

**АПОХРОМАТИЗАЦИЯ
ЖЕСТКОГО ГРАДИЕНТНОГО ЭНДОСКОПА*****Е. Г. Ежов¹, С. А. Степанов²**¹*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара**E-mail: drozd.k@gmail.com*²*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза**E-mail: grey@gasa.penza.com.ru*

Изложена методика апохроматизации визуального тракта жесткого эндоскопа, включающего объектив и градиентный транслятор, путем введения в оптическую схему корректора, состоящего из дифракционной и одной или двух однородных рефракционных линз. Показана возможность существенного снижения монохроматических аберраций системы при использовании трехлинзового корректора.

Введение. Методики коррекции хроматизма жестких градиентных эндоскопов, представленные в работах [1, 2], позволяют устранять хроматизм увеличения и осуществлять ахроматизацию, обеспечивающую равенство задних отрезков оптической системы на двух крайних длинах волн выбранного спектрального диапазона. Качество формируемого изображения и полихроматическое разрешение в этом случае ограничены вторичным спектром. Дальнейшее повышение разрешения может быть достигнуто путем введения в систему оптических элементов, дисперсионные свойства которых позволяют выполнять апохроматическую коррекцию.

Апохроматическая коррекция (исправление вторичного спектра) предполагает устранение хроматизма положения для трех длин волн, например λ_{\min} , $\bar{\lambda}$ и λ_{\max} , где $\bar{\lambda}$ – центральная длина волны выбранного спектрального диапазона. При такой коррекции обеспечивается равенство задних отрезков на этих длинах волн ($s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\bar{\lambda}} = s'_{\lambda_{\max}}$). Очевидно, что переход от ахроматической к апохроматической коррекции требует дополнительных эффективных коррекционных параметров.

При расчете оптических систем, состоящих из однородных рефракционных линз (ОРЛ), для апохроматизации используются оптические материалы с близкими по значению относительными частными дисперсиями, но с раз-

* Работа выполнена при поддержке «ВНИИМП-ОПТИМЕД-1» (Москва), Министерства образования РФ (грант № Т02-08.0-277) и российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE).

личными коэффициентами дисперсий [3, 4]. К таким материалам относятся специальные марки стекол, объединенные в группы особых флинтгов и кронов, а также флюорит.

В последние годы для апохроматизации объективов как в нашей стране, так и за рубежом эффективно применяются уникальные дисперсионные свойства дифракционных линз (ДЛ) [5, 6]. Далее покажем, что ДЛ могут также успешно использоваться и для апохроматизации оптических систем, включающих длинные градиентные стержни, обуславливающие значительную аномальную дисперсию.

Компоновка и расчет корректора. Плосковыпуклую ОРЛ, использованную в работе [2] для ахроматической коррекции визуального тракта эндоскопа, включающего в себя объектив и градиентный транслятор, заменим бесконечно тонким корректирующим компонентом, примыкающим к заднему торцу транслятора и состоящим из ДЛ и ОРЛ. При этом работать компонент по-прежнему должен в параллельном ходе лучей, что обеспечивается выбором длины транслятора.

Учитывая, что приращение оптической силы корректирующего компонента, вызванное изменением длины волны, должно быть равным по модулю и противоположным по знаку соответствующему приращению оптической силы объектива и транслятора, а оптическая сила корректирующего компонента Φ на центральной длине волны $\bar{\lambda}$ должна иметь фиксированное значение, обеспечивающее заданное фокусное расстояние системы в целом f' , можно записать [4, 7]:

$$\varphi_1/v_{11} + \varphi_2/v_{21} = S_1, \quad (1)$$

$$\varphi_1/v_{12} + \varphi_2/v_{22} = S_2, \quad (2)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \Phi, \quad (3)$$

