

О ВЫЧИСЛЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОТВЕРСТИЯ СВЕТОСИЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Правдивцев

Научно-исследовательская группа
«Конструктивная кибернетика»

e-mail: avp@rdcn.ru

Один из основных параметров оптической системы – относительное отверстие, ибо оно напрямую определяет количество энергии, которое собирает система. В настоящее время для систем функционирующих в ИК-области спектра часто применяют охлаждаемые матричные приёмники излучения (МПИ), рассчитанные на присоединение к объективам с высокой светосилой (1:1 и выше). При этом в самом приёмнике установлена холодная диафрагма, которая является апертурной для сопряженного объектива.

К сожалению, иногда встречаются неверные трактовки формул вычисления относительного отверстия объективов, сопрягаемых с вышеописанными приёмниками. Как следствие – масса ошибок напрямую влияющих на параметры работы конечного изделия. Рассмотрим появление данной ошибки. Для этого определим допущения, которые закладываются при выведении формулы для расчёта относительного отверстия.

Рассмотрим приёмник с охлаждаемой диафрагмой, см. рисунок 1.

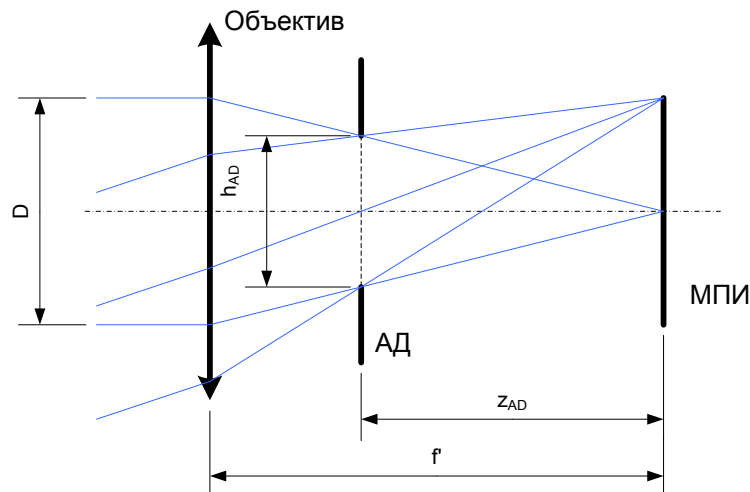


Рис. 1. Объектив сопряжённый с приёмником с охлаждаемой диафрагмой

На чертеже задаётся диаметр h_{AD} апертурной холодной диафрагмы (АД) и расстояние от неё до плоскости чувствительного слоя приёмника излучения z_{AD} . Тогда относительное отверстие можно **неправильно** рассчитать как

$$\frac{D}{f} = \frac{h_{AD}}{z_{AD}} = \frac{1}{k}, \quad (1)$$

где k – диафрагменное число.

Вспомним, как вводится относительное отверстие для случая, когда приёмник и объект находятся в воздухе. Полностью вывод формул рассматривать не будем, его можно посмотреть например в книге [1, стр. 125]. На указанной странице при расчёте освещённости в пространстве изображений приведена следующая формула (обозначения соответствуют оригиналу):

$$E' = \tau \pi L_e \sin^2 \sigma'_{A'}. \quad (2)$$

А дальше происходит замена такого рода:

$$\operatorname{tg} \sigma'_{A'} \approx \sin \sigma'_{A'} \approx \frac{0.5D'}{z' - z'_{P'}}, \quad (3)$$

$$z' = -\beta f', \quad (4)$$

$$z'_{P'} = -\beta_P f'. \quad (5)$$

Подставляя выражения (3)-(5) в исходную формулу (2) и считая, что объект находится в бесконечности ($\beta = 0$), получают линеаризованный аналог (2):

$$E' = \tau \pi L_e \frac{D^2}{4 f'^2}. \quad (6)$$

Таким образом, определяется то самое отношение диаметра входного зрачка к фокусному расстоянию (1), которое называют «относительным отверстием». На самом деле, из вывода формулы, можно видеть, что важно не данное соотношение само по себе, а величина апертурного угла $\sigma'_{A'}$ в пространстве изображений. Данное же соотношение используется лишь для упрощения расчётов и наглядности сравнения систем по энергетическому критерию. Из анализа формулы (1), с учётом (3) видно, что отношение $\frac{D}{f'}$ не совсем

корректно определяет количество энергии, приходящее на приёмник излучения. То есть при переходе к светосильным системам не будет соответствующего увеличения энергии, которое можно было бы ожидать, исходя из формулы (6).

Выразим

$$\sin \sigma'_{A'} = \frac{D}{2} / \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + f'^2}. \quad (7)$$

Рассмотрим, область допустимости замены синуса на тангенс, и как следствие, область адекватности формулы (6). Для этого рассчитаем разницу двух величин:

$$\Delta(\sigma'_{A'}) = \sin \sigma'_{A'} - \operatorname{tg} \sigma'_{A'}. \quad (8)$$

Построим график $\Delta(\sigma'_{A'})$ в зависимости от угла $\sigma'_{A'}$. Он приведён на рисунке 2 в логарифмических координатах. Из рисунка 2 видно, что при приближении угла к 90° , различие становится недопустимо большим, то есть, чем светосильнее система, тем больше величина ошибки.

