

## СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ПОЛЮ В ФОТООБЪЕКТИВАХ

С.А. РОДИОНОВ. А.А. ШЕХОНИН

Рассматривается вывод простых и адекватных формул для расчета светораспределения ни полю в фотообъективах на основе обобщенных передаточных характеристик оптических систем. В полученных выражениях используются геометрическое виньетирование, дисторсия заднего компонента и угол главного луча в пространстве, где расположена диафрагма. Приводятся результаты расчета светораспределения для объектива Руссар-31» по выведенным формулам.

Вопрос о светораспределении по полю имеет главное значение при проектировании широкоугольных фотообъективов и поэтому часто рассматривается в литературе, например [1–5]. Однако до сих пор является актуальным получение простой, но достаточно адекватной формулы, описывающей зависимость светораспределения от параметров объектива. В данной работе предпринята попытка получить искомое выражение на основе представлений об обобщенных передаточных характеристиках оптических систем, развитых одним из авторов [6–8].

В работах [6,7] вводятся масштабные передаточные характеристики, показывающие передачу оптическими системами размеров и формы предметов. В пределах небольшой зоны поверхности предмета таковыми являются (для центрированных систем) обобщенные зональные увеличения  $V_x$  и  $V_y$ , равные отношению дифференциалов зональных координат изображения и предмета (рис. 1):

$$V_x = \frac{dx'}{dx}; \varphi\varphi V_y = \frac{dy'}{dy}. \quad (1)$$

При рассмотрении всего поля передача размеров и формы предмета описывается глобальными масштабными передаточными характеристиками, в качестве которых выступают: обобщенное глобальное увеличение  $V_0$  и функция относительной дисторсии  $\Delta(r_0)$ , связывающие глобальные координаты  $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$  и  $r'_0 = \sqrt{x_0'^2 + y_0'^2}$  точек предмета и изображения,

$$r'_0 = r_0 V_0 [1 + \Delta(r_0)]. \quad (2)$$

Между зональными и глобальными масштабными передаточными характеристиками существует следующая связь:

$$V_x = V_0 [1 + \Delta(r_0)] \frac{k'_x}{k_x},$$

$$V_y = V_0 \left[ 1 + \Delta(r_0) + \frac{\partial \Delta(r_0)}{\partial r_0} r_0 \right] \frac{k'_y}{k_y}, \quad (3)$$

где  $k_x, k_y, k'_x, k'_y$  – коэффициенты, связывающие дифференциалы глобальных и зональных координат:

