

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СМОТРЯЩЕ-СКАНИРУЮЩИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2012 г. Т. Р. Габдрахманов; В. С. Яцык, канд. техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru; gipo@telebit.ru

Рассматриваются особенности применения оптико-электронных систем кругового обзора с матричными фотоприемными устройствами. Разработана методика оценки дальности действия таких систем с учетом изменяющейся во времени интенсивности излучения объекта. Определено значение оптимального периода обзора систем и оптимального времени экспонирования матричного фотоприемного устройства по критерию максимума дальности обнаружения объекта за минимальное время.

*Ключевые слова:* авиационные оптико-электронные приборы, инфракрасная область спектра, круговой обзор, обнаружение, переменная интенсивность излучения, оптимизация, период обзора, время экспонирования, пространственная фильтрация.

Коды OCIS: 110.2970, 040.3060, 3000.36110.

Поступила в редакцию 17.10.2011.

В настоящее время к устанавливаемым на борту самолетов и вертолетов оптико-электронным системам обнаружения малоразмерных высокотемпературных объектов предъявляются требования по обеспечению просмотра сферической зоны обзора и обнаружению объектов на максимально возможной дальности до них за минимальное время.

Самым простым решением этой проблемы, на первый взгляд, кажется установка на воздушном носителе некоторого количества “смотрящих” обнаружителей, однако их количество обратно пропорционально полю зрения, увеличение которого влечет уменьшение дальности обнаружения. Время обнаружения определяется периодом кадра матричного фотоприемного устройства (МФПУ), составляющим тысячные – сотые доли секунды.

Применение двух систем сканирования (полусферической или близкой к полусферической кольцевой зоны обзора) обеспечивает значительно большую дальность обнаружения объектов за счет сравнительно небольшого поля зрения. Максимальное время обнаружения в таких системах определяется периодом обзора (десятые доли – единицы секунд).

В данной работе рассмотрено влияние периода обзора системы кругового обзора с МФПУ на дальность обнаружения объекта с изменяющейся во времени интенсивностью излучения.

Система кругового обзора с МФПУ позволяет в сканирующем режиме осуществлять обнаружение целей в большой области пространства, а затем – слежение за “приоритетными” целями в смотрящем режиме в пределах небольшого поля кадра.

Использование МФПУ означает, что, с точки зрения формирования сигналов от объектов и фона, эта система является смотрящей даже в сканирующем режиме. Отличие от чисто смотрящего режима заключается лишь в наличии смаза изображения за время экспонирования вследствие быстрого перемещения поля зрения относительно пространства объектов. По сути это эквивалентно смазу изображения объекта, быстро перемещающегося в поле зрения смотрящей системы. Исходя из типа функционирования, далее будем называть подобные системы “смотряще-сканирующими” и применять к ним с необходимыми корректировками методы расчета, разработанные для смотрящих систем.

На основе работ, в которых освещались вопросы математического моделирования сигналов и шумов систем с МФПУ [1–3] и пространственной фильтрации изображений фоноцелевых сцен [4], разработана и реализована в виде программы методика оценки дальности обнаружения объектов посредством оптико-электронных приборов смотрящего типа [5].

Данная методика позволяет учесть пять независимых составляющих общего шума прибора, таких как

– темновой шум МФПУ (шум в отсутствие падающего излучения)

$$\Delta P_T = \sqrt{\left( \frac{S_{\Pi} (1 + \sigma_{\text{вр0}}^2)}{2t_{\text{H}} D_m^{*2}} - \frac{M_{\Sigma 0} S_{\Pi} hc}{B_0 \lambda_m \eta_m t_{\text{H}}} - \frac{N_c^2 h^2 c^2}{\lambda_m^2 \eta_m^2 t_{\text{H}} t_{\text{H0}}} \right) \frac{n_{\text{B}}}{k_{\text{H}}^2}};$$

– дробовой шум фона

$$\Delta P_{\Phi} = \sqrt{\frac{M_{\Sigma} S_{\Pi} n_{\text{B}} hc}{B \lambda_m \eta_m t_{\text{H}} k_{\text{H}}^2}};$$

– пространственный шум

$$\Delta P_{\Pi} = \sigma_{\text{ч}} M_{\Sigma} S_{\Pi} \sqrt{n_{\text{B}}} / B k_{\text{H}};$$

