

Ю. Ц. Батомункуев^{1,2}, А. А. Печенкина³, Н. А. Гурин³*

Расчет трехдиапазонного дифракционного объектива

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
г. Новосибирск, Российская Федерация

³АО «Новосибирский приборостроительный завод», г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: opttechnic@mail.ru

Аннотация. В работе представлена и обсуждается схема двухкомпонентного дифракционного объектива, имеющего три рабочих спектральных участка в «окнах прозрачности» инфракрасной средней области спектра. В каждом из диапазонов формируется ахроматическое изображение точечного источника, соответственно в первом, втором и третьем порядках дифракции. Первый компонент дифракционного объектива, представляющий собой плоский дифракционный оптический элемент, формирует хроматические мнимые изображения точечного источника на оптической оси (в каждом из порядков дифракции), а второй компонент, также представляющий собой плоский дифракционный оптический элемент, преобразует эти мнимые изображения в одно ахроматическое изображение. Дифракционная структура компонентов объектива и расстояние между ними рассчитываются таким образом, чтобы ахроматические изображения в каждом из порядков дифракции были пространственно совмещены.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, ахроматизация, хроматическая аберрация

Y. Ts. Batomunkuev^{1,2}, A. A. Pechenkina³, N. A. Gurin³*

Calculation of Three-Band Holographic System

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk,
Russian Federation

³Novosibirsk Instrument-making Plant, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: opttechnic@mail.ru

Abstract. The paper presents and discusses the design of a two-component diffraction lens having three operating spectral ranges in the infrared region of the spectrum. In each of the ranges, an achromatic image of a point source is formed, respectively, in the first, second and third orders of diffraction. The first component of the diffraction lens, which is a flat diffractive optical element, forms chromatic virtual images of a point source on the optical axis in each of the diffraction orders, and the second component, which is also a flat diffractive optical element, converts these virtual images into one achromatic image. The diffraction structure of the lens components and the distance between them are calculated in such a way that the achromatic images in each diffraction order are spatially combined.

Keywords: diffraction optical element, achromatization, chromatic aberration

Введение

В настоящее время одной из тенденций при разработке устройств для инфракрасной (ИК) области спектра является обеспечение работы в двух и более участках ИК спектра, при одновременном снижении массы, габаритов и себестоимости устройства [1]. На рис. 1 представлен спектр коэффициента пропускания T , выделены «окна прозрачности» – две главные области пропускания атмосферы на 3,0–5,5 мкм и 8–14 мкм. Известно, что в этих областях находятся участки пропускания инфракрасного излучения некоторых прозрачных полимерных слоев пластиков, которые являются весьма перспективными для создания недорогих полимерных дифракционных оптических элементов.

Главным недостатком дифракционных элементов, предназначенных для преобразования световых волн и формирования изображений, является значительная хроматическая aberrация. Коррекция хроматической aberrации положения и изображающие возможности двух и более компонентных дифракционных систем (по аналогии с линзовыми системами) достаточно подробно исследовались, начиная с 70-х годов 20-го века, например, в работах [2–5]. Было показано, что дифракционные системы, состоящие из двух или трех дифракционных пропускающих оптических элементов, обеспечивают уменьшение хроматической aberrации положения. Но коррекция хроматической aberrации выполнялась лишь для одной заданной спектральной области. Тогда как сферохроматические aberrации дифракционных оптических элементов оставались неисправленными и существенно ограничивали их практическое использование в оптических устройствах ИК области спектра.

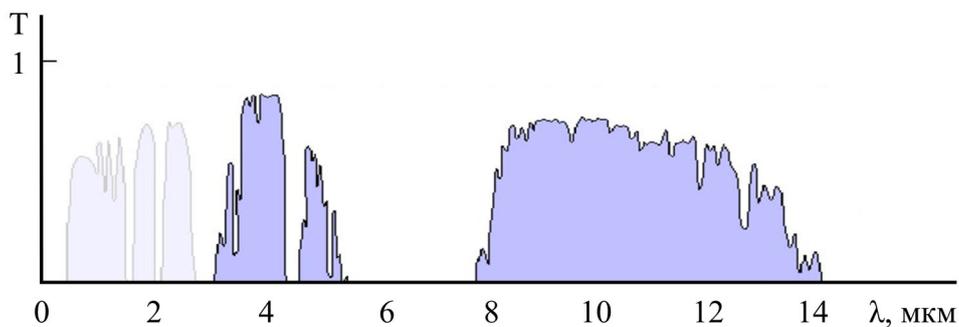


Рис. 1. Средняя инфракрасная область спектра пропускания атмосферы

Результаты

Известно, что в качестве простейшего фильтра пространственных частот световой волны может быть использовано микроскопическое отверстие. Такое микроскопическое круглое отверстие, помещенное в точку фокуса дифракционного оптического элемента, одновременно является и фильтром спектральных частот. Это обстоятельство позволяет отделить отраженную от удаленного объекта монохроматическую световую волну от паразитной полихроматической засветки.