$$dx = k_x dx_0; dx' = k'_x dx'_0; dy = k_y dy_0; dy' = k'_y dy'_0. \quad (4)$$

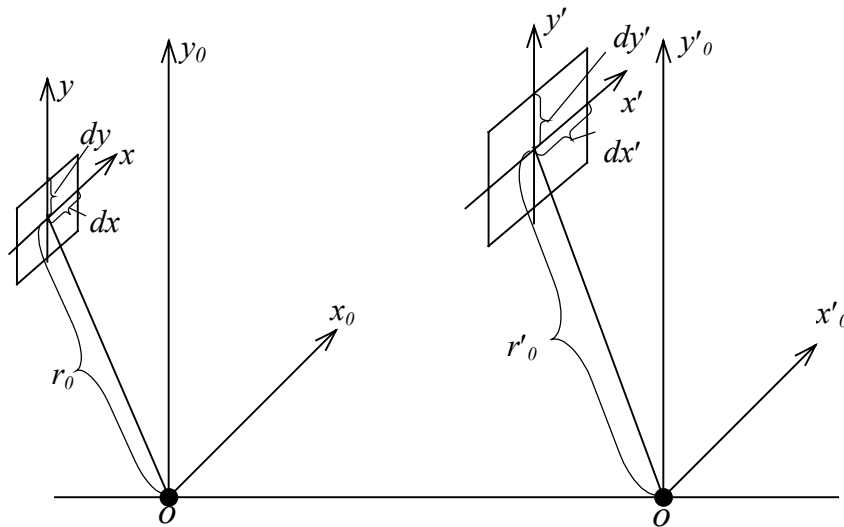


Рис. 1. Преобразование координат оптической системой

Для плоских поверхностей предмета и изображения они равны единице. Также необходимо рассмотреть характеристики, описывающие передачу прибором энергии предмета, так называемые энергетические передаточные характеристики [6, 8]. В пределах небольшой зоны предмета ими являются обобщенные зональные светосилы (передняя  $H$  и задняя  $H'$ ) [8]:

$$H = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}; H' = \frac{\varepsilon'_r}{\varepsilon_r} = \frac{H}{V_x V_y}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = \iint I(x, y) dx dy$  – обобщенная энергия участка предмета;  $\varepsilon' = \iint I'(x', y') dx' dy'$  – обобщенная энергия его изображения;  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon'_r$  – обобщенная энергия предмета и изображения, выраженная в приведенных координатах  $\eta_x, \eta_y, \eta'_x, \eta'_y$  одном масштабе:

$$\varepsilon_r = \iint I(\eta_x, \eta_y) d\eta_x d\eta_y; \varepsilon'_r = \iint I(\eta'_x, \eta'_y) d\eta'_x d\eta'_y.$$

В предыдущих выражениях  $x, y$  и  $x', y'$  – координаты на поверхностях предметов и изображений в пределах данной зоны (зональные координаты),  $\eta_x, \eta_y, \eta'_x, \eta'_y$  – приведенные зональные координаты, в которых масштабы предмета и изображения одинаковы,  $I(x, y), I(\eta_x, \eta_y)$  – обобщенная интенсивность (освещенность) точек изображения. Интегрирование ведется по данной зоне предмета и изображения. Предметом нашего непосредственного рассмотрения являются глобальные энергетические передаточные характеристики, а именно, функции светораспределения по полю (передняя  $\Phi$  и

задняя  $\Phi'$ ), показывающие изменение обобщенных светосил при изменении положения зоны предмета в пределах поля

$$\Phi(r_0) = \frac{H}{H_0}; \quad \Phi'(r_0) = \frac{H'}{H'_0}, \quad (6)$$

где  $H_0$  и  $H'_0$  – обобщенные светосилы для центральной зоны. Между передней и задней функциями светораспределения существует связь, определяемая следующей формулой, получаемой из (3) и (5),

$$\Phi' = \Phi \frac{k_x k_y}{k'_x k'_y \left[ 1 + \Delta(r_0) + \frac{\partial \Delta(r_0)}{\partial r_0} \right] [1 + \Delta(r_0)]}. \quad (7)$$

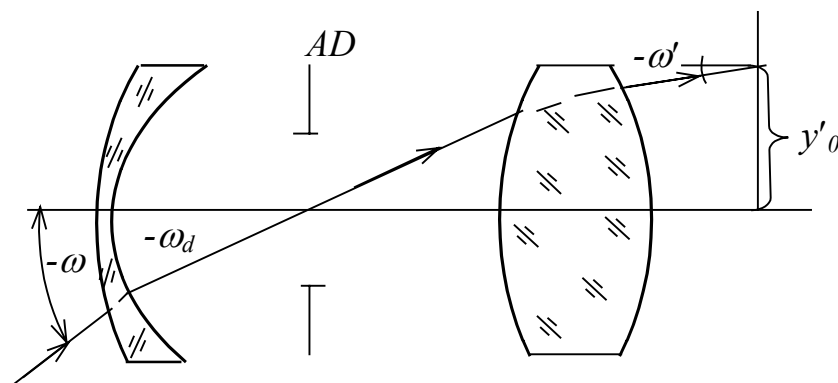


Рис. 2. Схема двухкомпонентного фотообъектива

Отметим, что выражение (7) является точным и достаточно общим, оно получено без каких-либо предположений о физических законах формирования оптического изображения и пригодно не только для оптических систем, но и для других изображающих звеньев, например, оптико-электронных преобразователей.

