

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОСОБОШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ КАМЕР

Дарья Евгеньевна Абрамкина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (999)464-08-77, e-mail: daria.abramkina@yandex.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

В статье рассмотрена классификация широкоугольных объективов по полю зрения. Предложена структурная схема построения особоширокоугольного объектива, состоящая из афокального и фокусирующего компонентов. Рассмотрены вопросы влияния дисторсии на светораспределение по полю. Приведены результаты расчета особоширокоугольного телецентрического объектива в видимой части спектра для экшен-камер.

Ключевые слова: оптические схемы, широкоугольный объектив, ортоскопические и дисторзирующие объективы, линейный закон построения изображения, дисторсия, телецентрический ход луча.

ANALYSIS OF OPTICAL SYSTEMS OF EXTREMELY WIDE-ANGLE LENSES FOR DIGITAL CAMERAS

Daria E. Abramkina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10, Plakhotnogo St., Graduate of the Department of Photonics and Device Engineering, phone: (999)464-08-77, e-mail: daria.abramkina@yandex.ru

Tatiana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Professor of the Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The article considers the classification of wide-angle lenses according to the field of view, presents the results of calculating the lens in the visible part of the spectrum for digital cameras. A method for increasing the field of view, as well as a method for ensuring high light distribution along the edge of the field of view, is proposed.

Key words: optical systems, wide-angle lens, distortion-free and distortion lenses, distortion, telecentric ray trace, linear image construction of the law.

Введение, актуальность

В настоящее время отечественными предприятиями серийно не выпускаются малогабаритные цифровые видеокамеры с особоширокоугольными и сверхширокоугольными объективами, базирующиеся на отечественной элементной базе. Принимая во внимание расширение сферы гражданских применений таких камер, можно утверждать, что разработка малогабаритных камер, позволяющих обеспечить возможность формирования изображения части пространства, приближающейся к полусфере, с конкурентоспособными массогабаритными характеристиками является актуальным направлением в оптическом приборостроении.

Важнейшим элементом цифровой камеры является объектив, параметры которого определяют качество сформированного изображения на приемной матрице камеры; поэтому предметом статьи стали оптические системы широкоугольных объективов. Целью работы является классификация широкоугольных объективов, рассмотрение одной из структурных схем построения особоширокоугольных телецентрических объективов.

При проведении исследования использованы методы геометрической оптики, компьютерное моделирование оптических элементов и методы автоматической оптимизации оптических систем.

Классификация оптических схем широкоугольных объективов

Основными оптическими характеристиками объективов являются фокусное расстояние, относительное отверстие и угловое поле в пространстве предметов. В соответствии с традиционной классификацией фотографических объективов: широкоугольными объективами называют такие объективы, у которых угловое поле лежит в интервале от 60° до 100° ; особоширокоугольными – от 100° до 180° ; сверхширокоугольными – свыше 180° [1].

Помимо классификации по полю зрения объективы подразделяются на две группы: ортоскопические и дисторзирующие. Дисторзирующие объективы можно рассматривать как объективы, в которых реализуется закон построения изображения, отличный от идеальной оптики, например, линейный закон построения изображения. Объективы, относящиеся к первой группе, обладают исправленной дисторсией, во второй группе объективов дисторсия не исправлена [2].

Современные цифровые видеокамеры оснащаются разными видами широкоугольных объективов. Набирает популярность использование экшен-камер, оснащенных особошироугольными дисторзирующими объективами с углами обзора от 100° до 180° [3, 4]. С развитием технологий стали появляться камеры с углами обзора, достигающими 360° . Большие углы обзора достигаются с помощью использования нескольких объективов или специальными оптическими системами с зеркалами [4, 5].

Структурная схема особоширокоугольного телецентрического объектива

Чаще всего структурную оптическую схему широкоугольных и особоширокоугольных объективов рассматривают как синтез отрицательного и положительного компонентов. При этом первый отрицательный компонент служит для увеличения углового поля, а второй – для формирования действительного изображения на приемной матрице. Именно по такой структурной схеме построены особоширокоугольные объективы с угловыми полями до 180° для приборов ориентации космических аппаратов [6]. Особенностью указанных объективов является наличие в них узкополосных светофильтров, что не требует устранения хроматических аберраций.

Известен прием синтеза базового силового компонента в широкоугольных объективах по методу Русина М. М. как сочетание телеконцентрической афокальной системы и положительной линзы с апланатической поверхностью, позволяющее создавать системы, свободные от астигматизма, комы и сферической аберрации [7].

