

М. П. ЕГОРЕНКО, В. С. ЕФРЕМОВ

ХРОМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕКТИВА С ЗЕРКАЛОМ МАНЖЕНА В НЕСКОЛЬКИХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА

Рассмотрены хроматические свойства объектива с зеркалом Манжана в визуальном и тепловизионных (3—5 и 8—12 мкм) диапазонах спектра при различных комбинациях конструктивных параметров. Построены графики зависимости хроматических сумм от значений толщины и радиуса кривизны поверхностей. Определены области наименьшего изменения хроматических сумм от конструктивных параметров с целью наилучшей компенсации хроматических aberrаций в системе „положительная линза и зеркало Манжана + мениск“.

Ключевые слова: многоспектральный, зеркально-линзовый, зеркало Манжана, хроматические aberrации.

В последние десятилетия появились оптические устройства, используемые одновременно в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах, что значительно расширяет эксплуатационные свойства изделия. Для построения подобных систем требуется соответствующая оптическая элементная база, позволяющая добиться необходимого качества изображения в рабочих участках спектра. В известных оптических схемах применяются оптические кристаллы, как правило, плохо сочетаемые по оптическим и физико-химическим свойствам вследствие ограниченного выбора подходящих материалов.

В связи с этим определенный интерес могут представлять зеркально-линзовые объективы, состоящие из положительной линзы и зеркала Манжана (рис. 1), выполненных из одного материала [1].

Исследования хроматических свойств зеркала Манжана ранее проводились Д. Д. Максуповым [2] и Д. В. Гавриловым [3], однако рассматривался только визуальный диапазон спектра. Попытка исследования хроматизма увеличения объектива была предпринята в работе [4], которая показала, что он не зависит от материала оптических деталей, а определяется оптической силой составляющих объектив компонентов.

В настоящей статье проведено дальнейшее исследование хроматических свойств объектива численными методами с целью определения области возможных решений и интервалов

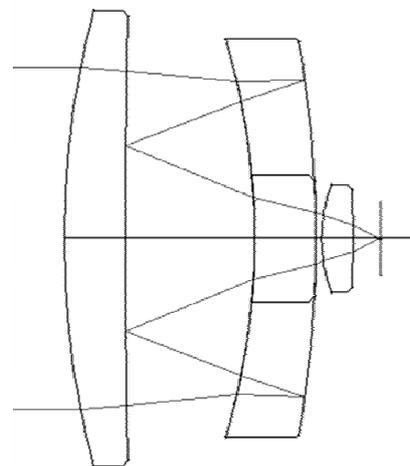


Рис. 1

изменения отдельных конструктивных параметров объектива. Рассматривается изменение хроматических сумм: S_{Ixp} — в зависимости от толщины, S_{Ixp} и S_{IIxp} — в зависимости от оптической силы компонентов объектива.

Поскольку на качество изображения систем с фотоприемниками большее значение оказывает хроматизм увеличения, то в качестве примера для объектива, выполненного из фтори-стого бария [1], на рис. 2 приведены графики изменения S_{Ixp} в зависимости от толщины линзы (d) и системы „зеркало Манжена + мениск“. Здесь и на последующих рисунках принята единая система обозначений кривых: 1, 2, 3 — линза, рабочий диапазон соответственно $\Delta\lambda = 0,5—0,9$; 3—5; 8—12 мкм; 4, 5, 6 — система „зеркало Манжена + мениск“, $\Delta\lambda = 0,5—0,9$; 3—5; 8—12 мкм.