Как показано в работе [8], именно задняя функция светораспределения в фотографических объективах характеризует неравномерность освещенности поверхности изображения при условии равнорядности предмета, т. е.  $\Phi' = \frac{E'}{E'_0}$ , при этом  $E'_0$  и  $E'$  – освещенности в осевой и внеосевой зонах изображения.

Рассмотрим схему фотографического объектива в виде двух компонентов, между которыми помещена апертурная диафрагма (рис. 2). В частном случае один из компонентов может отсутствовать (являться «пустым»), что не меняет дальнейших рассуждений. Применив формулу (7) к заднему компоненту объектива, расположенному между апертурной диафрагмой и изображением, обнаружим, что светораспределение по полю изображения в фотообъективе определяется дисторсией  $\Delta_2(r_{0d})$  заднего компонента и светораспределением  $\Phi_d$  в пространстве, где расположена апертурная диафрагма (полагаем поверхности предметов и изображений плоскими, т. е.  $k_x = k_y = k'_x = k'_y = 1$ )

$$\Phi' = \Phi_d \left\{ \left[ 1 + \Delta_2(r_{0d}) + \frac{\partial \Delta_2(r_{0d})}{\partial r_{0d}} r_{0d} \right] \left[ 1 + \Delta_2(r_{0d}) \right] \right\}^{-1}, \quad (8)$$

где  $r_{0d}$  – расстояние от оси до точки промежуточного изображения (на плоскости) в пространстве, где расположена апертурная диафрагма. При отсутствии геометрического виньетирования в случае равнояркого бесконечно протяженного предмета независимо от первого компонента апертурную диафрагму можно считать вторичным ламбертовским источником [9]. Таким образом, светораспределение в пространстве, где расположена апертурная диафрагма (в «пространстве диафрагмы»), становится тождественным распределению освещенности на плоскости от параллельного ей ламбертовского источника.

Как известно [4, 9], при бесконечно малых размерах диафрагмы эта функция определяется четвертой степенью косинуса угла  $\omega_d$ , образованного с осью главным лучом в «пространстве диафрагмы»:

$$\Phi_d = \cos^4 \omega_d. \quad (9)$$

При конечных размерах диафрагмы эта формула становится приближенной, причем степень приближения зависит от числовой апертуры  $A_d$  в «пространстве диафрагмы», равной синусу апертурного угла, образованного с осью направлением из центра промежуточного изображения на край диафрагмы  $A_d = \sin \sigma_d$  (рис. 3).

Как показано в работах [4, 10], точная формула для  $\Phi_d$  имеет вид

$$\Phi_d = \frac{\sin^2 \delta_d}{\sin^2 \sigma_d}, \quad (10)$$

где обозначения ясны из рис. 3. Результаты сравнения формулы (9), соответствующей формуле (10) при  $A_d \rightarrow 0$ , с формулой (10) при различных  $A_d$  приведены на рис. 4. Из этих результатов следует, что формулой (9) вполне можно пользоваться при числовых апертурах в «пространстве диафрагмы» до 0,25 ( $D/f' = 1:2$ ).

При наличии геометрического виньетирования, т. е. при частичном заполнении апертурной диафрагмы из-за срезания внеосевых пучков другими диафрагмами, находящимися в переднем или заднем компонентах, в формулу (9) надо добавить множитель  $F_g$ , равный отношению площади  $S_\omega$  сечения внеосевого пучка плоскостью апертурной диафрагмы к площади отверстия полной диафрагмы  $S_0$

