

## Сравнение двух методик расчета дальности оптико-электронных систем

В.В. Костров<sup>1,2</sup>, А.В. Ракитин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23

<sup>2</sup> АО «НИИ «Субмикрон» 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2  
E-mail: [kostrov.46@mail.ru](mailto:kostrov.46@mail.ru); [alexey.rakitin@mail.ru](mailto:alexey.rakitin@mail.ru)

*Производится сравнение методик расчета максимальной дальности действия оптико-электронных систем. Одна методика базируется на геометрических представлениях процессов съемки и использовании критерия Томсона. Такая методика более соответствует наблюдению объектов оператором. Для автоматических систем обнаружения такой подход дает заниженный результат. Предложена методика расчета максимальной дальности на основе использования параметра – эквивалентной шуму разности температур. Данный параметр входит в число основных характеристик матрицы, поэтому является доступным для расчетов. Получаемая в результате расчетов дальность носит вероятностный характер и выполняется при заданной вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги.*

*Ключевые слова: оптико-электронная система, болометрический матричный приемник, максимальная дальность, отношение сигнал-шум, тепловой контраст, критерий Томсона.*

## Comparison of two methods for calculating the range of optoelectronic systems

V.V. Kostrov<sup>1,2</sup>, A.V. Rakitin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Murom Institute of the Vladimir State University

<sup>2</sup> JSC Research Institute "Submicron"

*A comparison is made of methods for calculating the maximum range of optoelectronic systems. One technique is based on geometric representations of shooting processes and the use of the Thomson criterion. This technique is more consistent with the operator's observation of objects. For automatic detection systems, this approach gives an underestimated result. A method for calculating the maximum range based on the use of a parameter, the noise equivalent temperature difference (NETD), is proposed. This parameter is one of the main characteristics of the matrix, therefore it is available for calculations. The range obtained as a result of calculations is probabilistic in nature and is performed with a given probability of correct detection and the probability of a false alarm.*

*Keywords: optoelectronic system, bolometric matrix receiver, maximum range, signal-to-noise ratio, thermal contrast, Thomson criterion.*

## Введение

Одной из основных тактико-технических характеристик оптико-электронной системы (ОЭС) является дальность действия [1–3]. Этот показатель носит интегральный характер и определяется большим количеством параметров как параметров матричного приемника излучения (МПИ), так и параметров обработки процессов. Режим поиска и обнаружения цели реализуется на этапе первичной обработки. К основным задачам, которые решаются на данном этапе относятся первичное подавление помех и шумов; обнаружение полезных сигналов, принимаемых от цели; оценивание угловых координат и других параметров целей; преобразование информации о цели в принятый формат данных (координатные точки). Для пассивных

ОЭС данный перечень ограничивается обнаружением, измерением угловых координат и выдачей полученных координатных точек. Первичной становится задача обнаружения, которая является статистической и зависит как от параметров датчика, так и от параметров объекта наблюдения, поэтому дальность действия головки самонаведения с ОЭС является случайной.

Известно несколько методик расчета дальности, из которых можно выделить две группы: 1) на основе геометрических расчетов и критерия Джонсона; 2) энергетические расчеты. При расчете дальности по первой методике используются геометрические характеристики оптической системы, критические размеры цели [4,5], а при решении задач распознавания и идентификации – критерий Джонсона. Значение критерия может составлять от 0,5 до 7,5 [6] и определяется решаемой задачей и условиями, при которых она решается.

Задачей энергетического расчета дальности действия ОЭС является определение значений некоторых параметров прибора, при которых на выходе приемника излучения обеспечиваются требуемые статистические характеристики обнаружения при определенном пороговом отношении между полезным сигналом и сигналом, вызываемым внутренними (собственные шумы приемника) и внешними (излучение фона) помехами. Эта задача сводится к вычислению либо пороговой чувствительности и дальности действия прибора при заданных параметрах, либо к нахождению значений этих параметров по заданным дальности действия или пороговой чувствительности.

Попытка связать вероятностные характеристики вскрытия объекта с помощью ОЭС и значения критерия Джонсона была предпринята в [6] на основе эмпирических соотношений для работы оператора. Для систем автоматического обнаружения использование таких методик для определения максимальной дальности требует дополнительного обоснования.

Дальность действия и пороговая чувствительность ОЭС являются их важнейшими характеристиками. Оба эти понятия выполняются с определенной вероятностью и взаимосвязаны, только одно из них (дальность действия) применяется при работе по излучающим объектам, удаленным на конечные расстояния, а второе чаще всего используется для общей характеристики ОЭС или применительно к аппаратуре, предназначенной для работы по бесконечно удаленным излучателям, например по звездам.

