

В.В. Ростовцева, Г.И. Осипов

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ СИГНАЛА ОТ УДАЛЕННОГО ОБЪЕКТА ПРИЕМНИКОМ С МАТРИЧНЫМ ФОТОДЕТЕКТОРОМ

Рассмотрена задача получения сигнальной информации с помощью матричного ИК-приемника от звезд и метеоров для оценки параметров этих объектов или параметров атмосферы. Показано, что неопределенность положения пятна изображения на приемной матрице приводит к существенному изменению статистических характеристик сигнала. Вычислены математические ожидания и дисперсии сигнала как с учетом, так и без учета потерь сигнала в зазорах между элементарными приемниками. Полученные расчетные данные использованы для объяснения результатов экспериментов.

При изучении удаленных объектов (звезд, планет, метеоров) с помощью приемника ИК-излучения с матричным фотодетектором в некоторых случаях требуется не только получить информацию о координатах, но и оценить освещенность входного зрачка. В эти задачи входят, например, определение температуры объектов по их ИК-излучению или коррекция искажений сигнала (из-за поглощения в атмосфере) по опорным источникам излучения [1 – 4].

Измерение параметров ИК-излучения от удаленных объектов матричным фотодетектором имеет ряд особенностей. Так, из-за неопределенности положения объекта в кадре или из-за смещения изображения при регистрации движущегося объекта статистические характеристики сигнала отличаются от характеристик, полученных при стендовых испытаниях фотодетектора, предусматривающих практически полное <вписывание> изображения точечного объекта в фоточувствительный элемент матрицы или получение характеристик при равномерном освещении всей матрицы.

В данной статье рассчитаны уменьшение полезного сигнала и увеличение его дисперсии в зависимости от соотношения размеров пятна рассеяния и чувствительных элементов, скорости перемещения изображения, а также от метода обработки сигнала. Рассмотрен метод измерения малоконтрастных неподвижных объектов путем перемещения поля зрения измерителя. Выявленные закономерности подтверждаются данными, полученными с помощью приемника сигналов от звезд.

1. Оценка освещенности по максимальному сигналу

Рассмотрим задачу детектирования точечного излучателя матричным приемником. Размер пятна рассеяния объектива согласован с размерами элементарной площадки фотоприемника, средняя чувствительность и динамический диапазон определены при фокусировке излучения последовательно на несколько произвольно выбранных элементов в центре и на краях матрицы. Для коррекции неоднородности чувствительности элементарных площадок получены данные по их отклику при равномерном освещении матрицы. Будем считать, что при обработке отметок проводится калибровка чувствительности площадок по этим данным.

Оценим изменение основных характеристик приемника при измерении в натуральных условиях, т. е. при произвольном начальном положении пятна изображения, а также в режиме перемещающегося изображения. Приемник будем считать безынерционным. В качестве оценки освещенности от точечного источника примем величину сигнала с максимально освещенной в момент опроса элементарной площадки.

Пусть изображение источника перемещается по матрице чувствительных элементов. Закон изменения освещенности i -го элемента приемника описывается выражением

$$E(t, x_0, y_0, v) = E_0 f((y_0 - y_i + v_y t)/a, (x_0 - x_i + v_x t)/a), \quad (1)$$

где E_0 – освещенность i -го элемента при совпадении центра изображения с центром площадки; x_i, y_i – координаты площадки; x_0, y_0 – положение центра пятна изображения ко времени начала кадра; a – радиус пятна рассеяния; $v_{x,y}$ – скорость перемещения изображения; t – время от начала кадра; $f(\alpha, \beta)$ – закон набегания пятна изображения на площадку приемника. Пусть размеры пятна рассеяния согласованы с размером элементарной площадки ($r = a$, где r – половина расстояния между центрами соседних площадок по строке или по столбцу).

