ВЛИЯНИЕ ПЕЛЕНГАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗБРОСА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОПРИЁМНИКА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

А.С. Гридин, канд. техн. наук; И.Ю. Дмитриев, канд. техн. наук; В.Н. Васильев

НИИКИ ОЭП, г. Сосновый Бор

В работе рассматривается совместное влияние разброса чувствительности и пеленгационных характеристик площадок многоэлементного фотоприёмника на распределение пороговой чувствительности сканирующего оптико-электронного прибора. Представлены результаты экспериментов по измерению распределения пороговой чувствительности макетов сканирующих оптико-электронных приборов.

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению числа информационных каналов оптико-электронных приборов, предназначенных для решения задач пеленгации и обнаружения, что достигается включением в их состав многоэлементных фотоприёмников. Чувствительные элементы в таких приёмниках располагаются в виде линейки или матрицы, модуляция потока излучения производится сканированием линейки в направлении ей перпендикулярном или за счет поэлементного считывания в матрице. Элементы фотоприёмника имеют D^{*} технологический разброс обнаружительной способности (вольтовой чувствительности S) и различную пространственную структуру.

Рассмотрим совместное влияние разброса чувствительности и пеленгационных характеристик (зависимость амплитуды сигнала от координат объекта) чувствительных элементов (ЧЭ) фотоприёмника на распределение пороговой чувствительности сканирующего оптико-электронного прибора. ФПУ представляет собой линейку ЧЭ, обзор поля зрения прибора осуществляется сканированием линейки в направлении ей перпендикулярном.

При расчете итогового распределения пороговой чувствительности сделаны следующие допущения:

1. Распределение облученности изображения точечного источника излучения сформированного оптической системой прибора в плоскости элементов ФПУ описывается выражением:

$$E(x,y) = \frac{D_a^2 E_a \tau}{4} \cdot \frac{1}{x_0 y_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2x_0^2} - \frac{y^2}{2y_0^2}\right) = E(0) \cdot h(x,y)$$
(1)

где x, y – положение центра изображения точечного источника; D_a – диаметр входного зрачка оптической системы, cm^2 ; E_a – облученность на входном зрачке прибора, Bm/cm^2 ; τ – пропускание оптической системы, *отн.ед.*; $x_0 = y_0 = r/\sqrt{2}$ *r* - эффективный радиус;

Значение эффективного радиуса функции описывающей распределение освещенности в изображении точечного источника, в ряде случаев может быть определено в результате

решения следующего уравнения:
$$K_{_{3H}} = \frac{1}{r^2} \int_{0}^{m} 2\rho \cdot \exp\left(-\frac{\rho^2}{r^2}\right) d\rho$$
 (2)

где r – эффективный радиус; m- радиус измерительной диафрагмы, при которой производились измерения концентрации энергии в пятне рассеяния оптической системы; K_{30} – коэффициент концентрации энергии;

2. Зонная характеристика элемента ФПУ, описывающая распределение чувствительности по площади чувствительного слоя определяется соотношением:

$$S(x', y') = S_{\max} \exp\left(-\frac{(x'-x)^2}{2x_n^2} - \frac{(y'-y)^2}{2y_n^2}\right) = S_{\max}h'(x'-x, y'-y)$$
(3)

где x_n, y_n – параметры гауссоиды ($x_n = y_n = r_n / \sqrt{2}$); S_{max} – максимальная чувствительность, B/Bm; x, y – положение центра чувствительной площадки;

3. Распределение чувствительностей отдельных элементов ФПУ представляет собой нормальное распределение с заданными параметрами МО и СКО:

$$p_{S_{\text{max}}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(S_{\text{max}} - \overline{S}_{\text{max}})^2}{2\sigma^2}\right)$$
(4)

где \overline{S}_{max} – средняя величина максимальной чувствительности элементов ФПУ (изображение в центре ЧЭ); σ - среднее квадратичное отклонение величины максимальной чувствительности от среднего значения;

Формула для расчета величины сигнала на выходе оптико-электронного прибора без учета инерционности приёмника и влияния электронного тракта, следующая [1]:

$$U = \int_{x'-a_n/2}^{x+a_n/2} \int_{y'-a_n/2}^{y-a_n/2} S(x'-x, y'-y) \cdot E(x, y) dxdy$$
(5)

где *a_n* – размер чувствительной площадки;

Пусть x = y = 0, т.е. центр чувствительной площадки находится на оси оптической системы, а $\Delta x = x_1$ и $\Delta y = y_1$, что указывает на наличие и величину смещения изображения точечного источника в фокальной плоскости оптической системы. Тогда подставляя (1) и (3) в выражение (5) получаем:

$$U(\Delta x, \Delta y) = \frac{D_a^2 E_a \tau}{4} S_{\max} \int_{-a_n/2}^{a_n/2} \int_{-a_n/2}^{a_n/2} h'(x, y) \cdot h(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy$$
(6)

