

УДК 681.7.015.2

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-213-220

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ ПРИБОРЫ СО СМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Татьяна Николаевна Хацевич

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

Евгений Витальевич Дружкин

ООО «ЛУГГАР», 630120, Россия, г. Новосибирск, ул. Шевченко, 11, генеральный директор, тел. (962)829-63-39, e-mail: druzhkinev@luggar.biz

Ксения Дмитриевна Волкова

ООО «Оптическое расчетное бюро», 630120, Россия, г. Новосибирск, ул. Шевченко, 11, инженер-конструктор, тел. (923)240-77-94; e-mail: volkovakd@luggar.biz

Интенсивное развитие тепловизионной аппаратуры сопровождается расширением ее функциональных возможностей. Одна из них – реализация сменных увеличений и полей. Целью работы является обоснование способа смены фокусных расстояний и полей, обеспечивающего постоянство относительного отверстия и осевой длины объективов в режимах узкого и широкого полей зрения в тепловизионных приборах, использующих неохлаждаемые болометрические матричные приемники излучений. Предлагается метод структурного синтеза объектива из трех компонентов, отличающийся тем, что оптическая сила первого компонента равна оптической силе объектива, сумма оптических сил второго и третьего компонентов равна нулю, апертурная диафрагма размещается на третьем компоненте, внутренний компонент имеет два дискретных положения, при этом между параметрами компонентов найдены соотношения, обеспечивающие при изменении фокусного расстояния объектива неизменность заднего фокального отрезка и относительного отверстия объектива. Возможности метода подтверждаются разработками четырех инфракрасных объективов с двух- и трехкратными перепадами фокусных расстояний. Показано, что в оптической схеме с биасферическим дизайном при смене фокусного расстояния достигается уменьшение длины и стабильность относительного отверстия объектива при дифракционном качестве изображения.

Ключевые слова: инфракрасный объектив, тепловизионный прибор, неохлаждаемый приемник, дискретное поле, переменное фокусное расстояние, биасферический дизайн, относительное отверстие

Введение

Оставаясь на протяжении нескольких десятилетий трендом в развитии оптико-электронных приборов, тепловизионная аппаратура совершенствуется как в части использования новой элементной базы, так и в части расширения функциональных возможностей в составе комплексов [1]. Преимущества оптических систем со сменными характеристиками (фокусными расстояниями, угловыми полями) первоначально были реализованы в тепловизионных приборах и модулях, сопрягаемых с охлаждаемыми приемниками. По мере повышения чувствительности неохлаждаемых матричных бо-

лометрических приемников излучений появилась возможность внедрить концепцию смены оптических характеристик и в группе малогабаритных тепловизионных приборов «смотрящего» типа, реализуя в них режимы широкого и узкого полей зрения (ШПЗ и УПЗ соответственно) [2].

Обзор схемных решений, положенных в основу создания объективов для тепловизионных приборов с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений, позволяет выявить, что большинство из них используют один приемник излучения [3–12], и лишь редкие схемы – два приемника [13]. При этом в первой группе приборов дискретная смена

полей зрения (фокусных расстояний) может осуществляться различными способами:

– путем перемещения компонентов вдоль оптической оси при сохранении неизменной осевой длины объектива (расстояния от первой поверхности до плоскости чувствительной площадки приемника);

– путем перемещения компонентов вдоль оптической оси при изменении осевой длины объектива;

– путем ввода / вывода линз в оптическую систему объектива.

В большинстве систем имеет место изменение относительного отверстия при смене поля зрения [4–6]. Например, в [4] диафрагменное число объектива меняется от 1,1 до 1,4, что должно приводить к изменению облученности изображения в плоскости чувствительной площадки приемника в 1,6 раза при переключении с одного поля зрения на другое. При этом можно выделить немногочисленную группу оптических систем, в которых при смене поля зрения относительное отверстие сохраняется неизменным [2, 9–11].

Несмотря на то, что наличие сменных полей зрения предоставляет пользователю преимущества при эксплуатации приборов, на настоящий момент отсутствуют отечественные серийно выпускаемые малогабаритные тепловизионные приборы на неохлаждаемых приемниках с дискретной сменой полей зрения. Разработанные ранее как перспективные, инфракрасные (ИК) объективы со сменными полями [10–12] для матричных болометрических приемников сегодня могут представлять интерес для инженерных разработок или послужить стартовой системой для следующих шагов в проектировании оптических систем малогабаритных тепловизионных приборов со сменными характеристиками.

