

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.31; 681.7.06

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛОВОГО СЕЛЕКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ СИСТЕМОЙ ЭКРАНОВ

© 2017 г. А. Н. Бородин, канд. физ.-мат. наук

Байкальский государственный университет, Иркутск

E-mail: artur\_b@mail.ru

Рассмотрена проблема углового селективного экранирования световых пучков системой экранов произвольной формы, выделяющих требуемые участки изображения с требуемым характером падения освещенности от центра к краю. Приведен аналитический расчет характеристик экранирования при разных параметрах экранов. Показана возможность адаптации экранирующей системы к изменению угла падения световых лучей.

*Ключевые слова:* экранирующая система, угловая зависимость пропускания, динамический диапазон, рассеянный свет, оптическая система.

Коды OCIS: 070.6110, 230.0230

Поступила в редакцию 22.08.2016

### Введение

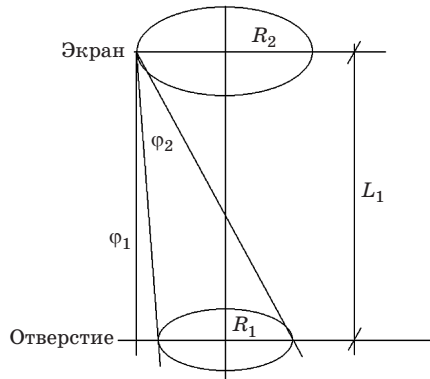
Среди задач оптического наблюдения встречаются задачи, связанные с наблюдением объектов при значительном перепаде яркости в поле зрения оптической системы [1–5]. Изменение яркости может превосходить динамический диапазон приемного элемента и изображение теряется в шумах, возникающих при дифракции излучения на границах оправ и неоднородностях оптических элементов [6], от яркого участка поля зрения.

Для ослабления излучения части поля зрения с целью уменьшения динамического диапазона входного сигнала и согласования его с динамическим диапазоном фотоприемного устройства, а также уменьшения оптических шумов в работе рассматривается использование набора экранов произвольной формы с угловой селективностью пропускания, расположенных перед изображающей системой. Такой набор экранов представляет собой один или несколько экранирующих элементов, расположенных перед входным люком оптической системы.

Сам экранирующий элемент может содержать наборы отверстий и экранов различной формы, расположенные друг за другом [7]. В зависимости от необходимых характеристик экранирования они могут быть как одинаковыми, так и отличающимися друг от друга. Расположение экранирующих элементов может быть как периодическим, случайным, так и подчиненным определенной функциональной зависимости.

Необходимо отметить, что в границах применимости геометрической оптики у этой системы экранов отсутствует спектральная зависимость коэффициента пропускания.

Рассмотрим действие такой экранирующей системы с угловой селективностью на примере простой конструкции, состоящей из двух элементов: экрана и отверстия, расположенных на одной оси. Для определенности расположим экран перед отверстием; размер экрана больше размера отверстия (рис. 1). Не обращая внимания пока на влияние такого экранирующего элемента на качество изображения оптической



**Рис. 1.** Схема простого экранирующего элемента.  $R_1$  — радиус отверстия,  $R_2$  — радиус экрана,  $L_1$  — расстояние между экраном и отверстием,  $\varphi_1$  — угол полного экранирования,  $\varphi_2$  — максимальный угол частичного экранирования.

системы, определим в приближении геометрической оптики зависимость коэффициента пропускания от углового поля.

### Определение коэффициента пропускания простого экранирующего элемента

Для простоты рассуждения и расчетов совместим плоскости экрана и отверстия, а вместо угла падения будем использовать продольное смещение экрана относительно отверстия. Рассмотрим случай  $R_2 > R_1$ , где  $R_1$  — радиус отверстия,  $R_2$  — радиус экрана. Так как система обладает осевой симметрией, ограничимся рассмотрением смещения вдоль направления оси “OX”, тогда смещение  $\Delta x$  в зависимости от угла будет

$$\Delta x = L_1 \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $L_1$  — расстояние между экраном и отверстием.

