

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317.6

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ИСХОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ

© 2008 г. А. П. Грамматин, доктор техн. наук; К. Т. Чан

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

Email: qtuan_vn@mail.ru

Рассмотрена методика построения исходных систем для тепловизионных линзовых объективов и представлены некоторые объективы, исходные системы которых были рассчитаны по предлагаемой методике.

Коды OCIS: 110.0100.

Поступила в редакцию 10.01.2008.

В связи с широким использованием компьютерных технологий для расчета оптических систем, большое значение приобретает выбор исходной системы, поскольку методы автоматизированной коррекции основываются на методе постепенных приближений. Для инфракрасных (ИК) систем характерно то, что они преимущественно синтезируются из тонких одиночных линз. Поэтому способ выбора исходной оптической системы для ИК объективов, основанный на использовании метода Г.Г. Слюсарева [1], имеет высокую целесообразность. В то же время, используя принцип Е.В. Кириченко [2], общий метод Г.Г. Слюсарева может быть существенно упрощен, благодаря отсутствию необходимости решения систем уравнений, связывающих коэффициенты аберраций всей системы с основными параметрами отдельных компонентов. В соответствии с принципом [2] габаритный расчет исходной системы производится таким образом, чтобы четвертая сумма S_{IV} Зейделя, определяющая кривизну поверхности изображения, равнялась нулю

$$\sum \phi/n = 0, \quad (1)$$

а для каждого компонента системы выполняется исправление сферической аберрации и комы третьего порядка

$$\left. \begin{array}{l} P_i = 0 \\ W_i = 0 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где ϕ – оптическая сила, n – показатель преломления, P_i , W_i – внутренние параметры i -го компонента.

В этом случае третья сумма S_{III} Зейделя равна нулю, а первая S_I и вторая суммы S_{II} равны нулю по условию (2).

$S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$, и тогда исходная система практически исправлена на аберрации третьего порядка.

Известно, что для одиночных линз выполнение условия (2) может быть достигнуто в общем случае, если одна из поверхностей линзы является асферической поверхностью второго порядка. Однако опыт расчета систем для ИК области спектра показал, что деформация асферической поверхности при этом оказывается весьма малой. Поэтому было предпринято исследование с целью определения зависимости величины P_0 от линейного увеличения V для одиночных линз с одной асферической поверхностью из различных материалов, используемых в ИК области спектра 8–14 мкм при условии (2). Результаты исследования сведены в табл. 1, из которой видно, что существуют некоторые пределы значений увеличения V , где можно использовать линзы без асферической поверхности, так как в пределах этих интервалов значений V величины $P_i = W_i \approx 0$. Например, для линзы из германия при увеличениях от –20 до 0,25, а также в диапазоне от 4,5 до 20 это условие соблюдается.

Согласно Г.Г. Слюсареву [1], минимальное значение основного параметра сферической аберрации P_0 одиночной линзы без асферических поверхностей определяется по формуле

Таблица 1. Зависимость P_0 от V

№	Увеличение V	P_0			
		Ge $n = 4,002$	Si $n = 3,418$	ZnSe $n = 2,406$	ИКС29 $n = 2,598$
1	0	0,28	0,34	0,6	0,52
2	-20	0,12	-0	0,03	0,06
3	-10	0,05	-0,05	0,17	0,02
4	-5	-0,04	-0,1	-0,03	-0,03
5	-2	-0,13	-0,13	-0,09	-0,10
6	-1	-0,16	-0,15	-0,18	-0,23
7	-0,5	-0,11	-0,12	-0,13	-0,14
8	0,25	0,28	0,27	0,24	0,24
9	0,3	0,41	0,4	0,39	0,41
10	0,4	0,68	0,65	0,55	0,56
11	0,5	1,3	1,14	0,96	1,0
12	0,75	6,1	5,47	4,79	5,17
13	1,25	20,38	19,3	17,76	17,9
14	1,5	5,42	4,97	4,48	4,7
15	2	1,64	1,63	1,55	1,5
16	2,5	1,02	0,91	0,83	0,9
17	3,5	0,6	0,44	0,43	0,45
18	4,5	0,31	0,31	0,31	0,3
19	5	0,31	0,27	0,27	0,28
20	10	0,17	0,09	0,11	0,2
21	20	0,09	0,12	0,08	0,14

$$P_0 = (4n - 1)n/[4(2 + n)(n - 1)^2], \quad (3)$$

n – показатель преломления материала линзы.