***Специфические требования,
предъявляемые к объективам
малогабаритных тепловизионных
приборов со сменными характеристиками***

Совокупность требований, которым должна удовлетворять оптика малогабаритного тепловизионного прибора, включает более десяти показателей [14]. Энергетическое согласование оптической системы объектива и приемника

предполагает, что при смене фокусного расстояния объектива в оптической системе сохраняется неизменным относительное отверстие. Как известно, облученность изображений протяженных объектов на приемной матрице при одинаковой яркости объектов зависит от квадрата относительного отверстия и коэффициента пропускания оптической системы объектива. Для сохранения уровня сигнала с приемника при смене оптических характеристик относительное отверстие должно сохраняться неизменным. Иными словами, при смене поля зрения (фокусного расстояния объектива) одновременно должен меняться и диаметр входного зрачка объектива. Здесь и далее рассматриваются объективы, имеющие постоянную длину при смене фокусного расстояния (поля зрения), которым отдается предпочтение при создании тепловизионных приборов, имеющих ограничение по габаритным размерам. Таким образом, структурная схема оптической системы объектива должна иметь апертурную диафрагму, которая в режиме ШПЗ размещается не на первом компоненте [15], а на внутренних компонентах схемы. Таким образом, в структуре объектива должны выделяться не менее трех компонентов. Апертурная диафрагма может как совпадать с компонентами, так и быть самостоятельным элементом, причем роль апертурной диафрагмы в режимах ШПЗ и УПЗ могут выполнять разные диафрагмы. В следующем разделе рассматривается трехкомпонентная структура объектива с дискретной сменой поля зрения (фокусного расстояния), в которой апертурная диафрагма в режиме ШПЗ размещена на третьем неподвижном компоненте схемы.

***Способ обеспечения постоянства
относительного отверстия
в оптической схеме объектива
при смене фокусного расстояния***

Способ обеспечения постоянства относительного отверстия при дискретной смене фокусного расстояния поясняется схемой, приведенной на рис. 1. На рис. 1 представлена оптическая схема инфракрасного объектива в двух дискретных положениях I и II. Стабильное положение компонента 1 и компонента 3, в совокупности с неизменным положением плоско-

сти изображения – постоянного заднего фокального отрезка $a'_{F'}$, при смене фокусного расстояния позволяет обеспечить стабильную длину объектива. Второй отрицательный компонент 2 перемещается из положения I в положение II на расстояние d . При решении задачи в области гауссовой оптики считаем, что компонент 2 встает вплотную к компоненту 3 в положении I и к компоненту 1 в положении II, соответственно, расстояние d между компонентами 1 и 3 является и расстоянием перемещения компонента 2. Высота апертурного луча на компонентах 1 и 3 обозначена на рисунке и в последующих формулах h_1 и h_3 .

Если для положения I (см. рис. 1, а, УПЗ) принять условия нормировки $f'=1$; $h_1=1$; $\text{tg } \alpha'=1$, обозначить отношение фокусного расстояния в режиме узкого поля к фокусному расстоянию в режиме широкого поля через k , то для предлагаемой схемы, на основании использования законов геометрической оптики, получаются следующие аналитические зависимости между параметрами схемы:

$$\varphi_1 = \varphi = 1; a'_{F'} = h_3 = 1 - d;$$

$$d = 1 \pm (\sqrt{k^3 - 2k^2 + k} / (1 - k));$$

$$\varphi_3 = -\varphi_2 = (1 - d - k + dk) / dk,$$

где φ , φ_1 , φ_2 , φ_3 – относительные оптические силы объектива, компонентов 1, 2 и 3 соответственно; d – перемещение компонента 2 вдоль оптической оси для изменения фокусного расстояния.

На рис. 2 приведены три варианта решений в гауссовой области оптики с числовыми значениями основных параметров, рассчитанных по вышеприведенным формулам.

