



Длиннофокусные зеркально-линзовые объективы

И. П. Шишкин, А. П. Шкадаревич
НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь

Представлена конструкция длиннофокусных зеркально-линзовых объективов для видимого и инфракрасного диапазона: VIS, SWIR, MWIR и LWIR. Фронтальная группа у всех объективов одинаковая – 2 зеркала, причем первое (prime) зеркало выполнено диаметром 150 мм. Диаметр зеркала был выбран исходя из требований к светосиле объектива и возможности изготовления зеркала в производстве. Кроме того, одинаковый диаметр основного зеркала при необходимости позволяет объединить несколько каналов (ТВ и SWIR, ТВ и LWIR) в один. В статье описывается телевизионный и SWIR объектив с фокусом 600 мм и относительным отверстием $F/4$, MWIR объектив с фокусом 400 мм и относительным отверстием $F/4$ и LWIR объектив с фокусом 250 мм и относительным отверстием $F/1.6$. Приведены варианты построения зеркально-линзового зум и мультиканального объективов с фокусом 400–800 мм и относительным отверстием $F/5 - F/10$.

Ключевые слова: длиннофокусный зеркально-линзовый объектив, зум объектив, мультиканальный объектив, VIS, SWIR, MWIR и LWIR, приборы наблюдения

Статья поступила: 13.02.2024

Статья принята: 11.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Применение длиннофокусных объективов в приборах наблюдения дает возможность максимально приблизить объект, идентифицировать его и определить точную дальность. С другой стороны, сложность объектива определяет габариты и параметры управления всего оптико-электронного комплекса наблюдения. Светосила, как известно, существенно влияет на разрешение объектива,

Long-Focal Length Catadioptric Lenses

I. P. Shishkin, A. P. Shkadarevich
LEMT Scientific and Technical Center of BelOMO, Minsk,
Republic of Belarus

The design of long-focal length catadioptric lenses for the visible and infrared ranges (VIS, SWIR, MWIR and LWIR) is provided. The front group of all lenses is similar and consists of 2 mirrors, with the first (prime) mirror having a diameter of 150 mm. The diameter of the mirror is selected based on the requirements for lens aperture and possible production of the mirror. In addition, the same diameter of the primary mirror, if necessary, allows to combine several channels (TV and SWIR, TV and LWIR) into one. The article describes a television and SWIR lenses with a focal point of 600 mm and a relative aperture of $F/4$, a MWIR lens with a focal point of 400 mm and a relative aperture of $F/4$, and a LWIR lens with a focal point of 250 mm and a relative aperture of $F/1.6$. The design options for a catadioptric zoom and multi-channel lenses with a focal point of 400–800 mm and a relative aperture $F/5-F/10$ are indicated.

Keywords: long-focal length catadioptric lens, zoom lens, multi-channel lens, VIS, SWIR, MWIR and LWIR, observation devices

Article received: 13.02.2024

Article accepted: 11.03.2024

INTRODUCTION

The use of long-focal length lenses in the observation devices makes it possible to bring an object as close as possible, identify it and determine the exact range. On the other part, the lens complexity determines the overall dimensions and control parameters of the entire optical-electronic observation complex. It is known that the aperture significantly affects the lens resolution designed for a particular spectral range.

Figure 1a shows the dependence of the lens aperture on the spectral range and pixel size. Obviously, when moving to the long-wavelength region of the spectrum, it is necessary to increase the aperture ratio in order to obtain an acceptable lens resolution. However, an increase in the relative aperture in a long-focal

расчитанного для того или иного спектрального диапазона.

На рис. 1а показана зависимость светосилы объектива от спектрального диапазона и размера пиксела. Очевидно, что при переходе в длинноволновую область спектра требуется увеличивать светосилу, чтобы получить приемлемое разрешение объектива. Но увеличение относительного отверстия в длиннофокусном объективе автоматически приводит к росту диаметров линз и габаритов. При этом точность изготовления линз и механических деталей должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить расчетное разрешение в собранном объективе. Создание оптимальной конструкции длиннофокусных зеркально-линзовых объективов для широкого применения и было целью настоящей работы.

ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ

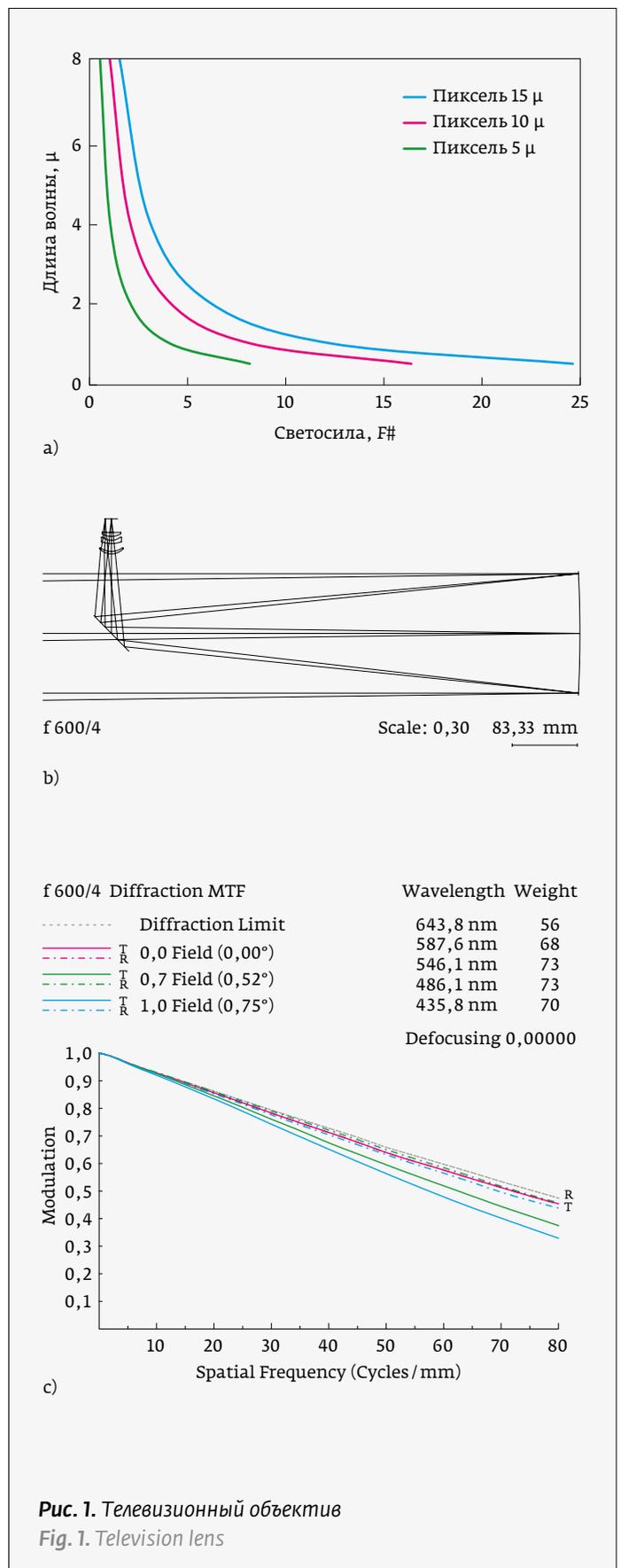
Объектив играет ключевую роль в телевизионном канале и в комбинации с подобранным сенсором обеспечивает требуемую дальность обнаружения. Дальность обнаружения зависит и от величины фокусного расстояния объектива и от светосилы.

Размер пиксела и диагональ сенсора также оказывают влияние на величину дальности обнаружения – для большего пиксела и ограниченного поля зрения можно рассчитать объектив с характеристиками, близкими к теоретическому пределу. На практике длиннофокусный светосильный объектив с высоким контрастом изображения позволяет получить более детальное изображение удаленного объекта.

На рис. 1б-1с показан вид зеркально-линзового телевизионного объектива и график оптической передаточной функции. Первое зеркало диаметром 150 мм – асферическое, второе зеркало – плоское, установленное под углом 45°, далее следует группа из 3-х линз, обеспечивающая исправление хроматических и полевых aberrаций. Объектив с фокусным расстоянием 600 мм и относительным отверстием 1:4 предназначен для сенсора 1" (диагональ 16 мм) и имеет угловое поле зрения 1,5°. Как видно из графика, разрешение объектива составляет 80 лин/мм при контрасте 0,5.

SWIR ОБЪЕКТИВ

С появлением сенсоров, работающих в широком спектральном диапазоне 0,8-1,6 мкм, появился и новый класс объективов. Пример зеркально-линзового объектива с фокусным расстоянием 600 мм и относительным отверстием 1:4 приведен на рис. 2. Конструктивно объектив выполнен по



известной схеме Максудова (Кассегрена) и отличается тем, что первое зеркало диаметром 150 мм имеет сферическую форму, второе зеркало плоское, а третье зеркало установлено под углом 45°, что значительно сокращает габариты объектива. С учетом широкого спектрального диапазона использование зеркал в составе объектива позволяет легко его ахроматизировать, что непросто было бы сделать в схеме, состоящей только из линз.

