

«АПЕРТУРНЫЙ ИНДЕКС» – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Правдивцев А.В. ОАО «НПК «СПП», МГТУ им. Н.Э. Баумана.

E-mail: avp@rdcn.ru, Тел.: +7(916)-439-22-99

Показана ограниченность применения характеристики «относительное отверстие» как ведущей, при сравнении оптических трактов (ОТ) оптико-электронных систем по энергетическому критерию. Предложен критерий: апертурный индекс – квадрат синуса апертурного угла в пространстве изображений, точнее и полнее описывающий ОТ в части их энергетических характеристик.

В настоящее время требуются всё более эффективные оптико-электронные системы (ОЭС), предназначенные для обнаружения и распознавания объектов. Зачастую на этапе предварительного анализа и синтеза прорабатывается большое количество различных схем и остро встаёт проблема выбора одного из вариантов. К сожалению, замкнутой системы синтеза ОЭС не существует (информации по данному вопросу в открытой печати не найдено), поэтому каждый разработчик использует собственный, часто не полностью адекватный, набор критериев для сравнения различных вариантов ОЭС.

Для корректной оптимизации синтезируемой системы, критерии должны отвечать, в том числе, следующим требованиям:

- 1) Достоверность – насколько точно данный критерий характеризует оцениваемый параметр.
- 2) Линейность – функция критериального отклика должна линейно зависеть от оцениваемого параметра.
- 3) Монотонность – функция критериального отклика должна монотонно изменяться при изменении значения оцениваемого параметра.

Один из примеров некорректного критерия – «относительное отверстие» оптического тракта [1], использующийся при энергетическом расчёте ОЭС для определения количества энергии, попадающей на приёмник излучения.

Рассмотрим последовательно, удовлетворяет ли критерий указанным выше требованиям. Для этого вспомним, как рассчитывается освещенность через относительное отверстие для случая, когда приёмник и объект находятся в воздухе [2].

$$E' = \tau \pi L_e \sin^2 \sigma_{A'}', \quad (1)$$

где $\sigma_{A'}'$ - апертурный угол в пространстве изображений, L_e - энергетическая яркость излучающего участка поверхности, расположенного перпендикулярно оптической оси, τ - пропускание оптической системы для осевого пучка. Далее производится следующая замена:

$$\operatorname{tg} \sigma_{A'}' \approx \sin \sigma_{A'}' \approx \frac{0.5D'}{z' - z_{P'}}, \quad (2)$$

$$z' = -\beta f', \quad (3)$$

$$z_{P'} = -\beta_P f', \quad (4)$$

где D' - диаметр выходного зрачка, β и β_P линейное увеличение и линейное увеличение в зрачках соответственно, f' – фокусное расстояние системы, z' –

расстояние от заднего фокуса до плоскости изображения, z_p' – расстояние от заднего фокуса до выходного зрачка.

Подставляя выражения (2)-(4) в исходную формулу (1) и считая, что объект находится в бесконечности ($\beta = 0$), получают линейризованный аналог (1):

$$E' = \tau \pi L_e \frac{D^2}{4 f'^2}. \quad (5)$$

Таким образом, вводится то самое отношение диаметра входного зрачка к фокусному расстоянию, 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 (2) 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 (5). Рассмотрим область, в которой возможно использование данного критерия. Для этого используем точную формулу, без указанной линейризации:

$$\sin \sigma_{A'} = \frac{D}{2} / \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + f'^2}. \quad (6)$$

Для определения области адекватности формулы (5) рассмотрим разницу двух величин:

$$\Delta(\sigma_{A'}) = \sin \sigma_{A'} - \text{tg} \sigma_{A'}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) исходные выражения для $\sin \sigma_{A'}$ и $\text{tg} \sigma_{A'}$, и упрощая, получаем:

$$\Delta(\sigma_{A'}) = -\frac{D^4}{4(D^2 + 4 f'^2) f'^2}. \quad (8)$$

Из анализа (8) видно, что $\Delta < 0$, то есть расчёт по формуле (5) даёт завышение освещённости в пространстве изображений относительно реального – рассчитываемого по формуле (1). Более того, при постоянном фокусном расстоянии, при увеличении диаметра, разница между точной и приближённой формулами растёт как квадрат диаметра входного зрачка.

Исходя из анализа формулы (8), можно сделать вывод, что замена (1) на (5) может быть выполнена только в случае небольших апертурных углов, то есть невысоких светосил. Для определения границ применимости формулы (6) построим график $\Delta(\sigma_{A'})$ в зависимости от угла $\sigma_{A'}$ (см. Рис. 1).

