

КОРРЕКЦИЯ ДИСТОРСИИ ГИБРИДНОГО ОБЪЕКТИВА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ДВУХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ И СКЛЕЕННОЙ ЛИНЗЫ ВУДА

© 2004 г. Е. Г. Ежов, канд. физ.-мат. наук

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

E-mail: drozd@netcity.ru

Показана возможность многократного снижения дисторсии у высокоразрешающего объектива-монохромата, состоящего из двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда, путем взаимной компенсации ее составляющих различных порядков. Приведены конструктивные параметры и полевые характеристики объектива, демонстрирующие эффективность метода.

Коды OCIS: 080.0080, 220.0220, 220.1000.

Поступила в редакцию 06.02.2004.

Введение

В работе [1], посвященной анализу коррекционных возможностей гибридного объектива, состоящего из двух дифракционных линз (ДЛ) и склеенной линзы Вуда (СЛВ), была показана, в частности, принципиальная возможность одновременного устранения всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков. При расположении предмета в бесконечности и в приближении aberrаций не выше пятого порядка оптические характеристики такого объектива определяются 18 параметрами. В это число входят оптические силы ДЛ $\Phi_{ДЛ}^{(i)} = 1/f_{ДЛ}^{(i)}$, коэффициенты асферической деформации их эйконалов записи $b_3^{(i)}$ и $b_5^{(i)}$, радиус сферической поверхности склейки r , толщины материалов СЛВ d_i , их базовые показатели преломления $n_0^{(i)}$ и коэффициенты радиального градиента $n_p^{(i)}$ ($i = 1, 2, p = 1, 2, 3$), а также расстояние t , определяющее положение входного зрачка (см. рис. 1).

Предполагается, что закон изменения пространственной частоты микроструктуры ДЛ описывается выражением вида:

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{\lambda_0} \frac{dG_0}{d\rho}, \quad (1)$$

где

$$G_0 = s'_{ДЛ} \sqrt{1 + \rho^2 / s'_{ДЛ}{}^2} - s'_{ДЛ} - s_{ДЛ} \sqrt{1 + \rho^2 / s_{ДЛ}{}^2} + s_{ДЛ} - \frac{1}{8} b_3 \rho^4 - \frac{1}{16} b_5 \rho^6 - \frac{5}{128} b_7 \rho^8 - \frac{21}{768} b_9 \rho^{10} - \dots \quad (2)$$

– эйконал записи структуры ДЛ [2, 3], λ_0 – длина волны записи, ρ – расстояние от оптической оси, $s'_{ДЛ}$, $s_{ДЛ}$ – сопряженные отрезки ДЛ, связанные с ее линейным увеличением $\beta_{ДЛ}$ известными соотношениями:

$$s'_{ДЛ} = (1 - \beta_{ДЛ}) / \Phi_{ДЛ}; s_{ДЛ} = (1 - \beta_{ДЛ}) / \beta_{ДЛ} \Phi_{ДЛ}. \quad (3)$$

При таком представлении пространственной частоты значения b_{2j+3} ($j = 0, 1, 2, \dots$) совпадают с соответствующими коэффициентами вносимой этой

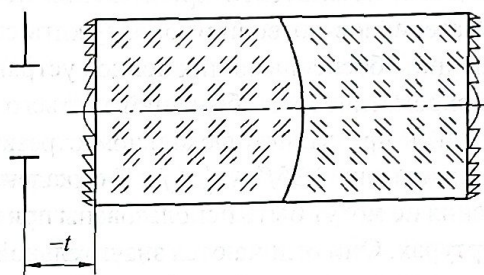


Рис. 1. Объектив, состоящий из двух плоских дифракционных линз и склеенной линзы Вуда.

ДЛ сферической aberrации, а ряд, адекватно описывающий ДЛ, может быть ограничен членом, отвечающим за наивысший из учитываемых порядков aberrационного разложения. Например, в приближении aberrаций не выше пятого порядка – членом, содержащим b_5 .