где

$$v_{11} = \bar{\lambda}/(\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (4)$$

$$v_{12} = \bar{\lambda}/(\lambda_{\min} - \bar{\lambda}) = v_{11}/P_1, \quad (5)$$

$$v_{21} = (n_{\bar{\lambda}} - 1)/(n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (6)$$

$$v_{22} = (n_{\bar{\lambda}} - 1)/(n_{\lambda_{\min}} - n_{\bar{\lambda}}) = v_{21}/P_2, \quad (7)$$

$$S_1 = S_{\text{ch}}^{(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})} / h_A^2, \quad (8)$$

$$S_2 = S_{\text{ch}}^{(\lambda_{\min}, \bar{\lambda})} / h_A^2. \quad (9)$$

Здесь φ_1 и φ_2 – оптические силы ДЛ и ОРЛ соответственно на длине волны $\bar{\lambda}$; v_{11} и v_{21} – коэффициенты дисперсии ДЛ и ОРЛ для диапазона, ограниченного длинами волн λ_{\min} и λ_{\max} ; v_{12} и v_{22} – коэффициенты дисперсии этих же элементов, но для диапазона, ограниченного длинами волн λ_{\min} и $\bar{\lambda}$; $S_{\text{ch}}^{(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})}$ и $S_{\text{ch}}^{(\lambda_{\min}, \bar{\lambda})}$ – первые хроматические суммы тракта объектив–транслятор, вычисленные для двух вышеуказанных спектральных диапазонов; h_A – высота

апертурного нулевого луча на выходном торце транслятора. Параметры P_1 и P_2 – относительные частные дисперсии ДЛ и ОРЛ соответственно:

$$P_1 = (\lambda_{\min} - \bar{\lambda}) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (10)$$

$$P_2 = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\bar{\lambda}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}). \quad (11)$$

Решив систему уравнений (1)–(3), получим

$$v_{21} = v_{11} \frac{1 - P_2 L}{1 - P_1 L}, \quad (12)$$

$$\varphi_2 = \frac{v_{21}(S_1 v_{11} - \Phi)}{v_{11} - v_{21}}, \quad (13)$$

$$\varphi_1 = \Phi - \varphi_2, \quad (14)$$

где

$$L = (S_1 v_{11} - \Phi) / (S_2 v_{11} - P_1 \Phi). \quad (15)$$

Расчет корректора выполняется в следующем порядке. Задаются длины волн λ_{\min} , $\bar{\lambda}$, λ_{\max} требуемого диапазона и ориентировочное значение параметра P_2 , характерное для стекол флинтовой группы в данном спектральном диапазоне. Для тракта объектив–транслятор вычисляются нормированные суммы S_1 и S_2 , а по заданному фокусному расстоянию системы в целом f' – оптическая сила корректора Φ . Затем, используя формулы (4), (10), (15) и (12), получают ориентировочное значение коэффициента дисперсии ОРЛ. Если оно лежит в пределах диапазона значений, соответствующих реальным оптическим материалам, то выбирается материал с наиболее близким коэффициентом дисперсии, уточняется значение параметра P_2 и расчет повторяется, включая вычисление оптических сил элементов корректора по формулам (13) и (14). Расчет заканчивается тогда, когда значения величин v_{21} и P_2 будут соответствовать значению одного из реальных оптических стекол.

Однако в ряде случаев полученное значение коэффициента дисперсии оказывается весьма малым и выходит за пределы диапазона, характерного для реально существующих материалов. Приблизить требуемое значение v_{21} к реально достижимому можно, увеличив оптическую силу корректора Φ . Это, естественно, приведет к уменьшению фокусного расстояния f' визуального тракта в целом. Для восстановления требуемого фокусного расстояния в систему придется ввести дополнительную отрицательную ОРЛ, коэффициент дисперсии которой должен быть максимально возможным, чтобы ограничить влияние на уже достигнутую апохроматическую коррекцию. При правильном выборе конструктивных параметров дополнительная ОРЛ (в совокупности с коэффициентами асферической деформации эйконала записи ДЛ) будет играть также роль корректора монохроматических аберраций. Требуемые конструктивные параметры и толщину воздушного промежутка между дополнительной и плосковыпуклой ОРЛ в первом приближении можно получить из условия, чтобы ее поверхности вносили небольшой астигматизм нужного знака, а их вклад в сумму Петцваля соответствовал вкладу отрицательной ОРЛ. В результате дополнительная линза приобретает форму мениска. Доводка системы в целом осуществляется оптимизацией.

