

Е. Г. Ежов, С. А. Степанов, Г. И. Грейсух

(Пенза)

**КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ
ЖЕСТКОГО ГРАДИЕНТНОГО ЭНДОСКОПА ***

Приведены результаты исследования возможностей коррекции хроматических и монохроматических aberrаций иглообразной части жесткого эндоскопа, включающей градиентные оптические элементы: объектив и транслятор. Показано, что эффективным корректором ее aberrаций может служить гибридный компенсатор, состоящий из линзы Вуда и однородного мениска.

Введение. В работе [1] была показана возможность коррекции хроматических и монохроматических aberrаций иглообразной части жесткого эндоскопа, включающей градиентные объектив и транслятор, с помощью однородно-линзового компенсатора. В данной работе исследуется возможность коррекции aberrаций и анализируются ее результаты, которые могут быть достигнуты при использовании одиночной радиально-градиентной линзы и двухлинзового гибридного градиентно-однородного компенсатора.

Для последующей коррекции в качестве исходной выбрана система, которая корректировалась и в работе [1]. Ее объектив представляет собой короткий цилиндрический градиентный стержень, выполненный из стекла SLW-1.0 и приклеенный к переднему торцу градан-транслятора, представляющего собой длинный цилиндрический стержень, выполненный из стекла ARS20. Производитель стекла SLW-1.0 – фирма “Nippon Sheet Glass Co., Ltd.” (Осака, Япония), а стекла ARS20 – фирма “Gradient Lens Corporation” (Рочестер, США). Длина градан-объектива $d_{об} = 2,57$ мм и градан-транслятора $d_{тр} = 241,9$ мм. При использовании указанных градиентных стекол и световом диаметре цилиндрической оболочки градан-транслятора $D_{тр} = 1,5$ мм угловое поле зрения $2\omega = 60^\circ$ обеспечивается с приемлемым виньетированием. Прямое изображение строится исходной системой вблизи заднего торца транслятора. Фокусное расстояние системы $f' = -1,01$ мм. Для осевого пучка ($\omega = 0$) при приведенном значении $D_{тр}$ диаметр входного зрачка $D_p = 0,149$ мм.

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

Компоновка компенсатора. Вклад в хроматизм положения, вносимый любым оптическим элементом, пропорционален квадрату высоты апертурного луча, падающего на элемент, поэтому корректор хроматизма целесообразно установить в плоскости, где эта высота максимальна. Практически это достигается изменением длины транслятора примерно на четверть периода синусоидальной траектории параксиального луча, распространяющегося в нем, и установкой корректора вблизи заднего торца транслятора. При этом для сохранения фокусного расстояния системы в целом корректор должен иметь положительную оптическую силу. В простейшем случае такой корректор может быть выполнен в виде приклеенной к заднему торцу транслятора линзы Вуда, т. е. плоскопараллельной пластины с радиальным распределением показателя преломления. Материал и толщина линзы Вуда выбираются из условия получения заданного фокусного расстояния и устранения хроматизма положения системы в целом.

Используя расчетные формулы, приведенные в работе [2], нетрудно показать, что для иглообразной части эндоскопа, объектив которой выполнен из стекла SLW-1.0, а транслятор длиной порядка 180–250 мм из стекла ARS20, материал корректирующей линзы Вуда должен иметь эффективное число Аббе ν , лежащее в диапазоне 45–55. Данный параметр, вычисляемый по формуле

$$\frac{1}{\nu} = \frac{1}{\nu_1} - \frac{1 - 1/\nu_0}{\nu_0}$$

и однозначно характеризующий дисперсионные свойства радиально-градиентной среды, введен в работе [1]. Здесь $\nu_0 = (n_0 - 1)/\Delta n_0$ и $\nu_1 = n_1/\Delta n_1$ – числа Аббе для базового показателя преломления n_0 и первого коэффициента радиального градиента n_1 [3] соответственно; $n_i = n_i(\lambda)$ и $\Delta n_i = n_i(\lambda_{\min}) - n_i(\lambda_{\max})$; λ , λ_{\min} и λ_{\max} – средняя, минимальная и максимальная длины волн заданного спектрального диапазона.