Конкретный вид закона набегания изображения точечного объекта на чувствительную площадку приемника зависит от распределения энергии в кружке рассеяния объектива и распределения чувствительности по элементарной площадке приемника. Если поглощением сигнала в зазорах между чувствительными площадками можно пренебречь, а чувствительность однородна по площадке, то закон набегания согласованного по размерам с элементарной площадкой кружка рассеяния можно достаточно удобно и точно аппроксимировать косинус-квадратной функцией [6]:

$$f(\alpha, \beta) = \cos^2\left(\frac{\pi}{4} \alpha\right) \cos^2\left(\frac{\pi}{4} \beta\right). \quad (2)$$

Сигнал с i -й площадки линейного безынерционного приемника описывается выражением

$$S_i = S_0 \cos^2 \frac{\pi}{4} \left(\frac{y_0 - y_i + v_y t}{r} \right) \cos^2 \frac{\pi}{4} \left(\frac{x_0 - x_i + v_x t}{r} \right). \quad (3)$$

Как уже было сказано, в качестве оценки освещенности от точечного объекта принимаем сигнал с той площадки, освещенность которой в момент опроса была максимальной. Пусть такой сигнал получен с i -й площадки в некоторый момент t . Это означает, что центр изображения в этот момент должен находиться в пределах этой площадки:

$$\begin{aligned} y_i - r < y_0 + v_y t < y_i + r; \\ x_i - r < x_0 + v_x t < x_i + r. \end{aligned} \quad (4)$$

Усредняя (2) по начальному положению (x_0, y_0) пятна изображения, получим математическое ожидание сигнала

$$\bar{S}_i = \frac{1}{(2r)^2} \int_{y_i - r - v_y t}^{y_i + r - v_y t} dy_0 \int_{x_i - r - v_x t}^{x_i + r - v_x t} dx_0 S_i(x_0, y_0) = S_0 \left(1 + \frac{2}{\pi}\right)^2 / 4 = 0,670 S_0. \quad (5)$$

Дисперсия сигнала вследствие неопределенности положения пятна рассеяния достигает при этом значения

$$\sigma^2 = \frac{1}{(2r)^2} \int_{y_i - r - v_y t}^{y_i + r - v_y t} dy_0 \int_{x_i - r - v_x t}^{x_i + r - v_x t} dx_0 (\bar{S}_i - S_i)^2 = S_0^2 \left(\frac{3}{4} + \frac{2}{\pi}\right)^2 / 4 - S_0^2 \left(1 + \frac{2}{\pi}\right)^4 / 16 = 0,0323 S_0^2. \quad (6)$$

Переходя к относительным величинам, получим $\sigma_{\text{отн}} = 0,27$.

В реальных матричных приемниках потери сигнала в зазорах между площадками могут составлять значительную величину. Закон набегания при этом остается плавной кривой, принимающей значения меньше 0,5 при пересечении центром кружка рассеяния границы между двумя соседними чувствительными элементами. Достаточно удобной аппроксимацией закона набегания здесь является колоколообразная функция. Пусть

$$f(\alpha, \beta) = \exp(-\alpha^2 - \beta^2), \quad (7)$$

что соответствует ~26%-му поглощению сигнала при попадании изображения на две соседние площадки. В этом случае величина сигнала с элементарной площадки описывается выражением

$$S_i = S_0 \exp \left\{ - \left(\frac{y_0 - y_i + v_y t}{r} \right)^2 - \left(\frac{x_0 - x_i + v_x t}{r} \right)^2 \right\}. \quad (8)$$

Проведя усреднение по начальному положению изображения (x_0, y_0) , получим математическое ожидание сигнала и его дисперсию:

$$\bar{S}_i = \frac{S_0 \pi \operatorname{erf}^2 1}{4} = 0,556 S_0; \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \overline{S_i^2} - \bar{S}_i^2 = \frac{S_0^2 \pi \operatorname{erf}^2 \sqrt{2}}{8} - \frac{S_0^2 \pi^2 \operatorname{erf}^4 1}{16} = 0,05 S_0^2; \quad \sigma_{\text{отн}} = \sigma / \bar{S}_i = 0,41. \quad (10)$$

Видно, что при измерениях в натуральных условиях средняя величина сигнала от объекта и его дисперсия будут существенно отличаться от номинальных значений и зависеть от соотношения размеров пятна рассеяния и элементарной чувствительной площадки, а также от величины зазоров, так как все это определяет вид закона набегания. Следует отметить также, что скорость перемещения пятна изображения по матрице чувствительных элементов не оказывает влияния на процесс формирования сигнала до тех пор, пока время пересечения изображением элементарной площадки больше постоянной времени приемника. Дальнейшее увеличение скорости ведет к дальнейшему уменьшению полезного сигнала.