LWIR ОБЪЕКТИВ

Объективы, работающие в длинноволновой области инфракрасного диапазона 8-12 мкм, активно

length lens automatically leads to an increase in the lens diameters and dimensions. Moreover, the production accuracy of lenses and mechanical parts shall be high enough to ensure the rated resolution in the assembled lens. The purpose of this paper is to develop an optimal design of long-focal length catadioptric lenses for wide application.

TV LENS

The lens plays a key role in the television channel. In combination with a selected sensor, it provides the required detection range. The detection range depends on both the focal length of the lens and the aperture ratio.

The pixel size and sensor diagonal also affect the detection range, since for a larger pixel and a limited field of view, a lens with the performance close to the theoretical limit can be designed. In practice, a long-focal length high-aperture lens with the high image contrast allows to obtain a more detailed image of a distant object.

Figure 1b-1c shows a view of a catadioptric television lens and an optical transfer function chart. The first mirror with a diameter of 150 mm is aspherical, the second mirror is a flat one installed at an angle of 45°, followed by a group of 3 lenses that adjust any chromatic and field aberrations. The lens with a focal length of 600 mm and a relative aperture of 1:4 is designed for a 1" sensor (with the diagonal of 16 mm) and has an angular field of view of 1.5°. As it can be seen from the chart, the lens resolution is 80 lines/mm with a contrast of 0.5.

SWIR LENS

Due to the occurrence of sensors operating in a wide spectral range of 0.8-1.6 мкм, a new category of lenses has been developed. An example of a catadioptric lens with a focal length of 600 mm and a relative aperture of 1:4 is shown in Fig. 2. Structurally, the lens is made according to the well-known Maksutov (Cassegrain) circuit and is distinguished by the fact that the first mirror with a diameter of 150 mm has a spherical shape, the second mirror is flat, and the third mirror is installed at an angle of 45° that significantly reduces the lens dimensions. With due regard to the wide spectral range, the use of mirrors in the lens makes it easy to achromatize it that would not be easy to do with an option consisting of the lenses only.

LWIR LENS

The lenses operating in the long-wave infrared range of 8-12 мкм are actively used in the up-to-date observation devices. Figure 3a shows a type of a long-focal length lens with a focal point of 250mm and an aperture ratio of 1:1.6. The first mirror with a diameter of 150 mm is aspherical, and the second mirror is flat.

