

УДК 535.317.6

СПОСОБ КОРРЕКЦИИ КРИВИЗНЫ ПОЛЯ В ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВАХ

В.А. Безруков, Г.В. Карпова

Предложен один из способов коррекции кривизны поля в широкоугольных объективах, приведена методика его реализации. Для решения задачи синтеза коррекционных компонентов использованы корректирующие элементы с определенными по величине отношениями продольных увеличений вдоль главного луча. Конструктивные параметры этих элементов математически связаны с их реально вносимыми аберрациями, в частности, такой аберрацией, как астигматизм.

Ключевые слова: широкоугольные объективы, кривизна поля, астигматизм, корректирующие линзы.

Введение

Занимаясь вопросом исправления кривизны поля, нельзя не отметить, что эта аберрация наиболее трудно поддается коррекции в широкоугольных объективах. По этой причине целесообразно рассмотреть один из способов коррекции кривизны поля в таких объективах, который основывается на преобразовании астигматизма от предшествующей части исходной оптической системы в необходимое изменение кривизны поля после корректирующего компонента.

Решение задачи определения конструктивных параметров анастигматических линз для бесконечно удаленного предмета и для положения предмета на конечном расстоянии было дано проф. М.М. Русиновым [1]. Это условие не позволяет синтезировать коррекционные компоненты с вносимым наперед заданным астигматизмом. В настоящей работе предлагается метод, который основывается на решении более общей задачи, а именно – расчета конструктивных параметров корректирующих линз конечной толщины с наперед заданным астигматизмом при определенных по величине отношениях продольных увеличений вдоль главного луча. Работа является дальнейшим развитием метода синтеза оптических систем профессора М.М. Русинова.

Метод синтеза коррекционного компонента на основе условия получения наперед заданного астигматизма линз

Как известно [1], рост меридиональной кривизны изображения по отношению к росту сагиттальной кривизны в оптической системе зависит от величины отношения $\frac{Q_m}{Q_s}$, где Q_m и Q_s – продольные увеличения в меридиональной и сагиттальной плоскостях в точках предмета и изображения на главном луче. При конечном положении предмета это отношение для оптической системы (коррекционного компонента) будет иметь вид

$$\frac{Q_m}{Q_s} = \frac{1 + \frac{\Delta' t - \Delta' F}{z'_s}}{1 + \frac{\Delta t - \Delta F}{z_s}}, \quad (1)$$

где $\Delta' t$, $\Delta' F$, Δt и ΔF – астигматизм вдоль главного луча в пространстве изображений, в задней фокальной плоскости, в пространстве предметов, в передней фокальной плоскости соответственно; z_s и z'_s – отрезки вдоль главного луча от фокальной точки до предмета и изображения в сагиттальной плоскости.

Рассматривая выражение (1) применительно к одиночной линзе (элементу), можно сделать вывод, что изменение величины и знака астигматизма $\Delta' t$ элемента, устанавливаемого после корректируемой системы, будет приводить к изменению величины отношения продольных увеличений. В свою очередь, астигматизм $\Delta' t$ линзы конечной толщины связан с основными ее параметрами вдоль главного луча выражением [2], которое при отрезках $t_{1,m}$ и $t_{1,s}$ от точек преломления главного луча на первой поверхности линзы до соответствующих точек предмета имеет вид

$$\frac{1}{t_{2F,s}} = \frac{\cos^2 \varepsilon_2}{\frac{\cos^2 \varepsilon_1}{n_{r1} \cos^2 \varepsilon_1 + \frac{1}{t_{1,m}}} - \tilde{d}} - \frac{\cos^2 \varepsilon'_2}{n_{r2} \Delta' t + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{t_{1,s}} + \frac{1}{t'_{1F,s}}} - \tilde{d}} - t_{2F,s}}}, \quad (2)$$

где $n_{r1} = \frac{n_1}{n_2}$ и $n_{r2} = \frac{n_2}{n_3}$ – относительные показатели преломления на первой и второй поверхностях.

Из выражения (2) следует, что при одних и тех же значениях отрезков $t'_{1F,s}$ и $t_{2F,s}$ углы преломления ε'_1 и падения ε_2 главного луча соответственно на первой и второй поверхностях могут иметь либо одинаковые, либо разные знаки. В соответствии с терминологией проф. М.М. Русинова линзы, имеющие одинаковые знаки углов, будем называть корректирующими линзами первого рода, а линзы, имеющие разные знаки, линзами второго рода.

В основном, силовые компоненты широкоугольных объективов обладают отрицательной кривизной поля, поэтому для ее коррекции используются обычно отрицательные линзы. Метод синтеза силовых компонентов широкоугольных объективов приведен в работе [3]. Исследование отрицательных корректирующих линз первого и второго рода при конечном положении предмета, удовлетворяющих условию (2), и положительном значении $\Delta't$ показали:

- для линз обоого рода отношение продольных увеличений, большее единицы, определяется условием $\Delta't \gg \Delta t$, приводящим к тому, что рост меридиональной кривизны изображения опережает рост сагиттальной в направлении положительных значений;
- для линз обоого рода отношение продольных увеличений, меньшее единицы, определяется условием $\Delta't \ll \Delta t$, которое приводит к росту меридиональной кривизны изображения в сторону отрицательных значений, а сагиттальной – в сторону положительных значений. Таким образом, наблюдается движение той и другой кривизны навстречу друг другу.

