым матричным приемником, и выявление зависимостей в такой модели. Результаты исследования будут использованы для дальнейших теоретических и практических исследований в рамках магистерской диссертации.

Ключевые слова: оптическая система, объектив переменного фокусного расстояния, тепловизионные приборы и системы, неохлаждаемые приемники излучений

PARAXIAL SYNTHESIS OF LWIR CONTINUOUS ZOOM LENS SYSTEM

Dmitry A. Izhbuldin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate of the Department of Photonics and Device Engineering, phone: (909)531-46-55, e-mail: izhbuldin.dima@gmail.com

Tatiana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor of the Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Trends in the development of IR lens systems, possible problems and solutions arising in the development of LWIR variofocal lens systems interfaced with uncooled matrix receivers, company products and the characteristics of the lens systems they produce are considered. The analysis of the considered products has been carried out, as a result of which the most optimal characteristics for development have been identified. The aim of the study is to obtain in the paraxial approximation a mathematical model of a variofocal LWIR objective coupled with an uncooled matrix receiver, and to identify the relations in such a model. The research results will be used for further theoretical and practical research in the master thesis.

Keywords: optical system, varifocal lens system, thermal imaging devices and systems, uncooled radiation receivers

Введение

В оптико-электронном приборостроении как гражданского (коммерческого), так и военного (тактического) назначения наблюдается постоянный спрос на инфракрасные (ИК) объективы с улучшенными характеристиками. Это обусловлено возрастающими требованиями к дальности обнаружения и распознавания объектов тепловизионными приборами (каналами) при одновременном уменьшении массогабаритных характеристик последних [1].

Принцип построения оптических схем ИК объективов существенно различается в зависимости от типа приемника излучений, с которым он должен сопрягаться в тепловизионном приборе. Сопряжение с охлаждаемым приемником излучений требует при разработке объектива обеспечить в нем коррекцию аберраций при несимметричном положении оптических элементов относительно апертурной диафрагмы [2]. Оптические системы инфракрасных объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений, в простейшем исполнении по своей структуре являются двухкомпонентными [3].

Спектральные диапазоны работы ИК объективов определяются спектральными характеристиками приемников излучений и традиционно обозначаются как ближний ИК-диапазон (NWIR, с длинами волн от 0,7 до 0,9 мкм); коротковолновый ИК-диапазон (SWIR – от 0,9 до 3,0 мкм); средневолновый ИК-диапазон (MWIR – от 3 до 5 мкм); длинноволновый ИК-диапазон (LWIR – от 8 до 14 мкм).

Возрастание требований к качеству сформированного ИК объективом изображения коррелируют с тенденциями в технологии производства приемников ИК излучения. Основные тенденции в технологии производства приемников ИК излучения – уменьшение размеров пикселей матричных приемников при одновременном увеличении размеров чувствительных площадок приемников [4] – влекут за собой изменение оптических систем объективов из-за необходимости более высокой степени коррекции аберраций объективов и повышения их угловых полей.

Возрастание стоимости как приемников излучений, так и ИК объективов стимулирует разработчиков применять ИК объективы со сменными характеристиками, тем самым расширяя эксплуатационные возможности тепловизионных приборов по наблюдению объектов с различными масштабами и полями.

В этом случае к традиционным проблемам, которые решаются при разработке ИК объективов для LWIR диапазона, а именно: необходимость обеспечивать высокие относительные отверстия, особенно при сопряжении с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений; осуществлять коррекцию хроматических аберраций при ограниченном номенклатурном ряде оптических материалов; ограничивать количество линзовых компонентов в силу необходимости снижения потерь внутри объектива на поглощение и рассеяния на просветляющих покрытиях преломляющих поверхностей, – добавляются трудности, связанные с поиском оптимальной структурной схемы построения объектива, обеспечивающей наибольший перепад фокусных расстояний при наиболее простой реализации отдельных компонентов схемы.

Поскольку задача синтеза является многовариантной, то в настоящем исследовании задача ограничена поиском частных решений для параксиального синтеза LWIR панкратического объектива с характеристиками, соответствующими

«типовому» на сегодня образцу, а в качестве основного научного метода исследования выступают компьютерные методы проектирования оптических систем.