Так как в реальных матрицах зазоры между площадками играют существенную роль, рассмотрение в дальнейшем ведется для второго типа закона набегания.

2. Оценка освещенности по суммарному сигналу

До сих пор мы рассматривали оценку освещенности по максимальному сигналу. Однако при значительном превышении освещенности от объекта над пороговым значением, а также в случае попадания центра изображения на край чувствительной площадки сигнал на соседних площадках сравним с максимальным. Рассмотрим схему обработки, при которой в качестве оценки освещенности входного зрачка от точечного объекта принимается сумма сигналов с центральной и восьми соседних площадок. Для расчетов используем второй тип закона набегания (7). Суммарный сигнал рассчитывался по формуле

$$S_{i\Sigma} = S_0 \sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 \exp \left\{ - \left(\frac{x_0 - x_i + v_x t}{r} + 2p \right)^2 - \left(\frac{y_0 - y_i + v_y t}{r} + 2q \right)^2 \right\}. \quad (11)$$

При такой оценке максимальный сигнал равен $1,074 S_0$. Считая, что центр изображения может иметь произвольное начальное положение на центральной площадке, можно рассчитать математическое ожидание сигнала:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{i\Sigma} &= \frac{1}{(2r)^2} \int_{y_i-r-v_y t}^{y_i+r-v_y t} dy_0 \int_{x_i-r-v_x t}^{x_i+r-v_x t} dx_0 S_{i\Sigma}(x_0, y_0) = \frac{S_0 \pi}{4} \left(\operatorname{erf}^2 1 + 4 \operatorname{erf} 1 \left(\frac{1 - \operatorname{erf} 1}{2} \right) + 4 \left(\frac{1 - \operatorname{erf} 1}{2} \right)^2 \right) = \\ &= 0,785 S_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Путем трудоемких, но несложных вычислений можно получить СКО сигнала

$$\sigma_{i\Sigma} = 0,133 S_0, \quad \sigma_{\text{отн}} = \sigma_{i\Sigma} / \bar{S}_{i\Sigma} = 0,17. \quad (13)$$

Видно, что СКО более чем в два раза отличается от соответствующей характеристики при первой схеме обработки изображения.

Таким образом, переход от оценки сигнала по максимально освещенной площадке к оценке по суммарному отклику нескольких площадок даже для точечного объекта приводит к увеличению среднего сигнала с $0,556 S_0$ до $0,785 S_0$.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что динамическая характеристика приемника, работающего в реальных условиях, отличается от эталонной характеристики, измеренной при центрировании изображения точечного объекта. Действительно, в результате пересчета сигнала, измеренного в зависимости от типа приемника в амперах, вольтах или каких-либо относительных единицах, к освещенности входного зрачка по обычной формуле может быть получена освещенность

$$\bar{E}_{\text{изм}} = \bar{S}_i (E_{\text{пор}}^0 / S_{\text{пор}}^0), \quad (14)$$

где $E_{\text{пор}}^0$ и $S_{\text{пор}}^0$ – пороговая освещенность входного зрачка и величина порогового сигнала, полученные в стендовых испытаниях. Истинное же значение освещенности превосходит полученное $\bar{E}_{\text{изм}}$:

$$\bar{E} = \bar{E}_{\text{изм}} (S_0 / S_i). \quad (15)$$

Подставляя (14) в (15), можно оценить новое пороговое значение освещенности входного зрачка:

$$E_{\text{пор}} = E_{\text{пор}}^0 (S_0 / S_i). \quad (16)$$

Для закона набегания (2) реальное пороговое значение при первой схеме обработки равно $1,5 E_{\text{пор}}^0$. Для закона набегания (7) пороговое значение почти вдвое превосходит эталонную пороговую освещенность входного зрачка. Кроме того, необходимо учитывать увеличение СКО сигнала при увеличении освещенности входного зрачка в реальных условиях. Обработка по суммарному сигналу ведет к существенному уменьшению порогового значения и приближению его к номинальному (с $1,8 E_{\text{пор}}^0$ до $1,3 E_{\text{пор}}^0$ в случае учета потерь в зазорах между площадками). При этом относительная ошибка при оценке освещенности от объекта уменьшается более чем в два раза (с 0,41 до 0,17).