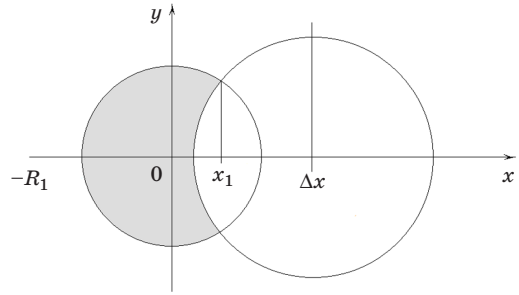
Пропускание экранирующего элемента в этом случае будет пропорционально открытой площади пересечения двух окружностей (рис. 2), которую можно определить по формуле

$$S(x_1) = S_1(x_1) - S_2(x_1),$$

где

$$S_1(x_1) = 2 \int_{-R_1}^{x_1} \sqrt{R_1^2 - x^2} dx,$$

$$S_2(x_1) = 2 \int_{\Delta x - R}^x \sqrt{R_2^2 - (x - \Delta x)^2} dx.$$



**Рис. 2.** Определение коэффициента пропускания при  $R_2 > R_1$ .

Найдем  $x_1$  как точку пересечения двух окружностей в зависимости  $\Delta x$

$$x_1 = \frac{R_1^2 - R_2^2 + \Delta x^2}{2\Delta x}.$$

Запишем интегралы площадей в явном виде

$$S_1(x_1) = x_1 \sqrt{R_1^2 - x_1^2} + R_1^2 \arctg \left( \frac{x_1}{\sqrt{R_1^2 - x_1^2}} \right) + \frac{\pi R_1^2}{2},$$

$$S_2(x_1) = (x_1 - \Delta x) \sqrt{R_2^2 - (x_1 - \Delta x)^2} + R_2^2 \arctg \left( \frac{x_1 - \Delta x}{\sqrt{R_2^2 - (x_1 - \Delta x)^2}} \right) + \frac{\pi R_2^2}{2}.$$

Такое представление удобно для дальнейшего использования в численных расчетах. Замена  $x_1$  на  $\Delta x$  здесь не приводится из-за громоздкости выражения. Ограничимся записью

$$S(\Delta x) = S_1(\Delta x) - S_2(\Delta x).$$

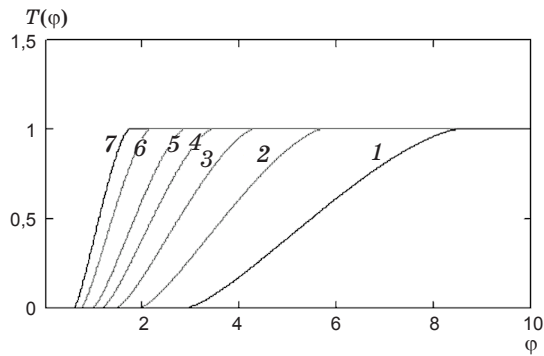
В общем виде для всего диапазона смещения можно записать

$$S(\Delta x) = \begin{cases} 0, & \Delta x < R_2 - R \\ S_1(\Delta x) - S_2(\Delta x), & R_2 - R_1 \leq \Delta x < R_2 + R \\ \pi R_1^2, & \Delta x \geq R_2 + R_1 \end{cases}.$$

Коэффициент пропускания такого экранирующего элемента можно вычислить как отношение открытой площади отверстия каждого смещения  $\Delta x$ , или угла прихода лучей, к максимальной площади отверстия

$$T(\Delta x) = \frac{S(x_1(\Delta x))}{\pi R_1^2}.$$

Для примера рассмотрим пропускание экранирующего элемента при  $R_1 = 10$ ,  $R_2 = 20$  единиц



**Рис. 3.** Зависимости угловой функции пропускания (1 – 200, 2 – 300, 3 – 400, 4 – 500, 5 – 600, 6 – 800, 7 – 1000 ед. длины) от расстояния между передним экраном и отверстием.

длины. Изменяя линейные параметры экранирующего элемента, можно получить различные зависимости функции пропускания. На рис. 3 приведены угловые зависимости коэффициента пропускания от расстояния между передним экраном и отверстием.

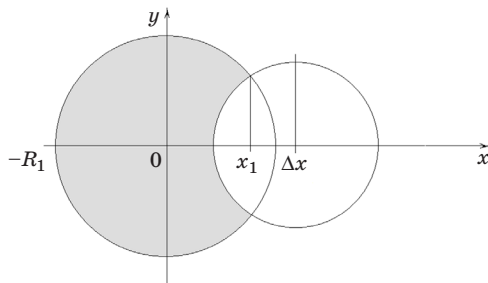
### Экран меньше отверстия

Рассмотрим случай, когда размеры переднего экрана меньше размера отверстия (рис. 4). Открытая площадь пересечения экрана и отверстия рассчитывается по формуле

$$S(\Delta x) = \begin{cases} \pi(R_1^2 - R_2^2), & \Delta x < R_1 - R_2 \\ S_1(\Delta x) - S_2(\Delta x), & R_1 - R_2 \leq \Delta x < R_2 + R_1 \\ \pi R_1^2, & \Delta x \geq R_2 + R_1 \end{cases}$$