Распределения показателей преломления неоднородных материалов СЛВ описываются рядом:

$$n = \sum_{p=0} n_p \rho^{2p}. \quad (4)$$

При фиксированных базовых показателях преломления градиентных материалов ($n_0^{(1)}$ и $n_0^{(2)}$) этих параметров в принципе достаточно, чтобы обеспечить заданную величину фокусного расстояния объектива f' и устранение всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков. Однако найденные в цитируемой работе решения характеризовались весьма коротким задним фокальным отрезком ($0,1f' \leq s'_f \leq 0,19f'$) и очень высоким уровнем остаточных aberrаций высших порядков, что заставило авторов отказаться от устранения дисторсии пятого порядка.

Новые решения, обеспечивающие полное устранение дисторсии

Последующие исследования зависимости aberrационных свойств гибридного объектива от зна-

Таблица 1. Конструктивные параметры объектива, свободного от всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков

по порядку

r/f'	d/f'	n_0	$n_1 f'^2$	$n_2 f'^4$	$n_3 f'^6$
∞^*	1,0816	1,645	-0,4671	-0,3320	-0,6110
0,4214	1,1224	1,5	0,5141	-1,0870	0,0773
∞^{**}					
$s'_F = 0,516 f'$					
* $\Phi_{дл} = -0,3861/f'$, $\beta_{дл} = 0$, $b_3 = 1,8960/f'^3$, $b_5 = 5,1204/f'^5$					
** $\Phi_{дл} = 1,5843/f'$, $\beta_{дл} = 0,1818$, $b_3 = -3,5109/f'^3$, $b_5 = 30,965/f'^5$					

чений базовых показателей преломления неоднородных материалов позволили обнаружить семейство решений, обеспечивающих полное устранение всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков при заднем фокальном отрезке, лежащем в диапазоне $0,35f' \leq s'_F \leq f'$. К сожалению, и эти решения не могут быть использованы при больших апертурах. Они отличаются значительной кривизной поверхности склейки, большой толщиной СЛВ (см. табл. 1) и высоким уровнем остаточных aberrаций высших порядков.

Взаимная компенсация составляющих дисторсии различных порядков

Принципиально иная ситуация возникает при отказе от полного устранения дисторсии. В этом случае, как было показано в работах [1, 4], решения, обеспечивающие устранение всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков, за исключением дисторсии пятого порядка, позволяют получить в результате оптимизации объективы, способные формировать изображение с высоким разрешением по большому полю.

Учитывая вышеизложенное, исследовалась возможность снижения суммарной дисторсии гибридного объектива путем взаимной компенсации ее составляющих различных порядков.

Было установлено, что у всех решений, представляющих практический интерес, при единичном фокусном расстоянии объектива $f' = 1$ и нулевых коэффициентах всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков, за исключением дисторсии пятого порядка, значения ее коэффициента лежат в диапазоне $0,28 < W_{0,2,0} < 0,42$. Остаточная дисторсия третьего порядка легко может быть получена любого знака, и это не сопровождается отрицательными эффектами, которые могли бы повысить уровень остаточных aberrаций высших порядков. Более того, при противоположных знаках коэффи-

циентов дисторсии третьего и пятого порядков $W_{0,1,0}$ и $W_{0,2,0}$ рост модуля коэффициента $W_{0,1,0}$ приводит к уменьшению модуля коэффициента $W_{0,2,0}$. С достаточной степенью точности коэффициенты дисторсии третьего и пятого порядков могут быть связаны простым соотношением:

$$W_{0,2,0} = W_{0,2,0}^{(0)} + kW_{0,1,0}, \quad (5)$$

где $W_{0,2,0}^{(0)}$ — коэффициент дисторсии пятого порядка при $W_{0,1,0} = 0$, k — коэффициент пропорциональности.