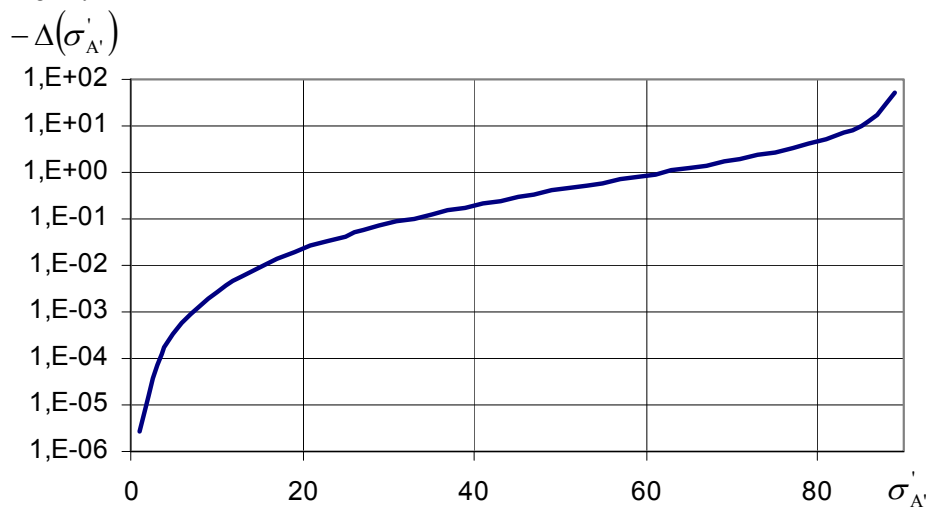


Рис. 2. Зависимость $\Delta(\sigma'_{A'})$ от $\sigma'_{A'}$

Подставляя в (8) исходные выражения для $\sin \sigma'_A$ и $\operatorname{tg} \sigma'_A$, и упрощая, получаем:

$$\Delta(\sigma'_A) = -\frac{D^4}{4(D^2 + 4f'^2)f'^2}. \quad (9)$$

Из анализа (9) видно, что $\Delta < 0$, то есть расчёт по формуле (6) даёт завышение освещённости в пространстве изображений относительно реального – рассчитываемого по формуле (2). Более того, при постоянном фокусном расстоянии, при увеличении диаметра, разница между точной и приближённой формулами растёт как квадрат диаметра входного зрачка. Тогда можно сделать вывод, что замена (2) на (6) может быть выполнена только в случае небольших апертурных углов, то есть невысоких светосил.

Рассмотрим практический пример. Пусть мы работаем с охлаждаемым матричным приёмником излучения со следующими параметрами охлаждаемой диафрагмы:

$$h_{AD} = 12 \text{ мм}, \quad z_{AD} = 10 \text{ мм}.$$

Проследим, как меняется освещённость, в зависимости от способа расчёта. Относительное отверстие, рассчитываемое по приближённой формуле (1):

$$\frac{h_{AD}}{z_{AD}} = \frac{1}{0.833}. \quad (10)$$

Величина апертурного угла в этом случае составит:

$$\frac{h_{AD}}{2z_{AD}} = 0.6. \quad (11)$$

Расчёт по точной формуле даёт другое значение:

$$\sin \sigma'_{A'} = \sin \operatorname{arctg} \frac{h_{AD}}{2z_{AD}} = 0.514. \quad (12)$$

Чтобы оценить изменение освещённости, разделим квадрат одной величины на другую:

$$\left(\sin \operatorname{arctg} \frac{h_{AD}}{2z_{AD}} \right)^2 \bigg/ \left(\frac{h_{AD}}{2z_{AD}} \right)^2 = \frac{0.514^2}{0.6^2} = 0.735. \quad (13)$$

Таким образом, видим, что расчёт освещённости по точной формуле даёт в 1.36 раза меньший результат, чем при расчёте в случае приближенной формулы. Если проектируемая система предназначена, к примеру, для пеленгации объектов с предельно низкими уровнями их излучения, то это приведёт к соответствующему уменьшению дальности её работы, либо росту уровня ложных тревог, либо снижению вероятности правильного обнаружения объектов.

Таким образом, рассмотрен вывод формулы относительного отверстия. Показана ошибочность применения данной формулы для оценки освещённости, создаваемой системой в случае светосильных систем. Показана формула, которую следует использовать при расчётах такого рода. Отметим, что полученный результат верен не только для систем, работающих с матричными приёмниками излучения с охлаждаемой диафрагмой, но так же и для обычных объективов, обладающих высокой светосилой.

Литература

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.