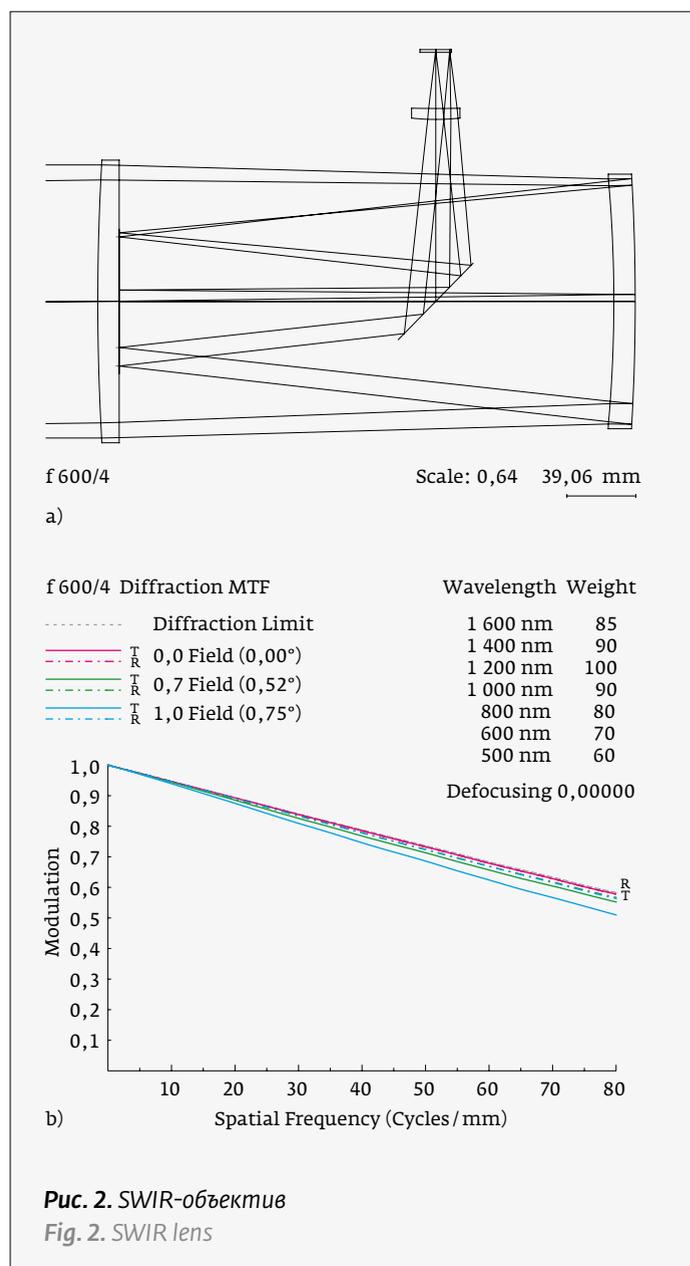
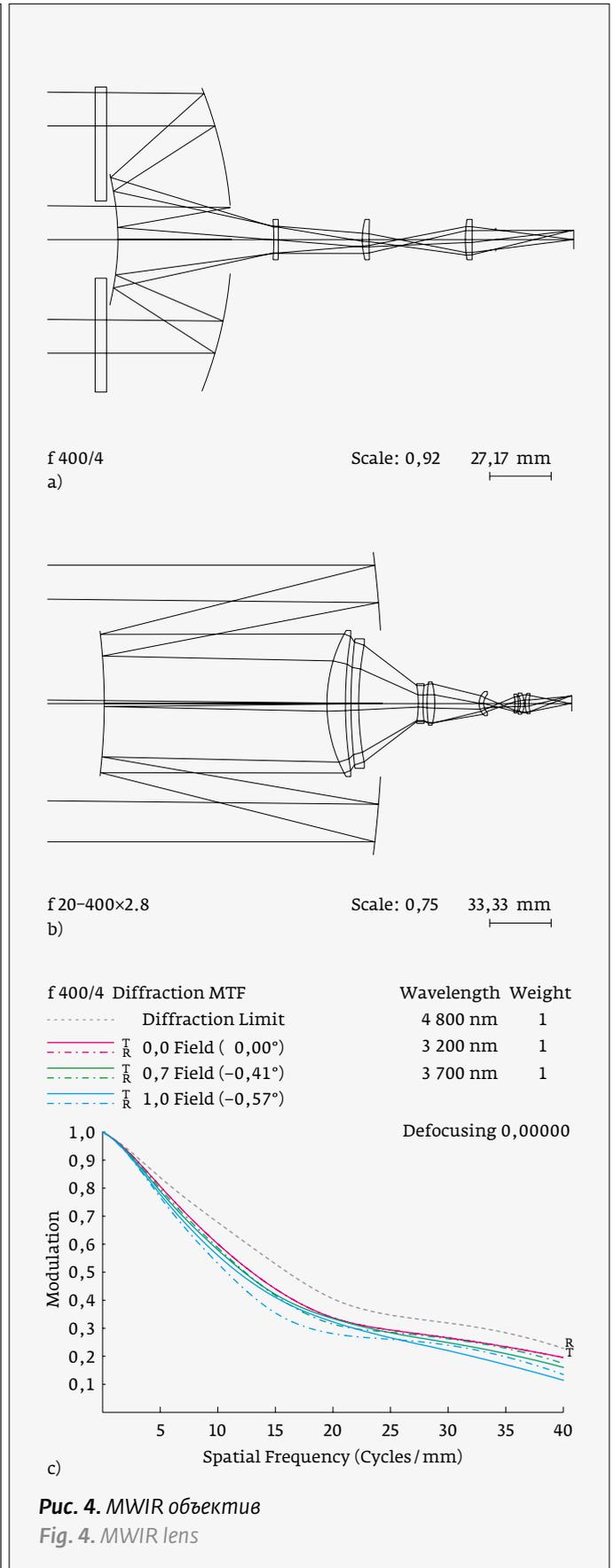
