

УДК 681.7.067.2.013.5

Вариообъективы для тепловизионных приборов наблюдения

© 2017 г. **С. Д. Козлов, канд. техн. наук; А. Р. Насыров, канд. физ.-мат. наук;
Н. Г. Нигматуллина**

Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Поступила в редакцию 12.10.2016

Рассмотрены конструкции вариообъективов с различной кратностью изменения фокусного расстояния, предназначенных для работы в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм. Представлены оптические схемы, внешний вид и расчетные технические характеристики объективов.

Ключевые слова: : инфракрасные вариообъективы, инфракрасные матричные приемники излучения, разработка и изготовление инфракрасных вариообъективов.

Коды OCIS: 220.0220

В настоящее время активно разрабатываются оптико-электронные системы (ОЭС), в которых в качестве входной оптики используются инфракрасные (ИК) вариообъективы с управляемым изменением углового поля обзора. Как правило, в таких объективах для обеспечения необходимого качества изображения при изменении дальности до объекта наблюдения и углового поля обзора в условиях различных внешних воздействующих факторов используется встроенный контроллер с управляющей программой.

Основные назначения таких ОЭС — контроль состояния окружающей обстановки, поиск, обнаружение и идентификация объектов и выдача координат цели. В отдельных случаях — это просто мониторинг ситуации на определенном участке, например, государственной границы или иной охраняемой территории. Однако в большинстве случаев они применяются в качестве обзорно-прицельных систем военного назначения. В качестве примеров можно назвать такие системы, как ARGOS 410-Z (*Carl Zeiss Optronics*, Германия), AN/DAS-1, MTS-A (*Raytheon*, США).

Естественно, наиболее желаемым результатом является контроль ситуации в максимально широком секторе обзора с возможностью обнаружения и идентификации в нем объектов минимальных размеров. Однако в силу ряда принципиальных конструктивных и технологических ограничений, связанных с практической реализуемостью расчетных оптических схем и характеристиками фотоприемных устройств (ФПУ), диапазон изменения углового поля ОЭС, следовательно,

и диапазон изменения фокусного расстояния изготавливаемых ИК вариообъективов ограничен. В известных вариообъективах фирм «OPHIR» и «RP optical lab» (Израиль), IRzoom (США), Xenics (Бельгия) кратность изменения фокусного расстояния ($M = f'_{\max}/f'_{\min}$) достигает $30\times$ в спектральном диапазоне 3–5 мкм и $12\times$ в диапазоне 8–12 мкм.

В АО «НПО ГИПО» имеется многолетний опыт разработки и производства ИК вариообъективов, включающий расчет оптических схем, разработку схем управления и конструкции, изготовление (в том числе небольшими сериями), исследование и контроль качества. В статье [1] рассмотрены конструкции ряда таких вариообъективов, предназначенных для работы с охлаждаемым матричным фотоприемным устройством (МФПУ) в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм. Технические характеристики четырех рассмотренных объективов приведены в таблице.

Технические характеристики ИК вариообъективов

Технические характеристики	1	2	3	4
Спектральный диапазон работы, мкм	3–5		8–12	
Фокусное расстояние, мм	75–300	60–500	100–500	60–300
Диафрагменное число	2	1,8	2	2
Линейное поле зрения, мм	9,6×7,2			

Объективы разработаны по известной методике [2, 3] и представляют собой пятикомпонентную схему, в которой три компонента неподвижные, а два подвижных компонента обеспечивают одновременное выполнение двух условий: изменение фокусного расстояния и неподвижность плоскости изображения. Высокое качество изображения и оптимальные габаритные размеры объективов обеспечиваются выбранными соотношениями фокусных расстояний отдельных компонентов к максимальному фокусному расстоянию объектива, а также подбором материалов линз компонентов и использованием асферических поверхностей. В этих объективах максимальная кратность изменения фокусного расстояния $8,3\times$. Эффективность схем построения и методики расчета рассмотренных объективов подтверждена проведенными испытаниями при работе в комплексе объектив — МФПУ.

Успехи технологии создания МФПУ с большей размерностью и меньшими размерами пиксела, необходимость совершенствования тепловизионной техники предъявляют к вариообъективам новые требования, что катализировали продолжение этих разработок в направлении увеличения кратности, уменьшения габаритов и массы, улучшения качества изображения.