В задачах дальнометрии возникает необходимость одновременного определения расстояния до двух и более объектов, при этом каждый объект зондируется своей световой волной (как правило, с разными частотами). Поэтому возникает потребность разработки ахроматических многодиапазонных оптических элементов [6–7]. Так, нами ранее были выполнены расчеты двухдиапазонного дифракционного оптического элемента с относительным отверстием 1:1 и с исправленными осевыми aberrациями третьего и высших порядков [10–12]. Было показано, что сферическая aberrация исправляется в двух узких диапазонах 502–507 нм и 543–548 нм. Так как радиусы Δr_i ($i = 1, 2, 3 \dots$) сферических aberrаций 3-го, 5-го и 7-го порядков дифракционного элемента зависят от произведения порядка дифракции на рабочую длину волны, то при уменьшении рабочей длины волны в 2 раза графики зависимости радиусов Δr_i во втором порядке дифракции для спектрального диапазона 251 – 274 мкм подобны графикам на рис. 2. Это было использовано при выполнении настоящей работы, а именно, при расчете двухкомпонентного дифракционного объектива с тремя рабочими спектральными диапазонами в ИК области спектра.

В настоящей работе методом разложения в ряд и минимизации членов разложения характеристической функции [8–10] рассчитан дифракционный двухкомпонентный объектив. Оба компонента являются плоскими пропускающими дифракционными элементами, расположенными параллельно друг другу на одной на оптической оси.

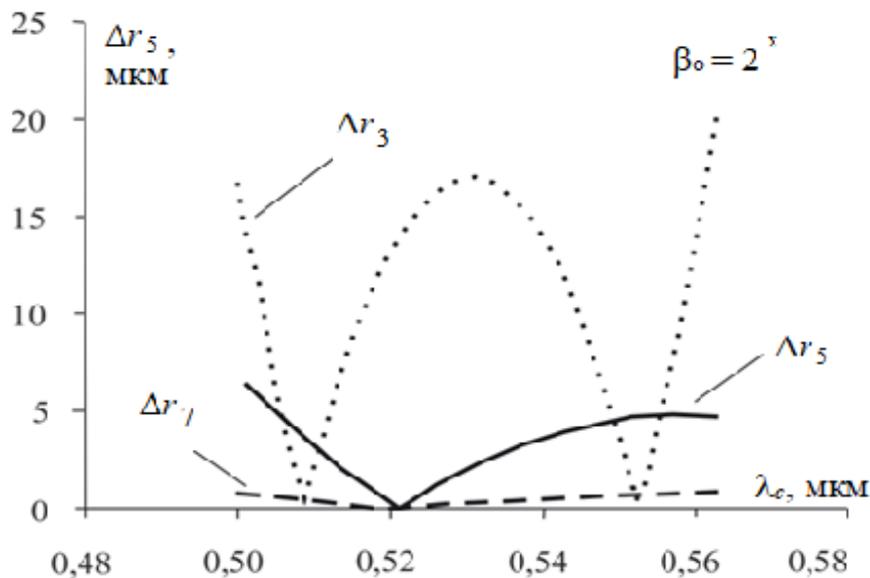


Рис. 2. Зависимости радиусов Δr_i сферических aberrаций 3-го, 5-го и 7-го порядков ГОЭ от λ_c

На рис. 3 изображен вариант дифракционного объектива, имеющего три рабочих диапазона в инфракрасной области спектра.

Принцип работы трехдиапазонного дифракционного объектива заключается в следующем: освещаемая точка поверхности объекта является точечным полихроматическим источником света S_1 . Первый компонент дифракционного объектива, представляющий собой плоский дифракционный оптический элемент, формирует хроматические мнимые изображения S_1' точечного источника S_1 на оптической оси (в первом, втором и третьем порядках дифракции), а второй компонент, также представляющий собой плоский дифракционный оптический элемент, преобразует эти мнимые изображения в одно ахроматическое изображение. Расчеты выполнены для первого порядка дифракции в ИК диапазоне длин волн 10,1–10,5 мкм, во втором порядке дифракции – в диапазоне 5,05–5,25 мкм, а в третьем порядке дифракции – в диапазоне 3,37–3,49 мкм. Дифракционная структура компонентов объектива и расстояние между ними рассчитываются таким образом, чтобы ахроматические изображения S_2' в каждом из порядков дифракции были пространственно совмещены. Полученное изображение S_2' обладает также уменьшенными сферохроматическими aberrациями, так как у обоих дифракционных элементов скорректированы сферохроматические aberrации. Методика расчета таких дифракционных элементов рассмотрена в работах [4, 6, 8–10]. Положение точечного ахроматического изображения S_2' определяется по формуле дифракционного оптического элемента.

