

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.31.17.2

## КОНФОКАЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ И ЕЕ СВОЙСТВА

© 2015 г. В. А. Безруков, канд. техн. наук; Г. В. Карпова, канд. техн. наук

Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: bezrukov@mail.ifmo.ru

Рассматриваются астигматизм и меридиональная кома конфокальной поверхности при конечных углах главного луча с оптической осью системы.

**Ключевые слова:** конфокальная поверхность, меридиональная кома, астигматизм, синтез, изопланатические поверхности.

Коды OCIS: 080.2740, 080.3620, 220.1000.

Поступила в редакцию 16.01.15.

Конфокальная поверхность в частном случае концентрична осевой точке изображения, образованного предшествующей ей частью оптической системы. В общем случае конфокальная поверхность концентрична проекции на ось системы точки изображения на главном луче, сформированном предшествующей частью оптической системы. Если меридиональное и сагиттальное изображения предмета плоские, то такая поверхность концентрична и осевой точке изображения.

Рассмотрим свойства конфокальной поверхности в общем случае при конечных углах главного луча с оптической осью. На рис. 1 представлено положение точки предмета  $A_{t,s}$  на главном луче, при котором ее проекция на ось совпадает с центром кривизны  $C$  исследуемой поверхности. При этом предметные отрезки вдоль главного луча в меридиональной  $t$  и сагиттальной  $s$  плоскостях равны между собой. Тогда из рисунка следует

$$t = s = \frac{r \cos(\omega - \varepsilon)}{\cos \omega}. \quad (1)$$

Применяя инварианты Гульстрранда–Юнга [1] для меридиональной и сагиттальной плоскостей к конфокальной поверхности с учетом выражения (1), получим

$$\frac{\cos^2 \varepsilon'}{t'} - \frac{n_r \cos^2 \varepsilon \cos \omega}{r \cos(\omega - \varepsilon)} = \frac{\cos \varepsilon' - n_r \cos \varepsilon}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{s'} - \frac{n_r \cos \omega}{r \cos(\omega - \varepsilon)} = \frac{\cos \varepsilon' - n_r \cos \varepsilon}{r}, \quad (3)$$

где  $n_r = n/n'$  – относительный показатель преломления.

Выражения (2) и (3) позволяют определить отрезки вдоль главного луча от его точки пре-

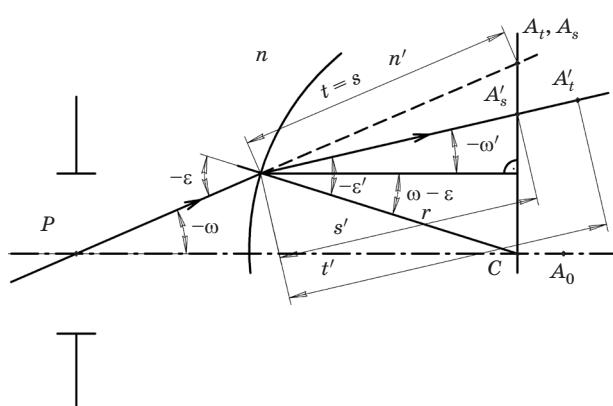


Рис. 1. Конфокальная поверхность.

ломления до изображений. Для меридиональной плоскости имеем

$$t' = \frac{r \cos \varepsilon' (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)}{1 + \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \varepsilon')}. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что  $1/\cos \varepsilon' = \cos \varepsilon' (1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon')$ , окончательно получаем выражение для определения величины отрезка

$$t' = \frac{r (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)}{\cos \varepsilon' (1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon') [1 + \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \varepsilon')]} \quad (5)$$

Для сагиттальной плоскости имеем

$$s' = \frac{r}{\cos \varepsilon' \left[ 1 - \frac{\operatorname{tg} \varepsilon'}{\operatorname{tg} \varepsilon} (1 - 1 / \cos^2 \varepsilon (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)) \right]}. \quad (6)$$

После преобразований окончательно получаем выражение для определения величины отрезка  $s'$

$$s' = \frac{r (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)}{\cos \varepsilon' [1 + \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \varepsilon') + \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{tg} \varepsilon']}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что  $\omega' = \omega - \varepsilon + \varepsilon'$ , выражение (7) можем привести к виду

$$s' = \frac{r \cos (\omega - \varepsilon)}{\cos \omega'}. \quad (8)$$

Как следует из выражения (8) и рисунка, точка изображения в сагиттальной плоскости лежит в плоскости предмета, следовательно, сагиттальной кривизны изображения для произвольного угла главного луча с оптической осью не возникает [1].

Отрезки  $t$  и  $t'$  связаны между собой зависимостью

$$\frac{\cos \varepsilon'}{t'} = W_t \frac{\cos \varepsilon}{t}, \quad (9)$$

где  $W_t$  – угловое увеличение в меридиональной плоскости в рассматриваемых точках. Из (9) с учетом (1) и (4) определяем выражение для углового меридионального увеличения конфокальной поверхности

$$W_t = 1 + \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \varepsilon'). \quad (10)$$

Из (10) следует, что при  $\operatorname{tg} \omega = 0$ , т.е. при телекентрическом ходе главного луча, угловое меридиональное увеличение равно единице. Это означает, что предмет и изображение размещены в узловых точках конфокальной поверхности.

Составляя отношение из (5) и (7) с учетом выражения (10), получим

$$\frac{t'}{s'} = \frac{1 + \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{tg} \varepsilon' / W_t}{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon'}. \quad (11)$$

Для случая, когда относительный показатель преломления  $n_r$  меньше единицы и, следовательно,  $\varepsilon' < \varepsilon$  (конфокальная поверхность имеет положительную оптическую силу), выражение (11) для произвольного угла главного луча с оптической осью всегда больше единицы. Это приводит к получению положительного астигматизма. Когда относительный показатель преломления больше единицы и, следовательно,  $\varepsilon' > \varepsilon$  (конфокальная поверхность имеет отрицательную оптическую силу), выражение (11) всегда меньше единицы. Это приводит к получению отрицательного астигматизма.