Для расчета особоширокоугольного объектива для экшн-камеры в рамках настоящего исследования предложена следующая структурная схема: сочетание афокальной системы, состоящей из компонентов 1 и 2, с угловым увеличением менее 1 крата и фокусирующего компонента 3, расстояние между которыми позволяет разместить апертурную диафрагму в передней фокальной плоскости компонента 3 (рис. 1).

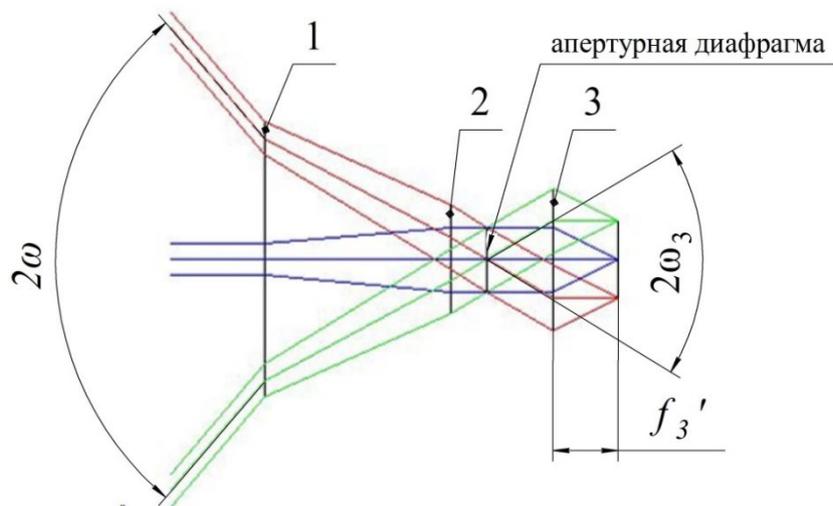


Рис. 1. Структурная схема широкоугольного объектива

Фокусирующий компонент 3 с угловым полем $2\omega_3$ работает в параллельных пучках лучей и обеспечивает телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений. Афокальная система 1, 2, построенная по типу инвертированной системы Галилея, уменьшая фокусное расстояние объектива f' по сравнению с фокусным расстоянием f'_3 фокусирующего компонента 3, увели-

чивает угловое поле в пространстве предметов до 2ω . При этом фокусное расстояние объектива определяется по формуле:

$$f' = \gamma_T \cdot f'_3, \quad (1)$$

где γ_T – угловое увеличение афокальной системы.

В зависимости от характера закона построения изображения, реализуемого в объективе, между значением диагонали y' приемной матрицы и углом ω наклона крайних пучков лучей относительно оптической оси могут быть справедливы соотношения

$$y' = f' \cdot \operatorname{tg} \omega \quad (2)$$

или

$$y' = f' \cdot \omega. \quad (3)$$

Соотношение (2) справедливо для ортоскопического объектива, соотношение (3) – для линейного закона построения изображения. Возможны и другие зависимости между указанными параметрами.

Одной из наиболее важных задач в проектировании особоширокоугольных объективов является обеспечение приемлемого светораспределения по полю [1, 3, 9]. Освещенность по полю зрения для ортоскопических систем определяется по известной формуле:

$$E_\omega = k(\omega) E_0 \cdot \cos^4 \omega', \quad (4)$$

где E_ω – освещенность на краю поля зрения;

E_0 – освещенность в центре поля зрения;

ω' – угол главного луча крайнего наклонного пучка лучей в пространстве изображений относительно оптической оси;

$k(\omega)$ – коэффициент виньетирования наклонных пучков по площади их поперечных сечений.

Светораспределение по полю в объективах с линейным законом построения изображения повышается по сравнению с ортоскопическими объективами. Освещенность по полю в объективах с линейным законом построения изображения определяется по формуле [10]:

$$E_\omega = k(\omega) E_0 \frac{\sin 2\omega'}{2\omega'}. \quad (5)$$

Из формул (4), (5) следует, что для достижения высокого светораспределения по полю необходимо, чтобы было минимизировано виньетирование наклонных пучков и угол ω' был равен нулю. Последнее требование достигается, если главные лучи всех наклонных пучков лучей в пространстве изображений параллельны оптической оси, т. е. в объективе реализован телецентрический ход главных лучей, для достижения которого апертурная диафрагма устанавливается в переднюю фокальную плоскость фокусирующего компонента 3. В [4] показано, что в особоширокоугольном светосильном объективе с угловым полем 120° и относительным отверстием 1 : 2 применение телецентрического хода главных лучей в пространстве изображений позволило достичь значения светораспределения на краю поля в 74 %.