Как показывает анализ представленных вариантов, по мере возрастания перепада фокусных расстояний возрастают требуемые значения перемещения подвижного компонента 2, абсолютные значения оптических сил компонентов 2 и 3, относительные отверстия компонентов 1, 2 и 3. Именно от значений последних зависит дизайн конкретной оптической системы при проектировании: количество линз в компонентах, дизайн отдельных линз, наличие асферических поверхностей при безусловном выполнении требований по абберационному согласованию разрабатываемой системы с размерами пикселей и форматом используемого матричного болометрического приемника излучений.

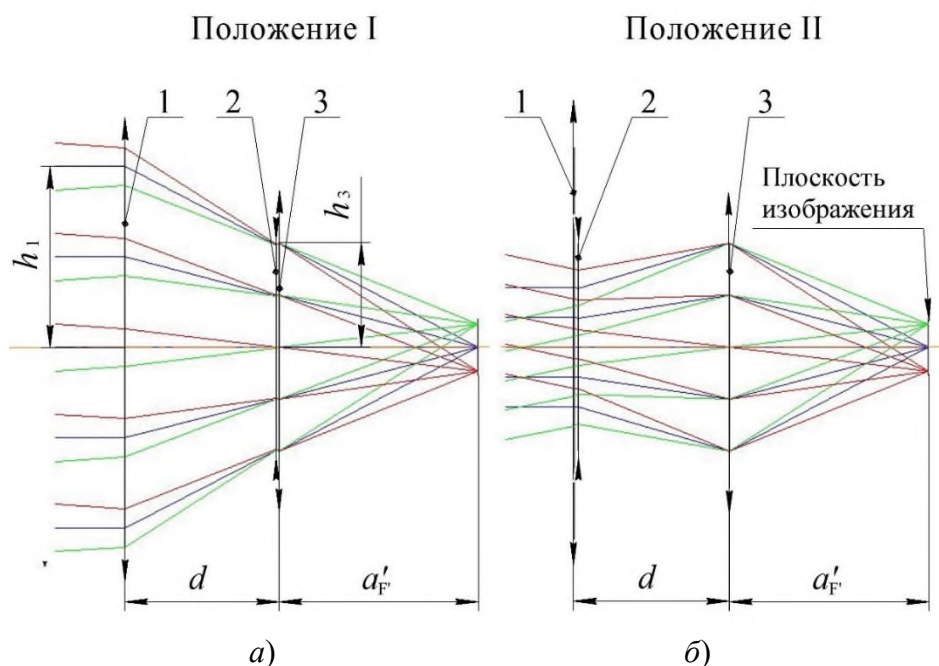


Рис. 1. Схема, поясняющая способ обеспечения постоянства относительного отверстия при смене фокусного расстояния:
а) УПЗ; б) ШПЗ