Для исследования меридиональной комы конфокальной поверхности воспользуемся инвариантом меридиональной комы, который связывает меридиональные радиусы кривизны каустик  $R$  и  $R'$  сферической преломляющей поверхности [1]

$$\begin{aligned} \frac{R' \cos^3 \varepsilon'}{t'^3 \sin \varepsilon'} + 3 \frac{\cos^2 \varepsilon'}{t'^2} - 3 \frac{\cos \varepsilon'}{t' r} = \\ = \frac{R \cos^3 \varepsilon}{t^3 \sin \varepsilon} + 3 \frac{\cos^2 \varepsilon}{t^2} - 3 \frac{\cos \varepsilon}{t r}. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя выражения (1) и (4), преобразуем инвариант (12) к виду

$$\begin{aligned} & \frac{1 + \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \varepsilon')}{r^2 (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)^2} \times \\ & \times \left\{ \frac{R' [1 + \operatorname{tg} \omega (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \varepsilon')]^2}{r \sin \varepsilon' (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)} - 3 \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon' \right\} = \\ & = \frac{1}{r^2 (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)^2} \times \\ & \times \left[ \frac{R}{r \sin \varepsilon (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon)} - 3 \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Используя (10), представим выражение (13), связывающее радиусы кривизны каустик меридиональной комы конфокальной поверхности в виде функции полевого угла  $\omega$  главного луча с оптической осью

$$\begin{aligned} & \frac{R' W_t^3}{r \sin \varepsilon'} - \frac{R}{r \sin \varepsilon} = \\ & = 3 \operatorname{tg} \omega (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon) (W_t \operatorname{tg} \varepsilon' - \operatorname{tg} \varepsilon) \end{aligned} \quad (14)$$

или

$$\begin{aligned} & R' W_t^3 - n_r R = \\ & = 3 r \sin \varepsilon' \operatorname{tg} \omega (1 + \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \varepsilon) (W_t \operatorname{tg} \varepsilon' - \operatorname{tg} \varepsilon). \end{aligned} \quad (15)$$

В правую часть выражения (15) входят три множителя, содержащие тангенс полевого угла.

Приравнивая каждый из них к нулю, определим тангенсы углов, при которых конфокальная поверхность становится свободной от комы, т.е. изопланатической поверхностью. Это будет происходить в следующих случаях:

–  $\operatorname{tg}\omega = 0$ , что соответствует размещению предмета и изображения в узловых точках конфокальной поверхности и телесентрическому ходу главного луча;

–  $\operatorname{tg}\omega = -1/\operatorname{tg}\epsilon$ , что соответствует расположению предмета и изображения в точке преломления главного луча на поверхности, но при этом главный луч “скользит” по поверхности;

–  $\operatorname{tg}\omega = 1/\operatorname{tg}\epsilon'$ , что соответствует расположению предмета и изображения в апланатических точках поверхности, что возможно, когда конфокальная поверхность вырождается в плоскую поверхность, т.е. предмет и изображение находятся в бесконечности.

Таким образом, конфокальная поверхность становится свободной от меридиональной комы только в одном случае, представляющем практический интерес, а именно – при телесентрическом ходе главного луча  $\operatorname{tg}\omega = 0$ .

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

– свойства конфокальной поверхности позволяют расширить область ее применения при синтезе оптических систем по методу проф. Русинова М.М. [1];

– конфокальная поверхность может быть использована при синтезе, например, силовых компонентов особоширокоугольных объективов для получения астигматизма определенного знака с целью коррекции кривизны поля;

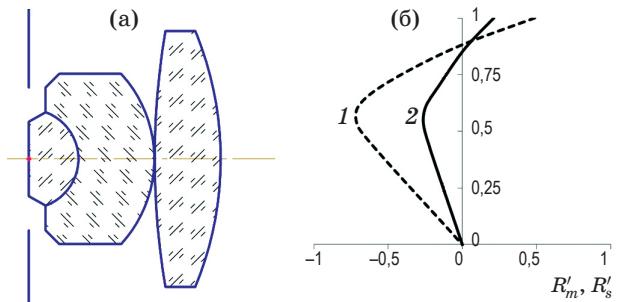


Рис. 2. Базовый компонент  $K(o, \text{снк}, k) + B(k\phi, k)$  (а) и радиусы каустики в меридиональной (1) и сагиттальной (2) плоскостях (б).

– конфокальная поверхность является изопланатической в случае телесентрического хода главного луча в пространстве предметов конфокальной поверхности, т.е.  $\operatorname{tg}\omega = 0$ , поэтому она может быть использована при синтезе оптических систем и, в частности, систем из изопланатических поверхностей вдоль главного луча [1, 2].

В качестве примера был синтезирован силовой компонент (рис. 2) с использованием конфокальной поверхности. По классификации проф. Русинова М.М. [1] полученную систему можно зашифровать так

$$K(o, \text{снк}, k) + B(k\phi, k),$$

которая практически свободна от меридиональной и сагиттальной комы. Основные оптические характеристики системы: фокусное расстояние – 25 мм; угловое поле в пространстве предметов –  $70^\circ$ ; относительное отверстие – 1:4.

Для коррекции кривизны изображения можно воспользоваться методом, который изложен в работе [3].

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
2. Безруков В.А., Карпова Г.В. Синтез силовых компонентов широкоугольных объективов // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 5. С. 32–34.
3. Безруков В.А., Карпова Г.В. Способ коррекции кривизны поля в широкоугольных объективах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 14–17.