

И.В. Дяченко, Н.С. Захаров

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены механизмы возникновения рассеянного излучения в оптических системах. Изложен численный метод расчета фоновой засветки в фокальной плоскости оптических систем. Приведены результаты расчета величины фоновой засветки от угла воздействия излучения для двух оптических систем. Проведен анализ вклада различных механизмов рассеяния в формирование фоновой засветки в фокальной плоскости.

1. Известно, что фоновая засветка является одним из факторов, снижающих контраст изображения в фокальной плоскости оптической системы. Это ведет к ухудшению обнаружительных характеристик оптико-электронных систем. Засветка фокальной плоскости от мощных источников фонового излучения может привести к ослеплению оптико-электронной системы. Основными причинами возникновения фоновой засветки являются [1]:

- дифракция излучения в оптической системе;
- рассеяние излучения на внутренних (оптических и неоптических) поверхностях оптической системы;
- переотражение излучения на оптических поверхностях преломляющих оптических элементов (рефлексы);
- собственное (тепловое) излучение элементов оптической системы в фокальную плоскость (для ИК-области спектра)

В настоящее время наиболее полно описаны методы вычисления фоновой засветки, вызванной рефлексами [2, 3, 4] и собственным излучением [5]. Менее изучены вопросы, связанные с описанием рассеяния излучения в оптической системе, где известны оценочные формулы [6], и совместными эффектами. Настоящая статья посвящена методу расчета фоновой засветки в фокальной плоскости оптической системы, которая позволяет учесть рассеяние излучения в оптической системе, дифракционные эффекты и рефлексы.

2. Величина фоновой засветки E_{ϕ} в произвольной точке фокальной плоскости равна сумме следующих составляющих:

$$E_{\phi} = E_{\phi 1} + E_{\phi 2} + E_{\phi 3} + E_{\phi 4} + E_{\phi 5} + E_{\phi 6} + E_{\phi 7}, \quad (1)$$

где $E_{\phi 1}$ – составляющая фоновой засветки, обусловленная рассеянием падающего излучения на оптических поверхностях; $E_{\phi 2}$ – обусловленная многократным рассеянием излучения на внутренних оптических и неоптических поверхностях; $E_{\phi 3}$ – дифракцией падающего излучения на входной апертуре оптической системы; $E_{\phi 4}$ – первоначальной дифракцией излучения на краю бленды и вторичной дифракцией на входной апертуре оптической системы; $E_{\phi 5}$ – первоначальной дифракцией излучения на краю бленды и дальнейшим рассеянием излучения в оптической системе; $E_{\phi 6}$ – дифракцией рассеянного на оптических поверхностях излучения в фокальную плоскость; $E_{\phi 7}$ – переотражением излучения на преломляющих оптических элементах.

Используя соотношения работ [6, 7], для величины фоновой засветки, обусловленной диффузным рассеянием излучения на оптических поверхностях, можно получить следующее выражение:

$$E_{\phi 1} = E_{\text{вх}} \tau \cos(\varepsilon) \frac{\pi D_{\text{вх}}^2}{4 f^2} \sum_{k=1}^{N_{\text{п}}} S_k(\varepsilon) r_k, \quad (2)$$

где $E_{\text{вх}}$ – освещенность на входной апертуре оптической системы; τ – коэффициент пропускания оптической системы; ε – угол падения излучения на входную апертуру; $D_{\text{вх}}$ – диаметр

входной апертуры оптической системы; f – фокусное расстояние оптической системы; $S_k(\varepsilon)$ – коэффициент засветки k -й поверхности падающим излучением; r_k – коэффициент яркости k -й поверхности; N_{Π} – число оптических поверхностей.

Величина $E_{\Phi 2}$ позволяет учесть многократное рассеяние излучения на поверхностях бленд, оправ, диафрагм, на стенках корпуса и оптических поверхностях. С учетом результатов [6, 8] формула для $E_{\Phi 2}$ принимает вид

$$E_{\Phi 2} = E_{\text{вх}} \tau \cos(\varepsilon) \frac{\pi D_{\text{вх}}^2}{4 f^2} \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} [1 - S_k(\varepsilon)] r_k \rho_{\text{бок}}^b, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{бок}}$ – коэффициент отражения неоптических поверхностей; b – число отражений излучения до рассеяния на оптической поверхности.