Примером ИК вариообъектива с улучшенными массогабаритными характеристиками может служить объектив (рис. 1б), оптическая схема которого приведена на рис. 1а [4]. Объектив работает в спектральном

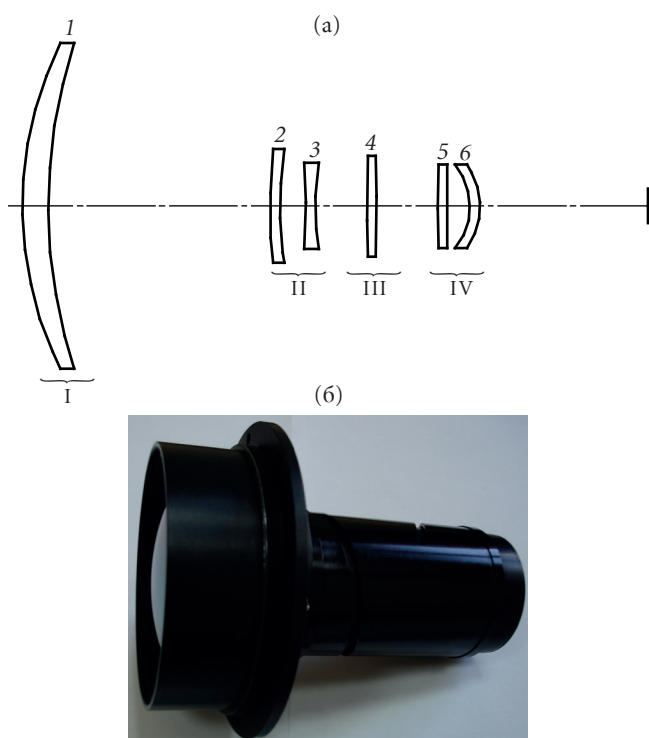


Рис. 1. Оптическая схема (а) и внешний вид (б) объектива с $f' = 50\text{--}200$ мм, спектральный диапазон работы 8–12 мкм. I–IV — компоненты объектива, 1–6 — линзы: 1, 3 (асферическая), 4–6 — из германия, 2 — из селенида цинка.

диапазоне 8–12 мкм, фокусное расстояние изменяется в интервале от 50 (f'_{\min}) до 200 (f'_{\max}) мм, относительное отверстие 1:2, линейное поле зрения 9,6×7,2 мм. Объектив предназначен для работы с МФПУ, имеющим формат матрицы 320×240, размер пиксела 30 мкм.

Объектив состоит из четырех компонентов, из них первый I и четвертый IV неподвижные, а одновременным перемещением второго II и третьего III компонентов вдоль оптической оси осуществляется четырехкратное плавное изменение фокусного расстояния. Апертурной диафрагмой является оправа линзы 5 неподвижного IV компонента, что обеспечивает постоянное относительное отверстие во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. Первый и III компоненты содержат по одной линзе из германия (1 и 4), II компонент содержит две линзы, одна из них 2 из селенида цинка, другая 3 из германия, IV компонент содержит две линзы (5 и 6) из германия (общая масса линз 315 г). Одна линза объектива 3 выполнена асферической. Длина объектива от первой поверхности до плоскости изображения 196,5 мм (меньше, чем максимальное фокусное расстояние), при этом II компонент при изменении фокусного расстояния перемещается на 17,3 мм, III — на 21,3 мм. Выбранное конструктивное исполнение обеспечивает эффективную коррекцию аберраций. Качество изображения объектива, оцениваемое по функции концентрации энергии (ФКЭ) на площадке изображения, равной размеру пиксела МФПУ (30 мкм), следующее: в центре поля зрения значение ФКЭ не ниже 0,67, на краю поля зрения, соответствующем краю диагонали МФПУ, — не ниже 0,48 во всем диапазоне изменения фокусного расстояния (дифракционный предел 0,69).

Изменение фокусного расстояния вариообъектива осуществляется электромеханическим приводом (на рисунке не показан), обеспечивающим перемещение подвижных компонентов по определенному закону, в соответствии с конструктивным исполнением управляющих цилиндрических кулачков, выполненных так же, как и в вариообъективах, описанных в работе [1].

Вариообъектив изготовлен, испытан в диапазоне температур от -40 до 40 °С и подтвердил расчетные параметры.