Значения P_0 , полученные по этой формуле, помещены в первую строку табл. 1.

Представим исходную оптическую систему, состоящую из k тонких одиночных линз, выполненных из одного и того же материала, с оптическими силами φ_i . При малых значениях полей зрения и апертур для устранения сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны поля изображения должны соблюдаться следующие условия:

1) суммарная оптическая сила всех линз равна нулю

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_k = 0,$$

2) увеличения $V_1, V_2, \dots, V_k$ всех линз должны находиться в пределах значений, выбранных по табл. 1,

3) для каждой линзы следует выполнить минимизацию сферической аберрации и комы третьего порядка.

Практика расчета показала, что исходная система, построенная по этому принципу, обладает небольшими для исходных систем значениями абер-

раций третьего порядка и может использоваться для следующих этапов: ввода толщин и выполнения коррекции с использованием автоматизированных программ проектирования оптических систем.

Рассмотрим в качестве примера предлагаемой методики расчет объектива типа триплет. Ниже приводятся формулы для габаритного расчета такой системы.

Расстояние d_2 между второй и третьей линзами получится после решения следующего уравнения:

$$V_3 d_2^2 - V_3 f' d_2 + V_2 V_3^2 d_1 d_2 + (1 - V_3)(V_2 V_3)^2 d_1 - (1 - V_3) f' = 0, \quad (4)$$

здесь f' – фокусное расстояние объектива, V_2, V_3 – увеличения второй и третьей линз в их рабочих условиях, выбранных в пределах, соответствующих таблице 1, d_1 – расстояние между первой и второй линзами. Оно может быть выражено функцией от переменной d_2

$$d_1 = (y_1 + \sqrt{y_2}) / (2V_2^3 V_3^2) \quad (5)$$

или $d_1 = (y_1 - \sqrt{y_2}) / (2V_2^3 V_3^2),$

где

$$y_1 = f' V_2 (V_2 V_3 + 1) - (V_2 V_3)^2 d_2,$$

$$y_2 = y_1^2 - 4V_2^3 V_3^2 (f'^2 - V_3^2 f' d_2) / V_3.$$

Следовательно, уравнение (4) стало уравнением с единственной неизвестной d_2 . Решив это уравнение, получим расстояние d_2 . Поставив d_2 в формулу (5), найдем d_1 . Фокусные расстояния линз вычисляются по следующим формулам:

$$f'_1 = f' / (V_2 V_3), \quad (6)$$

$$f'_2 = V_2 (f'_1 - d_1) / (1 - V_2), \quad (7)$$

$$f'_3 = V_3 [V_2 (f'_1 - d_1) - d_2] / (1 - V_3). \quad (8)$$

Представим некоторые объективы, исходные системы которых были рассчитаны по предлагаемой методике.

В первом примере показан объектив типа триплет с характеристиками: $f' = 40$ мм, диафрагменным числом $K = 2$, $2\omega = 20^\circ$. Все линзы выполнены из германия. Аберрации исходной системы представлены в табл. 2. В оптической схеме все три тонких линзы работают с бесконечности, т. е их увеличения равны нулю, находящемуся в выведенных пределах. Фокусные расстояния линз составляют: $f'_1 = f'_3 = 20$ мм, $f'_2 = -10$ мм.

В табл. 2 обозначены: H и M – координаты точки пересечения луча со входным зрачком, MU – си-

Таблица 2. Аберрации исходной системы объектива типа триплет с характеристиками: $f' = 40$ мм, диафрагменное число $K = 2$, угол поля зрения $2\omega = 20^\circ$