Создавая в исходной оптической системе положительный астигматизм, будем иметь более быстрое изменение меридиональной кривизны изображения по отношению к изменению сагиттальной кривизны. Устанавливая в пространстве изображений оптической системы отрицательную корректирующую линзу первого или второго рода, получаем возможность увеличить изменение меридиональной кривизны изображения или уравнивать это изменение с изменением сагиттальной кривизны в зависимости от величины отношения (1) корректирующей линзы.

Следовательно, использование обобщенного условия получения наперед заданного астигматизма линз конечной толщины (2) и результатов исследования корректирующих линз первого и второго рода позволяет реализовать на практике предлагаемый способ.

Синтез коррекционного компонента должен осуществляться по главному лучу, относительно которого ведется компоновка исходной оптической системы по методу проф. М.М. Русинова [1]. При этом число элементов, составляющих компонент, а также их род зависит от величин и знаков меридиональной и сагиттальной кривизны изображения предшествующей им оптической системы. Функция элемента состоит в преобразовании астигматизма от предшествующей ему оптической системы в заданное изменение кривизны поля после этого элемента. При этом конструктивные параметры элемента, обеспечивающие требуемое по величине отношение продольных увеличений и связь с предшествующим базовым компонентом оптической системы, определяются формулами, вытекающими из соотношения (2), которые приведены в работе [2].

Как показал предложенный метод, при синтезе коррекционных компонентов наиболее предпочтительно использовать корректирующие линзы второго рода с большим выносом входного зрачка, имеющие отношение продольных увеличений больше единицы, $\frac{Q_m}{Q_s} > 1$, и корректирующие линзы первого рода с прямой ориентировкой первой преломляющей поверхности, т.е. поверхности, расположенной вогнутостью к входному зрачку, с небольшим выносом входного зрачка и отношением продольных увеличений, меньшим единицы, $\frac{Q_m}{Q_s} < 1$.

Результаты синтеза коррекционных компонентов

В качестве примера, подтверждающего правильность выбранных исходных позиций и эффективность способа, были синтезированы два коррекционных компонента (рис. 1, 2). График изменения астигматизма системы (рис. 2), в которой осуществлялась коррекция кривизны поверхности изображения, соответствует угловому полю $2\omega = 141^\circ$. Астигматизм вдоль главного луча при $\omega = -70^\circ 30'$ составляет величину $\Delta t = 1,17$ мм. Как следует из характера изменения меридиональной и сагиттальной кривизны поля исходной оптической системы (рис. 1), коррекционный компонент должен состоять как минимум из двух отрицательных линз.

Первый элемент должен влиять на изменение кривизны таким образом, чтобы меридиональная кривизна перешла в область положительных значений, а сагиттальная кривизна находилась в области небольших отрицательных или положительных значений, т.е. это должен быть элемент второго рода с отношением продольных увеличений, большим единицы. Исходя из этого, первым элементом для обоих

вариантов явилась линза второго рода с выносом входного зрачка $s_p = -105,96$ мм, величиной предмета $y = 15,51$ мм и отношением продольных увеличений, большим единицы, а $Q_m = 2,2191$, $Q_s = 1,8798$ при $\Delta't = 3,2738$ мм. Конструктивные параметры имеют следующие значения: $r_1 = -29,50026$ мм; $r_2 = -209,01318$ мм; $d_1 = 3,001$ мм; $n_2 = 1,7849$. Косая толщина линзы $\tilde{d} = 6,0709$ мм.

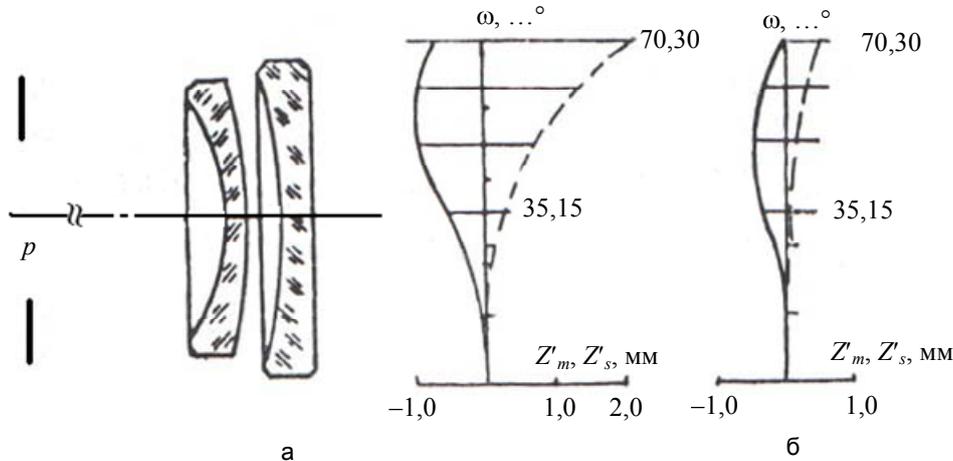


Рис. 1. Коррекционный компонент: изменение астигматизма по полю после первой линзы (а); изменение астигматизма по полю после второй линзы, т.е. после всей системы (б)