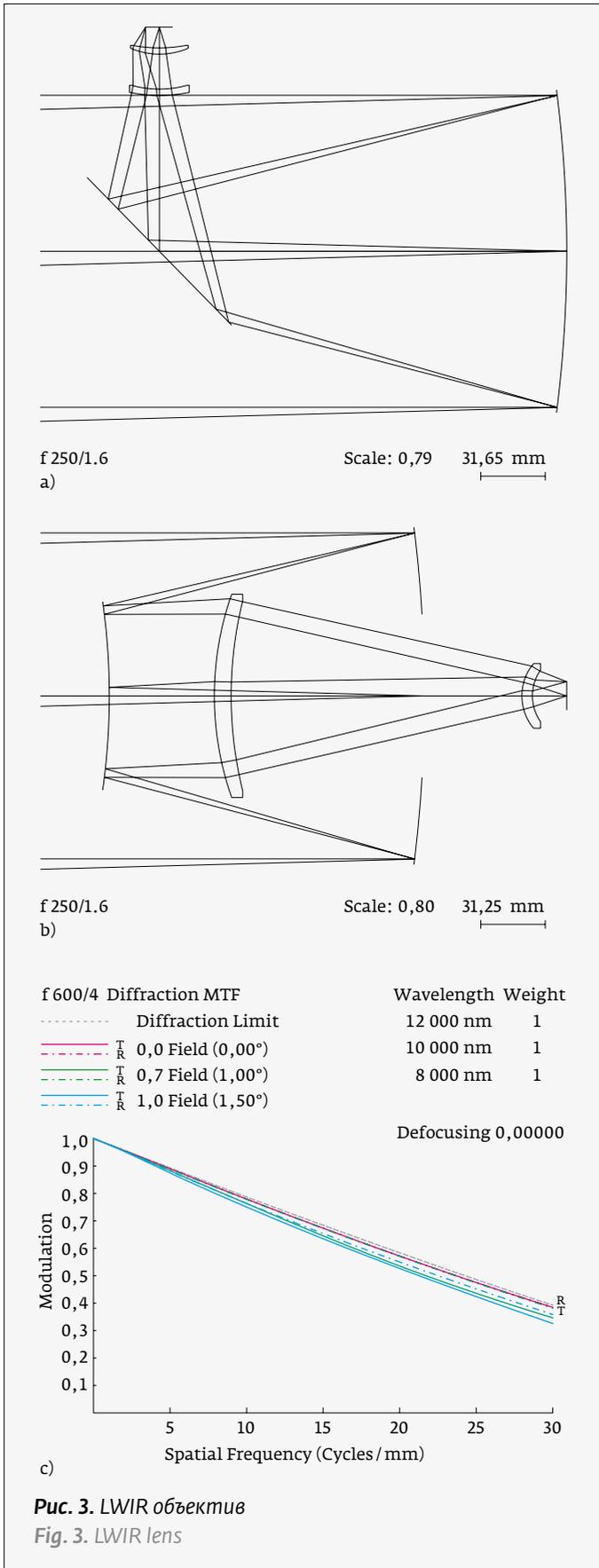