Распределение освещенности в фокальной плоскости, вызванное дифракцией излучения на входной апертуре оптической системы, с точностью до постоянного множителя представляет собой квадрат модуля преобразования Фурье комплексной амплитуды на выходном луче оптической системы [9]. В параксиальном приближении для оптической системы с центральным экранированием можно записать

$$E_{\Phi 3} = E_{\text{вх}} \tau \cos(\varepsilon) \frac{D_{\text{вх}} f (1 - K_{\text{бл}}) \lambda}{4 \pi^2 y^3 (1 - K_s) (1 - K_s^2)}, \quad (4)$$

где λ – длина волны; $K_{\text{бл}}$ – коэффициент экранирования входной апертуры блендой; K_s – коэффициент центрального экранирования оптической системы; y – координата в фокальной плоскости, отсчитываемая от центра дифракционной картины.

Для вычисления фоновой засветки, созданной смешанными эффектами дифракции и рассеяния излучения в оптической системе, использовались формулы из [10, 11]. При падении излучения на бленду происходит дифракция части излучения в первичную оптику. Далее происходит вторичная дифракция этого излучения на оптических элементах. Фоновая засветка в результате двойной дифракции определяется по следующей формуле:

$$E_{\Phi 4} = E_{\text{вх}} \frac{\lambda D_{\text{бл}} [1 + \cos(\varepsilon)]^2}{16 \pi^2 L^2 \sin^3(\varepsilon)} \frac{\tau \lambda \cos(\xi_d)}{D_{\text{оп}} \pi^3 \sin^3(\xi_d)}, \quad (5)$$

где $D_{\text{бл}}$ – диаметр края бленды; L – длина бленды; $D_{\text{оп}}$ – диаметр оправы первичной оптики; ξ_d – угол дифракции излучения в первичную оптику.

Часть излучения, продифрагировавшего на краю бленды, испытывает многократное рассеяние в оптической системе. Фоновая засветка при этом находится из выражения

$$E_{\Phi 5} = E_{\text{вх}} \frac{\lambda D_{\text{бл}} [1 + \cos(\varepsilon)]^2}{4 \pi^2 (D_{\text{бл}}^2 + L^2) \sin^3(\varepsilon)} \tau \cos(\xi_d) \frac{\pi D_{\text{вх}}^2}{4 f^2} \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} S_k(\xi_d) r_k. \quad (6)$$

Составляющая фоновой засветки, обусловленная дифракцией излучения на оправках оптических элементов в фокальную плоскость оптической системы, имеет следующий вид:

$$E_{\Phi 6} = E_{\text{вх}} \tau \cos(\varepsilon) \frac{\pi D_{\text{вх}}^2}{4 f^2} \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} (1 - S_k(\xi_k)) r_k \rho_{\text{бок}}^b \frac{1 f^3}{\pi^3 D_k y_k^3}, \quad (7)$$

где D_k – световой диаметр k -й поверхности; ξ_k – угол рассеяния излучения на k -й поверхности; y_k – координата в фокальной плоскости, отсчитываемая от центра дифракционного изображения k -го оптического элемента.

Составляющая фоновой засветки $E_{\Phi 7}$, вызванная рефlekсами излучения в оптической системе, определялась по отношению коэффициентов пропускания и задних апертурных углов рефlekсной и исходной оптических систем [4]:

$$E_{\phi 7} = \sum_{i=1}^{N_{p,n}} S_{p,ni} \frac{\tau_{p,ci} u'_{p,ci}{}^2}{\tau_{и,с} u'_{и,с}{}^2}, \quad (8)$$

где $N_{p,n}$ – число пар рефлексных поверхностей в оптической системе; $S_{p,ni}$ – коэффициент засветки i -й рефлексной поверхности прямым и рассеяным излучением; $\tau_{p,ci}$ – коэффициент пропускания i -й рефлексной системы; $\tau_{и,с}$ – коэффициент пропускания исходной системы; $u'_{p,ci}$ – задний апертурный угол i -й рефлексной системы; $u'_{и,с}$ – задний апертурный угол исходной системы.