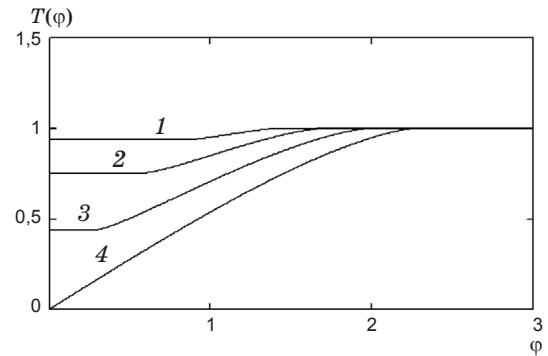
При этом пропускание экранирующего элемента также как и в предыдущем случае будет

$$T(\Delta x) = \frac{S(x_1(\Delta x))}{\pi R_1^2}.$$



**Рис. 4.** Определение коэффициента пропускания при  $R_2 < R_1$ .

\* \* \* \* \*



**Рис. 5.** Зависимости угловой функции пропускания от размера экрана (1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20 ед. длины) при размере отверстия 20 ед. длины.

По аналогии с предыдущим случаем приведем зависимости пропускания экранирующего элемента от угла прихода лучей и влияние размера экрана на кривую пропускания (рис. 5).

### Заключение

В работе получены зависимости угловой функции пропускания от размера экрана при разных размерах отверстия, от расстояния между экраном и отверстием, зависимости функции пропускания от смещения экранов и отверстий в направлении, перпендикулярном оптической оси. Экранирующие элементы с угловым селективным пропусканием [8] в различных сочетаниях можно использовать в решении большинства проблем частичного виньетирования ярких объектов в поле зрения оптической системы. Используя различные соотношения диаметров отверстий и экранов, а также расстояния между ними, можно расширять возможности оптических систем. Для получения более крутого хода характеристики углового пропускания необходимо увеличивать расстояние между экраном и отверстием. Изменяя соотношение диаметров экрана и отверстия, можно менять пропускание в области максимального виньетирования. Комбинируя экранирующие элементы с различными геометрическими параметрами, можно сформировать желаемую зависимость углового пропускания оптической системы.

Автор выражает благодарность Андрею Викторовичу Боровскому за помощь при подготовке статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Landini F., Vivès S., Romoli M., Guillon C., Pancrazzi M., Escolle C., Antonucci E., Fineschi S., Naletto G., Nicolini G., Nicolosi P., Spadaro D. Optimization of the occulter for the Solar orbiter/METIS coronagraph // Proc. SPIE. 2012. V. 8442–77. P. 12.
2. Landini F., Vives S., Venet M., Romoli M., Guillon C., and Fineschi S. External occulter laboratory demonstrator for the forthcoming formation flying coronagraphs // Appl. Opt. 2011. V. 50. № 36. P. 6632–6644.
3. Antonucci E., Fineschi S., Naletto G., Romoli M., Spadaro D., Nicolini G., Nicolosi P., Abbo L., Andretta V., Bemporad A., Auchère F., Berlicki A., Bruno R., Capobianco G., Ciaravella A., Crescenzo G., Da Deppo V., D'Amicis R., Focardi M., Frassetto F., Heinzel P., Lamy P., Landini F., Massone G., Malvezzi M., Moses D., Pancrazzi M., Pelizzo M., Poletto L., Schühle U., Solanki S., Telloni D., Teriaca L., Uslenghi M. Multi element telescope for imaging and spectroscopy (METIS) // Proc. SPIE. 2012. V. 8443–08. P. 13.
4. Чупраков С.А. Варианты оптических схем коронографа Лео на основе внеосевых зеркальных систем // Оптический журнал. 1997. № 12. С. 26–28.
5. Papushev P.G., Chuprakov S.A. Development and produce of ground-based reflecting coronagraph for solar applications // Proc. SPIE. 2012. V. 8446. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. P. 12.
6. Бородин А.Н. Визуализация тонкой структуры при наличии яркого мешающего источника в поле зрения // Автореф. канд. дис. Иркутск: ИрГТУ, 2004. 18 с.
7. Бородин А.Н. Устройство для наблюдения солнечной короны // Патент России № 2226707.
8. Закируллин Р.С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 8. С. 16–24.