

УДК 004.3

АДАПТАЦИЯ СХЕМ КЛАССИЧЕСКИХ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦИФРОВЫХ КАМЕРАХ

В. Н. Васильев,

член-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор

А. И. Драгунов,

студент

И. Л. Лившиц,

канд. техн. наук, начальник лаборатории

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Е. А. Соколова,

доктор техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Представлены пути повышения информативности цифровых камер оптико-информационных систем за счет улучшения коррекции хроматических aberrаций широкоугольного объектива в расширенном спектральном диапазоне.

Ключевые слова — повышение информативности системы, цифровые камеры, широкоугольный объектив, спектральный диапазон, хроматические aberrации.

Введение

Повышение информативности цифровых камер является важнейшей задачей при проектировании информационных систем, куда эти камеры входят как основная составная часть.

В этом случае рекомендуется, прежде всего, использовать именно широкоугольные объективы, позволяющие собрать максимальное количество информации об объекте. Однако достаточно часто подобные объективы имеют существенный недостаток, заключающийся в низком уровне коррекции хроматических aberrаций, при этом особенно критичными становятся хроматические aberrации главного луча, поскольку объектив — широкоугольный.

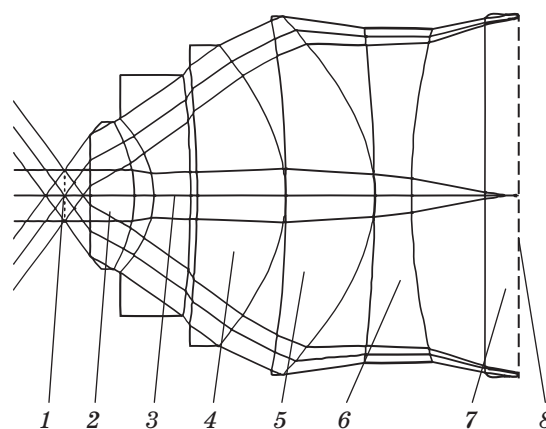
Дополнительные меры по коррекции указанных aberrаций, очевидно, позволят увеличить информативность системы в целом за счет получения более качественной информации в расширенном спектральном диапазоне.

Классический широкоугольный объектив для цифровой камеры

Одной из форм оценки информативности объективов цифровых камер оптико-информационных систем является их моделирование с помо-

щью специализированного программного обеспечения, используемого для проектирования оптических систем, с последующими расчетами aberrаций.

Рассмотрим рефракционный широкоугольный объектив (рис. 1), содержащий четыре асфериче-



■ **Рис. 1.** Широкоугольный рефракционный объектив для цифровой камеры: 1 — апертурная диафрагма; 2, 3, 6 — линзы из стекла; 4, 5 — пластиковые асферические линзы; 7 — защитное стекло ПЗС-матрицы; 8 — плоскость изображения

ские поверхности, позволяющие обеспечить достаточно высокое качество его абберационной коррекции [1, 2]. Отметим, что представленный объектив не является «штатным», а был специально разработан для увеличения углового поля цифровой камеры. Особенностью таких оптических схем является их очень большая дисторсия, которая может быть уменьшена за счет использования асферических поверхностей высшего порядка. Параметры оптической схемы представлены в табл. 1. Уравнение асферических поверх-

■ **Таблица 1.** Конструктивные параметры классического широкоугольного объектива для цифровой камеры

Позиция	Радиусы поверхностей, мм	Толщина линз и расстояния между ними, мм	Марка оптического материала линзы по каталогу Schott
1. Апертурная диафрагма	Плоскость	0,95	
2. Линза	Плоскость	0,7	LASFN15
	-6,194132	0,3	
3. Линза	-5,894562	0,94	SF61
	-8,098396	0,1	
4. Линза	-15,05*	1,27	ACRYLIC
	-2,96*	0,2	
5. Линза	-15,05*	1,27	ACRYLIC
	-2,96*	0,1	
6. Линза	-13,31263	1,1	SF61
	7,9	1,14	
7. Защитное стекло ПЗС-матрицы	Плоскость	0,5	BK7
	Плоскость	0,05**	
8. Плоскость изображения	Плоскость	0	

* Асферическая поверхность высшего порядка.
 ** Изображение находится на расстоянии 0,05 мм от защитного стекла ПЗС-матрицы.

ностей высшего порядка является общепринятым для описания подобных поверхностей в программах автоматизированного проектирования оптических систем [3].