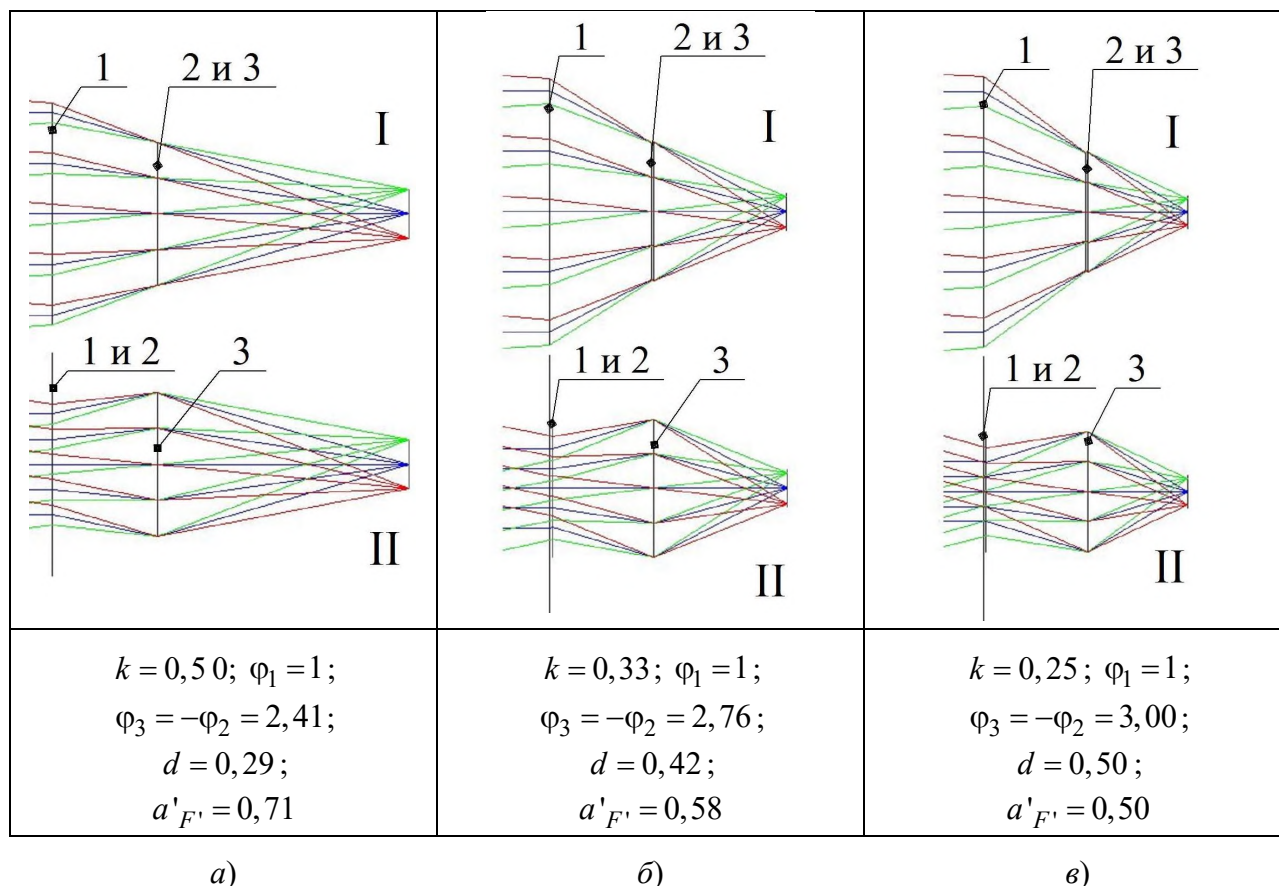


Рис. 2. Варианты схемных решений для перепада фокусных расстояний:

а) в 2 раза; б) в 3 раза; в) в 4 раза

Технические решения и результаты

В таблице приведена информация по четырем оптическим схемам объективов с дискретной сменой фокусных расстояний, разработанным в разные годы при участии авторов [10–12].

Фокусные расстояния указаны соответственно для ШПЗ и УПЗ. Относительная длина приведена как отношение длины объектива вдоль оптической оси от первой поверхности до плоскости приемника к значению фокусного расстояния, соответствующего УПЗ. Для патентов [11, 12] значения относительной длины приведены для каждого из двух вариантов, являющихся предметом изобретения.

По мере совершенствования приемников (увеличения количества элементов и уменьшения размеров пикселей) в оптических системах либо увеличивается количество

линз, либо применяются линзы асферического дизайна.

Четвертая схема в таблице, разработанная в рамках настоящего исследования, призвана продемонстрировать возможности применения линз биасферического дизайна для создания инфракрасных объективов с дискретной сменой оптических характеристик по способу, который представлен на рис. 1. В отличие от схемы [4] с биасферическими линзами, в схеме на рис. 3 осевая длина и относительное отверстие остаются неизменными при смене полей зрения и составляют 1 : 1,1.

При смещении подвижного компонента вдоль оптической оси из одного крайнего положения в другое, угловое поле меняется с $18,6^\circ \times 13,86^\circ$ в режиме ШПЗ до $9,12^\circ \times 6,85^\circ$ в режиме УПЗ, увеличивая в два раза масштаб наблюдаемой сцены и, соответственно, угловой размер разрешаемого элемента в пространстве предметов. В этой си-

стеме при балансировке остаточных aberrаций в пятно, сопоставимое с размером пикселя приемника, относительные оптические силы компонентов составили: второго – минус 2,1; третьего – 2,7; значение подвижки второго компонента вдоль оптической оси – 0,33. Биасферический дизайн линз позволяет обеспечить дифракционное качество изображения, что демонстрируется графиками ФКЭ (см. рис. 3, б). Кривые 2–5 на графиках соответствуют точке в центре кадра

изображения, точке на краю горизонтального поля зрения, точке на краю вертикального поля зрения и точке, соответствующей краю диагонали кадра. Близость кривых 2–5 к дифракционной кривой 1 и практическое равенство значений ФКЭ для пикселя 17×17 мкм в каждом из режимов работы подтверждают высокое качество коррекции aberrаций и отражают неизменность относительного отверстия в режимах УПЗ и ШПЗ.