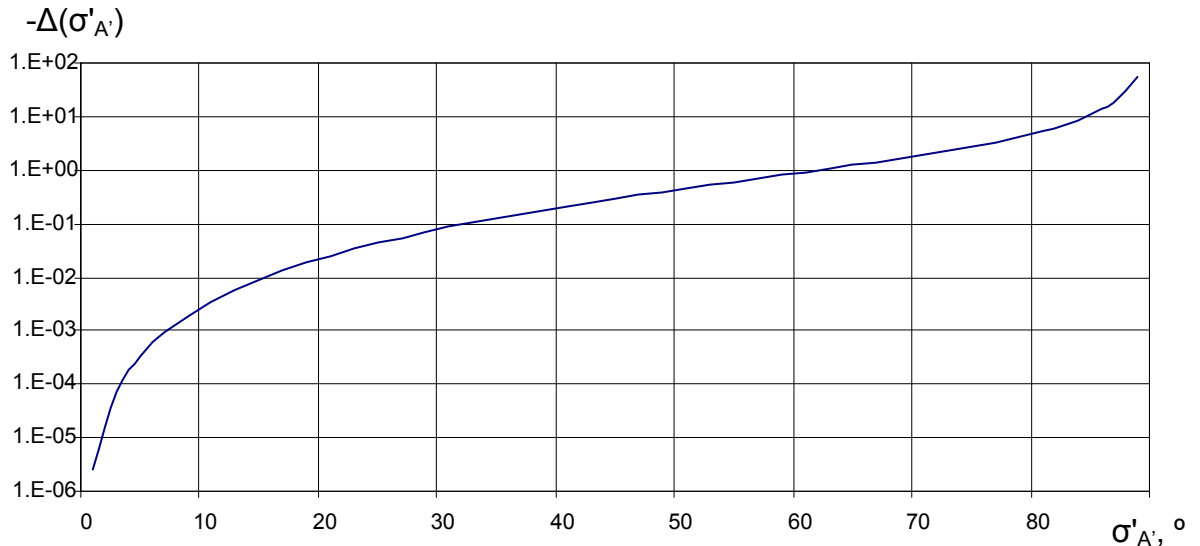


Рис. 1. Зависимость $\Delta(\sigma'_{A'})$ от $\sigma'_{A'}$.

Из рисунка 1 видно, что при приближении угла к 90° , различие становится недопустимо большим, то есть, чем светосильнее система, тем больше величина ошибки.

Рассмотрим следующий практический пример: в тепловизионной системе применяется светосильный объектив со следующими параметрами:

$$D = 24 \text{ мм}, f' = 20 \text{ мм}.$$

Характеристики оптической системы, близкие к рассмотренным в примере, являются широко используемыми в тепловизионных системах, работающих в диапазоне 8-12 мкм [3]. Проследим, как изменяется освещенность, в зависимости от способа расчёта. Относительное отверстие, рассчитываемое по приближённой формуле:

$$\frac{D}{f'} = \frac{1}{0.833}. \quad (9)$$

Величина апертурного угла в этом случае составит:

$$\frac{D}{2f'} = 0.6. \quad (10)$$

Расчёт по точной формуле даёт другое значение:

$$\sin \sigma'_{A'} = \sin \arctg \frac{D}{2f'} = 0.514. \quad (11)$$

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

$$\left(\sin \arctg \frac{D}{2f'} \right)^2 \bigg/ \left(\frac{D}{2f'} \right)^2 = \frac{0.514^2}{0.6^2} = 0.735. \quad (12)$$

Таким образом, видим, что расчёт освещенности 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. То есть техническое задание выполнено не будет. И это только первый этап. А дальше – дополнительные

погрешности, которые возникают при дальнейших расчётах по упрощённым методикам, с учётом их допущений, величина конечной ошибки становится непомерно большой.

Таким образом, данный критерий не удовлетворяет требованию достоверности. Кроме того, требования по линейности и монотонности не выполняются. Поэтому необходимо найти критерий, являющийся заменой «относительному отверстию», который позволил бы более точно оптимизировать ОЭС по энергетическому критерию. Несмотря на то, что данный результат может быть легко получен на основе приведённых исходных данных, зачастую встречается использование относительного отверстия при расчёте ОЭС, причём как в российской литературе [4, 5], так и в иностранной [6].

Из рассмотрения формулы 1, можно выделить параметры, которые относятся только к оптической системе – пропускание оптической системы и квадрат синуса апертурного угла (для приёмника расположенного в воздухе). В тезисах данного доклада их произведение названо апертурным индексом, который должен был отвечать за оптимизацию ОЭС по энергетическому критерию. В книге [7] введено понятие светосилы: «светосилу системы можно определить как отношение освещённости элемента изображения к яркости элемента предмета».

$$H = \frac{E'}{B} = \pi \tau n^2 \sin^2 \sigma'. \quad (13)$$

На момент написания тезисов, с данным источником автор знаком не был, поэтому в работе им было введено понятие апертурного индекса, который отличается от светосилы наличием нескольких констант. Но так как понятие светосилы уже было введено ранее, будем использовать именно его. Рассмотрим возможность применения светосилы как энергетического критерия при синтезе и оптимизации ОЭС.

Критерий является достоверным для вычисления энергетической характеристики ОЭС, так как при его выводе не используются упрощения. Так же критерий является линейным и монотонным.

В дальнейшем планируется разработать набор локальных критериев, которые после объединения приведут к созданию замкнутой системы оценивания характеристик оптического тракта ОЭС, что позволит сократить сроки и стоимость предварительного этапа разработки ОЭС. Достоверность, линейность, монотонность критерия светосилы позволят упростить вид зависимостей, при синтезе интегрального критерия качества оптического тракта ОЭС.

Показана некорректность использования относительного отверстия как линейного критерия оптимизации ОЭС. Рекомендуется использовать в качестве энергетического критерия светосилу системы, которая однозначно определяет освещённость для точки на оси, является линейной при вычислении освещённости, монотонной и явно пропорциональной, что отвечает требованиям, предъявляемым к критерию.

Автор выражает благодарность А.В. Макаренко и А.Н. Юдину за ценные консультации при написании данного доклада.

Литература

1. Правдивцев А.В. О вычислении относительного отверстия светосильных оптических систем. // Официальный web-сайт группы «Конструктивная Кибернетика». / URL: <http://www.rdcn.ru/data/estimation/n21032010a.pdf>.

2. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
3. Лапо Л.М., Совз И.Е., Сокольский М.Н. Светосильные объективы для тепловизионных приборов. //Оптический журнал, т. 76, № 10, 2009. с. 5-10.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.. Инфракрасные системы «смотрящего типа». М.: Логос, 2004. – 444 с.
5. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань, 2006. – 594 с.
6. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. v. 5. Passive Electro-Optical Systems. ed. Stephen B. Campana. 1993 . – 355 p.
7. Русинов М.М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 448 с.