Полученное выражение (6) представляет собой зависимость значения сигнала на выходе квадратного чувствительного элемента имеющего размеры (a_n , a_n) от смещения изображения точечного источника относительно центра площадки ЧЭ. Эту зависимость можно назвать пеленгационной характеристикой ЧЭ. Для прибора осуществляющего сканирование по одной из координат (X) можно принять $\Delta x = 0$. Если качество изображения в поле зрения оптической системы прибора одинаково в любой его точке (изопланетизм) и максимальные чувствительности ЧЭ равны друг другу ($S_{i_max} = S_{i+1_max}$), то можно получить выражение для нормированной пеленгационной характеристики, которая при этих условиях будет одинаковой для любого из ЧЭ:

$$U_{i}^{*}(\Delta y) = \frac{\int_{-a_{n}/2}^{a_{n}/2} \int_{-a_{n}/2}^{a_{n}/2} h'(x,y) \cdot h(x,y - \Delta y) dx dy}{\int_{-a_{n}/2}^{a_{n}/2} \int_{-a_{n}/2}^{a_{n}/2} h'(x,y) \cdot h(x,y) dx dy} = U^{*}(\Delta y)$$
(7)

В этом случае точка пересечения соседних пеленгационных характеристик получается при смещении изображения точечного источника $\Delta y = 0.5(a_n + d) d$ – зазор между элементами линейки. Следовательно, величина сигнала на выходе ЧЭ изменяется в пределах $[U_{\min}^*; U_{\max}^*]$, где: $U_{\max}^* = U_i^*(\Delta y = 0) = 1$

$$U_{\min}^* = U_i^* (\Delta y = 0.5(a_n + d))$$

Результат расчета выражения (7):

$$U^{*}(\Delta y) = \exp(k \cdot \Delta y^{2}) \cdot \left[\frac{erf(m + s\Delta y) + erf(m - s\Delta y)}{2 \cdot erf(m)}\right]$$

$$k = -\frac{1}{(r^{2} + r_{n}^{2})} \qquad m = -\frac{0.5 \cdot a_{n} \cdot \sqrt{r^{2} + r_{n}^{2}}}{r_{n}r} \qquad s = \frac{r_{n}}{r_{n}\sqrt{r^{2} + r_{n}^{2}}}$$
(8)

где Δy – смещение относительно центра i-ой чувствительной площадки; erf – функция ошибки;

Расчет дает громоздкую формулу (8), однако её при условии для дальнейших расчетов, можно заменить приближенным выражением (при выполнении условий

$$r \ge a_n, r_n \ge r$$
): $U^*(\Delta y) = \exp\left(\frac{\Delta y^2 \cdot 4\ln(U_{\min}^*)}{(a_n + d)^2}\right)$ (9)

где U_{\min} – минимальное значение пеленгационной характеристики; a_n – размер чувствительного элемента;

Выражение (9) описывает нормированную пеленгационную характеристику чувствительных элементов без учета разброса значений чувствительности.

Выражение для вероятности нормированного сигнала $p(U^*)$ запишется в виде:

$$p(U^*) = \frac{1}{2U^* \sqrt{\ln(U^*) \ln(U^*_{\min})}} \qquad \qquad \text{при } U^* \in \left[U^*_{\min}; 1\right] \tag{10}$$

Пороговая чувствительность рассчитывается с использованием выражения:

$$E_{nop} = \frac{E_a \cdot \sqrt{\overline{U}_u^2}}{U_{\text{max}} U^*} = \frac{\sqrt{\overline{U}_u^2}}{U^* S_{\text{max}}}$$
(11)

Так как значение U^* находится в интервале $\left[U_{\min}^*;1\right]$ следовательно, значение E_{nop} находится в интервале $\left[\frac{\sqrt{\overline{U}_u^2}}{S_{\max}};\frac{\sqrt{\overline{U}_u^2}}{U_{\min}^*S_{\max}}\right]$. Пусть $E_{nop_\min} = \sqrt{\overline{U}_u^2} / S_{\max}$, а $E_{nop}^* = \frac{E_{nop}}{E_{nop_\min}}$,

тогда выражение (11) запишется в виде: $E_{nop}^* = \frac{1}{U^*}$ (12) Выражение ния плотности вероятности нормированной норосорой инротритоги норм

выражение для плотности вероятности нормированной пороговой чувствительности
$$p(E_{nop}^*)$$
: $p(E_{nop}) = \frac{p(U^*)dU^*}{dE_{nop}^*}$ (13)

Подставим найденные ранее выражения для плотности вероятности нормированного сигнала:

$$p(E_{nop}^{*}) = -\frac{1}{2U^{*}\sqrt{\ln(U^{*})\ln(U_{\min}^{*})}} \cdot \frac{U^{*2}}{1} = \frac{-1}{2E_{nop}^{*}\sqrt{\ln(1/E_{nop}^{*})\ln(U_{\min}^{*})}}$$
(14)

Полученное выражение представляет собой плотность вероятности нормированной пороговой чувствительности с учетом пеленгационной характеристики ЧЭ.