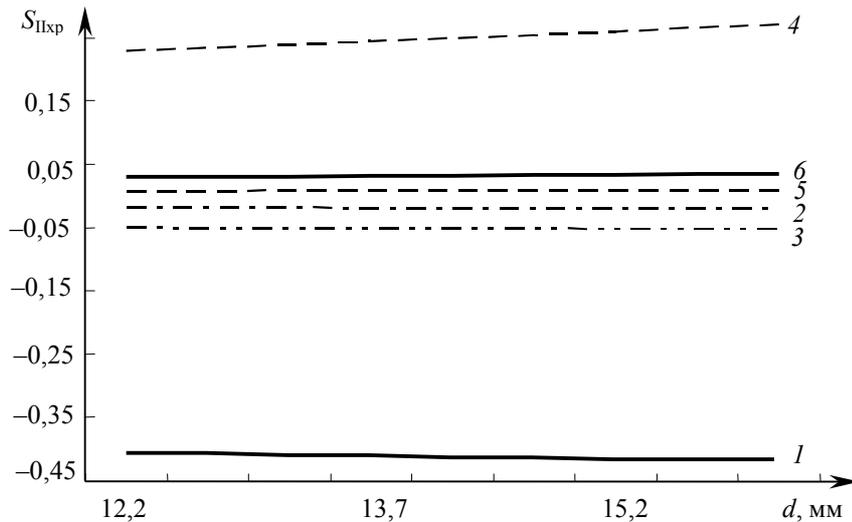


Рис. 2

Видно, что изменение толщины оптических деталей объектива практически не влияет на хроматизм увеличения объектива. Более значительное влияние на изменение хроматической суммы S_{Ixp} , согласно [4], должны оказывать оптические силы линзы и зеркала Манжена и мениска.

Для рассмотрения влияния изменения оптических сил компонентов на S_{Ixp} и S_{IIxp} будем изменять радиусы R_1 , R_3 и R_4 первой, третьей и четвертой поверхностей объектива (радиус кривизны R_2 второй поверхности линзы на величину хроматизма практически не влияет) и введем нормировку:

$$K_1 = R_1/R_4; \quad K_2 = R_3/R_4.$$

Это позволит представить на одном графике влияние изменения оптических сил отдельно взятых линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“ на S_{Ixp} и S_{IIxp} соответственно.

Чтобы оптические силы линзы и зеркала Манжена оставались положительными, а мениска — отрицательной, область изменения коэффициентов K_1 и K_2 должна находиться в интервале от 0,1 до 1 (из соотношения радиусов кривизны линзы и зеркала Манжена).

На рис. 3 приведены графики изменения S_{Ixp} в зависимости от изменения радиусов кривизны поверхностей линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“. Из рисунка следует, что в области значений коэффициентов K_1 и K_2 от 0,35 до 0,45 имеется разрыв функции S_{Ixp} , но только для системы „зеркало Манжена + мениск“ при изменении K_2 . Функция S_{Ixp} линзы при изменении K_1 в интервале значений от 0,1 до 1 разрывов не имеет, что хорошо видно на рис. 4, воспроизводящем часть рис. 3 в увеличенном масштабе.

Численные результаты расчета S_{Ixp} для рассматриваемых спектральных диапазонов при $K_1 = K_2$ приведены в табл. 1.