Относительная дисторсия, включающая составляющие двух наименьших порядков, имеет вид:

$$\delta y' = \Delta y' / \text{tg} \omega = W_{0,1,0} \text{tg}^2 \omega + W_{0,2,0} \text{tg}^4 \omega. \quad (6)$$

Здесь $\Delta y'$ — абсолютная дисторсия, а ω — полевой угол в пространстве предметов.

Значение коэффициента $W_{0,1,0}$, обеспечивающее оптимальное соотношение составляющих дисторсии третьего и пятого порядков $W_{0,1,0}^{(opt)}$, можно получить, потребовав, например, чтобы относительная дисторсия на краю поля была равна модулю относительной дисторсии в точке экстремума, как это показано на рис. 2. Тогда, полагая, что искомое значение по модулю много меньше единицы, нетрудно получить приближенное выражение

$$W_{0,1,0}^{(opt)} \approx \left(N - \sqrt{N^2 + 4PM} \right) / 2P, \quad (7)$$

дающее вполне приемлемое начальное значение для последующей взаимной компенсации с учетом уже влияния составляющих дисторсии высших порядков.

Величины, входящие в выражение (7), имеют вид:

$$M = \left(W_{0,2,0}^{(0)} \text{tg}^2 \omega_{\max} \right)^2, \quad (8)$$

$$N = 2Mk / W_{0,2,0}^{(0)} + \sqrt{M}, \quad (9)$$

$$P = 0,25 - k \text{tg}^2 \omega_{\max}, \quad (10)$$

где $\omega_{\max}$ — максимальный полевой угол в пространстве предметов.

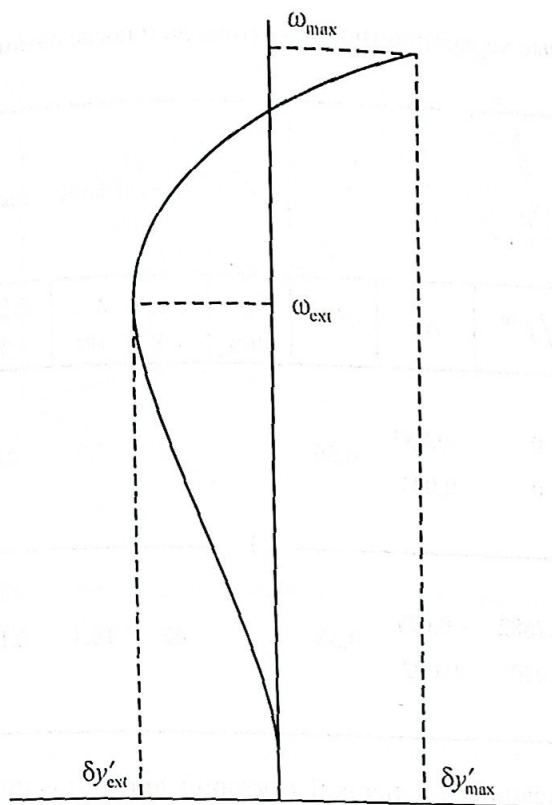


Рис. 2. Относительная дисторсия при оптимальном соотношении составляющих третьего и пятого порядков.

Полевой угол, при котором наблюдается экстремум, вычисляется по формуле:

$$\operatorname{tg} \omega_{\text{ext}} = \sqrt{-W_{0,1,0}^{(\text{opt})} / 2(W_{0,2,0}^{(0)} + kW_{0,1,0}^{(\text{opt})})}, \quad (11)$$

а относительная дисторсия на краю поля, с точностью до знака равная дисторсии в экстремуме, определяется выражением:

$$\delta y'_{\text{max}} = 0,25 W_{0,1,0}^{(\text{opt})2} / (W_{0,2,0}^{(0)} + kW_{0,1,0}^{(\text{opt})}). \quad (12)$$

В качестве исходного решения для последующей взаимной компенсации составляющих дисторсии был выбран набор конструктивных параметров гибридного объектива, представленный в табл. 1 работы

[4]. Исследование зависимости $W_{0,2,0} = f(W_{0,1,0})$ проводилось для этого решения при фиксированных значениях заднего фокального отрезка и базовых показателей преломления $s'_F = 0,58$, $n_0^{(1)} = 1,94$, $n_0^{(2)} = 1,55$. Исследования показали, что в диапазоне значений коэффициента дисторсии третьего порядка $-0,055 < W_{0,1,0} < -0,035$, представляющем интерес с точки зрения взаимной компенсации составляющих дисторсии, выражение (5) достаточно точно описывает изменения коэффициента дисторсии пятого порядка при $W_{0,2,0}^{(0)} = 0,3726$, $k = 0,638$.