Объективы с дискретной сменой фокусного расстояния

Фокусные расстояния ШПЗ / УПЗ, мм	k	$D:f'$	Диagonalь приемника, мм	Формат приемника; размер пикселя, мм	Относительная длина	Количество подвижных компонентов	Количество линз	Количество асферических поверхностей	Источник
20 / 40	2	1:1,0	8,0	160×120; 0,040	1,88	1	4	1	10
60 / 180	3	1:1,2	16,0	320×240; 0,040	1,28; 1,88	2	5	–	11
24 / 72	3	1:1,2	12,0	384×288; 0,025	1,43; 1,39	2	6	–	12
34 / 68	2	1:1,1	13,6	640×480; 0,017	1,70	1	4	8	–

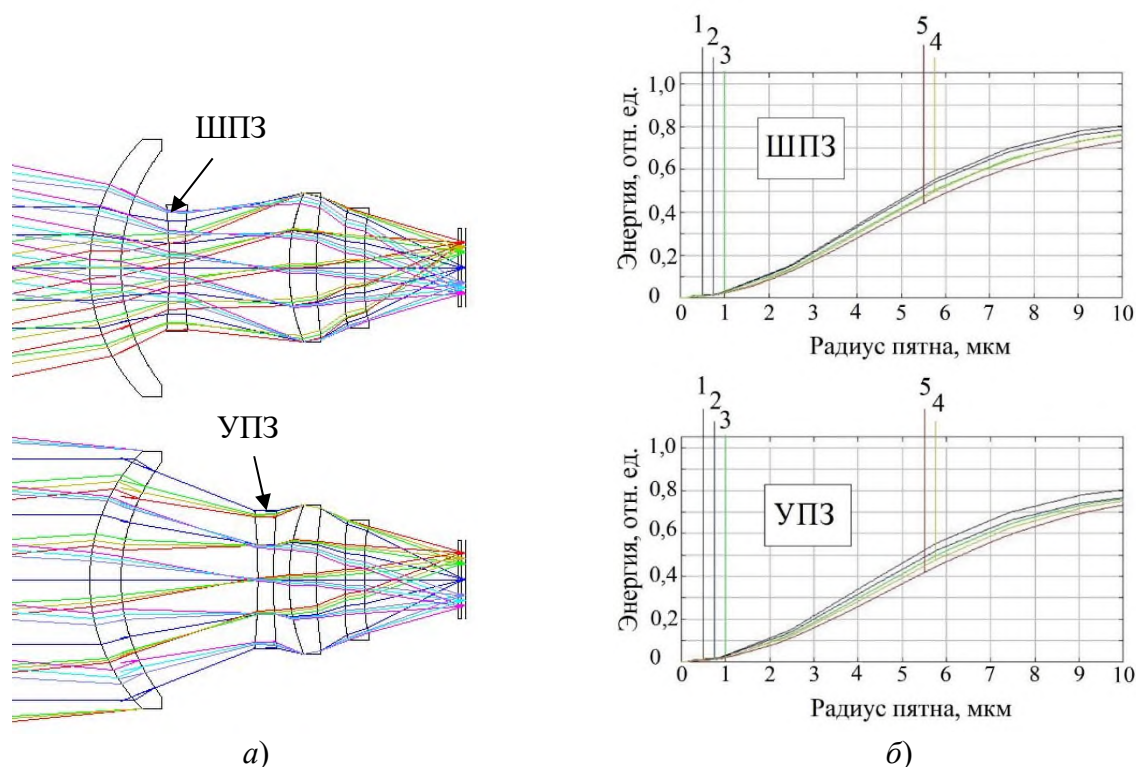


Рис. 3. Инфракрасный объектив с двумя полями зрения:

а) оптическая схема объектива в положениях ШПЗ и УПЗ; б) ФКЭ для различных координат точек изображения (1 – дифракционный предел; 2 – 0 мм; 3 – 4,08 мм; 4 – 5,44 мм; 5 – 6,8 мм)

Выводы

В выводах отмечается следующее.