Следующей задачей является определение плотности вероятности значения пороговой чувствительности элементов ФПУ с учетом не только пеленгационной характеристики, но и разброса чувствительностей элементов. Выражение для определения пороговой чувствительности, запишется в виде:

$$E_{nop} = \frac{S_{\max}\sqrt{\overline{U}_{u}^{2}}}{U^{*}} = S_{\max} \cdot E_{nop}^{*} \cdot \sqrt{\overline{U}_{u}^{2}}$$
(15)

В общем случае распределение чувствительностей отдельных элементов ФПУ можно описывать при помощи нормального распределения с заданными параметрами МО и СКО (4). Отсюда итоговое распределение значений сигналов p(U) со всех чувствительных элементов с учетом наличия пеленгационной характеристики и разброса чувствительности, запишется в виде композиции распределений:

$$p(E_{nop} = S_{\max}E_{nop}^{*}) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{E_{nop}^{*}}(E_{nop} / S_{\max}) p_{S_{\max}}(S_{\max}) \cdot \frac{1}{|S_{\max}|} dS_{\max}$$
(16)

где $p_{E_{nop}^*}(...)$ – плотность вероятности нормированной пороговой чувствительности; $p_{S_{max}}(...)$ – плотность вероятности величины максимальной чувствительности;

Подставляя известные выражения в формулу (16) получаем:

$$p_{E_{nop}} = \int_{E_{nop}}^{E_{nop} \cdot U_{\min}^{*}} \frac{1}{2\left(\frac{E_{nop}}{S_{\max}}\right) \sqrt{\ln(S_{\max} / E_{nop})\ln(U_{\min}^{*})}} \cdot \frac{k \cdot \exp\left(-\frac{k^{2}(S_{\max} - \overline{S}_{\max})^{2}}{2\overline{S}_{\max}}\right)}{\sqrt{2\pi}\overline{S}_{\max}} \cdot \frac{1}{|S_{\max}|} dS_{\max} \quad (17)$$

$$\Gamma de \qquad k = \overline{S}_{\max} / \sigma$$

На рис. 1 представлены результаты расчетов по формуле (17) для k = 10 и различных U_{\min}^* .



Рис.1 Плотность вероятности пороговой чувствительности для различных U^*_{min} ($k = 10, r_n > r$)

Была разработана методика измерения пороговой чувствительности с использованием тест-объектов, позволяющих имитировать равновероятное размещение изображений точечных источников в поле зрения элементов ФПУ оптикоэлектронного прибора [2]. Результаты эксперимента доказали верность предположений и расчетов [3].

Распределение пороговой чувствительности с учетом пеленгационных характеристик и разброса чувствительности, позволяет не только оценить качество прибора по параметрам распределения (МО, СКО, ...), но может быть использовано в дальнейшем при оценке статистических критериев системы обнаружения в целом (вероятность обнаружения, ложных тревог, пропуска, ...).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М., "Советское радио", 1967.

2. Гридин А.С., Дмитриев И.Ю., Воронич В.Б. Способ определения энергетической пороговой чувствительности многоканального сканирующего теплопеленгатора и тестовый объект для его осуществления. Патент РФ №2269796 06.08.2004.

3. Васильев В.Н. Исследование методов аттестации информационных многоканальных оптико-электронных приборов. СПб, Сб. трудов конференции "Прикладная оптика - 2004", т. 1, с. 100-104.

EFFECT OF CO-ORDINATE CHARACTERISTICS AND SPREAD VALUES OF SENSITIVITY OF ELEMENTS PHOTODETECTOR'S ON DISTRIBUTION OF THRESHOLD SENSITIVITY OF OPTOELECTRONIC DEVICE

A.S.Gridin, Ph.D.; I.Yu.Dmitriev, Ph.D.; V.N.Vasiliev.

Research Institute for Complex Testing of Optoelectronic Devices and Systems The town of Sosnovy Bor Leningrad region

Combined effect of the co-ordinate characteristics and spread values of sensitivity areas of multielement photodetector on the distribution of threshold sensitivity of the scanning optoelectronic device are considered in the paper. Experimental data for measurements of the distribution of threshold sensitivity made on prototypes of the scanning optoelectronic devices are presented.