Таким образом, используя соотношения (2)–(8), можно вычислить величину фоновой засветки E_{ϕ} по формуле (1).

3. В качестве примера приведем результаты расчета фоновой засветки для двух оптических систем: зеркально-линзового объектива МТО-1000А и зеркально-линзового объектива Шмидта. Коэффициенты яркости оптических поверхностей определялись по формуле

$$r(\alpha, \beta) = A / |\alpha - \beta|^B, \quad (9)$$

где α – угол рассеяния излучения относительно нормали к поверхности (в град.); β – угол падения излучения (в град.); A и B – коэффициенты, зависящие от длины волны излучения λ и состояния поверхности [12]. Значения коэффициентов яркости поверхностей корпуса и бленды взяты из [8]. Оптическая схема объектива МТО-1000А представлена на рис. 1, а. На рис. 1, б показаны зависимости фоновой засветки E_{ϕ} от угла воздействия излучения ϵ . Расчеты проводились для освещенности на входной апертуре $E_{вх} = 1$. Вклады дифракции, рассеяния и переотражения излучения в фоновую засветку представлены соответственно зависимостями 1, 2 и 3. Сравнение этих составляющих показывает преобладающий вклад переотражения, что объясняется наличием большого числа преломляющих оптических поверхностей. Фоновая засветка, вызванная рефлексами, имеет более пологую зависимость от угла воздействия излучения, так как первый оптический элемент постоянно освещен падающим излучением. Суммарная величина E_{ϕ} практически совпадает с величиной засветки, вызванной рефлексами, и на графике она отдельно не показана.

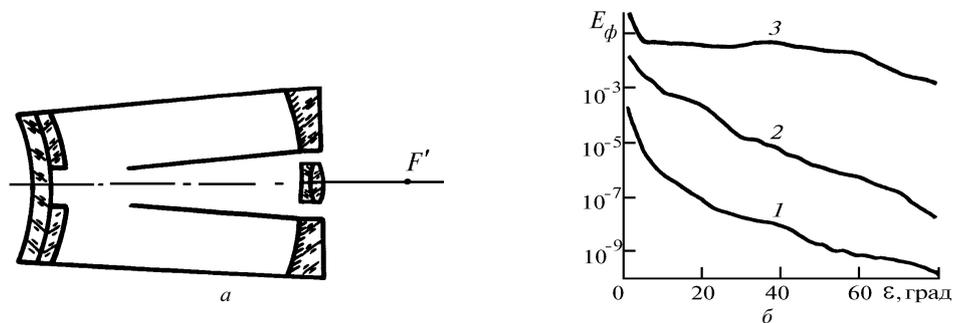


Рис. 1. Зеркально-линзовый объектив МТО-1000А. а – оптическая схема объектива; б – зависимость величины фоновой засветки в фокальной плоскости оптической системы от угла воздействия излучения: 1, 2, 3 – соответственно вклад дифракции излучения, рассеяния излучения, переотражения излучения в оптической системе в величину фоновой засветки

Оптическая схема зеркально-линзового объектива Шмидта показана на рис. 2, а. Зависимости фоновой засветки E_{ϕ} от угла воздействия ϵ , рассчитанные для этой оптической системы, приведены на рис. 2, б. Их сравнение показывает, что до угла $\epsilon = 30^\circ$ преобладающий вклад в суммарную величину фоновой засветки вносит рассеяние излучения в оптической системе, а свыше этого угла – переотражение излучения в корректирующей пластине. Это можно объяснить меньшим числом оптических поверхностей, на которых возможно переотражение излучения. При углах воздействия свыше 30° определяющую роль в уменьшении фоновой засветки играет противосолнечная бленда, так как на входную апертуру оптической системы попадает только излучение, рассеянное блендой.

