НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Методика расчета тепловизионного объектива # 06, июнь 2012 DOI: 10.7463/0612.0445463 Бодров С. В. УДК 535.317

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>rl-3@mx.bmstu.ru</u>

В настоящее время разнообразные тепловизионные приборы находят все более широкое применение в различных областях науки, техники и медицины [1]. Данная работа посвящена разработке методики расчета светосильного объектива тепловизора, оптическая схема которого содержит минимальное число компонентов. Она позволяет получить исходный вариант двухлинзового объектива с требуемыми значениями сферической аберрации и меридиональной комы. Полученный с ее помощью исходный вариант системы требует дальнейшей оптимизации с использованием любой из известных программ автоматизированной коррекции аберраций.

Современная тепловизионная техника использует область электромагнитного спектра в диапазоне 8...13 мкм, что обеспечивает высокую точность проводимых измерений. Также данной области соответствуют «окна прозрачности» атмосферы, поэтому она характеризуется низким поглощением излучения. Матрицы детекторов содержат в настоящее время не менее 320х240 пикселей, что позволяет получить высокую разрешающую способность прибора [2]. Но для этого необходим светосильный объектив, обладающий качеством изображения, близким к дифракционному пределу. Исходные оптические материалы, пригодные для работы в указанной области спектра, например, монокристаллический германий, имеют высокую стоимость, поэтому принципиально важным является вопрос о сокращении числа компонентов оптической системы тепловизионного объектива. Простейшая оптическая схема такой системы состоит из двух линз с положительной оптической силой, разделенных значительным воздушным промежутком. Для повышения относительного отверстия объектива одна из линз должна быть асферической. В [3] приведены результаты аберрационного расчета двухлинзового объектива тепловизора со следующими основными характеристиками: заднее фокусное расстояние 50 мм, относительное отверстие 1:1,1 и линейное поле в пространстве изображений, определяемое диагональю матрицы детекторов, 9,4 мм. Система предназначена для работы в спектральном диапазоне 8...12,5 мкм, при этом основная длина волны излучения составляет 10,6 мкм. Материалом для обеих линз выбран германий, а на вторую поверхность первой линзы с использованием технологии вакуумной асферизации нанесена асферическая поверхность.

В данной работе приведена методика расчета подобного двухлинзового тепловизионного объектива. Исходными данными для расчета оптической системы являются: воздушный промежуток между линзами  $d_2$ , задний фокальный отрезок s'<sub>F</sub>, показатели преломления первой  $n_2$  и второй  $n_4$  линз соответственно, а также требуемое значение второй суммы Зейделя S<sub>II</sub>. Расчет объектива выполняется в следующей последовательности. Сначала из условия масштаба для двухкомпонентной системы [4], считая линзы тонкими, вычисляются оптические силы первой  $\Phi_I$  и второй  $\Phi_{II}$  линз

соответственно: 
$$\Phi_{I} = \frac{1 - s_{F'}}{d_2}, \quad \Phi_{II} = \frac{1 - \Phi_{I}}{s_{F'}}.$$

Форма первой линзы, определяемая через угол первого вспомогательного луча  $\alpha_2$ , находится из условия получения минимальной сферической аберрации:  $\alpha_2 = \frac{2n_2 + 1}{2(n_2 + 2)}$ .

Если дальнейшие вычисления продолжать, считая линзы тонкими, то после определения конструктивных параметров системы и введения конечных толщин линз задний фокальный отрезок объектива окажется недопустимо малым. Поэтому все дальнейшие расчеты необходимо выполнять с конечными значениями толщин линз. Толщина первой линзы d<sub>1</sub> задается из технологических соображений [7] и уже с учетом этой конечной величины далее вычисляются радиусы кривизны r<sub>1</sub> и r<sub>2</sub>:

$$r_1 = \frac{n_2 - 1}{n_2 \alpha_2}, \quad r_2 = \frac{h_2(1 - n_2)}{\Phi_1 - n_2 \alpha_2}, \quad h_2 = 1 - \alpha_2 d_1.$$

Таким образом, конструктивные параметры первой линзы объектива известны, поэтому можно определить ее аберрационные параметры [4] P<sub>1</sub>, W<sub>1</sub> и P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>.