Целью данной работы является сравнение двух методик расчета инструментальной дальности ОЭС, в основе построения которой лежит МПИ с болометрической матрицей. При расчетах максимальной дальности будем ориентироваться на следующие типовые исходные данные:

тип приемного устройства	болометрический
рабочий диапазон волн, длина волны [мкм],	8...14 мкм
частота кадров, [кадр/с],	50
минимальная температура, эквивалентная шуму, К	0,05
диаметр объектива, [м],	0,09
относительное отверстие	1:1
коэффициент пропускания объектива	0,8
вероятность правильного обнаружения	0,9
вероятность ложной тревоги	$10^{-5}$ .

В качестве цели взят летательный аппарат с силовой установкой в виде двигателя внутреннего сгорания с водяным охлаждением и температурой нагрева 80°C. Расчетная излучательная способность цели составила 13,22 Вт/ср при критическом размере цели 0,4 м×0,4 м.

### Оценка дальности на основе геометрических характеристик

Процесс обнаружения и распознавания объекта зависит от ряда случайных факторов и является вероятностным. Поэтому необходим критерий, позволяющий с определенной степенью достоверности принимать решение о выполнении задачи обнаружения, распознавания и идентификации. В качестве такого критерия широко применяется критерий Джонсона [4–6]. Критерий Джонсона – это универсальный международный метод для оценки дальности действия любого оптического прибора, основанный исключительно на геометрических соотношениях оптики, матрицы и размера объекта. По существу, он определяет зависимость между числом разрешаемых периодов эквивалентной миры  $N$ , укладывающихся на критическом размере наблюдаемого объекта (в пространстве матрицы), и вероятностью решения задач наблюдения, равной 0,5.

Пространственная частота системы  $\nu$  в плоскости изображения, обеспечивающая требуемое для решения задачи обнаружения или распознавания число  $N$ , может быть рассчитана по формуле [5]

$$\nu = \frac{NR_g}{F_{ob}h_{кр}},$$

где  $\nu$  – пространственная частота оптической системы в плоскости изображения, линий/мм;  $N$  – число периодов эквивалентной миры, укладывающихся в критическом размере объекта (критерий Джонсона);  $R_g$  – расстояние от оптической системы до наблюдаемого объекта, м;  $F_{ob}$  – фокусное расстояние оптической системы, мм;  $h_{кр}$  – критический размер наблюдаемого объекта, м.

Критическая пространственная частота оптической системы в плоскости изображения определяется размерами чувствительного элемента

$$\nu = \frac{1}{2\Delta}, \text{ где } \Delta - \text{размер шага чувствительного элемента матричного приемника, мм.}$$

Отсюда получаем значение геометрической дальности до объекта

$$R_g = \frac{F_{ob}h_{кр}}{2N\Delta}.$$

Значения критерия Джонсона равны: 0,5...3 – для решения задач обнаружения в зависимости от структуры фона; 3...4 – для решения задач классификации (различения); 5...7,5 – для опознавания, идентификации и селекции объектов. Предполагая наличие фона со средней неоднородностью (поле, луг, лес, море) и использование цифрового процессора обнаружителя со стабилизацией вероятности ложной тревоги, примем для расчетов значение критерия Джонсона равным 1. В качестве критического размера цели примем минимальный размер сечения  $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$ . Результаты расчетов, полученные в этих условиях для трех размеров шага матрицы (12 мкм, 17 мкм и 25 мкм), сведены в таблицу 1.

**Таблица 1 – Максимальная дальность действия, основанная на геометрическом подходе**

Шаг матрицы, мкм	12	17	25
Дальность $R_g$ , км	0,75	0,53	0,36

Анализ полученных данных показывает, что расчет дальности по геометрическим параметрам дает заниженное значение. Это объясняется следующим. Миры, которые используются в критерии Джонсона, предназначены для визуального обнаружения и распознавания объектов. Один период эквивалентной миры содержит две полосы – темную и светлую, которые должны уложиться в критическом размере объекта. Такой объект является поверхностным (площадным), и воспринимается оператором в виде

некоторого образа. В системах автоматического обнаружения используется совершенно другой подход. Цель представляется точечной, а автомат обнаружения связан только с энергетикой входного сигнала, создаваемого целью в плоскости матрицы. Поэтому далее рассмотрим методики расчета на основе энергетических соотношений.