С учетом вышеизложенного для корректирующей линзы Вуда было выбрано стекло SLS-2.0, производимое фирмой “Nippon Sheet Glass Co., Ltd.”. Основные параметры радиально-градиентных стекол всех трех вышеперечисленных марок приведены в табл. 1. Они вычислены для спектрального диапазона, ограниченного синей F - и красной C -линиями водорода ($\lambda_{\min} = \lambda_F = 486,13$ нм и $\lambda_{\max} = \lambda_C = 656,26$ нм). В качестве средней длины волны принята желтая d -линия гелия ($\lambda = \lambda_d = 587,56$ нм).

Конструктивные параметры иглообразной части эндоскопа, включающей склеенные между собой градан-объектив, градан-транслятор и корректирующую линзу Вуда, приведены в табл. 2. Фокусное расстояние системы $f' = -1,01$ мм, а величина заднего фокального отрезка $s'_F = 6,997$ мм. Ис-

Т а б л и ц а 1

Марка стекла	n_0	$n_1, \text{мм}^{-2}$	ν_0	ν_1	ν
SLW-1.0	1,61038	-0,30015	39,26	17,41	20,93
ARS20	1,53954	-0,00324	52,86	822,16	-185,73
SLS-2.0	1,56615	-0,04810	46,54	37,03	51,98

Таблица 2

r , мм	d , мм	Марка стекла
∞		
	2,57	SLW-1.0
∞		
	205,98	ARS20
∞		
	2,40	SLS-2.0
∞		

следование этой системы методом расчета хода лучей показало, что в ней хроматизм положения, действительно, устранен полностью. Хроматизм увеличения, корректировавшийся лишь небольшим, порядка 1–2 мм, изменением длины транслятора, оказался в пределах всего углового поля почти на порядок меньше, чем у исходной схемы. В результате полихроматическое разрешение системы при контрасте $K = 0,2$ [4] составляет в центре и на краю поля зрения 110 и 66 мм^{-1} соответственно. Причем на краю поля зрения разрешение не отличается от дифракционно ограниченного. Снижение дифракционного предела разрешения обусловлено виньетированием, возникающим в результате ограничения наклонных пучков оболочкой градан-транслятора.

Если столь резкая неравномерность разрешения по полю нежелательна, то ее можно существенно снизить установкой специальной апертурной диафрагмы при одновременном увеличении светового диаметра цилиндрической оболочки градан-транслятора. При конструктивных параметрах системы, приведенных в табл. 2, световой диаметр цилиндрической оболочки градан-транслятора $D_{\text{тр}} = 2,2 \text{ мм}$ обеспечивает без виньетирования угловое поле зрения в пространстве предметов $2\omega = 60^\circ$, если диаметры всех световых пучков ограничиваются апертурной диафрагмой диаметром $D_{AS} = 1,47 \text{ мм}$, устанавливаемой на расстоянии $s_{AS} = 24,19 \text{ мм}$ от переднего торца транслятора.

Исследование оптической системы в таком варианте показало, что в плоскости наилучшей установки, обеспечивающей равенство разрешений в центре и на краю поля ($s'_F = 6,993 \text{ мм}$), полихроматическое разрешение при контрасте $K = 0,2$ не опускается ниже $N_m = 109 \text{ мм}^{-1}$. Качество формируемого изображения в основном ограничено вторичным спектром и монохроматическими aberrациями, превалирующей из которых является кривизна поля.