Для получения используемых в качестве исходного решения при последующей оптимизации конструктивных параметров визуального тракта с вышеописанным трехлинзовым корректором разработана специальная компьютерная программа. Она обеспечивает при выбранных стеклах и толщинах плосковыпуклой и дополнительной ОРЛ вычисление кривизны поверхностей, оптической силы ДЛ, толщин воздушных промежутков между элементами и длины транслятора из условия, что фокусное расстояние системы в целом на всех трех длинах λ_{\min} , $\bar{\lambda}$ и λ_{\max} будет одинаковым и будет иметь изначально заданное значение, а задние фокальные отрезки должны удовлетворять условию $s'_F(\lambda_{\min}) = s'_F(\bar{\lambda}) = s'_F(\lambda_{\max})$. При этом дополнительная линза обеспечит снижение отрицательного влияния на разрешение системы астигматизма и кривизны поля.

Пример апохроматизации. Рассмотрим результаты расчета, оптимизации и оценки разрешающей способности визуального тракта жесткого эндоскопа, работающего в спектральном диапазоне, ограниченном синей F - и красной C -линией водорода ($\lambda_{\min} = \lambda_F = 486,13$ нм и $\lambda_{\max} = \lambda_C = 656,26$ нм); в качестве центральной длины волны принята желтая d -линия гелия ($\bar{\lambda} = \lambda_d = 587,56$ нм). Предполагается, что эндоскоп формирует изображение в масштабе, соответствующем размеру ПЗС-матрицы формата 1/3".

Тракт включает в себя двухлинзовый однородный объектив, разработанный фирмой «ВНИИМП-ОПТИМЕД-1» (Москва), и радиально-градиентный транслятор из модели градиентного стекла (МГС), близкой по параметрам к отечественным стеклам, которые производятся на протяжении ряда лет компанией ЗАО «ГРИНЕКСТ» (Санкт-Петербург). Показатель преломления этой модели может быть задан степенным рядом

$$n = \sum_{p=0} n_p \rho^{2p}, \quad (16)$$

где n_0 – базовый показатель преломления; n_p ($p = 1, 2, \dots$) – соответствующие коэффициенты радиального градиента; ρ – расстояние от оси симметрии. При этом зависимости базового показателя преломления n_0 и первого коэффициента радиального градиента n_1 от длины волны описываются общей формулой

$$n_i(\lambda) = A_i + C_i/\lambda^2 + D_i/\lambda^4, \quad (17)$$

где

$$A_0 = 1,52586; \quad C_0 = 4,9579 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2; \quad D_0 = -3,0663 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^4;$$

$$A_1 = 0,004365 \text{ мм}^{-2}; \quad C_1 = 2,49676 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^2/\text{мм}^2;$$

$$D_1 = -2,18009 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}^4/\text{мм}^2;$$

λ – длина волны в микрометрах. Что касается коэффициентов более высокого порядка, то считалось, что они не зависят от длины волны и при этом отличным от нуля является лишь коэффициент $n_2 = 10,903 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-4}$.

Принципиальная оптическая схема визуального тракта, апохроматизированного с помощью трехлинзового дифракционно-рефракционного кор-

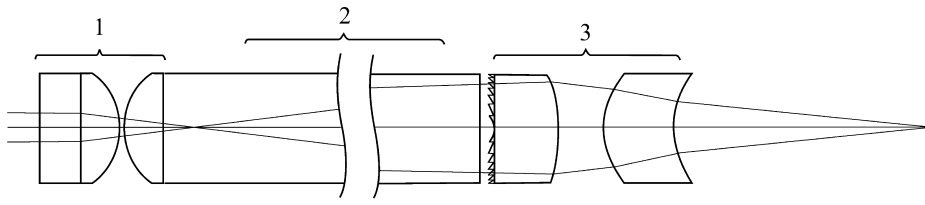


Рис. 1. Оптическая схема апохроматизированного визуального тракта жесткого эндоскопа: 1 – двухлинзовый объектив, 2 – градан-транслятор, 3 – гибридный трехлинзовый корректор