$$F_d = \frac{S_\omega}{S_0}. \quad (11)$$

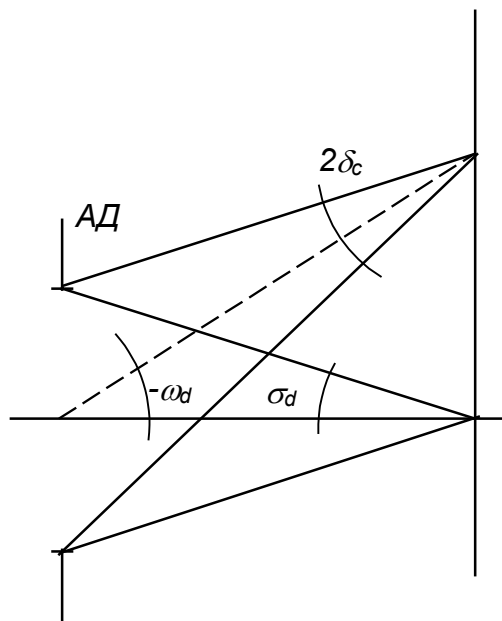


Рис. 3. Угловые апертуры в пространстве апертурной диафрагмы

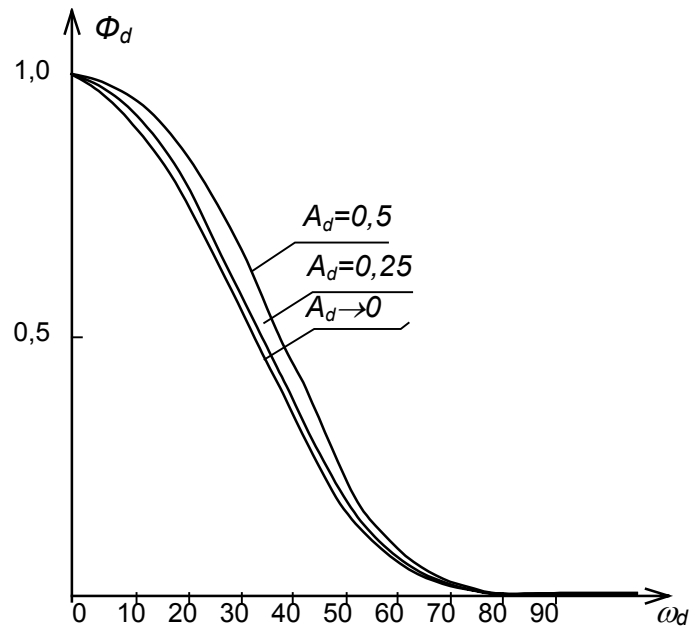


Рис. 4. Результаты точного и приближенного вычисления светораспределения

С учетом формул (8) и (11) получаем искомую формулу для светораспределения по полю в фотографических объективах

$$\Phi' = F_g \cos^4 \omega_d \left\{ \left[ 1 + \Delta_2(r_{0d}) + \frac{\partial \Delta_2(r_{0d})}{\partial r_{0d}} r_{0d} \right] [1 + \Delta_2(r_{0d})] \right\}^{-1}. \quad (12)$$

Заметим, что множитель  $F_g$  учитывает лишь геометрическое виньетирование, т. е. срезание пучка, вызванное другими диафрагмами. Так называемое «абберационное виньетирование» [1, 2] не должно включаться в множитель  $F_g$ , оно автоматически учитывается самой формулой (12) тем, что в нее входит косинус угла  $\omega_d$  в пространстве именно апертурной диафрагмы, а не в пространстве предметов или изображений.

Таким образом, для получения хорошего светораспределения в широкоугольных объективах необходимо в процессе их проектирования уменьшать полевой угол в «пространстве апертурной диафрагмы» по сравнению с углом в пространстве предметов, т. е. стремиться делать первый компонент с угловым увеличением меньше единицы. Кроме того, полезно вводить отрицательную дисторсию в задний компонент, а, следовательно, положительную – в передний (при условии, что весь объектив свободен от дисторсии).