Для реализации преимуществ, которые открываются при эксплуатации тепловизионной аппаратуры со сменными полями зрения, необходимы новые схемы светосильных объективов, обеспечивающих согласование с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений. При смене фокусного расстояния оптическая система объектива должна сохранять постоянство относительного отверстия. Предложена принципиальная схема построения объектива, удовлетво-

ряющая указанному требованию. Реализованные на основе предложенной схемы инженерные решения отличаются дифракционным качеством изображения, уменьшенной относительной длиной, стабильностью относительного отверстия при смене характеристик и могут представлять интерес для разработчиков новых тепловизионных приборов и комплексов, прежде всего гражданского применения, в том числе при решении задач, требующих высоких метрологических показателей, например, для решения задач дистанционного выявления лиц с повышенной температурой тела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : ЛОГОС, 2004. – 444 с.
2. Mann Allen, Arthur R. Weeks, Jr. Infrared Optics and Zoom Lenses: Vol.: TT83. – SPIE PRESS BOOK, 2009. – 182 p.
3. US 7848015. United States. Compact two-element infrared objective lens and IR or thermal sight for weapon having viewing optics [Electronic resource] / Allie M. Baker; Pat. Assignee Goodrich Corp. – Pub. date 2010.12.07. – 27 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US7848015B2/en>.
4. CA 2696775. Canada. Compact two-element infrared objective lens and ir or thermal sight for weapon having viewing optics [Electronic resource] / Allie M. Baker; Pat. Assignee Goodrich Corp. – Pub. date 2011.05.10. – 47 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/CA2696775C/en>.
5. US 20040036982. United States. Fixed focus, optically athermalized, diffractive infrared zoom objective lens [Electronic resource] / Robert Chipper; Pat. Assignee Raytheon . – Pub. date 2004.02.26 – 18 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US20040036982>.
6. JP 3982554. Japan. Infrared zoom lens and infrared camera [Electronic resource] / Chihiro Hiraiwa, Tatsuya Izumi. – Pub. date 2007.09.26. – 22 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/JP3982554B2/en>.
7. KR 101265436. South Korea. The dual field of view lens module for un-cooled the thermal imaging camera [Electronic resource] / Hyun Kyu Kim, Ok Chang Min. – Pub. Date 2013.05.16. – 11 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/KR101265436B1/en>.
8. CN 203385929. China. Infrared zoom lens with large zoom ratio [Electronic resource] / Xu Yuhui, Liu Tao, Zhao Ying, Sun Jianjun, Ma Tao. – Pub. Date 2014.01.08. – 8 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/CN203385929U/en>.
9. US 7564617. United States. Short infrared zoom lens system [Electronic resource] / Abraham Reichert – Pub. Date 2009.07.21 – 12 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US7564617B2/en>.
10. Пат. 2316797. G02D 15/16, 9/34, 13/14. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра / Олейник С. В. ; патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – Заявл. 16.06.2006 ; опубл. 10.02.2008, бюл. № 4.
11. Пат. 2339983. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра (варианты) / Олейник С. В., Хацевич Т. Н. ; патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – Заявл. 16.06.2006 ; опубл. 27.11.2008, бюл. № 33.
12. Пат. 2538067. Светосильный объектив с изменяемой величиной поля зрения для тепловизора (варианты) / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. ; патентообладатель Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – Заявл. 18.06.2013 ; опубл. 10.01.2015, бюл. № 1.
13. CA 2750354. Canada. Dual field-of-view optical imaging system with dual focus lens [Electronic resource] / Hubert Caron – Pub. Date 2015.07.21– 21 p. – Mode of Access: <https://patents.google.com/patent/CA2750354C/en>.

14. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // ПРИБОРЫ. – 2018. – № 1 (211). – С. 43–50.