Снизить уровень остаточных aberrаций удастся с помощью компенсатора, который помимо линзы Вуда включает оптически слабый коррекционный элемент, помещенный вблизи плоскости изображения, формируемого иглообразной частью эндоскопа. Этот коррекционный элемент представляет собой мениск, выполненный из однородного стекла. Оптическая схема иглообразной части эндоскопа, включающей гибридный компенсатор,

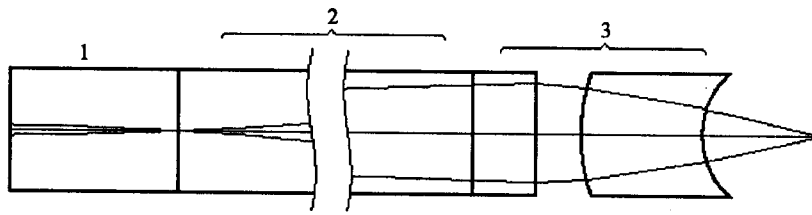


Рис. 1. Оптическая схема иглообразной части жесткого эндоскопа: 1 – градан-объектив, 2 – градан-транслятор, 3 – гибридный компенсатор

Таблица 3

$r, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	Параметры среды	
		n_d	ν
∞			
	1,544	SLS-2.0	
∞			
	1,177	1	
2,211			
	2,897	1,7550	52,32
1,0			

представлена на рис. 1, а конструктивные параметры компенсатора приведены в табл. 3. Фокусное расстояние иглообразной части в целом $f' = -1,01 \text{ мм}$, а величина заднего фокального отрезка $s'_F = 2,302 \text{ мм}$.

На рис. 2 и 3 приведены кривые остаточных монохроматических и хроматических aberrаций оптической системы с гибридным компенсатором. Ее монохроматические aberrации вычислялись на центральной длине волны λ_d , а хроматические – в спектральном диапазоне, ограниченном F - и C -линиями. На рис. 4 представлена полихроматическая частотно-контрастная характеристика этой системы.

Так как у исходной системы, состоящей только из градан-объектива и градан-транслятора, в отсутствие виньетирования разрешение при контрасте $K = 0,2$ на краю поля не превышало 77 мм^{-1} , нетрудно увидеть, что введение в иглообразную часть эндоскопа гибридного компенсатора aberrаций позволило увеличить ее разрешение более чем в 1,5 раза, подняв его при контрасте $K = 0,2$ до $N_m = 124 \text{ мм}^{-1}$. Что же касается дисторсии, то она от введе-

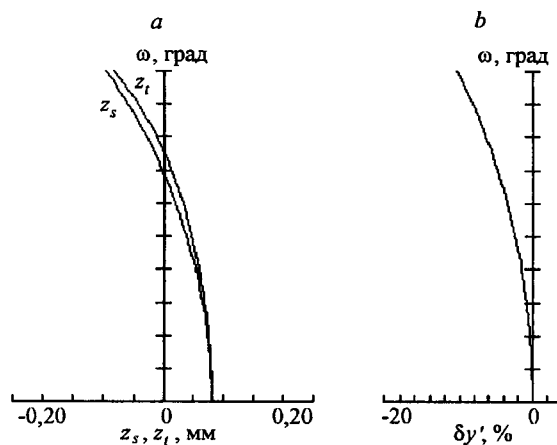


Рис. 2. Кривые монохроматических aberrаций иглообразной части эндоскопа: астигматизм и кривизна поля (а), дисторсия (б)

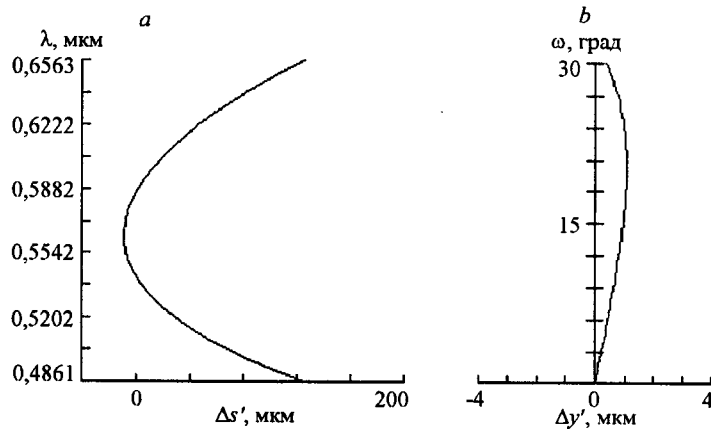


Рис. 3. Кривые хроматических aberrаций иглообразной части эндоскопа: хроматизм положения (а), хроматизм увеличения (b)