Дисторсия в особоширокоугольных объективах

Как указано в [1], развитие полей зрения до 140° и более становится возможным лишь при наличии большой отрицательной дисторсии. В широкоугольных объективах относительная дисторсия может принимать значения до 80 %.

Дисторсия – это нарушение подобия между изображением предмета и самим предметом, при условии сохранения резкости изображения. Большая отрицательная дисторсия в объективах вызывает искажение прямых линий по полю зрения. Они принимают форму выпуклых линий. Увеличение значения дисторсии позволяет улучшить светораспределение. Поэтому, при разработке широкоугольных объективов, для достижения высокой освещенности по краю поля зрения часто используют закон построения изображения, близкий к линейному [2].

Создание линейного закона построения изображения можно рассматривать как введение в оптическую систему дисторсии, относительное значение которой $\Delta y'/y'_0$ должно изменяться в зависимости от угла ω по следующему закону:

$$\frac{\Delta y'}{y'_0} = \left(\frac{\omega}{\text{tg}\omega} - 1 \right). \quad (6)$$

В частности, для $2\omega=150^\circ$, расчет по формуле (6) дает значение относительной дисторсии на краю поля, равное минус 65 %.

Наличие дисторсии приводит к тому, что при известном значении размера чувствительной площадки приемника требуемое значение фокусного расстояния будет отличаться от значения, определенного по формуле (2). При соблюдении линейного закона построения изображения фокусное расстояние определится по формуле (3). В частности, для $2\omega=150^\circ$ и $2y'=7,8$ мм получается значение фокусного расстояния, равное 3 мм. Если имеет место отступление от линейного закона построения изображения, т.е. дисторсия отличается от вычисленной по формуле (6), то корректируется и значение фокусного расстояния объектива. Рис. 2 иллюстрирует увеличение фокусного расстояния f' объектива при наличии в нем отрицательной дисторсии по сравнению с фокусным расстоянием ортоскопическим объективом f'_0 для одного и того же размера приемной матрицы.

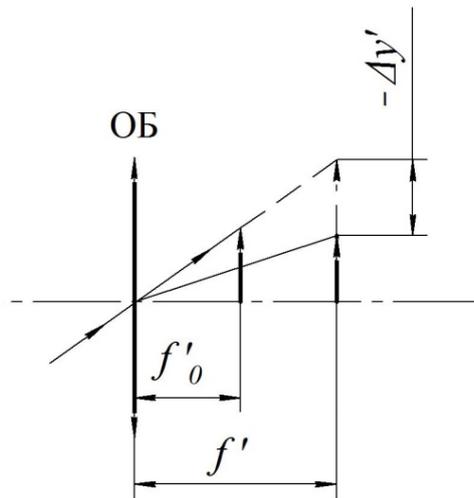


Рис. 2. Фокусные расстояния ортоскопического объектива и объектива с отрицательной дисторсией при использовании одного и того же приемника

Рассмотренная структурная схема особоширокоугольного объектива положена в основу инженерного решения по разработке объектива для малогабаритных экшен-камер с угловым полем 150° .

Инженерное решение

В результате использования методов компьютерного проектирования получена оптическая система особоширокоугольного телецентрического объектива, представленная на рис. 3, со следующими характеристиками: угловое поле в пространстве предметов 150° (по диагонали приемника), фокусное расстояние 3,17 мм, относительное отверстие 1 : 4, линейный размер изображения 7,8 мм.