В целях расширения возможностей тепловизионных систем наблюдения были разработаны вариообъективы с увеличенной кратностью изменения фокусного расстояния: для спектрального диапазона 3–5 мкм с максимальной кратностью изменения фокусного расстояния $25\times$ и для спектрального диапазона 8–12 мкм с максимальной кратностью изменения фокусного расстояния $10\times$.

Оптическая схема и внешний вид такого вариообъектива для спектрального диапазона 8–12 мкм [5] представлены на рис. 2. Фокусное расстояние изменяется в интервале от 30 до 300 мм, кратность изменения фокусного расстояния $10\times$, относительное отверстие 1:2, линейный размер изображения 9,6×7,68 мм. Объектив предназначен для работы с охлаждаемым МФПУ, имеющим формат матрицы 320×256, размер пиксела 30 мкм.

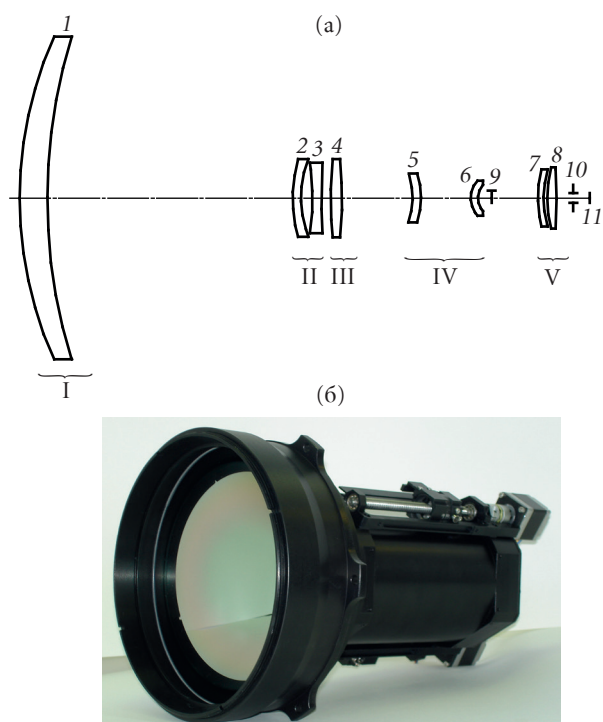


Рис. 2. Оптическая схема (а) и внешний вид (б) объектива с $f' = 30\text{--}300$ мм, спектральный диапазон работы 8–12 мкм. I–V — компоненты объектива, 1–8 — линзы; 1, 3, 4 (асферическая), 5, 6, 8 (асферическая) — из германия, 2, 7 — из селенида цинка; 9 — плоскость промежуточного изображения, 10 — апертурная диафрагма, 11 — плоскость изображения.

Объектив состоит из пяти компонентов, из них I, IV и V — неподвижные, а одновременным перемещением II и III компонентов вдоль оптической оси осуществляется плавное изменение фокусного расстояния. Между IV и V компонентами расположена плоскость промежуточного изображения 9. Апертурная диафрагма 10 объектива вынесена в пространство между последним компонентом V и плоскостью изображения 11, тем самым обеспечивается оптимальное его сопряжение с охлаждаемым МФПУ. Этим достигается минимальное виньетирование наклонных пучков лучей и снижается рассеянное излучение от оптических деталей и других элементов конструкции объектива, что повышает освещенность и контраст изображения и улучшает его качество. Первый и III компоненты содержат по одной линзе из германия (1 и 4). Второй компонент содержит две линзы, одна из них 2 из селенида цинка, другая 3 из германия, IV компонент содержит две линзы (5 и 6) из германия, V — две линзы, одна из них 7 из селенида цинка, другая 8 — из германия. Две линзы объектива (4 и 8) выполнены асферическими. Длина объектива от первой поверхности до плоскости изображения 330 мм, длина перемещения II компонента при изменении фокусного расстояния составляет 53 мм, III — 25,4 мм.

Значения ФКЭ на площадке изображения, равной размеру пиксела МФПУ (30 мкм), следующие: в центре поля зрения значение ФКЭ $\geq 0,65$, на краю поля зрения,

соответствующем краям диагонали МФПУ, — не ниже 0,48 во всем диапазоне изменения фокусного расстояния (дифракционный предел 0,69).