Конструктивные параметры визуального тракта эндоскопа, включающего в себя двухлинзовый объектив, транслятор и гибридный трехлинзовый корректор

r , мм	d , мм	Марка стекла
∞		
	1,50	К8
∞		
	1,00	СТК20
-1,3424		
	0	
2,4890		
	1,00	СТК20
∞		
	186,133	МГС
∞		
	0,1	
∞^*		
	0,8	СТФ111-18
-15,6263		
	4,221	
3,0846		
	2,8791	К8
1,9788		

ректора, представлена на рис. 1, а оптимизированные конструктивные параметры сведены в таблицу. Фокусное расстояние системы в целом $f' = -3,80$ мм, а величина заднего фокального отрезка $s'_F = 15,376$ мм. Дифракционная структура ДЛ выполнена на поверхности плосковыпуклой линзы (отмечено звездочкой). Ее пространственная частота описывается выражением

$$\Omega(\rho) = (1/2\pi)(dG/d\rho), \quad (18)$$

где

$$G = \sum_{i=1}^2 B_i \rho^{2i}; \quad (19)$$

$$B_1 = 72,9422 \text{ мм}^{-2}; \quad B_2 = -16,00 \text{ мм}^{-4}.$$

На рис. 2 и 3 приведены кривые остаточных aberrаций данной оптиче-

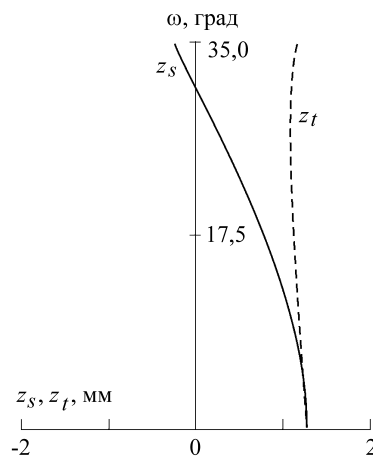


Рис. 2. Кривые астигматизма и кривизны поля

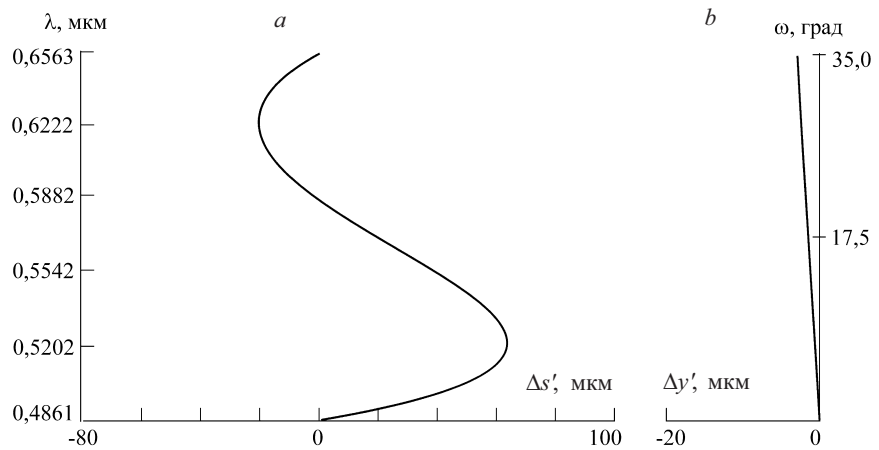


Рис. 3. Кривые хроматических aberrаций: хроматизм положения (а) и увеличения (б)

ской системы, а на рис. 4 – ее дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика. Абберационные кривые показывают, что небольшой остаточный астигматизм обусловлен сагиттальной кривизной, а хроматизм положения и увеличения для трех длин волн устранен практически полностью. Из рис. 4 следует, что в плоскости наилучшей установки ($s' = 14,02$ мм) полихроматическое разрешение при контрасте $K = 0,2$ на оси составляет 66 мм^{-1} , а на краю поля – 27 мм^{-1} . При этом разрешение на краю поля ограничено не остаточными aberrациями, а виньетированием лучей, проходящих через транслятор эндоскопа. Для сравнения заметим, что разрешение тракта без корректора при том же самом фокусном расстоянии в