Задний фокальный отрезок объектива будет равен заданной величине при выполнении равенства  $h_4=s'_{F'}$ , где  $h_4$  – высота первого вспомогательного луча на последней поверхности второй линзы. Для продолжения вычислений необходимо задаться толщиной второй линзы  $d_3$  и приближенным значением первого вспомогательного луча внутри второй линзы  $\alpha_4$ . Из проведенных вычислений следует, что если материалом линз служит германий, то значение угла  $\alpha_4$  лежит в диапазоне 0,52...0,62. Далее находится

значение высоты первого вспомогательного луча на первой поверхности второй линзы h<sub>3</sub> и скорректированная величина воздушного промежутка между линзами:

$$h_3 = s'_{F} - \alpha_4 d_3, \quad d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\Phi_1}.$$

Если апертурная диафрагма находится между линзами, то далее необходимо вычислить положение входного зрачка s<sub>p</sub> и по известным формулам углов и высот [4] найти высоты второго вспомогательного луча H<sub>1</sub>...H<sub>4</sub>.

Форма второй линзы объектива определяется из условия получения заданного значения меридиональной комы третьего порядка ( $S_{II}$ ). Точное значение угла первого вспомогательного луча внутри второй линзы  $\alpha_4$  находится из решения кубического уравнения:

$$A\alpha_4^3 + B\alpha_4^2 + C\alpha_4 + D = 0,$$

где  $A = \delta_3 - \delta_{13}$ ,  $B = \delta_{12} - \delta_4$ ,  $C = \delta_5 - \delta_{11} - \delta_9 + \delta_{14}$ ,  $D = \delta_0 - \delta_6 + \delta_{10} - \delta_7 + \delta_1$ . Предварительно вычисляется ряд вспомогательных коэффициентов:

$$\begin{split} \delta_{1} &= H_{1}P_{1} + H_{2}P_{2} + W_{1} + W_{2} - S_{II}, \quad \delta_{2} = (\mu_{4} - 1)^{-2}, \quad \delta_{3} = H_{3}\delta_{2}\mu_{4}, \quad \delta_{4} = H_{3}\Phi_{I}\delta_{2}(1 + 2\mu_{4}), \\ \delta_{5} &= H_{3}\Phi_{I}^{2}\delta_{2}(2 + \mu_{4}), \quad \delta_{6} = H_{3}\Phi_{I}^{3}\delta_{2}, \quad \delta_{7} = (\mu_{4} - 1)^{-1}, \quad \delta_{8} = \delta_{7}\mu_{4}, \quad \delta_{9} = \Phi_{I}\delta_{7}(1 + \mu_{4}), \\ \delta_{10} &= \Phi_{I}^{2}\delta_{7}, \quad \delta_{11} = H_{4}\delta_{2}(2 + \mu_{4}), \quad \delta_{12} = H_{4}\delta_{2}(1 + 2\mu_{4}), \quad \delta_{13} = H_{4}\delta_{2}(1 + \mu_{4}), \\ \delta_{14} &= \delta_{7}(1 + \mu_{4}), \quad \delta_{0} = H_{4}\delta_{2}, \quad \mu_{4} = n_{4}^{-1}. \end{split}$$

Перед вычислением радиусов кривизны второй линзы находится уточненное значение высоты первого вспомогательного луча на последней поверхности  $h_4 = h_3 - \alpha_4 d_3$ . Значения радиусов кривизны определяются по формулам:

$$r_3 = \frac{h_3(n_4 - 1)}{n_4 \alpha_4 - \Phi_I}, \quad r_4 = \frac{h_4(1 - n_4)}{1 - n_4 \alpha_4}.$$

Таким образом, конструктивные параметры системы определены, однако так как объектив светосильный, то для компенсации сферической аберрации необходимо введение асферической поверхности. Такой поверхностью целесообразно сделать вторую вогнутую поверхность первой линзы, так как на ней высота первого вспомогательного луча  $h_2$  значительна и влияние на сферическую аберрацию максимально. Прежде чем определить эксцентриситет этой поверхности необходимо вычислить аберрационные параметры второй линзы [2]  $P_3$ ,  $W_3$ ,  $P_4$ ,  $W_4$  и величину первой суммы Зейделя системы со сферическими поверхностями  $S_{I cob} = P_1 + h_2P_2 + h_3P_3 + h_4P_4$ .

Квадрат эксцентриситета асферической поверхности, позволяющий компенсировать сферическую аберрацию третьего порядка находится по формуле:

$$e_{2}^{2} = -\frac{\Delta S_{I \text{ acc}} \left(1 - n_{2}\right)^{2}}{h_{2} \left(\Phi_{I} - \alpha_{2} n_{2}\right)^{3}},$$
(1)

где:  $\Delta S_{I \text{ асф}} = S_{I \text{ зад}} - S_{I \text{ сф}}$ ,

S<sub>I зад</sub> - желаемое значение первой суммы Зейделя после введения асферической поверхности.