Выбор характеристик «типового» объектива для исследования

Основываясь на анализе продукции компаний «Ophir Optronics Solutions Ltd», «Temmek Optics Ltd», ООО «Интегрированные электронно-оптические системы» и «RP OPTICAL LAB» [5-8] составлена табл. 1, в которой приведены характеристики и доля (в процентах) выпускаемых LWIR панхроматических объективов, сопрягаемых с неохлаждаемыми приемниками, относительно остальных объективов компаний, с целью выявления тенденций и определения «типового» объектива для дальнейшего исследования.

Таблица 1

Продукция LWIR панхроматических объективов рассмотренных компаний

Название компании – δ , %	Наименование модели объектива	Фокусное расстояние, мм/отн. отв.	Поле зрения по гор., градус	Коэффициент пропускания, %	Задний фокальный отр., мм	Масса, г /габаритные размеры, мм
«Temmek Optics Ltd» – 22,2	RONIT 100	15-100/1:1,4	39,9-6,2	83	20,0	1040/ Ø94x137
	RONIT 150	25-150/1:1,4	24,5-4,1	83	27,6	1315/ Ø116x161
	RONIT 150XL	25-150/1:1,4	38,4-6,6	83	23,0	2290/ Ø156x190
	RONIT 210XL	40-210/1:1,5	24,5-4,7	80	48,0	4500/ Ø165x318
	OFEK 225	25-225/1:1,5	24,5-2,8	83	30,0	400/ Ø179x220
	RONIT 70	25-70/1:1,6	8,9-25,5	83	19,0	250/ Ø52x59
«Ophir Optronics Solutions LTD» – 9,5	680164	15-60/1:1,4	44,2-10,4	81	25,0	500/ Ø62x89
	680386	15-75/1:1,2	52,0-9,6	79	20,8	320/Ø76x88
	680151	30-100/1:1,6	33,9-9,8	80	31,6	650/Ø94x105
	680320	26-105/1:1,6	28,7-6,7	83	37,7	575/Ø82x122
	680119	25-150/1:1,4	41,5-6,6	75	28,0	1900/Ø141x133
	680157	25-225/1:1,5	41,1-4,4	75	30,7	4300/Ø178x239
	680264	40-300/1:1,5	26,8-3,3	82	56,0	9500/Ø204x299
«RP OPTICAL LAB» – 10,8	CEDAR	15-100/1:1,4	42,0-6,2	–	11,0	1000/Ø115x119
	TOPAZC	18-60/1:1,4	33,6-10,3	–	5,9	220/Ø70x56
	YARKON	24-90/1:0,9	28,7-7,8	–	–	1200/Ø113x120
	PECAN	24-105/1:1,5	25,5-5,9	–	11,3	1000/Ø85x130
	DEKEL	25-150/1:1,4	24,5-4,1	–	7,3	1000/Ø116x154
	KEW	25-225/1:1,5	24,5-2,8	–	12,2	3000/Ø188x208
	CONDOR	40-300/1:1,5	25,8-3,2	–	18,0	5900/Ø238/293
«IEOS» – 9,2	–	30-120/1:1,2	20,6-5,2	81	20,0	–/Ø144/160
	–	7,5-75/1:1,2	71,9-8,3	81	13,0	620/Ø116/131
	–	25-225/1:1,5	38,3-4,4	81	20,0	–/Ø194/237
	–	25-100/1:1,2	24,6-6,2	81	20,0	–/Ø119/156,55
	–	30-400/1:1,5	32,4-2,5	80	20,0	14000/Ø305/461
	–	18-54/1:1,0	33,6-11,5	81	13,5	–/Ø84/89
	–	25-75/1:1,0	24,6-8,3	84	20,0	–/Ø115/144

Анализируя характеристики, представленные в табл.1, сделаны следующие выводы:

- процентное соотношение рассмотренных панкратических объективов LWIR диапазона, сопрягаемых с неохлаждаемыми приемниками относительно других объективов, составляет от 9 % до 22 %, в среднем примерно 10 %;

- среднее значение наименьшего фокусного расстояния составляет 25 мм, а перепад фокусных расстояний (zoom) для большинства объективов составляет от 3 до 9 крат, причем среднее значение приходится на диапазон от 5 до 6 крат. Наибольший перепад фокусных расстояний в объективах до 2020 г. составлял 9 крат, на момент подготовки статьи – 13 крат;