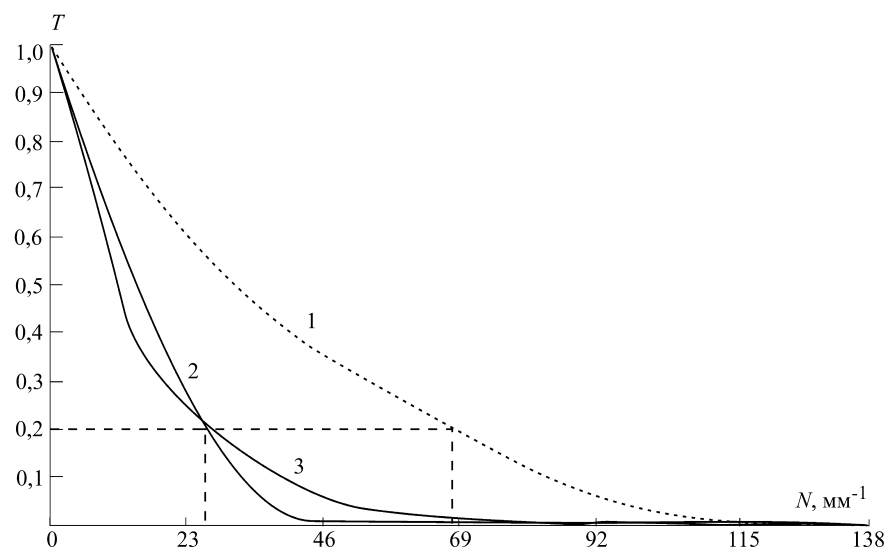


Рис. 4. Полихроматическая частотно-контрастная характеристика при $\omega = 0$ (кривая 1) и при $\omega = 35^\circ$ (кривые 2 и 3) для меридиональной и сагиттальной плоскостей соответственно

плоскости наилучшей установки на оси и на краю поля составляет только 19 мм^{-1} .

Заключение. Реализация методики, предложенной в данной работе, позволяет выполнить апохроматическую коррекцию визуального тракта жесткого градиентного эндоскопа, обеспечивающую равенство фокусных расстояний и задних отрезков на трех выбранных длинах волн, а также существенно снизить уровень монохроматических аберраций. В результате разрешение в изображении, формируемом визуальным трактом на оси и на краю поля, приближается к дифракционно-ограниченному.

Расчет хода реальных лучей, вычисление на его основе аберраций и частотно-контрастной характеристики выполнялись как с использованием авторского программного обеспечения, так и других программ расчета оптических систем, в частности “ZEMAX Optical Design Program” [8], позволяющих осуществлять прогон реальных лучей через элементы различных типов.

Авторы выражают благодарность С. Ю. Дьяконову за инициирование данной работы и полезные обсуждения, а также Н. В. Ремизову и В. Г. Ильину за предоставленную информацию о производимых ЗАО «ГРИНЕКСТ» градиентных стеклах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ежов Е. Г., Степанов С. А., Грейсух Г. И.** Коррекция аберраций жесткого градиентного эндоскопа // Автометрия. 2004. **40**, № 3. С. 100.
2. **Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А.** Коррекция аберраций оптической системы иглообразного жесткого градиентного эндоскопа // Автометрия. 2005. **41**, № 2. С. 115.
3. **Русинов М. М., Грамматин А. П., Иванов П. Д. и др.** Вычислительная оптика: Справочник /Под ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.
4. **Русинов М. М.** Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
5. **Gan M., Potyemin I., Perveev A.** High-speed apo-lens with kinoform element // Proc. SPIE. 1991. **1574**. P. 243.
6. <http://www.canon.com/do-info/>
7. **Слюсарев Г. Г.** Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969.
8. <http://www.focus-software.com>

Поступила в редакцию 15 мая 2006 г.