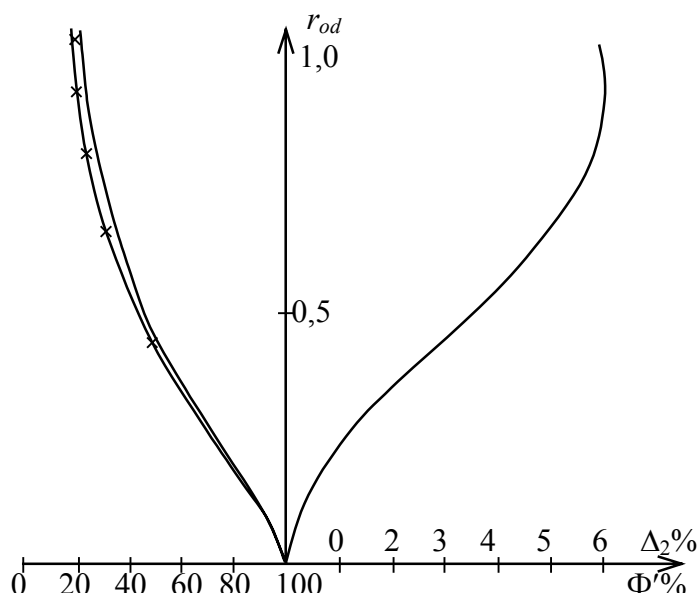


Рис. 5. Результаты вычисления светораспределения для объектива «Руссар-31»

При использовании формулы (12) часто достаточно ограничиться рассмотрением дисторсии третьего и пятого порядков, т. е. представить ее в виде

$$\Delta_2 = ar_{0d}^2 + br_{0d}^4. \quad (13)$$

Тогда нетрудно получить, подставляя (13) в (12), более простую в употреблении формулу

$$\Phi' = F_g \cos^4 \omega_d \left\{ (1 + \Delta_2)(1 + 7\Delta_2 - 8\Delta_2^{(0,7)}) \right\}^{-1}, \quad (14)$$

где  $\Delta_2$  – относительная дисторсия заднего компонента для точки изображения, соответствующей главному лучу, образующему с осью в «пространстве диафрагмы» угол  $\omega_d$ ;  $\Delta_2^{(0,7)}$  – относительная дисторсия заднего компонента для точки изображения, для которой тангенс угла, образованного главным лучом с осью в «пространстве диафрагмы» составляет  $-\frac{\sqrt{2}}{2} \operatorname{tg} \omega_d$ .

Для иллюстрации применения формул (12) и (14) на рис. 5 показаны графики светораспределения для широкоугольного объектива «Руссар-31» [11]: графики, рассчитанные по формуле (14), обозначены пунктиром, по формуле (12) – сплошной кривой, с учетом реальных апертур – крестиками; здесь же приведен для наглядности график относительной дисторсии –  $\Delta_2$  заднего компонента этого объектива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М. М. Техническая оптика. –М.–Л.: Машгиз, 1961.
2. Русинов М. М. Техническая оптика. –Л.: Машиностроение, 1979.
3. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. –Л.: Машиностроение, 1975.
4. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. –М.: Искусство, 1971.
5. Прикладная оптика // Дубовик А. С., Апенко М. И., Дурейко Г. В. и др. –М.:Недра, 1982.
6. Родионов С. А. Передаточные характеристики оптических приборов в теории изображения // Тр.ЛИТМО. Расчет и конструирование оптических систем. –Л., 1974. –Вып. 75.

7. Родионов С. А. Масштабные передаточные характеристики оптических систем // Приборостроение. –1977. –Т. 20. –№ 10. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Родионов С. А. Обобщенные светосилы оптических приборов // Приборостроение. –1979. – Т. 22. –№ 1. –С.81-84. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.:Машиностроение, 1983.
10. Волосов Д. С., Цывкин М. В. Теория и расчет светооптических систем. –М.: Искусство, 1960.
11. Каталог-справочник по аэрофотосъемочным объективам для картографии. –М.: ЦНИИГАиК. 1981.