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

Получено 21.04.2020

© Т. Н. Хацевич, Е. В. Дружкин, К. Д. Волкова, 2020

HANDHELD THERMAL VISION DEVICES WITH VARIABLE CHARACTERISTICS

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Evgeniy V. Druzhkin

LUGGAR Co Ltd., 11, Shevchenko St., Novosibirsk, 630074, Russia, General Manager, phone: (962)829-63-39, e-mail: druzhkinev@luggar.biz

Ksenia D. Volkova

Optical Design Office Co Ltd, 11, Shevchenko St., Novosibirsk, 630074, Russia, Design Engineer, phone: (923)240-77-94; e-mail: volkovakd@luggar.biz

The intensive development of thermal imaging device is accompanied by the expansion of its functional possibilities. One of them is the realization of changing magnifications and fields. The aim of the work is to justify the method of changing focal lengths and fields, ensuring the constancy of the relative aperture and axial length of the lenses when changing the field in thermal imaging devices using uncooled microbolometer infrared sensor arrays. A method of structural synthesis of a lens of three components is proposed. The method is characterized by the following: the optical power of the first component is equal to the optical power of the lens, the sum of the optical powers of the second and third components is zero. The aperture diaphragm is located on the third component. The internal component has two discrete positions. Relations between the parameters of components that are found provide the invariability of the back focal length and the relative aperture of the lens when changing the focal length. The capabilities of the method are confirmed by the development of four infrared lenses with two- and three-fold differences in focal lengths. Decreasing the length along the axis and the stability of the relative aperture of the lens with diffractive image quality when changing the focal length in an optical scheme with a bi-aspheric design is achieved.

Keywords: infrared lenses, thermal imaging device, uncooled infrared microbolometer, discrete field, variable focal length, bi-aspheric design, relative aperture

REFERENCE

1. Tarasov, V. V., & Yakushenkov, Y. G. (2004). *Infrakrasnye sistemy «smotryashchego» tipa [Infrared systems of "looking" type]*. Moscow: Logos Publ., 444 p. [in Russian].

2. Mann Allen, Arthur, R., & Weeks, Jr. (2009). *Infrared Optics and Zoom Lenses: Vol. TT83*. SPIE PRESS BOOK, 182 p.

3. Allie M. Baker. (2010). US 7848015. Compact two-element infrared objective lens and IR or thermal sight for weapon having viewing optics. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/US7848015B2/en>.

4. Allie M. Baker. (2011). CA 2696775. Compact two-element infrared objective lens and ir or thermal sight for weapon having viewing optics. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/CA2696775C/en>.

5. Robert Chipper. (2004). US 20040036982. Fixed focus, optically athermalized, diffractive infrared zoom objective lens. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/US20040036982>.
6. Chihiro Hiraiwa, & Tatsuya Izumi. (2007). JP 3982554. Infrared zoom lens and infrared camera. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/JP3982554B2/en>.
7. Hyun Kyu Kim, & Ok Chang Min. (2013). KR 101265436. The dual field of view lens module for uncooled the thermal imaging camera. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/KR101265436B1/en>.
8. Xu Yuhui, Liu Tao, Zhao Ying, Sun Jianjun, & Ma Tao. (2014). CN 203385929. Infrared zoom lens with large zoom ratio. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/CN203385929U/en>.
9. Abraham Reichert. (2007). US 7564617. Short infrared zoom lens system. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/US7564617B2/en>.
10. Olejnik S. V. (2008). *Patent RF No. 2316797*. Lens objective with changeable focal length for operation within ir spectrum area. IP Russian Federation [in Russian].
11. Olejnik S. V., & Khatsevich, T. N. (2008). *Patent RF No. 2339983*. Lens objective with variable focal length for operation in infrared spectrum (versions). IP Russian Federation [in Russian].
12. Khatsevich, T. N., & Druzhkin, E. V. (2015). *Patent RF No. 2538067*. Objective with a variable field of view for infrared device (variants). IP Russian Federation [in Russian].
13. Hubert Caron. (2015). CA 2750354. Dual field-of-view optical imaging system with dual focus lens. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/CA2750354C/en>.
14. Druzhkin, E. V., & Khatsevich, T. N. (2018). Implementation of general technical and special requirements in the development of small-sized thermal imaging observation devices and sights. *Pribory [Instruments]*, 1(211), 43–50 [in Russian].
15. Khatsevich, T. N., & Druzhkin, E. V. (2018). Analysis of objective lens for compact infrared devices using a two-component objective model. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 245–261 [in Russian].

Received 21.04.2020

© T. N. Khatsevich, E. V. Druzhkin, K. D. Volkova, 2020