Рис. 2. SWIR-объектив

Fig. 2. SWIR lens



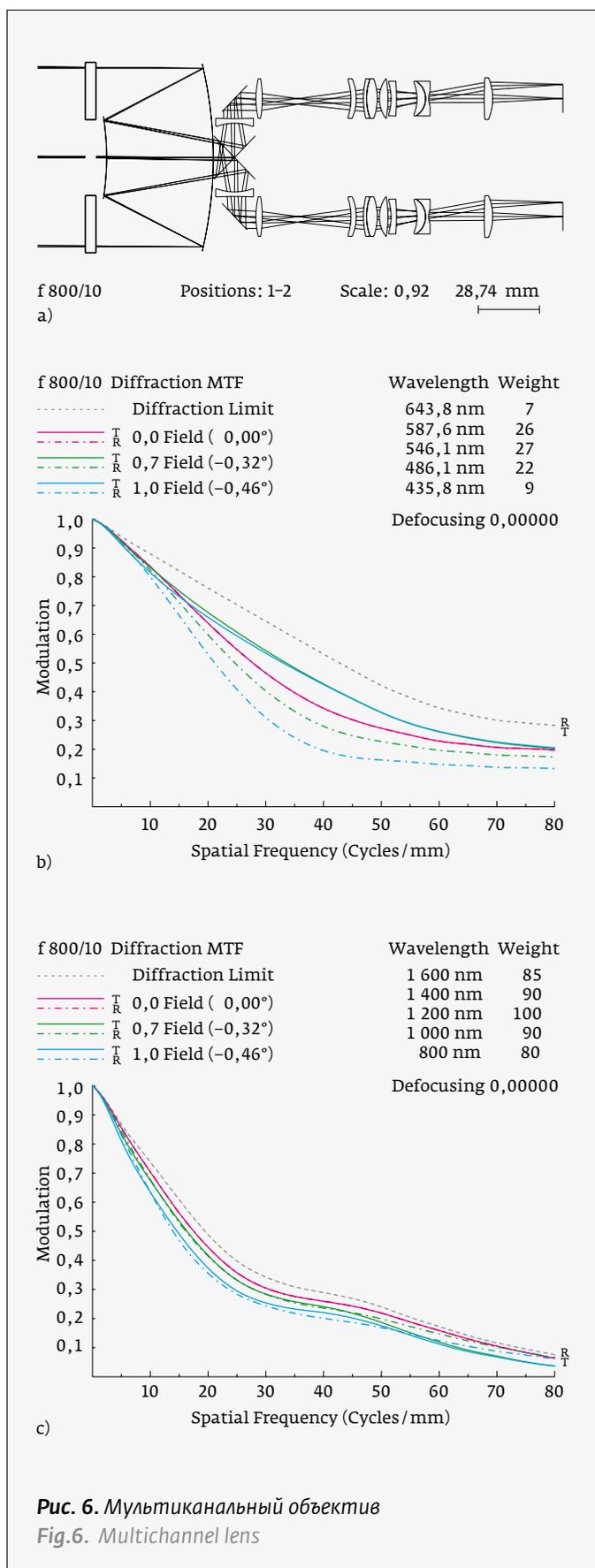
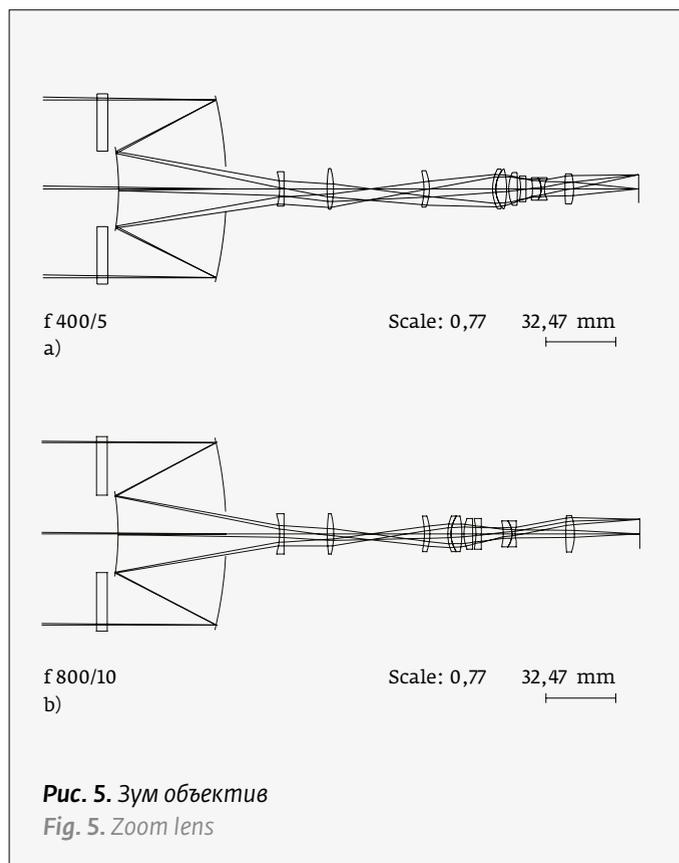
применяются в современных приборах наблюдения. На рис. 3а представлен вид длиннофокусного объектива с фокусным расстоянием 250 мм и относительным отверстием 1:1,6. Первое зеркало диаметром 150 мм асферическое, а второе зеркало плоское.

График на рис. 3с показан для пространственной частоты 30 лин/мм, что соответствует разрешению пиксела с размером 12-17 мкм.

На рис. 3б приведен другой вариант объектива с 2-кратным зеркальным экстендером. В экстендере первое зеркало диаметром 150 мм асферическое, а второе зеркало – сфера.

MWIR ОБЪЕКТИВ

Пример длиннофокусного объектива, предназначенного для средневолновой области инфракрасного диапазона 3-5 мкм, приведен на рис. 4. Особенностью конструкции такого типа линзовых объективов, представленных на рынке, является наличие дифракционных, асферических элементов и охлаждаемых болометров (сенсоров). Кроме того, апертурная диафрагма объектива должна быть расположена за последней линзой, а ее диаметр должен быть согласован с рабочей апертурой



болометра (cold stop). На рис. 4а представлен вид длиннофокусного объектива с фокусным расстоянием 400 мм и относительным отверстием 1:4. Оба зеркала (первое диаметром 150 мм) и две линзы – асферические. Качество изображения объектива показано на рис. 4б. Фокусировка на ближнюю дистанцию осуществляется с помощью последней линзы. На рис. 4с приведен другой вариант объектива с переменным фокусом 20–400мм с 2-кратным зеркальным экстендером. В экстендере первое зеркало диаметром 150 мм асферическое, а второе зеркало – сфера.

ЗУМ И МУЛЬТИКАНАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ

Двухзеркальную конструкцию можно использовать при проектировании объективов с переменным фокусом и мультисканальных объективов. На рис. 5а–б представлен вид зум-объектива с фокусом 400–800 мм. Изменение фокусного расстояния осуществляется с помощью перемещения 2-х групп линз. Фронтальное зеркало выполнено диаметром 80 мм, что сделано из соображений оптимального сочетания основных параметров объектива: диапазон фокусных расстояний (400–800 мм), габариты (<250 мм), поле зрения (2–1°), разрешение

The chart in Fig. 3c is shown for a spatial frequency of 30 lines/mm that corresponds to a pixel resolution of 12–17 μm .