Однако в светосильных системах после исправления аберрации третьего порядка влияние аберраций высшего порядка остается значительным и может привести к большим значениям остаточных аберраций. Поэтому для исправления сферической аберрации на краю зрачка необходимо выполнить расчет хода реальных лучей через полученную исходную систему и определить значение остаточной аберрации <sub>Δ</sub>у'. Затем по формуле

$$\Delta S_I = -\frac{2f_{\Delta}^{\prime 3}y'}{m_{\kappa p}^{3}}$$
 находится поправка к требуемому значению первой суммы Зейделя, где

m<sub>кр</sub> -координата луча на краю входного зрачка. Уточненное значение квадрата эксцентриситета определяется по формуле (1), в которой величина поправки к сумме, вызванная введением асферической поверхности, вычисляется по формуле

$$\Delta S_{I \text{ acb}} = S_{I \text{ sag}} - S_{I \text{ cb}} + \Delta S_{I}.$$

В качестве примера рассмотрим расчет объектива с указанными выше основными характеристиками и следующими исходными данными:  $d_2=70$  мм, s'<sub>F</sub> =12,5 мм, в качестве материала линз выбран германий ( $n_2=n_4=4,0022$ ). Рассчитанный по приведенной методике исходный вариант системы имел следующие значения радиусов кривизны, толщин линз и воздушного промежутка:  $r_1=50$  мм,  $r_2=56,756$  мм,  $r_3=15,871$  мм,  $r_4=16,315$  мм,  $d_1=4,5$  мм,  $d_2=63,7$  мм,  $d_3=3$  мм. Квадрат эксцентриситета второй поверхности составляет -0,13885, а после коррекции сферической аберрации высших порядков он получился равным -0,147. При этом диаметр аберрационного кружка для осевого пучка во всем спектральном диапазоне не превышает 0,02 мм, но на краю поля его величина возрастает до 0,46 мм. Поэтому исходный вариант был оптимизирован по волновым аберрациям с помощью программы «ОПАЛ» [5]. Конструктивные параметры объектива при оптимизации изменились незначительно и стали равны:

50.15		воздух	$n_1=1$
r <sub>1</sub> =53,15	d <sub>1</sub> =5	германий	n <sub>2</sub> =4,0022
r <sub>2</sub> =64,8			
r <sub>3</sub> =19,14	d <sub>2</sub> =52,15	воздух	n <sub>3</sub> =1
	d <sub>3</sub> =4	германий	n <sub>4</sub> =4,0022
r <sub>4</sub> =18,38		возлух	n5=1

Вторая поверхность объектива является асферической и описывается уравнением  $x^2+y^2-129,59039z+1,191099z^2+0,30822\cdot10^{-5}z^3-0,679746\cdot10^{-6}z^4=0$ .

Ее отступление от ближайшей сферы радиусом  $r_{c\phi} = 64,425$  мм составляет 5,6 мкм. Такая поверхность может быть изготовлена, например, методами алмазного точения или ионной обработки [6].

Рассчитанный объектив имеет качество изображения близкое к дифракционному пределу. Диаметр аберрационного кружка осевого пучка для основной длины волны равен 0,0312 мм, а для всего спектрального диапазона он увеличивается до 0,0372 мм. Хроматическая аберрация положения и сферохроматическая аберрация по всему входному зрачку остаются практически постоянными и равны 0,034 мм. Таким образом, хроматические аберрации не оказывают существенного влияния на качество изображения. Аберрационное пятно на краю поля для основной длины волны в меридиональном и сагиттальном сечениях имеет размеры 0,0373 мм и 0,0328 мм соответственно.

В кружок диаметром 33,55 мкм, который соответствует диаметру кружка Эри, данный объектив концентрирует 83 % энергии осевого пучка и 81 % энергии наклонного пучка для края поля. В таблице приведены значения функции передачи модуляции полученной оптической системы с учетом дифракции. Они доказывают высокое качество изображения синтезированного объектива.