### Характеристики обнаружения сигналов ОЭС по контрастности

Математические основы энергетического расчета и расчета дальности ОЭС заложены в [1], а оценивание параметров и возможностей ОЭС с болометрической матрицей изложено в [7]. Мощность, поступающая на матричный приемник излучения (МПИ), зависит от диаметра объектива (площади входного зрачка), от затухания в объективе и без учета потерь в атмосфере и объективе равна

$$P_{\text{МПИ}} = \gamma_{ob} \Pi_{ob} = \gamma_{ob} \frac{\pi D_{ob}^2}{4} \frac{I_{tag}}{R_{max}^2}.$$

где  $D_{ob}$  – диаметр объектива;  $I_{tag}$  – мощность излучения цели.

Если  $\varphi_{tag}(\lambda)$  и  $\psi_{ob}(\lambda)$  – относительные спектральные характеристики излучения цели и чувствительности приемника,  $\tau_{ob}(\lambda)$  – спектральная характеристика прозрачности оптической системы, то коэффициент использования излучения цели будет равен

$$\xi = \frac{\int_0^\infty \varphi_{tag}(\lambda) \psi_{ob}(\lambda) \tau_{ob}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_{tag}(\lambda) d\lambda}.$$

Соотношение существенно упрощается, если предположить, что в рабочей полосе частот  $\varphi_{tag}(\lambda) = \text{const}$ . Коэффициент использования излучения цели в данном случае равен  $\xi \cong \gamma_{ob} < 1$  и показывает, какая часть энергии сигнала проходит через объектив. С учетом этого реальная мощность, освещающая МПИ, составит

$$P_{\text{МПИ}} = \gamma_{ob} P_{\text{МПИ}0}.$$

Мощность, поступающая на МПИ, благодаря дифракционному эффекту рассеивается по матрице, а из-за наличия технологических промежутков не вся воспринимается отдельными пикселями матрицы. Потери мощности в матрице зависят от размеров пикселя, геометрических параметров объектива и величины технологических промежутков [8]. Введем коэффициент  $\gamma_m$  использования излучения цели матрицей,  $\gamma_m < 1$ . Тогда

$$P_{\text{МПИ}} = \gamma_m \gamma_{ob} P_{\text{МПИ}0}.$$

Эти уравнения будут справедливы для условия наблюдения точечной цели, которое выполняется на больших расстояниях. На малых расстояниях цель занимает несколько пикселей, поэтому мощность от цели будет распределяться между несколькими пикселями, а мощность сигнала в отдельном пикселе будет прямо пропорциональна квадрату фокусного расстояния (относительного отверстия объектива).

Средние значения коэффициента  $\gamma_m$  для выбранного объектива составляет 0,57 (матрица 25 мкм), 0,47 (матрица 17 мкм), 0,6 (матрица 12 мкм). Попутно отметим, что с этой точки зрения матрица с шагом 17 мкм не является наилучшей.

Далее полученная в МПИ от цели мощность преобразуется в электрический сигнал, который обрабатывается и используется для пороговой обработки, в результате чего выносится решение об обнаружении или отсутствии цели [8]. Получение электрического сигнала в болометрических приемниках значительно отличается от соответствующего процесса в фотонных устройствах. В фотонных устройствах чаще всего расчет уровня выходного сигнала ОЭС связывают с подсчетом фотонов, образуемых при воздействии ИК излучения заданной мощности. Для характеристики свойств пороговых сигналов для них вводится специальный параметр – обнаружительная способность приемника, который существенно облегчает расчет дальности действия. Для микроболометрических матриц в качестве технических

характеристик используются чувствительность детектора  $\Delta T$  и эквивалентная шуму разность температур  $\Delta T_n$  (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference), которая чаще всего измеряется при температуре 300K и частоте кадров 50 Гц.

Вклад в общий уровень шума вносят пять основных некоррелированных источников шума: 1) доминирующим компонентом шума является шум структуры смещения (половина общей мощности шума); 2) шумы источника питания вносят примерно четверть мощности в общий шум; 3) шум опорного напряжения; 4) шумы дискретизации АЦП; 5) шумы активных элементов схемы МПИ.

Большое количество источников некоррелированных шумов приводит к общему гауссовскому распределению общего шума МПИ. Изменение температуры элемента болометрической матрицы на величину  $\Delta T$  приводит к изменению выходного напряжения на величину  $\Delta U$ . Связь между этими теплоэлектрическими величинами устанавливается соотношением [7]

$$\Delta U = \alpha U_B \Delta T,$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления (ТКС),  $U_B$  – напряжение смещения.