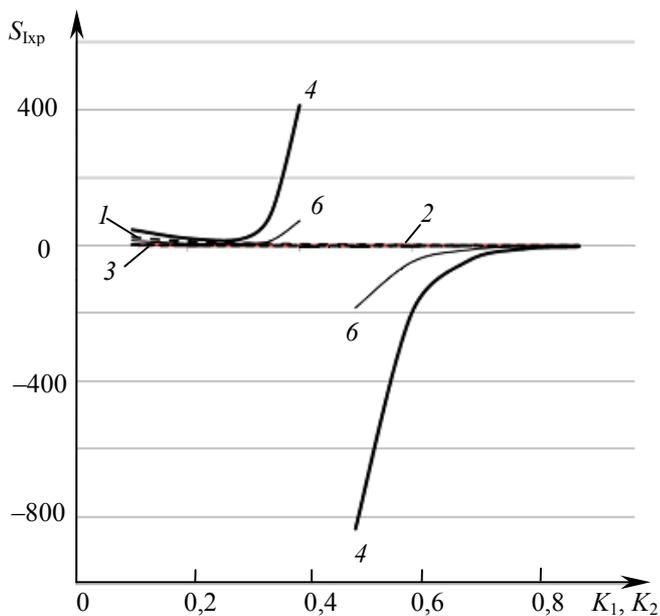


Рис. 3

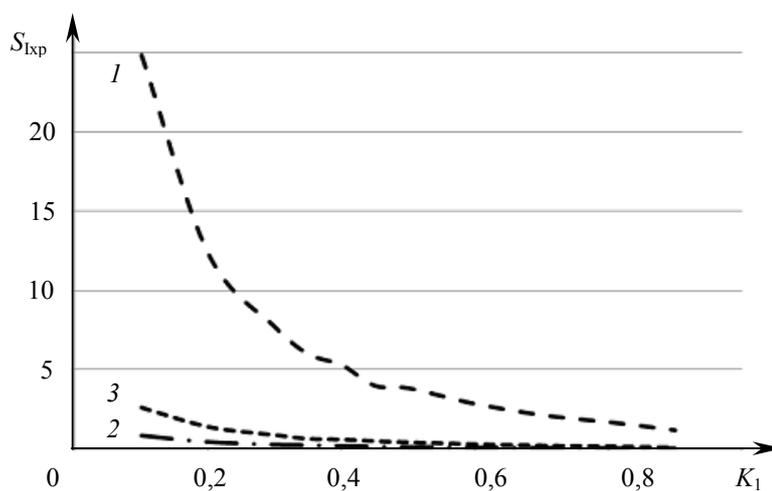


Рис. 4

Таблица 1

K_1, K_2	S_{Ixp} по компонентам (по трем диапазонам спектра)					
	Линза			Зеркало Манжера + мениск		
	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм
0,1	24,872	0,8951	2,6581	46,2701	1,9081	13,9827
0,2	12,353	0,4838	1,4483	20,8132	0,9095	5,9488
0,3	7,7148	0,3111	0,9344	20,8213	1,0264	6,4726
0,35	6,5342	0,2734	0,7851	98,5243	—	15,5482
0,4	5,3133	0,2174	0,6538	412,874	-5,3462	72,6254
0,45	4,6442	0,1825	0,5542	—	-4,2001	—
0,5	3,8465	0,1588	0,4782	-836,512	-3,8853	-184,725
0,6	2,8579	0,1187	0,3575	-202,321	-2,7584	-49,7143
0,7	2,1466	0,0895	0,2697	-47,11	-1,3712	-13,6224
0,8	1,7078	0,0714	0,2152	-10,54	-0,4115	-3,5613
0,9	1,1915	0,0499	0,1506	-3,998	-0,1692	-1,5614

В интервале значений K_1 и K_2 от 0,1 до 0,35 $S_{\text{ИХР}}$ имеют один знак для линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“. В интервале значений K_1 и K_2 от 0,45 до 0,9 $S_{\text{ИХР}}$ для линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“ имеют разные знаки, но значительно отличаются по абсолютной величине. Из этого можно заключить, что хроматизм положения в объективе исправить невозможно.

На рис. 5 приведены графики изменения $S_{\text{ИХР}}$ в зависимости от изменения радиусов кривизны поверхностей линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“. Из графиков следует, что в области значений коэффициентов K_1 и K_2 от 0,33 до 0,43 имеется разрыв функции $S_{\text{ИХР}}$. Численные результаты расчета для рассматриваемых спектральных диапазонов приведены в табл. 2.