– шум вариаций энергетической яркости фоновых неоднородностей

$$\Delta P_{\text{H}} = \frac{\pi S_{\Pi}}{4K^2} \sqrt{n_{\text{H}} \sigma_{\Phi}^2};$$

– шум схем считывания

$$\Delta P_{\text{с}} = \frac{N_{\text{с}} hc \sqrt{n_{\text{B}}}}{\lambda_m \eta_m t_{\text{H}} k_{\text{H}}}.$$

Здесь  $\Delta P_k$  – эффективные потоки, приведенные к элементу разложения изображения, эквивалентные каждой  $k$ -й из составляющих шума при нормировке к длине волны максимума спектральной характеристики чувствительности прибора;

$k_{\text{H}}$  – коэффициент перенормировки от длины волны максимума спектральной чувствительности прибора к длине волны максимума спектральной чувствительности МФПУ;

$t_{\text{H}}$  – время накопления МФПУ (время экспонирования);

$S_{\Pi}$  – площадь фоточувствительного элемента МФПУ;

$\lambda_m$  – длина волны максимума спектральной чувствительности МФПУ;

$D_m^*$  – удельная обнаружительная способность МФПУ, усредненная по всем его элементам, на длине волны  $\lambda_m$ ;

$h$  – постоянная Планка;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\eta_m$  – квантовая эффективность МФПУ на длине волны  $\lambda_m$ ;

$\sigma_{\text{вр0}}$  – относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) вариаций временного шума элементов МФПУ при определении его пороговой чувствительности (отношение СКО вариаций СКО темнового шума элементов МФПУ к среднему значению СКО темнового шума);

$M_{\Sigma 0}$  – эффективная энергетическая светимость фона при определении пороговой чувствительности МФПУ, приведенная к длине волны максимума его спектральной характеристики чувствительности;

$B_0 = 1 + 4K_0^2$ , где  $K_0$  – диафрагменное число используемой при определении пороговой чувствительности МФПУ охлаждаемой диафрагмы;

$t_{\text{H0}}$  – время накопления МФПУ при определении его пороговой чувствительности;

$M_{\Sigma}$  – средняя по полю зрения эффективная энергетическая светимость фона в условиях работы прибора, приведенная к длине волны максимума спектральной характеристики чувствительности МФПУ;

$B = 1 + 4K^2$ , где  $K$  – диафрагменное число используемой при эксплуатации МФПУ охлаждаемой диафрагмы;

$\sigma_{\text{ч}}$  – относительное СКО чувствительности элементов МФПУ (отношение СКО интегральной чувствительности к ее среднему значению) с учетом принятых мер по его коррекции;

$\sigma_{\Phi}^2$  – дисперсия энергетической яркости фоновых неоднородностей в рабочем спектральном диапазоне прибора;

$N_{\text{с}}$  – СКО шума схем считывания, выраженное числом фотоэлектронов;

$n_{\text{B}}$  – коэффициент увеличения дисперсии внутреннего шума при использовании межэлементной обработки изображений, реализуемой пространственными фильтрами ( $n_{\text{B}} = 1$  при отсутствии пространственной фильтрации);

$n_{\text{H}}$  – коэффициент уменьшения дисперсии шума вариаций энергетической яркости фоновых неоднородностей при использовании межэлементной обработки изображений ( $n_{\text{H}} = 1$  при отсутствии пространственной фильтрации).

Коэффициент  $k_{\text{H}}$  определяется по формуле

$$k_{\text{H}} = \max \{ \tau_{\text{обт}}(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) S(\lambda) \},$$

где  $\tau_{\text{обт}}(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания обтекателя (защитного оптического элемента),  $\tau_{\text{об}}(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания объектива,  $S(\lambda)$  – относительная

спектральная характеристика чувствительности МФПУ.

При определении пороговой чувствительности МФПУ время накопления обычно устанавливается из условия полузаполнения потенциальной ямы фотоэлектронами, вызванными излучением фона, –

$$t_{h0} = \frac{N_n B_0 h c}{2 M_{\Sigma 0} S_{\Pi} \lambda_m \eta_m}.$$

Здесь  $N_n$  – сигнал насыщения ячейки МФПУ, выраженный числом фотоэлектронов.