Another option of the lens with a 2x mirror extender is shown in Fig. 3b. In the extender, the first mirror with a diameter of 150 mm is aspherical, and the second mirror is a sphere.

MWIR LENS

An example of a long-focal length lens designed for the mid-wave infrared region of 3...5 μm is shown in Fig. 4. A design feature of this type of lens available on the market is the diffractive, aspherical elements and cooled bolometers (sensors). In addition, the lens aperture diaphragm shall be located behind the last lens, and its diameter shall be consistent with the operating aperture of the bolometer (cold stop). Figure 4a shows a view of a long-focal length lens with a focal point of 400mm and a relative aperture of 1:4. Both mirrors (the first one with a diameter of 150 mm) and two lenses are aspherical. The image quality of the lens is shown in Fig. 4b. Focusing at close range is achieved using the last lens. Figure 4c provides another option of the lens with the variable focus of 20–400 mm and a 2x mirror extender. In the

ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»

БЕЛОМО
ММЗ ВАВИЛОВА

Оптический завод «Сфера»

«Оптический завод «Сфера» основан в 1994 году как филиал ОАО «Минский механический завод имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга БелОМО» для производства оптических элементов. В настоящее время завод выпускает большое количество оптических элементов различной сложности по чертежам Заказчика. Оптические элементы, произведенные «Оптическим заводом «Сфера», успешно применяются во многих уникальных оптоэлектронных системах.

Для производства высокотехнологичной продукции проводится техническое переоснащение производства, проводится модернизация производственных мощностей с целью увеличения объемов производства. Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям версии ГОСТ ISO 9001:2015.

Многолетний опыт производства оптических элементов, высококвалифицированный персонал предприятия позволяют удовлетворить любую потребность Заказчика.

Республика Беларусь, 220114,
г. Минск, ул. Макаенка, 23
Тел.: (+375 17) 325-52-91
Тел./факс: (+375 17) 276-27-71
E-mail: sfera.ved@belomo.by; sfera@belomo.by

www.belomo.by





Таблица. Сравнительные характеристики объективов

Table. Comparative features of lenses

| Спектр Range | Длина волны, мкм Wavelength, μm | f' , мм f' , mm | F# | Ф зеркала, мм F of the mirror, mm | Угол поля зрения Field of view angle | Разрешение, лин Resolution, line | Длина, мм Length, mm | Дистор- сия Distortion |
|-----------------|---|------------------------|------|---|---|---|----------------------------|------------------------------|
| VIS | 0,4–0,7 | 600 | 4 | 150 | 1,5° | 80 | 600 | <5% |
| SWIR | 0,8–1,6 | 600 | 4 | 150 | 1,5° | 80 | 250 | <5% |
| LWIR | 8–12 | 250 | 1,6 | 150 | 3° | 30 | 250 | <5% |
| MWIR | 3–5 | 400 | 4 | 150 | 1,2° | 40 | 210 | <5% |
| VIS | 0,4–0,7 | 400–800 | 5–10 | 80 | 2–1° | 80 | 250 | <5% |
| SWIR | 0,8–1,6 | 400–800 | 5–10 | 80 | 2–1° | 80 | 250 | <5% |

(80 лин/мм). На рис. 6а–с показан вариант объединения двух спектральных каналов (тв и SWIR) с использованием светоделительной призмы (x-cube) и даны их оптические характеристики.

Сравнительные характеристики объективов представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная конструкция длиннофокусных объективов на основе двухзеркальной схемы является оптимальной с точки зрения числа компонентов, габаритных размеров и возможности изготовления в производстве. Все объективы имеют приемлемое качество изображения и могут найти применение в наблюдательных приборах различного назначения.

REFERENCES

1. RU 2769088. Зеркально-линзовый объектив. Сокольский М. Н., Краснова Л. О., 28.06.2021.
2. US 2021 / 0141240. Optical system and optical apparatus. Tatsuro Watanabe etc., May 13, 2021.
3. US 2014 / 0098277. Catadioptric lens system and image pickup system. Kodai Nagamatsu etc., April 10, 2014.

ОБ АВТОРАХ

Шишкин Игорь Петрович, к.т.н., с НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь.

ORCID ID: 0000-0002-4592-1060

Шкадаревич Алексей Петрович, д.т.н., НТЦ «ЛЭМТ», БелОМО, Минск, Республика Беларусь.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива. Разработка и исследования выполнены за счет собственных средств НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО.

extender, the first mirror with a diameter of 150 mm is aspherical, and the second mirror is a sphere.