- относительные отверстия большинства объективов лежат в диапазоне от 1:1,2 до 1:1,6, при этом среднее значение равно 1:1,4, а большее значение диафрагменного числа имеет место у моделей, имеющих более высокое значение наибольшего фокусного расстояния;

- длина панкратических объективов находится в диапазоне от 0,8 до 1,6 от наибольшего фокусного расстояния;

- наружные диаметры оправ панкратических объективов превышают диаметры входных зрачков при наибольшем фокусном расстоянии приблизительно от 1,1 до 1,5 раз;

- массы панкратических объективов разных моделей составляют от 220 до 14000 г, а диапазон рабочей температуры у всех объективов составляет от минус 30 °С до плюс 60 °С;

- наибольшее поле зрения в рассмотренных объективах достигается в подавляющем большинстве случаев при сопряжении с матрицами разрешения 640x480 и размером пиксела 17 мкм.

На основании вышеприведенных выводов для исследования определены характеристики «типового» панкратического LWIR объектива: относительное отверстие 1:1,5, зум с кратностью от 5 до 6, наибольшее фокусное расстояние от 200 до 240 мм, формат неохлаждаемого матричного приемника 640x480, размер пиксела 17 мкм.

Методика исследования, результаты и обсуждение

Принимая во внимание дополнительное требование по обеспечению фиксированного расстояния между первым и последним компонентом и постоянство относительного отверстия для параксиального синтеза LWIR панкратического объектива выбрана схема трансфокатора.

В отличие от схемы вариобъектива, фокусное расстояние которого непрерывно изменяется за счет перемещения его компонентов вдоль оптической оси и изменения расстояния между первым и последним компонентом объектива [9], в трансфокаторе при фиксированном фокусном расстоянии последнего компонента, изменение фокусного расстояния достигается за счет изменения углового увеличения афокальной части трансфокатора. При этом постоянство длины афокальной части может достигаться путем применения двух подвиж-

ных компонентов при фиксированном положении первого. В основу исследования положена гипотеза, что при такой схеме построения возможно найти частные решения, обеспечивающие равенство выходных зрачков и их положений для афокальной части при всех увеличениях последней, что позволит сохранить неизменным относительное отверстие панкратического объектива на всем диапазоне изменения фокусных расстояний.

На первом этапе был выбран диапазон фокусных расстояний объектива от 40 до 200 мм. Размер изображения принят 10,88x8,16 мм (диагональ 13,6 мм), соответствующий выбранному приемнику ИК излучения. Относительное отверстие системы принято равно 1:1,5. В результате применения компьютерных методов оптимизации [10] получено решение в параксиальном приближении, иллюстрируемое рис. 1.

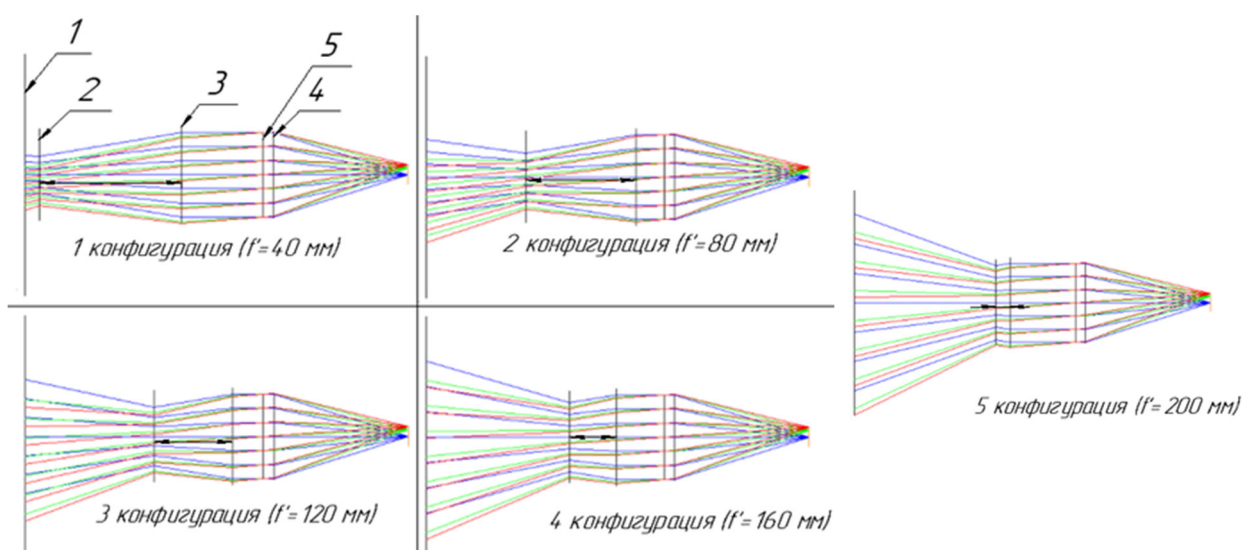


Рис.1. Ход лучей и положения компонентов в пяти конфигурациях с фокусными расстояниями от 40 до 200 мм:

1, 4 – неподвижные компоненты; 2, 3 – подвижные компоненты; 5 – апертурная диафрагма

В этом решении получена длина системы равная 255 мм, значения фокусных расстояний компонентов: 1 компонент 160,8 мм; 2 компонент минус 50 мм; 3 компонент 186 мм и 4 компонент 90 мм. Наибольший диаметр составляет 168 мм, диаметр апертурной диафрагмы – 60 мм. Исследования проводились в параксиальном приближении с использованием мультikonфигурационного режима в программе «Zemax».

Количество конфигураций принималось равным пяти или шести (в соответствии с перепадом фокусных расстояний объектива). В оптимизационную модель для каждой из конфигураций включалось требуемое значение характеристик (фокусное расстояние объектива, поле), переменные параметры (осе-

вые расстояния и фокусные расстояния компонентов), ограничения на конструктивные параметры (постоянство длины объектива и диаметра апертурной диафрагмы, фиксированное положение диафрагмы).

На втором этапе моделировались варианты с длиной от 255 до 400 мм. Задача этого этапа – понять, как изменение общей длины системы влияет на относительные отверстия компонентов. Анализ результатов компьютерного синтеза приведен в табл. 2.

Таблица 2

Влияние длины оптической системы на относительные отверстия компонентов

Длина оптической системы, мм	Относительное отверстие			
	1 компонент	2 компонент	3 компонент	4 компонент
255	1:0,95	1:0,74	1:2,71	1:1,46
265	1:0,95	1:0,74	1:2,71	1:1,42
280	1:0,94	1:0,75	1:2,77	1:1,41
295	1:0,94	1:0,75	1:2,85	1:1,41
310	1:0,94	1:0,75	1:2,92	1:1,41
400	1:0,91	1:0,76	1:3,34	1:1,41

Исходя из данных табл. 2, можно предположить, что с целью лучшей коррекции aberrаций компоненты 1 и 2 будут сложными и включать несколько линз. Отмечается, что повышение длины наиболее явно сказывается на относительном отверстии компонента 3, при этом относительное отверстие наибольшего по диаметру компонента 1 возрастает.

Далее, на этапе 3, рассмотрено влияние повышения zoom на общую длину и относительные отверстия компонентов. С этой целью к существующим пяти конфигурациям была добавлена шестая с фокусным расстоянием 240 мм, т. е. был увеличен верхний порог фокусных расстояний. Выявлено, что в этом случае все заданные условия выполняются, начиная с длины оптической системы, равной 285 мм, а увеличение zoom влечет за собой увеличение длины объектива и диаметров компонентов: так, диаметр компонента 1 возрос с 168 (этап 2) до 204 мм.

В табл. 3 приведены значения относительных отверстий компонентов по результатам моделирования на этапе 3.

Таблица 3

Влияние длины оптической системы на относительные отверстия компонентов в случае увеличения верхнего порога фокусного расстояния

Длина оптической системы, мм	Относительное отверстие			
	1 компонент	2 компонент	3 компонент	4 компонент
285	1:0,97	1:0,76	1:2,68	1:1,46
300	1:0,97	1:0,76	1:2,68	1:1,41
315	1:0,97	1:0,77	1:2,74	1:1,41
350	1:0,95	1:0,77	1:2,93	1:1,41

На этапе 4 рассмотрено достижение zoom 6 крат путем изменения нижнего порога фокусного расстояния, а именно от 33,33 до 200 мм. Выявлено, что все заданные условия выполняются, начиная с длины оптической системы равной 275 мм, т.е. при увеличении нижнего порога, оптическая система имеет меньшую длину, чем в случае увеличении верхнего порога фокусных расстояний.