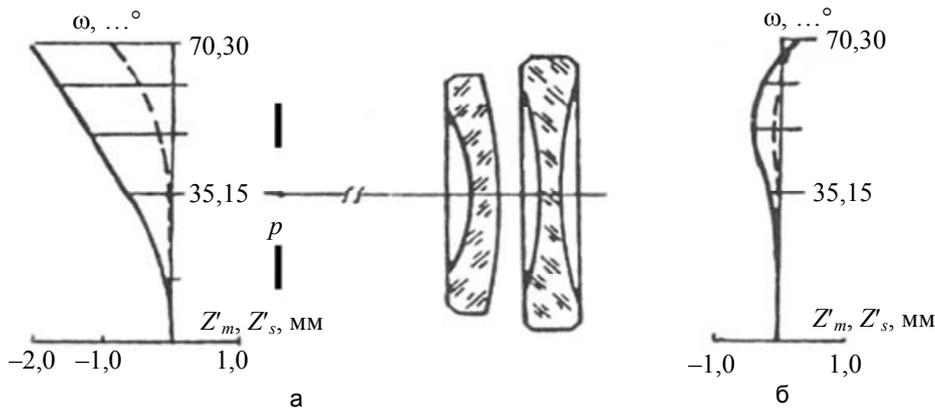


Рис. 2. Коррекционный компонент: изменение астигматизма системы, в которой осуществлялась коррекция кривизны поля (а); изменение астигматизма по полю после второй линзы, т.е. после всей системы (б)

Второй элемент должен сохранить направление изменения сагиттальной кривизны, а изменение меридиональной кривизны должно быть направлено в сторону отрицательных значений, причем этот элемент должен быть первого рода с отношением продольных увеличений, меньшим единицы. По этой причине в качестве второго элемента в обоих случаях была использована корректирующая линза первого рода с прямой ориентировкой ее первой преломляющей поверхности и выносом входного зрачка $s_p = -37,05$ мм, величиной предмета $y = -21,292$ мм и отношением продольных увеличений, меньшим единицы. Для первого варианта (рис. 1) продольные увеличения составляют $Q_m = 0,8772$, $Q_s = 1,2871$ при $\Delta't = 0,5187$ мм, а конструктивные параметры имеют следующие значения: $r_3 = -54,99945$ мм; $r_4 = \infty$; $d_3 = 2,99$ мм; $n_4 = 1,805998$. Косая толщина линзы $\tilde{d} = 6,2734$ мм.

Для второго варианта (рис. 2) продольные увеличения составляют $Q_m = 0,8091$, $Q_s = 1,3060$ при $\Delta't = 0$, а конструктивные параметры имеют следующие значения: $r_3 = -54,99945$ мм; $r_4 = 735,81714$ мм; $d_3 = 3,069$ мм; $n_4 = 1,805998$. Косая толщина линзы $\tilde{d} = 6,6399$ мм. Воздушный промежуток между линзами в обоих вариантах $d_2 = 5,7$ мм.

Заключение

В основном широкоугольные объективы для получения хорошего качества изображения рассчитаны с использованием геометрического виньетирования широких наклонных пучков, что отрицательно сказывается на светораспределении в пространстве изображений.

Предложенный метод синтеза силовых и коррекционных компонентов широкоугольных объективов позволяет получить высокое качество изображения в пределах всего углового поля без использования геометрического виньетирования широких наклонных пучков, что определяет более равномерное светораспределение в пространстве изображений [4]. Выполненный расчет коррекционных компонентов подтвердил правильность выбранных исходных позиций и эффективность метода.

Литература

1. Русинов М.М. Техническая оптика. – Л.: Машиностроение, 1979. – 488 с.
2. Безруков В.А. Обобщенное условие получения заранее заданного астигматизма линз // Оптико-механическая промышленность. – 1986. – № 1. – С. 16–18.
3. Безруков В.А., Карпова Г.В. Синтез силовых компонентов широкоугольных объективов // Оптический журнал. – 2012. – № 5. – С. 32–34.
4. Зацепина М.Е. Расчет светосильного (1:1,2) киносъемочного объектива с асферическими поверхностями // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 147–148.

Безруков Вячеслав Алексеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, bezrukov@mail.ifmo.ru

Карпова Галина Васильевна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, Karpova3101@mail.ru