Эффективная энергетическая светимость фона при определении пороговой чувствительности МФПУ определяется по формуле

$$M_{\Sigma 0} = \int_{\Delta \lambda} M(\lambda, T_0) S(\lambda) d\lambda,$$

где  $T_0$  – нормированная температура фона,  $M(\lambda, T_0)$  – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре  $T_0$ ,  $\Delta \lambda$  – рабочий спектральный диапазон прибора.

Средняя по полю зрения эффективная энергетическая светимость фона в условиях работы прибора определяется следующим образом:

$$M_{\Sigma} = \int_{\Delta \lambda} M_{\Phi}(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

$$M_{\Phi}(\lambda) = M_{вф}(\lambda) \tau_{обт}(\lambda) \tau_{об}(\lambda) +$$

$$+ M(\lambda, T_{обт}) \varepsilon_{обт}(\lambda) \tau_{об}(\lambda) +$$

$$+ M(\lambda, T_k) [1 - \tau_{об}(\lambda) + \rho_{обт}(\lambda) \tau_{об}(\lambda)],$$

$$\varepsilon_{обт}(\lambda) = \frac{\tau(\lambda)(1-A)[1 + \{1 - \tau(\lambda)\}A]}{1 - \{1 - \tau(\lambda)\}^2 A^2},$$

$$\rho_{обт}(\lambda) = 1 - \tau(\lambda) + \frac{\tau^2(\lambda)\{1 - \tau(\lambda)\}A^2}{1 - \{1 - \tau(\lambda)\}^2 A^2},$$

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_{обт}(\lambda)A}{1 + \tau_{обт}(\lambda)A} \times$$

$$\times \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{(1 + \tau_{обт}(\lambda)A)(1 - A^2)}{\tau_{обт}(\lambda)A^3}} \right),$$

$$A = \exp(-\alpha_{обт} l_{обт}).$$

Здесь  $M_{\Phi}(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической светимости фона (внешнего и внутри-приборного);

$M_{вф}(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической светимости внешнего фона в зависимости от условий наблюдения объекта (высота

объекта и носителя, состояние атмосферы, положение Солнца);

$M(\lambda, T_{обт})$  – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре обтекателя  $T_{обт}$ ;

$M(\lambda, T_k)$  – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре внутри корпуса  $T_k$ ;

$\varepsilon_{обт}(\lambda)$  – спектральный коэффициент излучения обтекателя;

$\rho_{обт}(\lambda)$  – спектральный коэффициент отражения обтекателя;

$\tau(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания границы “обтекатель – воздух”;

$\alpha_{обт}$  – показатель ослабления материала обтекателя;

$l_{обт}$  – толщина обтекателя.

В случае применения пространственных фильтров коэффициенты  $n_{в}$  и  $n_{н}$  рассчитываются следующим образом:

$$n_{в} = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^2,$$

$$n_{н} = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq} \left( \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N h_{rs} R_{pqrs} \right),$$

$$R_{pqrs} = \exp \left( - \frac{\sqrt{(p-r)^2 + (q-s)^2}}{\varphi_{н} / (\Delta a / f)} \right),$$

где  $h_{pq}$  и  $h_{rs}$  – весовые коэффициенты элементов двухмерного пространственного фильтра с индексами соответственно  $p, q, r, s$ ;  $N \times N$  – формат пространственного фильтра,  $R_{pqrs}$  – корреляционная функция фона,  $\varphi_{н}$  – средний угловой размер фоновых неоднородностей,  $\Delta a$  – шаг элементов МФПУ,  $f$  – фокусное расстояние оптической системы.

Эффективная облученность входного зрачка прибора, эквивалентная шуму, определяется для центра поля зрения оптической системы прибора с учетом вышеперечисленных шумовых составляющих:

$$\Delta E_{эш} = 4 \sqrt{\Delta P_{т}^2 + \Delta P_{\Phi}^2 + \Delta P_{п}^2 + \Delta P_{н}^2 + \Delta P_{с}^2} / \pi D_{вх.зр}^2,$$

где  $D_{вх.зр}$  – диаметр входного зрачка оптической системы.

Дальность обнаружения объекта  $D$  определяется из условия

$$P_{обн}(D) = P_{обн.тр},$$

где  $P_{обн}(D)$  – вероятность обнаружения объекта на дистанции  $D$ ;  $P_{обн.тр}$  – требуемая вероятность обнаружения (обычно  $P_{обн.тр} \geq 0,9$ ).