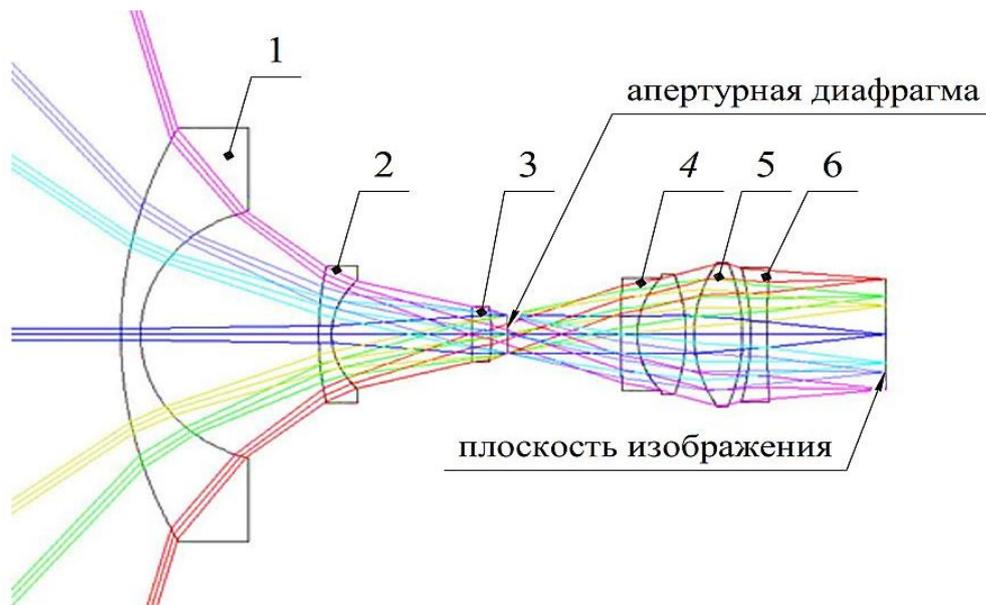


Рис. 3 Оптическая система широкоугольного объектива

Оптическая система состоит из линз 1–6. При этом анастигматический мениск 1 обеспечивает устранение астигматизма в пределах углового поля в пространстве предметов, равного 150° . Афокальная система с угловым увеличением 0,3 крата, состоящая из компонентов 1–3, позволяет снизить угловое поле фокусирующего компонента объектива до 45° , упростить конструкцию последнего, применив в нем три линзы 4–6. Между афокальной системой и фокусирующим компонентом обеспечен воздушный промежуток, значение которого превышает по абсолютной величине передний фокальный отрезок фокусирующего компонента, что обеспечило возможность разместить апертурную диафрагму в передней фокальной плоскости фокусирующего компонента. Все преломляющие поверхности в оптической системе являются сферическими, использованы марки стекол, производимые российскими предприятиями.

Описанный выше дизайн оптической системы позволил обеспечить высокую степень коррекции хроматических и монохроматических aberrаций, что подтверждается графиками частотно-контрастных характеристик (ЧКХ). На рис. 4 приведены сечения ЧКХ по полю объектива для четырех значений пространственных частот, при этом сплошные линии соответствуют сагиттальным сечениям, пунктирные – меридиональным.