Сравнительные характеристики качества изображения, полученного с помощью классического объектива, показанного на рис. 1, представлены в табл. 2. Аберрации меридионального и сагиттального астигматизма показывают расстояние от поверхности реального изображения до поверхности параксиального изображения в зависимости от координат углового поля, а их разница характеризует кривизну поверхности изображения и трудно поддается коррекции в широкоугольных объективах. Классическая формула для определения аберрации дисторсии D определяется как отношение разницы координат реального и безабберационного (идеального) главных лучей к координате безабберационного луча:

$$D = 100 \times \frac{y_{chief} - y_{ref}}{y_{ref}}$$

Таким образом, при создании широкоугольного объектива по классической схеме в качестве параметров для коррекции дисторсии использовались асферические поверхности высшего порядка, а в гибридном объективе — порядки дифракции, радиусы зон и их взаимное расположение.

Широкоугольный гибридный объектив для цифровой камеры информационной системы

Анализ объектива (см. рис. 1), а именно значений его остаточных аберраций (см. табл. 2, 3), позволяет сделать вывод о недостаточной степени коррекции его элементарных хроматических аберраций, представленных в табл. 3, что впоследствии приводит к появлению неэлементарных хроматических аберраций (см. табл. 2, 3). При-

■ **Таблица 2.** Сравнение основных абберационных характеристик классического и гибридного объективов

W*	RMS**, длины волн		Астигматизм меридиональный, мм		Астигматизм сагиттальный, мм		Дисторсия относительная, %	
	Классика	Гибрид	Классика	Гибрид	Классика	Гибрид	Классика	Гибрид
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,1	0,05	0-02	-0,005	0	0	-5,04	-5,34
20	0,218	0,03	-0,05	-0,007	-0,05	-0,05	-12,54	-6,54
30	0,542	0,07	-0,07	-0,012	-0,17	-0,007	-15,39	-7,39
40	0,85	0,12	-0,12	-0,005	-0,12	-0,012	-18,145	-8,145
50	0,976	0,154	-0,25	-0,08	-0,305	-0,005	-20,19	-10,19
60	1,5	0,3	-0,018	-0,01	-0,28	-0,08	-32,01	-12,01

*W — половинное значение углового поля объективов.
 **RMS — среднеквадратическое отклонение деформации волнового фронта, выраженное в долях длин волн.

■ **Таблица 3.** Коэффициенты хроматических aberrаций третьего порядка (элементарные) и комбинированные (неэлементарные) для классического широкоугольного объектива

Элементарные		Неэлементарные	
Название	Значение*	Название	Значение*
Хроматизм положения	0,0067	Меридиональный астигм-хроматизм	0,0012
Вторичный спектр по осевому лучу	0,0034	Сагиттальный астигм-хроматизм	0,0008
Хроматизм увеличения	0,0028	Хроматическая кома	0,001
Вторичный спектр по главному лучу	0,0013	Хроматическая дисторсия	0,02

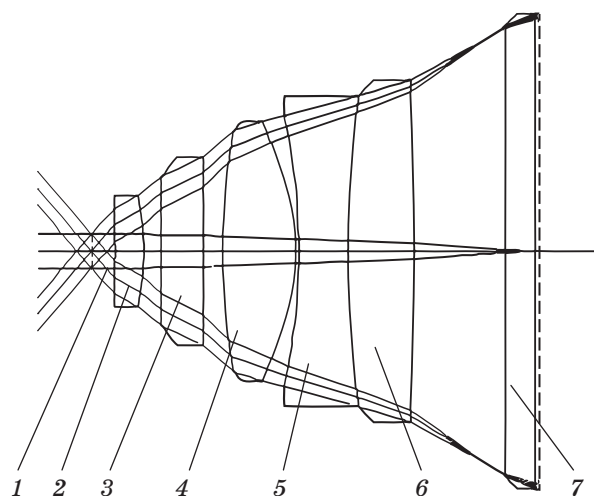
* Значения коэффициентов — безразмерные величины.

чина этого явления — выбор в качестве материала для двух линз объектива пластика марки ACRYLIC, что в свою очередь определялось необходимостью использования асферических поверхностей. Таким образом, при проектировании таких объективов традиционными методами разработчики сталкиваются с невозможностью улучшить степень aberrационной коррекции, что и приводит к уменьшению их информативности в широком спектральном диапазоне, а это сказывается на работе всей системы в целом.