Координаты на объект	Координаты на входной зрачок	Характеристики и аберрации исходной системы						
		Z0 0	Z' -19,44	S'0(0) 19,608	F'(0) 39,788	V3P(0) 0,9815	S'A 19608	
MU	H	DS'(0)	TGC'	ДY'(0)	W(0)	ЭТА%		
0	5,00	-0,417	0,128	-0,0532	-0,156	0,344		
	4,33	-0,308	0,110	-0,0339	-0,0861	0,265		
	3,54	-0,202	0,0895	-0,181	-0,0376	0,181		
	2,50	-0,099	0,0631	-0,0063	-0,0092	0,0928		
MU	H	Z'	TGC'	Y'(0)	ДИС	Z'M	Z'S	Z'M-Z'S
0,123	0	-20,92	-0,121	4,91	-0,0089	0,118	0,0769	0,0416
0,174	0	-23,47	-0,161	6,95	-0,0669	0,0091	0,204	-0,195
MU	H	TGC'	ДTGC'	Д'Y	W(0)			
0,174	5,00	-0,0303	0,131	0,0376	0,212			
	4,33	-0,0479	0,113	0,0341	0,512			
	3,54	-0,0687	0,0927	0,0272	0,0916			
	2,50	-0,0957	0,0656	0,0164	0,0365			
	-2,50	-0,229	-0,0674	0,0261	-0,0491			
	-3,54	-0,258	-0,0963	0,0571	-0,150			
	-4,33	-0,280	-0,119	0,0192	-0,291			
	-5,00	-0,300	-0,138	0,128	-0,468			
MU	M	TGC'	TGD'	Д'X	W(0)	Д'Y		
0,174	5,00	-0,164	0,126	-0,021	0,016	0,0351		
	4,33	-0,163	0,109	-0,0073	0,0386	0,0264		
	3,54	-0,163	0,0884	0,00247	0,0428	0,0177		
	2,50	-0,162	0,0623	0,00742	0,0297	0,00887		

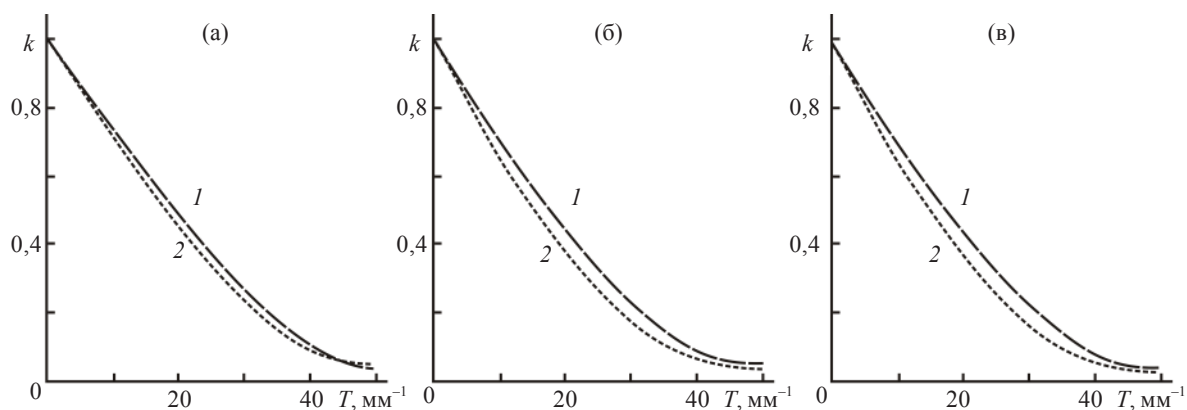


Рис. 1. Графики ЧКХ объектива типа триплет с характеристиками: $f' = 40$ мм, диафрагменное число $K = 2$, угол поля зрения $2\omega = 20^\circ$. 1 – поперечные аберрации в меридиональной плоскости, 2 – поперечные аберрации в сагиттальной плоскости. а – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 0$, б – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 4,92$; $Y = 0$, $X = 4,92$, в – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 6,95$; $Y = 0$, $X = 6,95$.