ZOOM AND MULTI-CHANNEL LENS

The two-mirror design can be used in the production of varifocal lenses and multi-channel lenses. Fig. 5a-b shows a zoom lens with a focus of 400–800 mm. Any changes in the focal length are performed by moving 2 groups of lenses. The front mirror is made with a diameter of 80 mm that leads to the optimal combination of main parameters of the lens: focal length range (400–800 mm), dimensions (<250 mm), field of view (2–1°), resolution (80 lines/mm). Figure 6a-c shows the combination of two spectral channels (TV and SWIR) using a beam splitting prism (x-cube) and with their optical specifications. The comparative features of the lenses are given in the table.

CONCLUSION

The given design of long-focal length lenses based on a two-mirror design is optimal in terms of the number of components, overall dimensions and production capabilities. All lenses have an acceptable image quality and can be used in the observation tools for various purposes.

ABOUT AUTHORS

Shishkin Igor Petrovich, Candidate of Technical Sciences, RTC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.

ORCID ID: 0000-0002-4592-1060

Shkadarevich Alexey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, RTC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors. Development and research are carried out at the expense of RTC "LEMT" BELOMO.



Поправки в закон «Об обеспечении единства измерений»

Закон об «амнистии» для средств измерений, которые применялись до вступления в силу законодательства об обеспечении единства измерений, инициирован правительством РФ и вносит поправки в закон «Об обеспечении единства измерений». Нормы вносимых поправок позволяют применять средства измерения, принадлежащие иностранным организациям или иностранного производства, только в том случае, если обеспечена их прослеживаемость к российским государственным первичным эталонам.

Как пояснил ранее руководитель Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Антон Шалаев, с введением в России госрегулирования в этой сфере к применению стали допускаться только средства измерения утвержденного типа, а «многочисленное измерительное оборудование, изготовленное в 1980-х годах, то есть до вступления в силу законодательства, осталось вообще за рамками законодательства». По его словам, таких средств измерения особенно много на промышленных предприятиях, предприятиях оборонно-промышленного комплекса.

Вносимые изменения позволят применять подобное оборудование, не проходя дополнительных процедур, которые несли бы существенную дополнительную нагрузку для предприятий. При этом речь идет только о случаях, когда оборудование находится в исправном состоянии, а его точность подтверждена по итогам поверки, указал глава ведомства.

Кроме того, закон регламентирует использование эталонов единиц величин и средств измерений при проведении работ и оказании услуг

в области обеспечения единства измерений за пределами Российской Федерации. Принятые нормы позволят применять средства измерения, принадлежащие иностранным организациям или иностранного производства, но только в том случае, если обеспечена прослеживаемость таких средств к российским государственным первичным эталонам.

Предлагаемые документом изменения необходимы в условиях «реализации цифровой экономики и позволят обеспечить прозрачность, реализуемость и контролируемость работ в области обеспечения единства измерений, повысить их эффективность», говорится в пояснительной записке.

В эталонную базу РФ, помимо государственных эталонов, включаются также эталоны юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

Одной из новелл закона является введение регламентации использования иностранных средств измерений при проведении работ за пределами России. С этим сталкивается, например, госкорпорация «Росатом» при строительстве объектов в других государствах. Кроме того, измерительное оборудование зарубежного производства используется на газозазах при погрузке и выгрузке сжиженного природного газа.

Закон должен вступить в силу с 1 марта 2025 года, за исключением отдельных положений, которые касаются Государственной метрологической службы и начнут действовать с 1 января 2026 года.

<https://ria.ru> и <https://tass.ru>

Подробнее: spb.hse.ru/spbopen/

Школа-конференция с международным участием по Оптоэлектронике, Фотонике и Нанобиоструктурам

11

OPEN

Saint Petersburg 2024

CONFERENCE

SPbOPEN 2024

14–17 мая 2024 года
НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург

Подача тезисов – до 1 апреля 2024
aa.baryshnikova@hse.ru

2100+

УЧАСТНИКОВ
И ПРЕДСТАВЛЕННЫХ РАБОТ

190+

ИНОСТРАННЫХ
УЧАСТНИКОВ

1400+

ОПУБЛИКОВАННЫЙ
СТАТЕЙ

Цель школы-конференции — познакомить молодых исследователей, аспирантов и студентов с актуальными задачами и достижениями в области физики и технологии наноструктур, приборов на их основе, а также в родственных областях. Предоставить участникам возможность приобрести опыт публичных выступлений, подачи научных работ для публикации, познакомить научное сообщество со своими результатами и обменяться идеями, стимулировать развитие научного сотрудничества.

Все принятые тезисы будут опубликованы в сборнике конференции. Лучшие работы по результатам постерной сессии будут отмечены почетными грамотами и призами.