Попытка установить дополнительный «отдельный» корректор хроматических aberrаций в готовую оптическую схему не дал результатов, поскольку этот корректор вносил в схему и другие aberrации.

Альтернативой явилась адаптация — разработка гибридного широкоугольного объектива с улучшенной информативностью за счет достижения более качественной коррекции всех хроматических aberrаций. Началом процесса стало сокращение числа асферических коэффициентов и оптимизация других параметров исходного объектива после каждого снижения числа коэффициентов. На этапе, когда ход лучей на краях поля зрения достиг предела возможного, на одной из поверхностей линз была построена дифракционная поверхность.

В ходе оптимизации контролю подвергался процесс эволюции как дифракционной структуры, так и формы остальных поверхностей оптической системы. Результатом оптимизации оптической схемы объектива стали существенное упрощение конструкции и даже сокращение количества линз на одну. При этом дифракционная структура наносится на плоские поверхно-



■ **Рис. 2.** Широугольный гибридный дифракционно-рефракционный объектив цифровой камеры: 1 — плоскость апертурной диафрагмы; 2 — дифракционная линза; 3-6 — стеклянные сферические линзы; 7 — защитное стекло ПЗС-матрицы

сти пластинки с двух сторон, а остальные поверхности других линз становятся сферическими (рис. 2).

Сравнительные характеристики качества изображения для полученной оптической схемы гибридного дифракционно-рефракционного объектива приведены в табл. 2.

Сравнение aberrаций, представленных в табл. 2-4, показывает, что объектив с дифракционно-рефракционной линзой обеспечивает значительно меньшую RMS-ошибку волнового фронта, чем с асферическими поверхностями. Разница в дисторсии и кривизне поля для дифракционного и асферического вариантов незначительна, а хроматические aberrации существенно лучше.

■ **Таблица 4.** Коэффициенты хроматических aberrаций третьего и пятого порядков для гибридного широкоугольного объектива с дифракционной линзой

Элементарные		Неэлементарные	
Название	Значение	Название	Значение
Хроматизм положения	0,0002	Меридиональный астигм-хроматизм	0,00003
Вторичный спектр по осевому лучу	0,0001	Сагиттальный астигм-хроматизм	0,00001
Хроматизм увеличения	0,0001	Хроматическая кома	-0,00001
Вторичный спектр по главному лучу	0,0001	Хроматическая дисторсия	-0,00001

Генерированные на компьютере изображения одной и той же сцены, полученные при помощи этих двух объективов, показаны на рис. 3, а, б.

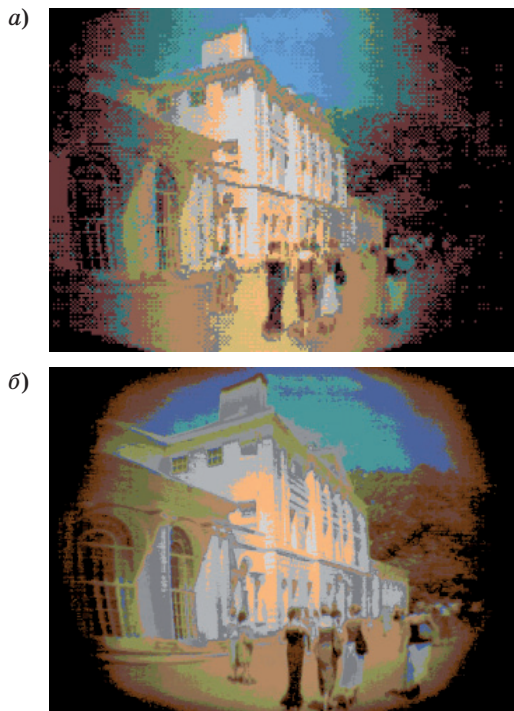
Очевидно, что качество изображения, полученное при помощи объектива с гибридной дифракционно-рефракционной линзой, не уступает качеству изображения для объектива с асферическими линзами, а по ряду параметров его превосходит.

При моделировании гибридной оптической системы учитывался только ход лучей через объектив, дифракционная эффективность дифракционной линзы показана на рис. 4.