Таблица 3. Аберрации исходной системы второго объектива типа триплет с характеристиками: $f' = 54$ мм, диафрагменное число $K = 2$, угол поля зрения $2\omega = 20^\circ$

Координаты на объект	Координаты на входной зрачок	Характеристики и аберрации исходной системы						
		Z_0 0	Z' -6,149	$S'_0(0)$ 30,662	$F'(0)$ 54,00	$V_3P(0)$ 0,6809	$S'A$ 30,622	
MU	H	$DS'(0)$	TGC'	$ДY'(0)$	$W(0)$	ЭТА%		
0	5,00	-1,04	0,0958	-0,1000	-0,226	-0,0123		
	4,33	-0,776	0,0822	-0,0638	-0,124	0,00554		
	3,54	-0,514	0,0665	-0,0342	-0,0537	0,0126		
	2,50	-0,255	0,0467	-0,0119	-0,0131	0,0104		
MU	H	Z'	TGC'	$Y'(0)$	ДИС	$Z'M$	$Z'S$	$Z'M-Z'S$
0,0707	0	-6,095	-0,105	3,85	0,0236	0,00383	0,0190	-0,0152
0,100	0	-6,041	-0,150	5,50	0,0682	0,00708	0,0414	-0,0344
MU	H	TGC'	$ДTGC'$	$Д'Y$	$W(0)$			
0,100	5,00	-0,0493	0,101	-0,318	-0,626			
	4,33	-0,0675	0,0824	-0,146	-0,246			
	3,54	-0,0844	0,0655	-0,0631	-0,0879			
	2,50	-0,104	0,0456	-0,0186	-0,0184			
	-2,50	-0,196	-0,0463	0,0132	-0,0138			
	-3,54	-0,216	-0,0663	0,0371	-0,0561			
	-4,33	-0,232	-0,0821	0,0677	-0,128			
	-5,00	-0,246	-0,0959	0,104	-0,229			
MU	M	TGC'	TGD'	$Д'X$	$W(0)$	$Д'Y$		
0,100	5,00	-0,150	0,0942	-0,102	-0,218	-0,0030		
	4,33	-0,150	0,0808	-0,0638	-0,115	-0,96-3		
	3,54	-0,150	0,0654	-0,0330	-0,0467	0,659-4,		
	2,50	-0,150	0,0458	-0,0105	-0,0092	0,332-3		

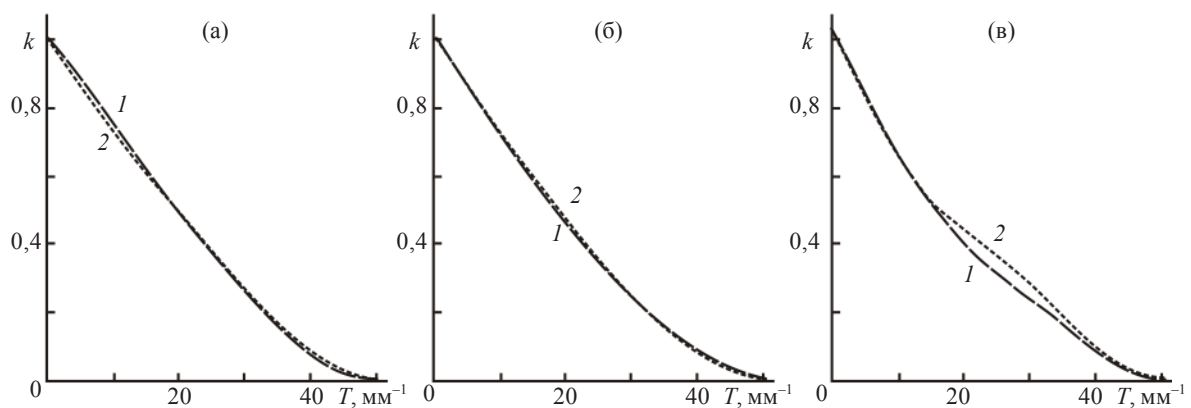


Рис. 2. Графики ЧКХ объектива типа триплет с характеристиками: $f' = 54$ мм, диафрагменное число $K = 2$, угол поля зрения $2\omega = 20^\circ$. 1 – поперечные аберрации в меридиональной плоскости, 2 – поперечные аберрации в сагиттальной плоскости. а – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 0$, б – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 6,63$; $Y = 0$, $X = 6,63$, в – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 9,38$; $Y = 0$, $X = 9,38$.