Подставляя эти значения в формулы (7)–(12) для максимального полевого угла $\omega_{\text{max}} = 21^\circ$, получаем $W_{0,1,0}^{(\text{opt})} = -0,042$, $\omega_{\text{ext}} = 13,84^\circ$, $\delta y'_{\text{max}} = 1,275 \times 10^{-3}$. Решение с таким значением коэффициента дисторсии третьего порядка оптимизировалось при фокусном расстоянии $f' = 24$ мм и числовой апертуре $NA = 0,27$, обеспечивающей на длине волны He–Cd лазера $\lambda = 0,4416$ мкм рэлеевский предел разрешения $\delta_R = 1$ мкм. Оптимизация осуществлялась по параметрам, влияющим лишь на aberrации седьмого и девятого порядков. В результате был получен объектив, формирующий изображение, практически не отличающееся от дифракционно-ограниченного в пределах заданного изначально полевого угла $2\omega = 42^\circ$. Однако дисторсия при максимальном полевым угле $\omega_{\text{max}} = 21^\circ$ оказалась примерно на 10% больше модуля дисторсии в экстремальной точке, что свидетельствовало о влиянии суммарной дисторсии высших порядков, которая по знаку совпадает с дисторсией пятого порядка. Отсюда следовало, что для оптимизации необходимо было использовать решение с несколько большим по модулю значением коэффициента дисторсии третьего порядка. Действительно, выбор решения с $W_{0,1,0} = -0,0432$ позволил достичь требуемого равенства дисторсий на краю поля и в экстремальной точке.

В табл. 2 приведен набор конструктивных параметров объектива, соответствующий решению, обеспечивающему полное устранение всех монохроматических

Таблица 2. Конструктивные параметры объектива, свободного от всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков за исключением дисторсии

r/f'	d/f'	n_0	$n_1 f'^2$	$n_2 f'^4$	$n_3 f'^6$
∞^*	1,5882	1,94	-0,4907	0,1215	0,1157
4,110	0,6785	1,55	0,6773	-0,6332	-1,5554
∞^{**}					
$s'_F = 0,58 f'$					
* $\Phi_{\text{дл}} = -0,6161/f'$, $\beta_{\text{дл}} = 0$, $b_3 = -0,0785/f'^3$, $b_5 = -1,8848/f'^5$					
** $\Phi_{\text{дл}} = 1,2443/f'$, $\beta_{\text{дл}} = 0,2783$, $b_3 = -1,3321/f'^3$, $b_5 = 28,1253/f'^5$					

Таблица 3. Дополнительные конструктивные параметры и полевые характеристики объектива до и после оптимизации ($f' = 24$ мм; $\lambda = 0,4416$ мкм)

№№ разделов	№№ строк	Конструктивные параметры								Полевые характеристики			
		$b_7 f'^7$	$b_9 f'^9$	$D_{св}$, мм	Λ_{min} , мкм	n_4/f'^8	n_5/f'^{10}	Δn	t/f'	δ_R , мкм	2ω , град	$2y'$, мм	$\delta y'_{max}$, %
1	1	0	0	16,3	2,18								
	2			16,7		0	0	-0,057	0,56				
	3			12,3		0	0	0,041			12	5,0	-0,03
	4	0	0	11,3	1,67								
2	1	-7,3063	68,520	19,5	1,86					1			
	2			19,5		0,4965	-3,7682	-0,077	0,33				
	3			20,4		-2,3198	11,0408	0,092			42	18,4	0,13
	4	-5,9570	62,568	20,4	1,36								

аббераций третьего и пятого порядков, за исключением дисторсии ($W_{0,1,0} = -0,0432$, $W_{0,2,0} = 0,3452$).