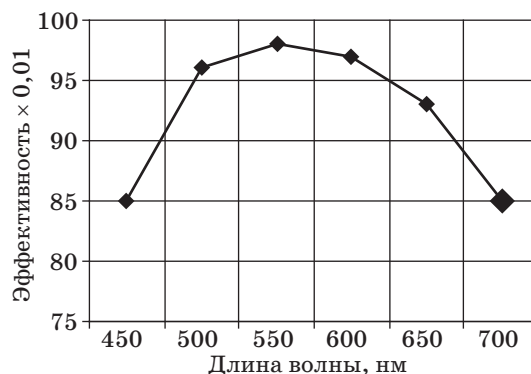
Недостатком этого решения является возможность увеличения уровня рассеянного света в связи с ненулевой эффективностью высоких порядков дифракции.

Полный анализ рассеянного света выходит за рамки данной работы. Дифракционная эффективность для второго и третьего порядков показана на рис. 5, а, б. Для четвертого порядка эффективность составляет менее 0,5 %, а для более высоких порядков — близка к нулю.

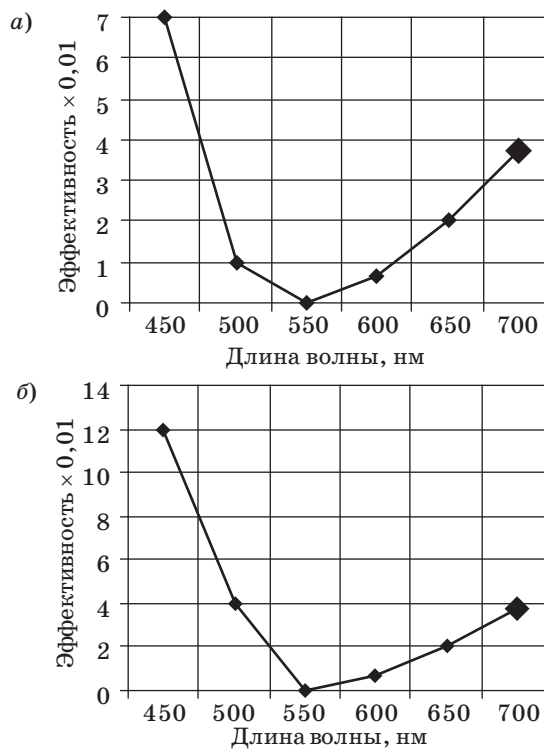
В случае, когда качество изображения оптимизируется только для первого порядка дифракции, четкость изображения уменьшается с увеличением порядка. Симулированное компьютерное изображение для второго порядка дифракции гибридного объектива с дифракционно-рефракционной линзой показано на рис. 6.



■ Рис. 3. Изображения, полученные при помощи классического объектива с асферическими линзами (а) и гибридного объектива с дифракционно-рефракционной линзой (б)



■ Рис. 4. Дифракционная эффективность дифракционной линзы, используемой в гибридном объективе



■ Рис. 5. Дифракционная эффективность дифракционной линзы во втором (а) и третьем (б) порядках дифракции



■ Рис. 6. Изображение для второго порядка дифракции

Потенциальным решением проблемы минимизации влияния аберраций высоких порядков на качество изображения может быть выполнение дифференциальной оптимизации качества изображения для более чем одного порядка дифракции на краях спектрального диапазона.

Заключение

Предлагаемый метод проектирования широкоугольных объективов с угловыми полями, превышающими $90\text{--}100^\circ$, на основе гибридных схем применяется **впервые**.

Расчет гибридных оптических схем путем введения в состав конструкции классического объектива — дифракционно-рефракционной линзы-корректора — показал, что все характеристики качества изображения, по крайней мере, не хуже, а некоторые — лучше, чем для классического рефракционного прототипа.

Теоретическая дифракционная эффективность достаточно высока, однако реальная эффективность в значительной степени будет зависеть от технологии изготовления элементов объектива, которая в данной работе не рассматривается.

Для гибридного широкоугольного объектива подавление высоких порядков дифракции является более важным, поэтому оно должно быть учтено на стадии детального проектирования профиля линз, связанного непосредственно с технологией их изготовления.

Альтернативный способ решения этой задачи авторы видят в увеличении резкости изображения для более чем одного порядка.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта 11.519.11.6014.

Литература

1. **Bronshtein I. G., Vasilyev V. N., Livshits I. L.** et al. Wide angle objective with the entrance pupil removed forward. Russian Patent N 84590, priority from 10.03.09.
2. **Buralli A.** et al. Optical performance of holographic kinoforms // Applied Optics. 1989. Vol. 28. N 5. P. 976.
3. www.osdoptics.com (дата обращения: 29.10.2012).