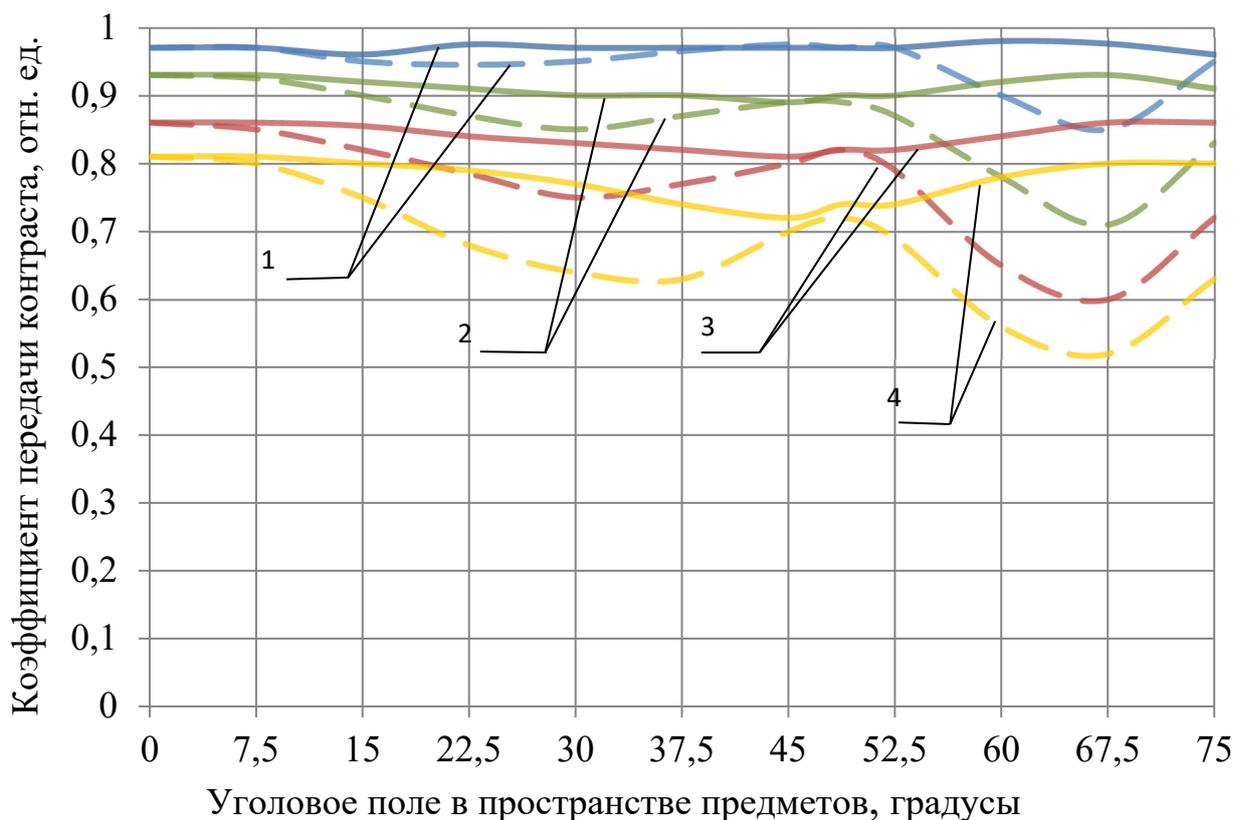


Рис.4. Сечения ЧКХ разработанного объектива для пространственных частот:
1–10 лин/мм; 2–20 лин/мм; 3–30 лин/мм; 4–40 лин/мм

Качество изображения меняется незначительно для различных точек поля. В рассчитанном варианте особоширокоугольного объектива значение относительной дисторсии на краю кадра (в углах приемной матрицы) равно минус 67 %, что обеспечивает закон построения изображения, близкий к линейному.

Заключение

Предложенная структурная схема, включающая афокальный компонент с увеличением мене 1 крата и фокусирующий компонент, разнесенные на расстояние, превышающее фокусное расстояние фокусирующего компонента, позволяет создать инженерные решения при разработке особоширокоугольных телецентрических объективов. В частном примере достигнуто поле зрения 150°, относительное отверстие 1 : 4 при использовании только сферических преломляющих поверхностей. Рассчитанный объектив может представлять интерес для разработчиков экшен-камер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русинов М.М. Техническая оптика // Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1979. – 488 с.
2. Волосов Д.С. Фотографическая оптика // Искусство. Москва – 1978. – 543 с.
3. Гебгарт А.Я., Шатова Е.А., Медведев В.В. Оптические системы некоторых типов широкоугольных объективов // Оптический журнал. – 2013. Т. 80, №2 – С. 48 – 51.
4. Гебгарт А.Я. Особенности проектирования некоторых типов особоширокоугольных объективов // Оптический журнал. – 2010. Т. 77, №9 - С. 17 – 21.
5. Kae-Hong K., Yeong-Sik K., Sung-Chan P. Design of a Tele-centric Wide Field Lens with High Relative Illumination and Low Distortion Using Third-order Aberration Analysis // Journal of the Optical Society of Korea. – 2015. Vol. 1, №6 – pp. 689 – 686.
6. Xiaoheng W., Xing Z., Ruifei Z., Fang G., Zhuqiang L. Extremely wide-angle lens with transmissive and catadioptric integration // Applied Optics. – 2019. Vol. 58, №16 – pp. 4381 – 4389.
7. Елизаров А.В., Куртов А.В., Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. Обзорно-панорамные оптико-электронные системы // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. Т. 45, № 2 – С. 37–45.
8. Безруков В.А., Карпова Г.В. Синтез силовых компонентов широкоугольных объективов // Оптический журнал. – 2012. Т. 79, №5 – С. 24 – 31.
9. Shu-Wei Y., Kuang-Lung H., Chien-Yue C., Rong-Seng C. Wide-Angle Lens Design // Optical Society of America. – 2014. Vol.2 , №3 – pp. 22 – 31.
10. Хацевич Т.Н. Светораспределение в объективах с линейным законом построения изображения // Оптические и оптико-электронные приборы: Межвуз. сб. науч. тр. – 1989. – С. 20–25.

© Д. Е. Абрамкина, Т. Н. Хацевич, 2020