Пространственная	Точка на оси	Точка вне оси (ω=5 <sup>0</sup> 24')	
частота $\nu$ , мм <sup>-1</sup>	$(\omega = 0^0)$	меридиональное	сагиттальное
		сечение	сечение
3	0,95	0,95	0,95
6	0,9	0,89	0,9
9	0,85	0,83	0,85
12	0,8	0,78	0,8
15	0,75	0,72	0,74
18	0,7	0,67	0,69
21	0,63	0,61	0,62

Значения функции передачи модуляции рассчитанного объектива

Предлагаемая методика показала высокую эффективность, позволяя быстро получить исходный вариант объектива с заданными значениями заднего фокусного расстояния и заднего фокального отрезка. Кроме этого, рассчитанная система будет иметь требуемые значения сферической аберрации на краю зрачка и меридиональной комы. Такой исходный вариант объектива легко оптимизируется с помощью любой из известных компьютерных программ, таких, например, как «ОПАЛ», «Zemax» и др.

## Список литературы

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». М.: Логос, 2004. 443 с.

2. Кулакова Н.А., Насыров А.Р., Несмелова И.М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2010. Т. 77. №5. С. 36-44.

3. Применение технологии вакуумной асферизации для изготовления тепловизионного объектива /А.К. Герасюк, А.И. Гоев, Б.Д. Горелик, В.В. Потелов, Б.Н. Сеник, С.Н. Скляров, А.Б. Сухачев // Прикладная физика. 2007. №2. С. 119-121.

4. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.

5. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем.- Л.: Машиностроение, 1982. 270 с.

 Кукс В.Г., Хуснутдинов А.Г. Получение асферических оптических поверхностей вращения в широком диапазоне технологических параметров // Оптический журнал. 2007. Т. 74. №1. С. 36-43.

7. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общей ред. В.А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.

## **SCIENCE and EDUCATION**

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

## Method of calculating a thermal lens # 06, June 2012 DOI: 10.7463/0612.0445463 Bodrov S.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University <u>rl-3@mx.bmstu.ru</u>

The author describes a method of calculation for a high-aperture two-lens thermal imager. The method includes overall calculation, taking into account the finite thickness of the lens and the calculation of third-order aberrations. The method provides the initial version of the lens which has no spherical aberration and meridional coma. The final point of the calculation is optimization of the initial system. The efficiency of the method is proved by the example of lens synthesis.

**Publications with keywords:**<u>optimization, modulation transfer function, infrared range, thermal</u> <u>imaging, IR objective</u> **Publications with words:**<u>optimization, modulation transfer function, infrared range, thermal</u>

**Publications with words:**<u>optimization</u>, <u>modulation transfer function</u>, <u>infrared range</u>, <u>thermal</u> <u>imaging</u>, <u>IR objective</u>

## References

1. Tarasov V.V., Iakushenkov Iu.G. *Infrakrasnye sistemy «smotriashchego tipa»* [Infrared systems of «looking»type]. Moscow, Logos, 2004. 443 p.

2. Kulakova N.A., Nasyrov A.R., Nesmelova I.M. Sovremennye tendentsii sozdaniia opticheskikh sistem dlia infrakrasnoi oblasti spektra [Modern trends creation of optical systems for infrared spectral region]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2010, vol. 77, no. 5, pp. 36-44.

3. Gerasiuk A.K., Goev A.I., Gorelik B.D., Potelov V.V., Senik B.N., Skliarov S.N., Sukhachev A.B. Primenenie tekhnologii vakuumnoi asferizatsii dlia izgotovleniia teplovizionnogo ob"ektiva [The application of the vacuum aspherical technology for manufacturing the thermal objective]. *Prikladnaia fizika* [Applied Physics], 2007, no. 2, pp. 119-121.

4. Zakaznov N.P., Kiriushin S.I., Kuzichev V.I. *Teoriia opticheskikh system* [The theory of optical systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 448 p.

5. Rodionov S.A. *Avtomatizatsiia proektirovaniia opticheskikh system* [Automation of design of optical systems]. Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 270 p.

6. Kuks V.G., Khusnutdinov A.G. Poluchenie asfericheskikh opticheskikh poverkhnostei vrashcheniia v shirokom diapazone tekhnologicheskikh parametrov [Getting aspherical optical surfaces of rotation in a wide range of technological parameters]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2004, vol. 71, no. 12, pp. 14-19.

7. Panov V.A., Kruger M.Ia., Kulagin V.V., et. al. *Spravochnik konstruktora optikomekhanicheskikh priborov* [Reference book of designer of opto-mechanical devices]. Leningrad, Mashinostroenie, 1980. 742 p.