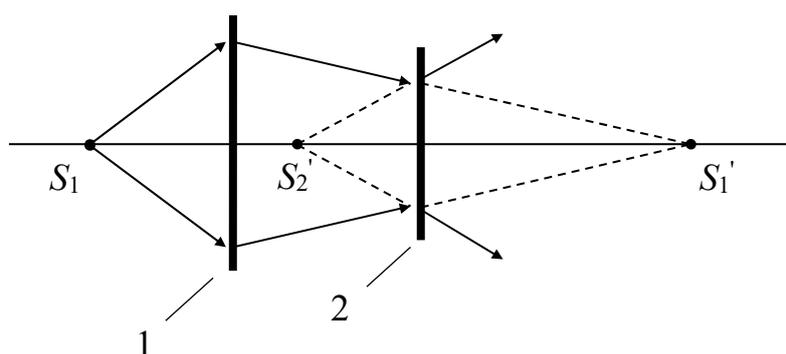


Рис. 3. Трехдиапазонный двухкомпонентный дифракционный объектив: 1 – первый дифракционный оптический элемент, 2 – второй дифракционный оптический элемент

Достижение высокой дифракционной эффективности одновременно в трех порядках дифракции в ИК диапазоне спектра может быть достигнуто оптимизацией, например, поверхностной дифракционной структуры рельефного оптического элемента или объемной дифракционной структуры голографического оптического элемента. Известны, например [11–12], работы по оптимизации дифракционной эффективности, по получению заданных значений и пространственного распределения дифракционной эффективности в разных порядках дифракции различных дифракционных оптических элементов и систем.

Заключение

Таким образом, в работе представлена и обсуждается схема двухкомпонентного дифракционного объектива, имеющего три рабочих спектральных участка в «окнах прозрачности» средней инфракрасной области спектра. В работе также были рассчитаны другие варианты оптических схем расположения дифракционных оптических элементов, также обеспечивающих формирование ахроматического изображения точечного полихроматического источника инфракрасного излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент на полезную модель RU 184965 U1, 15.11.2018. Двухдиапазонная голографическая оптическая система. Батомункуев Ю.Ц., Дианова А.А.
2. Bennet, S. J. Achromatic combinations of hologram optical elements // *Applied optics*. – 1976. – V. 15, N. 2. – P. 542–545.
3. Sweatt, W. C. Achromatic triplet using hologram optical elements // *Applied optics*. – 1977. – V. 16, N. 5. – P. 1390–1391.
4. Мустафин, К. С. Расчет ахроматизированных голограммных линзовых систем на основе принципа таутохронизма лучей / К.С. Мустафин // *Оптика и спектроскопия*. – 1978. – Т. 44, вып. 1. – С. 164–167.
5. Weingärtner, I., Rosenbruch K.J. Chromatic correction of two- and three-element holographic imaging systems // *Optica Acta*. – 1982. – V. 29, N. 4. – P. 519–529.
6. Батомункуев, Ю.Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов / Монография // СГУГиТ. – Новосибирск, 2020. – С.195.
7. Лукин, А.В. Голограммные оптические элементы / *Опт. журн.* – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 80–87.
8. Батомункуев Ю.Ц. Расчет ахроматической дифракционной системы с исправленной сферической аберрацией (часть 1) / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // *Интерэкспо ГЕОСибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 8 : Национальн. конф. с междунар. участ. «СибОптика-2019».* – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – С. 41–46.
9. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет осевых сферических аберраций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической аберрацией третьего порядка. Часть 2 / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова, Т.В. Маганаква // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 627–636.
10. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет осевых сферических аберраций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической аберрацией третьего порядка. Часть 1 / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 44–53.
11. Сойфер В.А., Волков А.В., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Соловьев В.С., Харитонов С.И., Хонина С.Н., Успленев Г.В. Методы компьютерной оптики. Под редакцией В.А. Сойфера // М.: «Физматлит», 2000, 688 с.
12. Сойфер В. А., Головашкин Д. Л., Досколович Л. Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Хонина С.Н. Дифракционная компьютерная оптика. Под редакцией В.А. Сойфера М : Физматлит, 2007, 736 с.

© Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Печенкина, Н. А. Гурин, 2024