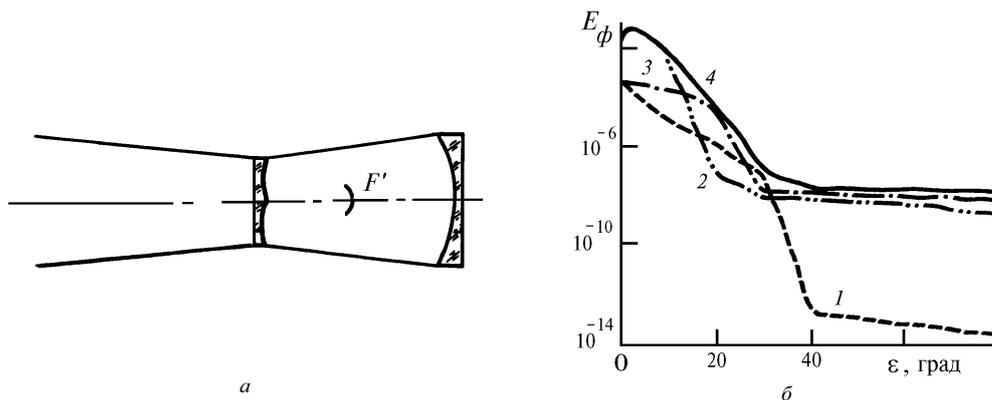


Рис. 2. Зеркально-линзовый объектив Шмидта. *a* – оптическая схема объектива; *б* – зависимость величины фоновой засветки в фокальной плоскости оптической системы от угла воздействия излучения: 1, 2, 3 – соответственно вклад дифракции излучения, рассеяния излучения, переотражения излучения в оптической системе в величину фоновой засветки; 4 – зависимость суммарной величины фоновой засветки от угла воздействия излучения

Сравнение величин фоновой засветки двух оптических систем при малых углах воздействия излучения позволяет сделать вывод о том, что зеркально-линзовый объектив Шмидта создает меньшую фоновую засветку в фокальной плоскости при прочих равных условиях, благодаря меньшему количеству оптических поверхностей.

Таким образом, разработана методика, позволяющая рассчитывать фоновую засветку фокальной плоскости оптических систем в зависимости от параметров излучения, условий воздействия и конструктивных характеристик систем. Из анализа результатов расчета фоновой засветки для двух оптических систем можно сделать следующие выводы:

- величина фоновой засветки зависит от количества поверхностей в оптической системе и их оптических характеристик;
- соотношение вкладов дифракции, рассеяния и переотражения излучения в суммарную величину фоновой засветки определяется схемой и конструктивными параметрами оптической системы.

1. Вычислительная оптика: Справочник / М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов и др. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
2. Попов А. С. // ОМП. 1988. N 1. С. 59–60.
3. Магарилл С. Я. // ОМП. 1984. N 3. С. 13–16.
4. Арлиевский А. Г., Грамматин А. П., Серегина М. Д. // ОМП. 1980. N 9. С. 58.
5. Собственное излучение элементов оптических систем оптико-электронных приборов / Б.И. Голубь, И.И. Пахомов, А. М. Хорохоров. М.: Машиностроение. 1978. 144 с.
6. Гончаренко Е. Н. // ОМП. 1971. N 9. С. 26–28.
7. Теория и расчет светооптических систем / Д.С. Волосов, М.В. Цивкин. М.: Искусство, 1960. 525 с.
8. Гончаренко Е. Н., Осипова Л. П., Голубева А. А., Губанова О. Н. // ОМП. 1987. N 3. С. 13–16.
9. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
10. Greynolds A. W. // Proc. SPIE. 1980. V. 257. P. 64–77.
11. Freniere E.R., Stern R. D., Howard J. W. // Proc. SPIE. 1990. V. 1331. P. 107–117.
12. Михеев А. С., Терешина Л. П., Филимонов Ю. А. // ОМП. 1975. N 10. С. 9–12.

Поступила в редакцию
29 июля 1993 г.

I. V. Dyachenko, N. S. Zakharov. **Calculation of Spurious Background Noise in Optical Systems.**

The sources of spurious background in different optical systems are considered. Numerical method of calculating this background in a focal plane of an optical system is described. The results of computations of the spurious background noise as a function of the input radiation incidence angle are given. Contributions from different mechanisms of the spurious background formation into the total its brightness in the focal plane are analyzed.