Результатом разработок, направленных на дальнейшее увеличение кратности ИК вариообъективов, является оптическая схема объектива, представленная на рис. 3а (внешний вид объектива — на рис. 3б). Объектив предназначен для работы в спектральном диапазоне 3–5 мкм с охлаждаемым МФПУ, имеющим формат матрицы 640×512, размер пиксела 15 мкм. Фокусное расстояние объектива изменяется в интервале от 20 до 500 мм, кратность изменения фокусного расстояния 25 \times , относительное отверстие 1:4, линейный размер изображения 9,6×7,68 мм.

Объектив содержит I компонент (линзы 1–6) и II компонент (линза 7), между которыми расположена плоскость промежуточного изображения. Одновременным перемещением линз 2 и 3 вдоль оптической оси осуществляется плавное изменение фокусного расстояния объектива. Апертурная диафрагма 9 так же, как в представленном выше объективе, вынесена в пространство между последней линзой 7 и плоскостью изображения 10 с целью обеспечения оптимального сопряжения объектива с охлаждаемым МФПУ.

В качестве материалов линз объектива использованы кремний (линзы 1, 2, 4, 5) и германий (линзы 3, 6, 7). Линзы объектива (1, 2, 3, 6 и 7) — асферические. На асферических поверхностях линз 1 и 7 выполнен дифрак-

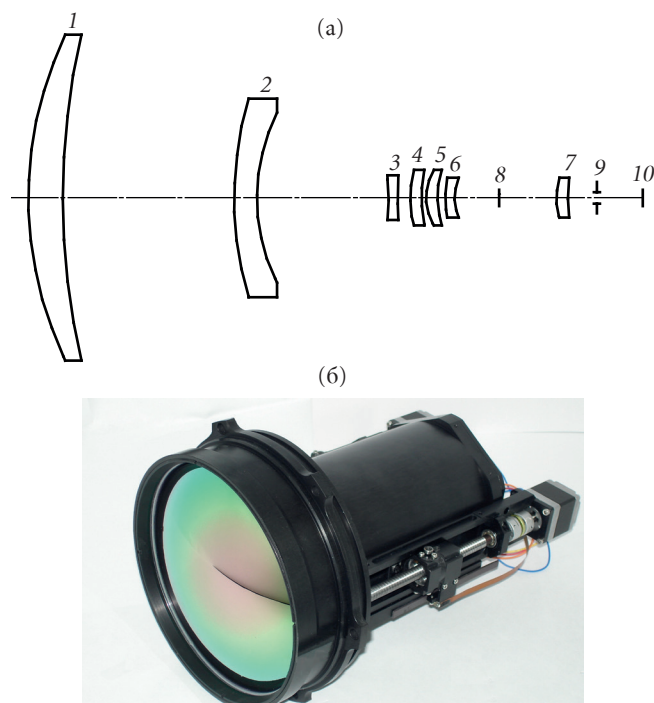


Рис. 3. Оптическая схема (а) и внешний вид (б) объектива с $f' = 20\text{--}500$ мм, спектральный диапазон работы 3–5 мкм. 1–7 — линзы; 1, 2, 4, 5 — из кремния, 3, 6, 7 — из германия, 1, 2, 3, 6, 7 — асферические, 1, 7 — с дифракционным микрорельефом; 8 — плоскость промежуточного изображения, 9 — апертурная диафрагма, 10 — плоскость изображения.

ционный микрорельеф (киноформ), что оказалось эффективным для исправления хроматических aberrаций во всем диапазоне изменения фокусного расстояния.

Длина объектива L от первой поверхности до плоскости изображения – 269,3 мм. При максимальном фокусном расстоянии объектива 500 мм коэффициент телеукорочения ($T_L = L/f'_{\max}$) составляет 0,54, что говорит о его компактности. Для кратности изменения фокусного расстояния $25\times$ в объективе сравнительно небольшие расстояния перемещения подвижных линз: линза 2 перемещается на 54,1 мм, линза 3 — на 34,2 мм. Выбранное конструктивное исполнение позволило эффективно провести коррекцию aberrаций и обеспечить хорошее качество изображения во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. Значения ФКЭ на площадке изображения, равной размеру пиксела МФПУ (15 мкм), в центре поля зрения не ниже 0,34 во всем диапазоне изменения фокусного расстояния (дифракционный предел 0,36). На краю поля зрения, соответствующем краю диагонали МФПУ, значения ФКЭ не ниже 0,25 почти во всем диапазоне изменения фокусного расстояния (0,2 — при минимальном фокусном расстоянии).

