

УДК 535.317.2

Термокомпенсация в оптической системе тепловизионного прибора

Е. О. Ульянова, К. П. Шатунов

Представлена оптическая система тепловизионного прибора для работы в широком диапазоне температур окружающей среды (от -50 до $+50$ °С). Рассмотрены способы термокомпенсации, приводятся основные параметры и характеристики оптической системы, а также оценка качества изображения.

PACS: 42.79.-e, 42.88.+h

Ключевые слова: оптическая система, тепловизионный прибор, температурное влияние, термокомпенсация.

Введение

При использовании оптико-электронных систем (ОЭС) в условиях широкого диапазона температур окружающей среды возникает проблема компенсации влияния температурных воздействий на выходные характеристики фокусирующего узла. К таким характеристикам, в первую очередь, относятся фокусное расстояние и параметры кружка рассеяния. Показатели преломления большинства используемых в тепловидении преломляющих оптических материалов существенно меняются с температурой в диапазоне земных температур. Многие тепловизионные системы работают в диапазоне температур от -40 до $+40$ °С, а в некоторых областях применения, таких как высотная и скоростная авиация или космические корабли, пределы могут быть еще шире. Поэтому возникает необходимость компенсации влияния температурных воздействий на параметры линз и элементов конструкции ОЭС, обусловленных зависимостью показателя преломления и коэффициента линейного расширения от температуры.

Способы компенсации температурного влияния окружающей среды в оптической системе

Для одиночной линзы, изготовленной из одного материала и находящейся в воздухе, фокусное расстояние f связано с показателем преломления n соотношением*:

$$f = \frac{k}{n-1},$$

где k — геометрическая константа, если материал линзы не расширяется.

Частная производная от f по n равна:

$$\frac{\partial f}{\partial n} = -\frac{k}{(n-1)^2}.$$

Зависимость показателя преломления от температуры также представляется в виде частной производной от n по T и равна $\frac{\partial n}{\partial T}$. Таким образом, небольшое изменение фокусного расстояния при незначительном изменении температуры T приближенно описывается выражением:

$$\Delta f = -\frac{k}{(n-1)^2} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T = -\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T.$$

Если изменение фокусного расстояния велико, оно будет определяться формулой

$$f = \frac{k}{n(T_2)-1} - \frac{k}{n(T_1)-1}.$$

Изображение бесконечно удаленного объекта сдвигается на Δf по направлению к линзе при отрицательном значении $\frac{\partial n}{\partial T}$ и на Δf по направлению

от нее — при положительном. Если этот сдвиг превышает допустимую глубину резкости, его необходимо компенсировать.

В табл. 1 представлены значения $\frac{\partial n}{\partial T}$ и коэффициентов теплового расширения наиболее употребительных инфракрасных оптических материалов.

Ульянова Елена Олеговна, младший научный сотрудник.
Шатунов Константин Павлович, зав. сектором.
Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН, "Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники".
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, 2/1.
Тел. (383) 330-65-59. E-mail: helen@oesd.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2011 г.

© Ульянова Е. О., Шатунов К. П., 2012

* Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.

Таблица 1

Наиболее употребительные инфракрасные оптические материалы

Материал	$\frac{\partial n}{\partial T}$ при 300 К, $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Коэффициент теплового расширения, $10^{-6} \text{ см}/(\text{см}\cdot\text{град})$
Германий	280—300	5,5—6,1
Кремний	162—168	4—4,15
Селенид цинка	100	8,53
Теллурид кадмия	93—107	5,9
Арсенид галлия	149	5,7—6

Поскольку применяемые оптические материалы имеют значительные температурные коэффициенты изменения показателей преломления, возникает необходимость применения системы термокомпенсации (коррекции температурного влияния окружающей среды). Для реализации этой задачи возможны следующие решения:

1. Предусмотреть ручную подфокусировку.

2. Снабдить систему автоматической электро-механической подфокусировкой (активная компенсация, за счет применения приводов).