В табл. 3 приведены конструктивные параметры b_7 , b_9 , n_4 , n_5 , использовавшиеся для минимизации остаточных aberrаций высших порядков; параметр t , который использовался как для минимизации aberrаций, так и для уменьшения перепадов показателей преломления; световые диаметры $D_{св}$ дифракционных линз и неоднородных материалов; минимальные периоды Λ_{min} структур дифракционных линз и перепады показателей преломления Δn неоднородных материалов.

Первая и четвертая строки каждого раздела этой таблицы содержат конструктивные параметры,

относящиеся к первой и второй дифракционным линзам, а вторая и третья строки – параметры, относящиеся к фронтальной и последующей частям СЛВ соответственно.

Представленные в таблице полевые характеристики объектива включают диаметр поля высококачественного изображения $2y'$, соответствующее ему угловое поле в пространстве предметов 2ω и дисторсию $\delta y'_{max}$. Граница поля высококачественного изображения определялась по критерию $E(\delta_R) \geq 0,73$, согласно которому, если относительная энергия, приходящаяся на центральный кружок дифракционного изображения радиусом δ_R , не опускается ниже 73%, то это изображение практи-

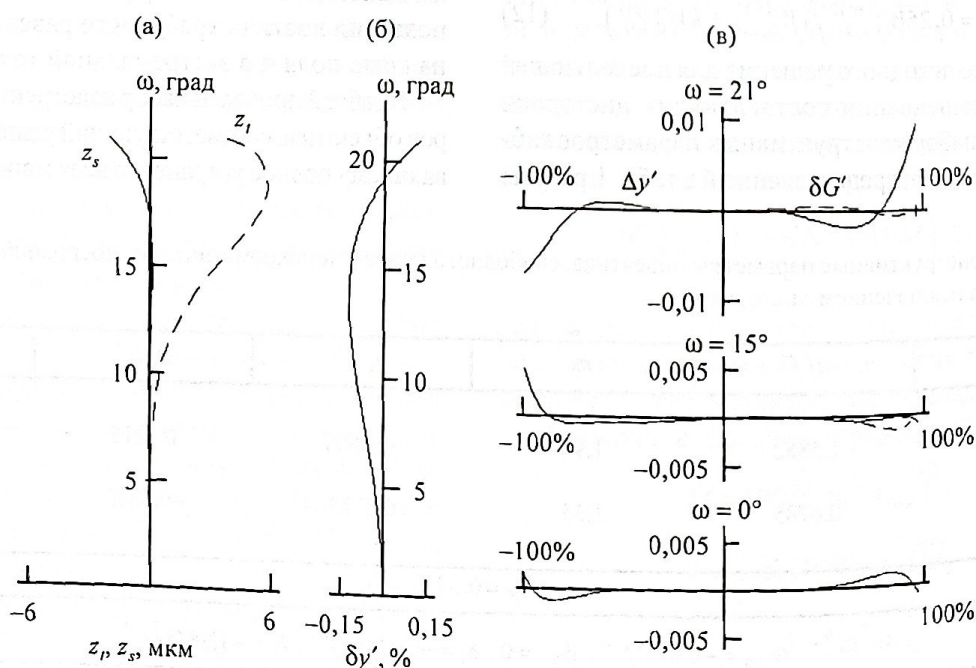


Рис. 3. Графики остаточных aberrаций: а – астигматизм и кривизна поля, б – дисторсия, в – aberrации широких наклонных пучков ($\Delta y'$ – для меридиональной плоскости; $\delta G'$ – для сагиттальной плоскости).