Значение ТКС для пленок оксида ванадия составляет  $\alpha = -(0,02 \dots 0,03) \text{K}^{-1}$ , а напряжение смещение  $U_B = 1 \text{В}$ . Изменение температуры обусловлено изменением падающей мощности  $\Delta P$  и зависит от времени переходных процессов в болометрической мембране. Для стационарного состояния (после окончания переходного процесса, когда время интегрирования много больше постоянной времени  $t \gg \tau_r$ ) данная взаимосвязь может быть определена зависимостью [7]

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{G} = \frac{\Delta P \tau_r}{C},$$

где  $\tau_r$  – время реакции болометрической пластинки на изменение мощности теплового излучения,  $\tau_r = C/G$ ;  $G$  – теплопроводность консолей болометра,  $G = 5 \cdot 10^{-7} \text{Вт/К}$ ;  $C$  – теплоемкость мембраны,  $C = 6 \cdot 10^{-5} S_m \text{ Дж/К}$ ,  $S_m$  – площадь мембраны в  $\text{см}^2$ .

Рассматривая  $\Delta U_n = \alpha U_B \Delta T_n$  как широкополосный случайный процесс, прошедший низкочастотный фильтр с единичным усилением, для среднеквадратического напряжения на выходе схемы ROIC получаем

$$U_{rms} = \Delta U_n / \sqrt{\Delta F_{amp}},$$

где  $\Delta F_{amp}$  – полоса усилителя с коэффициентом усиления равным 1.

Предельные характеристики обнаружения сигналов и дальности соответствуют наблюдению на фоне только шума в пределах одного пикселя. Поскольку мощность шума на выходе МПИ измеряется в полосе сигнала, то отношение сигнал-шум по мощности определяется соотношением

$$q_s = \frac{P_s}{P_n},$$

где  $P_s$  – мощность импульса, пропорциональная квадрату амплитуды пикселя  $U_s^2$ ;  $P_n$  – мощность (дисперсия) шума,  $P_n = \sigma_n^2 = U_{rms}^2$ ,  $U_{rms}$  – среднеквадратическое значение шума.

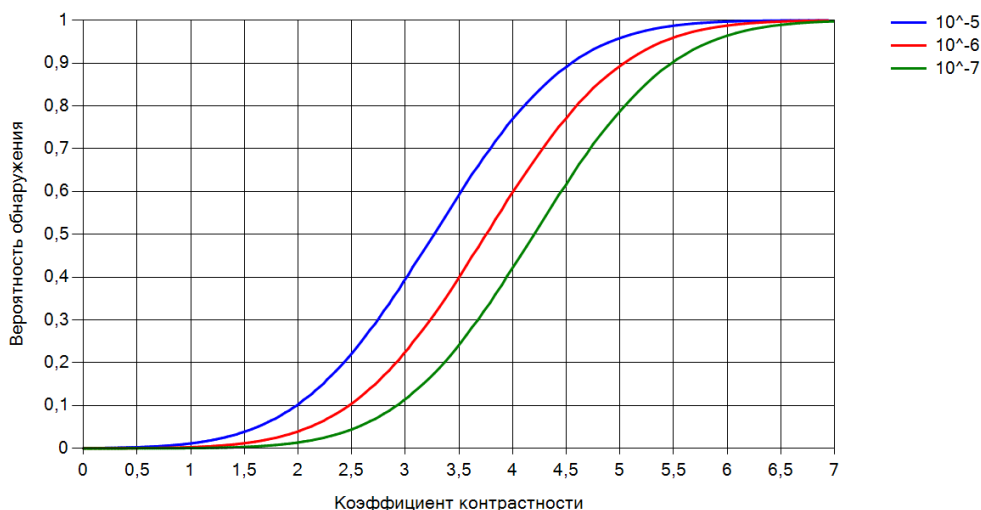
Поскольку  $\Delta U$  и  $\Delta T$  связаны линейно, то при наличии цели разность температур цели и шумового фона  $\Delta T_{tag} = T_{tag} - T_n$  определяется

$$\Delta T_{tag} = \frac{\Delta T_n (U_s - U_{rms})}{U_{rms} \sqrt{\Delta F_{amp}}} = \frac{\Delta T_n k_{kont}}{\sqrt{\Delta F_{amp}}}.$$

где  $k_{kont} = \sqrt{q_s} - 1$  – контраст цели (коэффициент, показывающий во сколько раз сигнал объекта возвышается над среднеквадратическим уровнем шума).