3. Исключить влияние температуры, подбирая материалы различных элементов системы таким образом, чтобы результирующая эффективная величина $\frac{\partial n}{\partial T}$ равнялась нулю (пассивная компенсация).

Следует заметить, что осуществить полную пассивную компенсацию невозможно, поскольку линзы в системе нагреваются неравномерно, так что наблюдаются градиенты в самой линзе и от линзы к линзе. К недостаткам метода пассивной компенсации также следует отнести усложнение коррекции хроматической аберрации.

4. Исключить влияние температуры, монтируя линзы системы таким образом, чтобы они перемещались с изменением температуры, компенсируя расфокусировку.

При небольших изменениях температуры увеличение какого-либо размера R линзы равно:

$$\Delta R = R \cdot \alpha \cdot \Delta T,$$

где α — коэффициент теплового расширения, $\text{мм}/(\text{мм}\cdot^\circ\text{C})$.

Очевидно, что фокусное расстояние одиночной линзы будет изменяться в соответствии с формулой

$$\frac{\partial f}{\partial T} = \alpha \cdot f.$$

Влияние теплового расширения линз обычно мало по сравнению с влиянием изменения показателя преломления в зависимости от температуры. Однако оправы линз также расширяются и сжимаются, вызывая расфокусировку.

Все рассмотренные факторы можно учесть уравнением полной расфокусировки:

$$\delta = \left(-\frac{f}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha f + \alpha L\right) \Delta T,$$

где L — полная длина системы линз.

В тепловизионных прицелах и ручных приборах наблюдения термокомпенсация обеспечивается ручной подфокусировкой. В бортовых приборах и особенно приборах для беспилотных летательных аппаратов компенсация терморасфокусировки должна производиться автоматически. Для ручных приборов ручная подфокусировка тоже нежелательное решение, так как это приводит к лишним для оператора манипуляциям с прибором. Способы термокомпенсации, которые применимы для объективов охлаждаемых тепловизионных систем, для малогабаритных систем имеют ограниченное применение. Для малогабаритных тепловизионных систем предпочтительны два варианта автоматической термокомпенсации:

- пассивная, за счет тепловых свойств материалов линз, оправ и механических элементов;
- активная, за счет малогабаритных приводов.

Пример реализации термокомпенсации в оптической системе тепловизионного прибора

Для использования в широком диапазоне температур окружающей среды (от -50 до $+50$ $^\circ\text{C}$) в Филиале ИФП СО РАН "КТИПМ" была разработана и изготовлена оптическая система тепловизионного прибора с фокусным расстоянием 250 мм для спектрального диапазона 7,7—10,3 мкм, формирующая изображение в плоскости матричного фотоприемного устройства (ФПУ) с форматом кадра 320×256 элементов и шагом между чувствительными элементами 30 мкм (рис. 1).

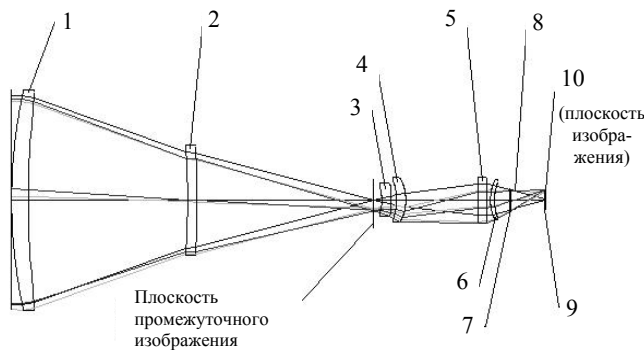


Рис. 1. Оптическая система тепловизионного прибора с матричным ФПУ:

- 1, 2 — входной объектив; 3—6 — проекционная система;
- 7 — входное окно криостата; 8 — охлаждаемая диафрагма;
- 9 — охлаждаемый фильтр; 10 — плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

В представленной оптической системе применена активная автоматизированная термокомпенсация в условиях эксплуатации в диапазоне температур окружающей среды от -50 до $+50$ °С. Компенсация терморасфокусировки обеспечена введением подвижек оптических компонентов, используется перемещение некоторых линз в системе вдоль оптической оси по определенному закону в зависимости от изменения температуры.