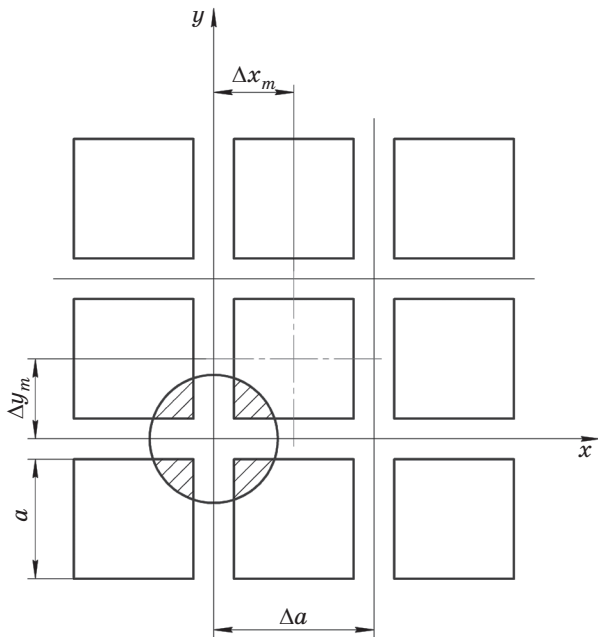


Рис. 1. К расчету вероятности обнаружения.

Предполагается использование алгоритма порогового обнаружения объектов. Относительный порог обнаружения  $\mu$  задается в соответствии с критерием Неймана–Пирсона, исходя из требуемой вероятности ложной тревоги  $P_{лт}$ , определяющейся средней частотой ложных тревог  $F_{лт}$  (обычно  $F_{лт} \leq 10^{-3}-10^{-4}$  Гц), –

$$\mu = \Phi^{-1}(1 - 2P_{лт}), \quad P_{лт} = F_{лт} / (FR_{стр}R_{ст}),$$

где  $\Phi^{-1}(\dots)$  – функция, обратная интегралу вероятности;  $F$  – частота считывания кадров МФПУ;  $R_{стр}$  и  $R_{ст}$  – количество элементов разложения изображения по строке и столбцу МФПУ соответственно.

Вероятность обнаружения объекта на дистанции  $D$  рассчитывается в зависимости от координат  $\Delta x$  и  $\Delta y$  смещений центра “энергетической тяжести” (тяжести) изображения объекта относительно центра элемента МФПУ (рис. 1) с последующим усреднением по  $\Delta x$  и  $\Delta y$  и определяется как

$$P_{обн}(D) = \frac{\int_0^{\Delta x_m} \int_0^{\Delta y_m} P_{обн}(D, \Delta x, \Delta y) d(\Delta x) d(\Delta y)}{\Delta x_m \Delta y_m}. \quad (1)$$

$$P_{обн}(D, \Delta x, \Delta y) = \begin{cases} \max_{i,j} P_{обн.ij}(D, \Delta x, \Delta y) & \text{без пространственной фильтрации,} \\ \max_{u,v} P_{обн.uv}(D, \Delta x, \Delta y) & \text{с пространственной фильтрацией,} \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 1 показаны максимальные значения смещений  $\Delta x_m = \Delta y_m = \Delta a/2$ , при этом величины  $\Delta x$  и  $\Delta y$  изменяются от 0 до  $\Delta a/2$ . За начало отсчета координат  $x$  и  $y$  принято положение центра тяжести изображения объекта.

Объект считается точечным ввиду малости его угловых размеров.

Функция рассеяния точки оптической системы аппроксимируется [1] гауссоидой с параметром  $\sigma_{oc}$ , определяемым концентрацией энергии  $k_3$  точечного источника излучения на элементе МФПУ при совпадении центра тяжести изображения этого источника и центра элемента МФПУ, –

$$\sigma_{oc} = \frac{a}{2\Phi^{-1}(\sqrt{k_3})},$$

где  $a = \sqrt{S_{п}}$  – размер фоточувствительного элемента МФПУ.