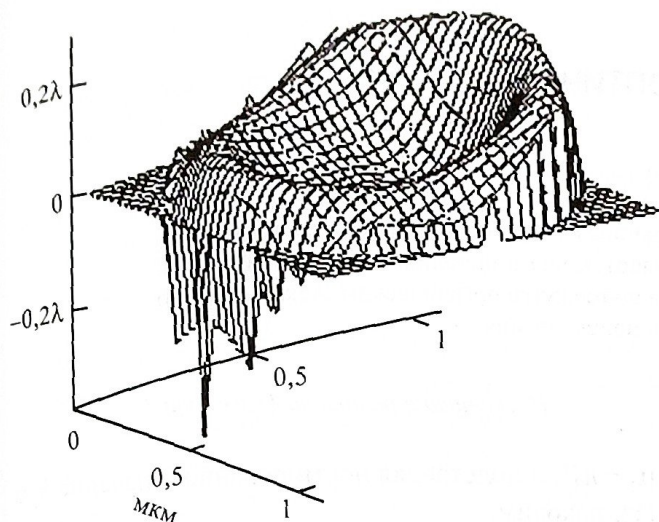


Рис. 4. Волновая aberrация в выходном зрачке при полевом угле $\omega = 21^\circ$.

чески не отличается от дифракционно-ограниченного [2, 3].

Чтобы дать читателю более полную информацию о коррекционных возможностях рассматриваемого объектива, на рис. 3 приведены графики его остаточных aberrаций. Они относятся к оптимизированному варианту, параметры которого представлены во втором разделе табл. 3. Кроме того, на рис. 4 для этого же варианта объектива представлена картина распределения волновой aberrации по плоскости выходного зрачка для края поля, т. е. при полевом угле $\omega = 21^\circ$. Максимальное значение волновой aberrации на краю зрачка составляет $0,36\lambda$. Наконец, на рис. 5 представлена картина распределения интенсивности в дифракционном изображении точки при том же самом полевом угле. Интенсивность Штреля в этом изображении равна 0,85, а $E(\delta_R) = 0,74$.

Заключение

Сопоставляя параметры и полевые характеристики, приведенные в табл. 2 и табл. 3, с соответствующими данными работ [1, 4], нетрудно видеть, что в результате взаимной компенсации составляющих дисторсии ее уровень удалось снизить более

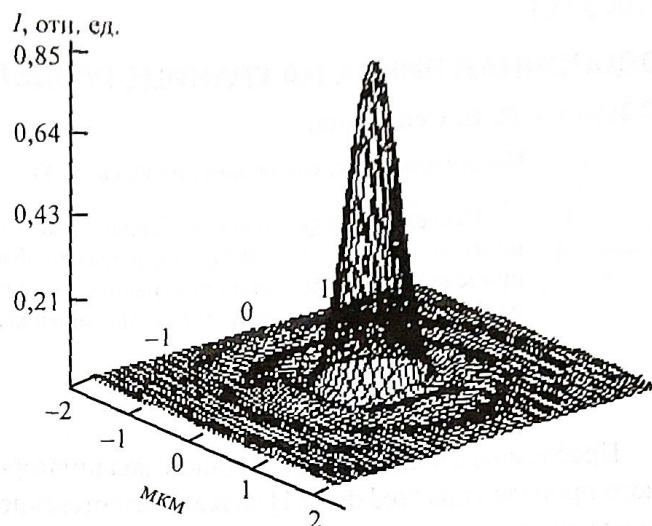


Рис. 5. Распределения интенсивности в дифракционном изображении точки при полевом угле $\omega = 21^\circ$.

чем в 6 раз без потери разрешения и углового поля. Платой же за снижение дисторсии стали несколько возросшие кривизна склейки и толщина объектива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ и американского фонда CRDF (грант № Y1-P-14-03 в рамках программы "Фундаментальные исследования и высшее образование").

ЛИТЕРАТУРА

1. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Коррекционные возможности гибридного объектива, состоящего из двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 10. С. 48–52.
2. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
3. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.
4. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Композиция и расчет высокоразрешающих оптических систем с градиентными и дифракционными элементами // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 2000. В. 20. С. 20–24.