Для оптимизации фоновой нагрузки на матричное ФПУ в конструкции криостата предусмотрена охлаждаемая диафрагма. При данной конструкции оптимальной оптической системой для ФПУ будет система, состоящая из входного объектива и проекционной системы, у которой выходным зрачком является охлаждаемая диафрагма криостата, а входной зрачок расположен вблизи фронтальной поверхности 1-й линзы объектива. При этом на матричное ФПУ не будут попадать фоновые потоки от элементов конструкции оптической системы. Для реализации данного принципа построения необходимо проведение совместного абберационного расчета входного объектива и проекционной системы в целях взаимной коррекции остаточных aberrаций входного объектива и проекционной системы.

Оптический тракт строится по следующему принципу: входной объектив оптической системы (поз. 1, 2) формирует промежуточное изображение, а проекционная система (поз. 3—6) проецирует данное изображение в плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ и, кроме того, компенсирует остаточные aberrации входного объектива. При этом выходной зрачок оптической системы совпадает с охлаждаемой диафрагмой ФПУ для устранения фонового излучения от элементов конструкции.

Изменение фокусного расстояния оптического тракта осуществляется заменой входного объектива, либо введением или изменением компонентов во входном объективе, при этом проекционная система остается неизменной.

Оптическая схема входного объектива включает в себя два одиночных линзовых компонента, выполненных из германия и селенида цинка. Проекционная система состоит из четырех оптических компонентов, выполненных из селенида цинка и германия. Все компоненты оптической системы выполнены со сферическими поверхностями.

Для термокомпенсации рассчитаны подвижки одиночного линзового компонента поз. 2 и блока, включающего в себя линзы поз. 3 и 4. Расчет подвижек выполнен через 5° в диапазоне температур от -50 до $+50$ °С. Диапазон величин подвижек линзового компонента поз. 2 составляет от 2,28 мм до $-1,3$ мм, а блока с линзами поз. 3 и 4 — от $-2,64$

до 0,8 мм. Перемещение линзового компонента поз. 2 и блока линз поз. 3 и 4 вдоль оптической оси осуществляется в соответствии с графиком, представленным на рис. 2. Необходимое для термокомпенсации перемещение оптических элементов с прецизионной точностью обеспечивается электромеханическими приводами. В качестве приводов используют шаговые двигатели серии MD 14.

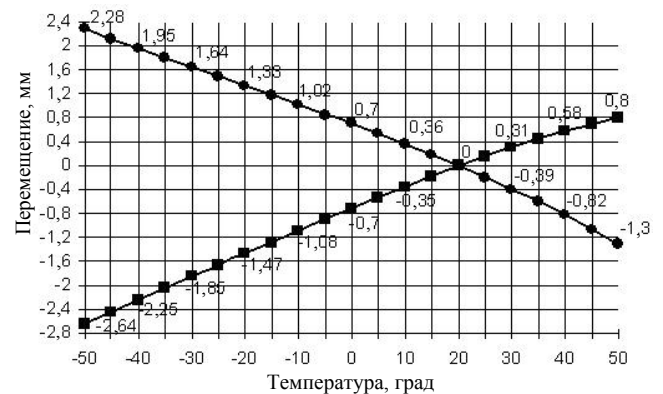


Рис. 2. График зависимости величины перемещения линзового компонента поз. 2 (кривая 1) и блока линз поз. 3 и 4 (кривая 2) вдоль оптической оси от температуры окружающей среды: —●— кривая 1; —■— кривая 2

Диапазон величины изменения фокусного расстояния при изменении температуры окружающей среды находится в пределах от $-2,26$ до $0,65$ мм. Величина относительной погрешности фокусного расстояния составляет от $-0,9$ до $0,3$ % для диапазона температур от -50 до $+50$ °С от номинального значения, рассчитанного при температуре $+20$ °С. График зависимости величины относительной погрешности фокусного расстояния от изменения температуры окружающей среды приведен на рис. 3. Все полученные зависимости (см. рис. 2 и 3) близки к линейным.