При автоматическом обнаружении основным параметром является отношение сигнал-шум на входе порогового устройства. В качестве критерия оптимизации наиболее целесообразно использовать критерий Неймана-Пирсона, в котором задаются

вероятность правильного обнаружения  $P_d$  и вероятность ложной тревоги  $P_{fa}$ , а качество работы системы оценивается по характеристикам обнаружения. При размере матрицы  $W \times H = 640 \times 480 = 307\,200$  значение вероятности ложной тревоги целесообразно выбирать не более  $P_{fa} = 10^{-5}$ . Поскольку это значение соответствует равномерному внутреннему фону (идеальный случай), будем также ориентироваться на значения  $P_{fa} = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ . На рис. 1 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения в зависимости от контраста цели. Характеристики показывают, что для достижения  $P_d \geq 0,9$  необходимо превышение полезного сигнала над среднеквадратическим уровнем внутреннего шума в 4,5...5,5 раз.



**Рис. 1. Характеристики обнаружения по контрастности для  $P_{fa} = 10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  и  $10^{-7}$**

Расчет максимальной дальности по данной методике при вероятности правильного обнаружения  $P_d = 0,9$ , вероятности ложной тревоги  $P_{fa} = 10^{-5}$ , полосе фильтра  $\Delta F_{атр} = 50$  Гц дает следующие результаты по расчету максимальной инструментальной дальности (таблица 2).

**Таблица 2 – Максимальная дальность действия, основанная на контрастности сигнала**

Шаг матрицы, мкм	12	17	25
Дальность $R_e$ , км	1,593	1,409	1,552

Полученные данные в 2...3 раза превышают значения инструментальной дальности, полученные на основе геометрических характеристик. Это подтверждает тезис о том, что такой подход совместно с критерием Джонсона более подходит к расчету ОЭС с оператором и видеоконтрольным устройством.

### Заключение

В докладе произведены оценки основных тактико-технических характеристик оптико-электронной системы смотрящего типа с болометрической матрицей, которые показали следующие результаты.

1. В результате анализа двух методик оценки инструментальной дальности обнаружения объектов показано, что расчеты на основе геометрических характеристик и критерия Джонсона дают заниженные результаты, поскольку

обнаружения связывается с восприятием оператором объекта наблюдения на одном пикселе.

2. Предложена методика расчета дальности на основе отношения сигнал-шум и связанного с ним коэффициента контрастности. Такая методика учитывает оптимальные статистические решения, применяемые в теории обнаружения. Для повышения устойчивости процедуры обнаружения в устройство обработки сигналов включается процессор с постоянным уровнем ложных тревог, который существенно снижает число ложных обнаружений. Другие методики дают примерно одинаковые результаты по оценке инструментальной дальности
3. Сравнительный анализ по максимальной дальности трех вариантов исполнения матричного приемника излучения – с шагом пикселей 12, 17 и 25 мкм показывает, что при заданном объективе МПИ с шагом пикселей 12 мкм имеет преимущества по рубежам обнаружения малоконтрастных целей, а матрица с шагом 17 мкм оказалась не оптимальной.

### **Литература**

1. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы (Основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974.
2. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы оптоэлектроники: Уч. пособие. М: МИИГАиК. 2014.
3. Меденников П.А., Павлов Н.И. Обнаружение и сопровождение точечных слабоизлучающих объектов на основе анализа последовательности минисерий изображений // Оптический журнал. 2021. Т.88. №12. С.50-58.
4. Погорельский С.Л. Методика оценки поисковых возможностей оптико-электронной системы смотрящего типа // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 7. С.285-290.
5. Кулакова Н.Н., Мишин С.В. Анализ результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам // Контенант. 2015. №3. С.24-30.
6. Иванов В.П., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Метод оптимизации несканирующих тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2012. Т.79. №3. С.3-10.
7. Хафизов Р.З., Старцев В.В., Москвичев В.Ю. Быстродействующие болометрические матричные детекторы // Фотоника. 2021. Т.15. № 5. С.396-409.
8. Костров В.В., Ракитин А.В., Богатов А.Д. Алгоритмическое обеспечение обнаружения и координатометрии точечных объектов в оптико-электронных системах с болометрическим матричным приемником // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025. № 4. С.44-54.