Аналогичный характер имеет и изменение диаметра компонента 1 – он возрастает, но меньше, чем в варианте на этапе 3 (до 176 мм). Анализ результатов моделирования на этапе 4 приведен в табл. 4.

Таблица 4

Влияние длины оптической системы на относительные отверстия компонентов в случае увеличения нижнего порога фокусного расстояния

Длина оптической системы, мм	Относительное отверстие			
	1 компонент	2 компонент	3 компонент	4 компонент
275	1:0,88	1:0,72	1:3,01	1:1,47
290	1:0,88	1:0,72	1:3,01	1:1,42
305	1:0,88	1:0,72	1:3,07	1:1,41
320	1:0,88	1:0,72	1:3,14	1:1,41

Сравнение результатов, приведенных в табл. 2 – 4, показывает, что наиболее высокие относительные отверстия первого компонента появляются в вариантах с большими угловыми полями. Можно предположить, что именно в таких объективах возникает необходимость применения асферических поверхностей.

При возрастании перепада фокусных расстояний из-за сложности коррекции хроматических аберрации при наибольшем фокусном расстоянии перспективно применение киноформных оптических элементов, что, согласно [11,12], позволит уменьшить количество линз на 30 % по сравнению с обычной оптикой.

Заключение

В заключение отмечаются следующие результаты проведенного параксиального синтеза панкратического LWIR объектива:

– увеличение zoom, вне зависимости от значений верхнего или нижнего порога фокусных расстояний, ведет к увеличению длины системы, диаметров компонентов и, как следствие, массогабаритных характеристик объектива;

– при переходе к стартовой системе для параметрического синтеза предлагается предусматривать в компонентах количество линз соразмерное относительным отверстиям;

– для уменьшения количества линз в объективе целесообразно использовать асферическую и киноформную оптику [11];

– при разработке перспективных оптических систем для ИК области спектра «на первый план выдвигается задача выбора оптимальной оптической схемы» [12]. Создание исходных оптических систем для параметрического синтеза является наиболее творческой задачей в процессе разработки объективов. Частные решения по параксиальному синтезу, полученные в исследовании, будут положены в основу разработки панкратического LWIR объектива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хацевич Т.Н., Ижбульдин Д.А., Греченевский А.С. Проблемы в проектировании и тенденции развития LWIR объективов // Калашниковские чтения: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции – Ижевск, 2020. – С. 134 – 137.

2. Хацевич Т.Н., Греченевский А.С. Исследование схем объективов с вынесенным выходным зрачком для тепловизионных приборов // Журнал «Вестник СГУГиТ», Том 25. № 2, 2020. – С. 259 – 273.

3. Хацевич Т.Н., Дружкин Е. В. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива // Журнал «Вестник СГУГиТ», Том 23. №2, 2018. – С. 245 – 261.

4. Горыня А., Шатунов Д., Кабенин М., Виталисов А., Демидов П., Моргоров М., Похилин А., Попов А. Рынок тепловизоров: пандемия стимулировала развития технологий // Журнал «Системы безопасности», видеонаблюдение и видеоаналитика, спецпроект тепловизоры, выпуск №2, 2020. – С. 102 – 113.

5. LWIR continuous zoom thermal objectives [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ophiropt.com/> (дата обращения: 25.03.2021).

6. LWIR - Lenses for uncooled detectors [Электронный ресурс]. URL: <https://www.temmek.com/project-div/LWIR-Lenses-for-uncooled-detectors/> (дата обращения: 25.03.2021).

7. LWIR lenses [Электронный ресурс]. URL: http://rp-optical-lab.com/products_type/lenses/ (дата обращения: 25.03.2021).

8. Панкратические объективы [Электронный ресурс]. URL: <http://ieos.ru/wp-content/uploads/2019/05/catalog-V2019.pdf/> (дата обращения: 25.03.2021).

9. Пахомов И. И. Панкратические системы. М., «Машиностроение», 1976. – 160 с.
10. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide / Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation. 2009. – 732 p.
11. Кулакова Н.А., Насыров А.Р., Несмелова И.М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 5. С. 36 – 44.
12. Грейсух Г. И., Антонов А. И. Одно- и многослойные киноморфные элементы для компактных объективов инфракрасного диапазона // «Оптический журнал», 2019. Т 86. №6. С. 3 – 6.

© Д. А. Ижбульдин, Т. Н. Хацевич, 2021