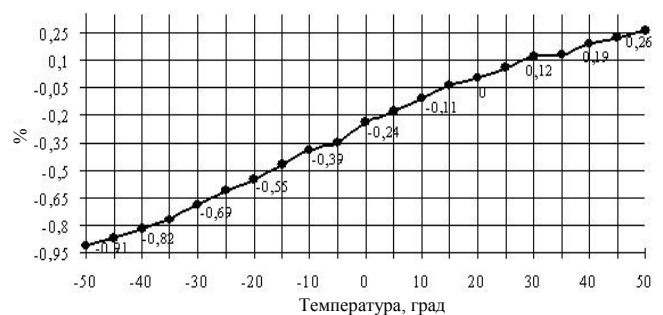


Рис. 3. График зависимости величины относительной погрешности фокусного расстояния от температуры окружающей среды

Оптическая система обеспечивает хорошее качество изображения в диапазоне температур окружающей среды от -50 до $+50$ °С в спектральном

диапазоне 7,7—10,3 мкм, имеет относительное отверстие 1:1,92; поле зрения 2,77° и длину по оси порядка 350 мм. Расчетная масса всех оптических компонентов составляет около 900 г.

Качество изображения разработанной оптической системы оценивается с помощью параметров кружка рассеяния и модуляционной передаточной функции. Параметры модуляционной передаточной функции представленной системы в сравнении с дифракционно-ограниченной системой, параметры кружка рассеяния при температуре окру-

жающей среды +20 °С приведены в табл. 2, а также показаны на рис. 4 и 5.

Таблица 2

Модуляционная передаточная функция

2ω°	Контраст при разрешении N линий/мм				
	10	15	20	25	30
0	0,70	0,54	0,42	0,34	0,29
2,22	0,71	0,55	0,44	0,36	0,29
2,77	0,69	0,53	0,41	0,32	0,24
Дифракционно-ограниченная система					
0	0,78	0,67	0,56	0,46	0,36