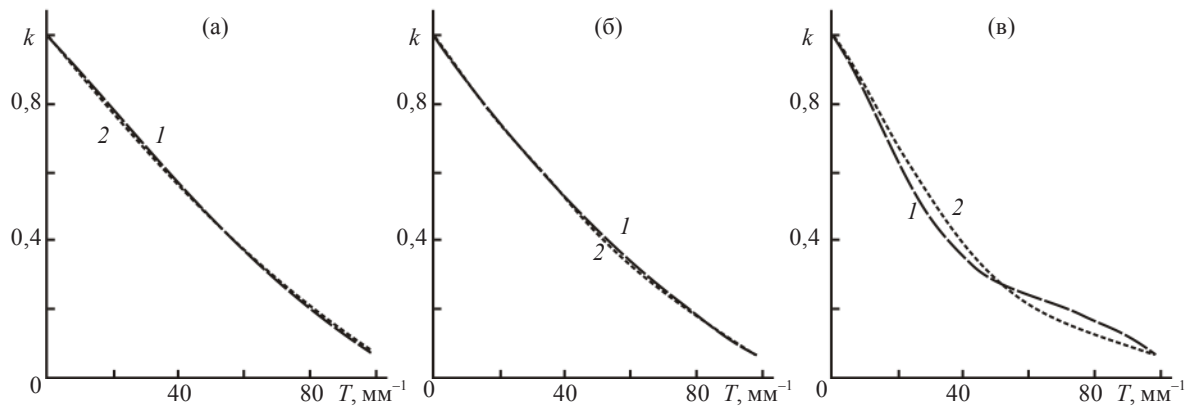


Рис. 3. Графики ЧКХ объектива, состоящего из четырех линз, с характеристиками: $f' = 38$ мм, диафрагменное число $K = 1$, угол поля зрения $2\omega = 25^\circ$. 1 – поперечные aberrации в меридиональной плоскости, 2 – поперечные aberrации в сагиттальной плоскости. а – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 0$, б – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 5,81$; $Y = 0$, $X = 5,81$, в – координаты точки поля – $X = 0$, $Y = 8,22$; $Y = 0$, $X = 8,22$.

нус в пространстве предметов, $F'(0)$ – фокусное расстояние, $Z0$ – положение входного зрачка, Z' – положение выходного зрачка, $S'0(0)$ – положение плоскости Гаусса, $V3P(0)$ – линейное увеличение в зрачках, $S'A$ – положение плоскости установки, $DS'(0)$ – продольная сферическая aberrация, $DU'(0)$ – поперечная сферическая aberrация, $W(0)$ – волновая aberrация, $\Delta TA\%$ – отступление от условия изопланатизма, TGC' – тангенс угла между лучом и осью, $Y'(0)$ – величина изображения, ДИС – дисторсия, $Z'M$ и $Z'S$ – составляющие астигматизма, DX' и DU' – поперечные aberrации в сагиттальной и меридиональной плоскостях, TGD' – тангенс угла между внемеридианным лучом и его проекцией на меридиональную плоскость YOZ .

Из табл. 2 видно, что при диафрагменном числе $K = 4$ и поле зрения 20° aberrации исходной системы незначительны.

После ввода толщин и выполнения коррекции данный объектив имеет графики частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), приведенные на рис. 1.

Во втором примере приведен объектив триплет с характеристиками: $f' = 54$ мм, диафрагменным числом $K = 2$, $2\omega = 20^\circ$. Тонкие линзы исходной си-

стемы, выполненные из германия, имеют увеличения: $V_1 = 0$, $V_2 = -1,43$, $V_3 = -1,75$ и фокусные расстояния: $f_1 = 21,6$ мм, $f_2' = -7,354$ мм, $f_3' = 11,243$ мм. Aberrации исходной системы представлены в табл. 3 (все обозначения такие же, как в табл. 2).

После ввода толщин и выполнения коррекции данный объектив имеет графики ЧКХ, приведенные на рис. 2.

Последний из объективов [3], рассчитанный по предлагаемой методике и состоящий из четырех линз, имеет характеристики: $f' = 38$ мм, $2\omega = 25^\circ$, диафрагменное число $K = 1$ и практически идеальное качество изображения в спектральном диапазоне 8–9 мкм. Графики его ЧКХ приведены на рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 670 с.
2. Кириченко Е.В. Принцип построения оптических систем из бесконечно тонких компонентов // ОМП. 1978. № 9. С. 17–20.
3. Грамматин А.П., Чан К.Т. Заявка на патент с регистрационным номером 2006142127. Дата поступления: 28.11.2006.