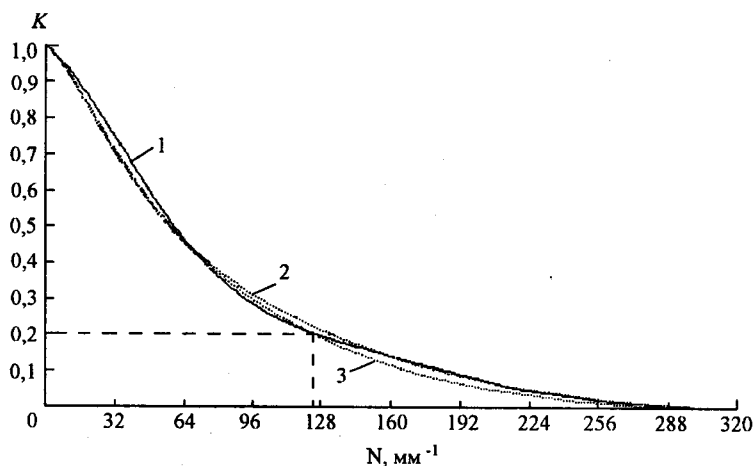


Рис. 4. Полихроматическая частотно-контрастная характеристика иглообразной части эндоскопа: при $\omega = 0$ (кривая 1); при $\omega = 30^\circ$ для меридиональной и сагиттальной плоскостей (кривые 2 и 3 соответственно)

ния компенсатора практически не изменилась и, как следует из рис. 2, b , на краю поля достигает 10 %.

Заключение. Превалирующими монохроматическими aberrациями иглообразной части жесткого эндоскопа, включающей градиентные объектив и транслятор, являются aberrации тонких пучков. Из хроматических aberrаций преобладает хроматизм положения, который в силу ограниченности ассортимента серийно выпускаемых неоднородных материалов устранить автоматически не представляется возможным.

Снизить до приемлемого уровня все aberrации системы позволяет гибридный компенсатор, состоящий из линзы Вуда и однородного мениска. Выбор его конструктивных параметров в соответствии с рекомендациями, данными в работе, обеспечивает более чем полуторократное повышение разрешающей способности при сохранении величины оптической силы системы в целом.

Расчет хода лучей, вычисление на его основе аберраций и частотно-контрастной характеристики выполнялись с использованием разработанного авторами программного обеспечения, позволяющего производить анализ и синтез оптических систем, включающих традиционные, дифракционные и градиентные элементы. Аналогичные результаты могут быть получены с помощью и других программ расчета оптических систем, также допускающих прогон лучей через элементы различных типов, например Optical Design Program «ZEMAX» [5].

Авторы выражают благодарность С. Ю. Дьяконову и Р. Е. Ильинскому за инициирование данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грейсух Г. И., Степанов С. А., Ежов Е. Г. Дифракционные и однородно-линзовые компенсаторы для коррекции аберраций градиентного эндоскопа // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 54.
2. Греков А. А., Дроздов Н. М. Хроматические параксиальные аберрации неоднородных оптических систем с цилиндрическим распределением показателя преломления // Оптико-мех. пром-сть. 1989. № 7. С. 26.
3. Ryan-Howard D. P., Moore D. T. Model for the chromatic properties of gradient-index glass // Appl. Opt. 1985. 24, N 24. P. 127.
4. Королев А. Н., Морозова С. Л., Сивяков И. Н. Анализ и оптимизация информационных характеристик оптико-электронных систем наблюдения // Оптический журнал. 1995. № 5. С. 54.
5. ZEMAX@focus-software.com; www.focus-software.com

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства,
E-mail: drozd@netcity.ru*

*Поступила в редакцию
12 сентября 2003 г.*