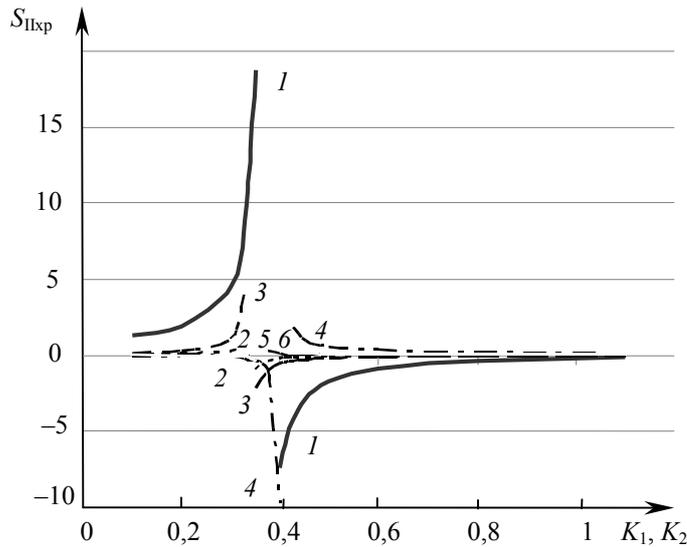


Рис. 5

Таблица 2

K_1, K_2	$S_{\text{ИХР}}$ по компонентам (по трем диапазонам спектра)					
	Линза			Зеркало Манжена + мениск		
	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм
0,1	1,3460	0,0555	0,1682	0,0724	0,0034	0,0105
0,2	1,9316	0,0941	0,2918	0,0687	0,0025	0,0073
0,3	4,4655	0,3219	1,0851	-0,0748	-0,0068	-0,0225
0,325	8,1262	0,9336	4,0533	-0,2023	-0,0144	-0,0634
0,337	12,2240	—	—	-0,3106	-0,0220	-0,0925
0,35	18,7360	-0,9942	-2,2012	-0,3785	—	-0,3676
0,375	—	-0,4357	-1,2327	-0,9345	0,2810	—
0,4	-7,4121	-0,1805	-0,5144	-9,6832	0,1526	0,4302
0,412	-5,4474	-0,1234	-0,4543	—	0,0752	0,2543
0,425	-4,2364	-0,1138	-0,3812	1,7843	0,0376	0,1655
0,45	-2,9437	-0,0825	-0,3258	0,9502	0,0345	0,1468
0,5	-1,7435	-0,0629	-0,1861	0,5682	0,0242	0,0738
0,6	-0,8906	-0,0349	-0,1042	0,3638	0,0164	0,0486
0,7	-0,5485	-0,0223	-0,0669	0,2467	0,0108	0,0337
0,8	-0,3945	-0,0163	-0,0494	0,2195	0,0097	0,0294
0,9	-0,2485	-0,0105	-0,0316	0,1517	0,0068	0,0206
1	-0,1695	-0,0072	-0,0218	0,1015	0,0047	0,0143

Для дальнейшего анализа выберем часть графиков $S_{\text{ИХР}}$ на рис. 5, расположенную справа от линии разрыва с диапазоном изменения K_1 и K_2 от 0,5 до 1 (где возможно получить минимальный хроматизм увеличения). Изменение $S_{\text{ИХР}}$ в зависимости от оптической силы линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“ в указанном интервале значений K_1 и K_2 показано на рис. 6.

Характер зависимостей на рис. 6 в целом соответствует данным для видимой области спектра [5], согласно которым зеркало Манжена компенсирует примерно треть хроматической aberrации положительной линзы. Примерно такое же соотношение наблюдается и в спектральных интервалах 3—5 и 8—12 мкм, но сама величина $S_{\text{Икр}}$ в инфракрасной области спектра существенно меньше (примерно в 10 раз — для диапазона 3—5 мкм и примерно в 20 раз — для диапазона 8—12 мкм).

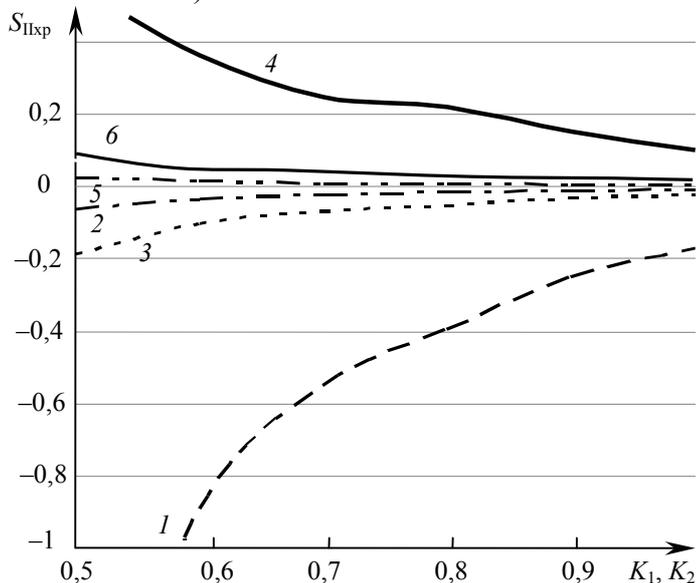


Рис. 6

Таким образом, в объективах рассмотренного типа система „зеркало Манжена + мениск“ компенсирует примерно половину хроматической aberrации положительной линзы, что открывает реальные возможности для дальнейшего уменьшения хроматизма, в частности, заменой зеркальной части первой линзы на второе зеркало Манжена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР № 10768558. Зеркально-линзовый объектив / В. С. Ефремов, Л. Н. Павлюшенко. Опубл. 10.08.84. Б.И. № 8.
2. Максудов Д. Д. *Астрономическая оптика*. Л.: Наука, 1979. 395 с.
3. Гаврилов Д. В. Расчет простой линзы с одной отражающей поверхностью // *Опт. и спектр*. 1962. Т. 13. С. 436—431.
4. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2007. Т. 50, № 2. С. 65—69.
5. Слюсарев Г. Г. *Расчет оптических систем*. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.

Сведения об авторах

- Марина Петровна Егоренко** — Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптико-электронных приборов, Новосибирск; ассистент;
E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Виктор Сергеевич Ефремов** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптико-электронных приборов, Новосибирск;
E-mail: ews49@mail.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.