3. Анализ экспериментальных данных

Полученные результаты были использованы при анализе экспериментальных данных по наблюдению звезды Бетельгейзе матричным охлаждаемым ИК-радиометром, установленным на самолете-лаборатории. Для облегчения идентификации сигнала от звезды на фоне наведенных изображений и дефектов матрицы использовался метод смещения поля зрения [5]: вираж самолета обеспечивал перемещение изображения объекта по матрице светочувствительных элементов со скоростью приблизительно одна площадка за кадр. В каждом эксперименте звезда фиксировалась в 6 – 8 кадрах. Освещенность в каждом кадре оценивалась по сумме сигналов с центральной и соседних площадок.

В результате этих экспериментов были получены оценки средней освещенности от звезды и ее СКО. Бетельгейзе является переменной звездой, и поэтому средние значения освещенности, полученные в различных экспериментах, могут иметь различную величину, но они должны попадать в интервал возможных значений освещенности входного зрачка ($4 \cdot 10^{-13} \pm 2 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²). В двух экспериментах из четырех, однако, эти значения не превосходили нижнего предела (см. ниже).

Кроме того, оценка дисперсии сигнала по разбросу экспериментальных значений значительно превосходила дисперсию, полученную в стендовых условиях ($2,5 \cdot 10^{-15}$ Вт/см²). Эти явления хорошо объясняются при учете неопределенности положения пятна изображения на светочувствительной матрице. Согласно полученным выше результатам средние значения должны быть увеличены в $S_{\text{max}} / \bar{S}_2$ раз. Видно, что полученные при этом значения E попадают в интервал возможных значений освещенности от Бетельгейзе. Величина же относительной дисперсии хорошо согласуется с теоретически предсказанным значением $\sigma_{\text{отн}} = 0,17$.

$\bar{E}_{\text{изм}}$	$3,9 \cdot 10^{-13}$	$7,95 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$8,64 \cdot 10^{-13}$
\bar{E}	$5,3 \cdot 10^{-13}$	$1,09 \cdot 10^{-12}$	$4,9 \cdot 10^{-13}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$
σ	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$1,06 \cdot 10^{-13}$	$6,5 \cdot 10^{-14}$	$9,5 \cdot 10^{-14}$
$\sigma_{\text{отн}}$	0,16	0,13	0,18	0,11

Таким образом, учет неопределенности положения изображения точечного объекта в кадре в натуральных условиях позволяет существенным образом скорректировать полученные количественные оценки освещенности входного зрачка.

1. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 281 с.
2. Gardner J. L. // Appl. Optics. 1980. V. 19. N 18. P. 3088–3091.
3. Righini F. Temperature, its measurement and control in science and industry. Pittsburg: ISA, 1973. 57 p.
4. Ростовцева В.В., Краснов К.В., Осипов Г.И. // Атмосферная радиация и актинометрия. (Сб. научных трудов). Томск: Изд-е Томского филиала СО АН СССР. 1988. С. 18–21.
5. Ростовцева В.В., Осипов Г.И. // Труды XI Симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО РАН, 1993. С. 99–102.
6. Миросников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.

Научно-исследовательский институт
радиоприборостроения, Москва

Поступила в редакцию
21 июля 1993 г.

V. V. Rostovtseva, G. I. Osipov. Evaluation of a Signal from a Remote Object Using a Receiver with a Matrix Photodetector.

This paper deals with the problem on obtaining information about the parameters of stars, meteors, and atmosphere from observations with an IR matrix detector. It is shown in the paper that uncertainties in the position of an image spot on the receiving matrix result in an essential modification of statistical properties of a signal. Mathematical expectation and variance of a signal are calculated in the paper with and without the account for signal losses due to gaps between the elements of the matrix. Thus obtained results are used for interpretation of the experimental data.