Последние два типа вариообъективов (рис. 2, 3), несмотря на различия в оптической схеме и в спектральных диапазонах назначения, созданы по единому принципу и даже внешне схожи. Авторами разработки конструкций этих вариообъективов было принято решение: позиционирование подвижных компонентов выполнять с помощью независимых прецизионных приводов линейного перемещения, управляемых по программе, автоматически учитывающей температуру окружающей среды. Это связано с тем, что в разработанных оптических схемах требование к точности позиционирования подвижных компонентов достигает 5–10 мкм. Обеспечить такую точность механизмами линейного перемещения существенно проще, чем с помощью кулачкового механизма. К тому же при этом можно исключить дополнительный привод для температурной подъюстировки.

Принцип управления фокусировкой вариообъектива приведен на функциональной схеме (рис. 4). Данные о текущих координатах подвижных компонентов (линз) X_1 и X_2 с датчиков положения 1 и 2, а также информация о текущем значении температуры t °C окружающей среды с нескольких датчиков температуры, расположенных в различных местах конструкции вариообъектива, поступают в вычислитель. По посту-

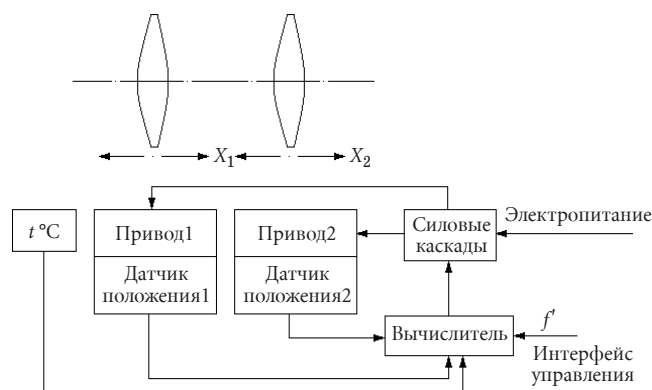


Рис. 4. Функциональная схема вариообъектива.

плению внешней команды на установку фокусного расстояния в вычислителе проводится сравнение текущих значений X_1 и X_2 с аналогичными расчетными значениями $X_{1cal} = F(f', t)$ и $X_{2cal} = F(f', t)$, соответствующими требуемому значению фокусного расстояния при текущей температуре. По результатам сравнения выдаются команды управления в силовые каскады, где формируются электрические сигналы управления приводами для перемещения подвижных линз в положения $X_1 \rightarrow X_{1cal} = F(f', t)$ и $X_2 \rightarrow X_{2cal} = F(f', t)$.

Прецизионные приводы линейного перемещения выполнены в виде унифицированного модуля (на рис. 3б виден на переднем плане), содержащего шаговый двигатель и сопряженный с ним ролик-винтовой механизм, преобразующий вращательное движение вала двигателя в линейное перемещение подвижной линзы с точностью до нескольких микрометров, с запасом, превышающим требования к рассмотренным схемам.

Вариообъективы изготовлены, испытаны в диапазоне температур от -40 до 40 °C и подтвердили расчетные параметры.

Разработанные образцы ИК вариосистем и отработанные технологии их производства позволяют проектировать, изготавливать и внедрять в отечественное оптико-электронное приборостроение ИК системы для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм с широким диапазоном плавного изменения углового поля, соответствующего требованиям современных и перспективных образцов оптико-электронных систем различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.П., Козлов С.Д., Морозов А.Е., Нигматуллина Н.Г. Объективы с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием для работы в инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2007. Т. 74, № 1. С. 70–73.
2. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 672 с.
3. Шнякин М.А. Исследование и расчет объективов с широким интервалом изменения фокусного расстояния // Автореф. канд. дис. Л.: ГОИ, 1971.
4. Иванов В.П., Морозов А.Е., Насыров А.Р., Нигматуллина Н.Г. Инфракрасный объектив с плавно изменяющимся фокусным расстоянием // Патент RU 2 441 196, С1. 2012.
5. Балоев В.А., Иванов В.П., Насыров А.Р., Нигматуллина Н.Г., Шарифуллина Д.Н. Инфракрасный объектив с плавно изменяющимся фокусным расстоянием // Патент RU 2 569 429, С1. 2015.