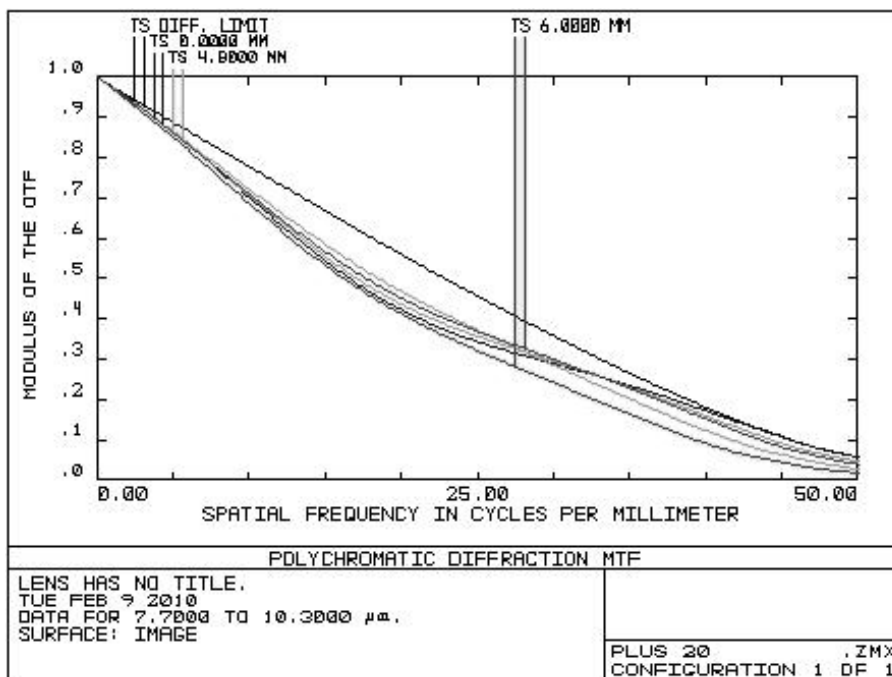


Рис. 4. Модуляционная передаточная функция

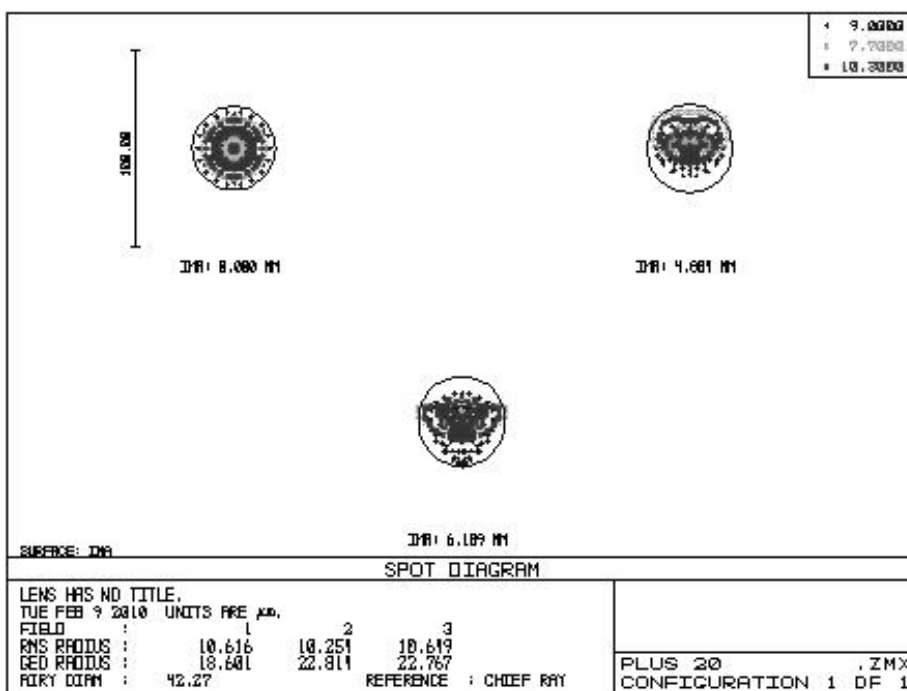


Рис. 5. Функция рассеяния точки

Заключение

Приведенные данные показывают хорошее качество разработанной оптической системы. Геометрический радиус кружка рассеяния точки не превышает 19 мкм в центре поля зрения и 23 мкм

на краю поля зрения. Представленная оптическая система обладает разрешающей способностью, позволяющей использовать ее в оптико-электронных системах (ОЭС) для решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения.

Thermocompensation in an optical system of a thermal imaging device

E. O. Ulyanova, K. P. Shatunov

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, SB RAS,
Technological Design Institute of Applied Microelectronics.
2/1 Academician Lavrentiev av., 630090, Novosibirsk, Russia
E-mail: helen@oesd.ru

Optical system of a thermal imaging device developed at the Novosibirsk Branch of ISP SB RAS "TDIAM" for operation in a wide range of ambient temperatures (from -50 to $+50$ °C) is presented in the paper. Methods of thermocompensation are considered in the article. The optical system of the thermal imaging device, its main parameters and technical characteristics are given in the paper as well as evaluation of its image quality.

PACS: 42.79.-e, 42.88.+h

Keywords: optical system, thermal imaging device, temperature influence, thermocompensation.

Bibliography — 0 references.

Received May 12, 2011