С учетом движения изображения объекта вдоль одной оси (например вдоль оси  $x$ ) пространственное распределение энергии по изображению точечного объекта имеет следующий вид:

$$E(x, y) = \frac{\exp(-y^2/2\sigma_{oc}^2)}{2\Delta_{см}\sigma_{oc}\sqrt{2\pi}} \left[ \Phi\left(\frac{2x + \Delta_{см}}{2\sigma_{oc}}\right) - \Phi\left(\frac{2x - \Delta_{см}}{2\sigma_{oc}}\right) \right],$$

$$\Delta_{см} = ftg(\omega_0 t_n).$$

Здесь  $\Phi(\dots)$  – интеграл вероятности,  $\Delta_{см}$  – линейное перемещение центра тяжести изображения точечного объекта за время накопления МФПУ,  $\omega_0$  – угловая скорость перемещения объекта в поле зрения прибора.

Функция  $E(x, y)$  соответствует условию нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) dx dy = 1.$$

Условная вероятность обнаружения для координат  $\Delta x$  и  $\Delta y$  смещений центра тяжести изображения объекта относительно центра элемента МФПУ с учетом функции  $E(x, y)$ , а также с учетом шума, вызванного излучением объекта, определяется как

где

$$P_{обн.ij}(D, \Delta x, \Delta y) = \left( 1 + \Phi \left[ \frac{\Delta E_{об}(D)k_{ij}(\Delta x, \Delta y) - \mu \Delta E_{эш}}{\sqrt{\Delta E_{эш}^2 + \Delta E_{эш.o.ij}^2(D, \Delta x, \Delta y)}} \right] \right) / 2,$$

$$P_{обн.uv}(D, \Delta x, \Delta y) = \left( 1 + \Phi \left[ \frac{\Delta E_{об}(D)k_{uv}(\Delta x, \Delta y) - \mu \Delta E_{эш}}{\sqrt{\Delta E_{эш}^2 + \Delta E_{эш.o.uv}^2(D, \Delta x, \Delta y)}} \right] \right) / 2,$$

$$\Delta E_{эш.o.ij}(D, \Delta x, \Delta y) = \sqrt{\frac{\Delta E_{об}(D)k_{ij}(\Delta x, \Delta y)hc}{S_{вх.зр} t_{\text{н}} \lambda_m \eta_m k_{\text{н}}} + \left\{ \sigma_{\text{ч}} \Delta E_{об}(D)k_{ij}(\Delta x, \Delta y) \right\}^2},$$

$$\Delta E_{эш.o.uv}(D, \Delta x, \Delta y) = \sqrt{\sum_{u=1}^{(M-N+1)} \sum_{v=1}^{(M-N+1)} \left( \sum_{i=u}^{(u+N-1)} \sum_{j=v}^{(v+N-1)} \Delta E_{эш.o.ij}^2(D, \Delta x, \Delta y) h_{pq} \right)},$$

$$k_{ij}(\Delta x, \Delta y) = \int_{\{\Delta x + \Delta a(i-i_0) + a/2\}}^{\{\Delta x + \Delta a(i-i_0) - a/2\}} \int_{\{\Delta y - \Delta a(j-j_0) + a/2\}}^{\{\Delta y - \Delta a(j-j_0) - a/2\}} E(x, y) dx dy,$$

$$k_{uv}(\Delta x, \Delta y) = \sum_{u=1}^{(M-N+1)} \sum_{v=1}^{(M-N+1)} \left( \sum_{i=u}^{(u+N-1)} \sum_{j=v}^{(v+N-1)} k_{ij}(\Delta x, \Delta y) h_{pq} \right),$$

$$p = i - u + 1, \quad q = j - v + 1,$$

$$\Delta E_{об}(D) = \frac{S_o}{D^2} \int_{\Delta \lambda} \{B_o(\lambda, T_o) - B_{\text{фо}}(\lambda)\} \tau_a(\lambda, D) S_{\text{отн}}(\lambda) d\lambda,$$

$$S_{\text{отн}}(\lambda) = \tau_{\text{обт}}(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) S(\lambda) / \max\{\tau_{\text{обт}}(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) S(\lambda)\}.$$

Здесь  $i$  и  $j$  – индексы элементов сигнального кластера формата  $M \times M$  (где  $M \leq \min(R_{\text{стр}}, R_{\text{ст}})$  и является нечетным числом);

$i_0 = j_0 = (M + 1)/2$  – индексы центрального элемента сигнального кластера, на котором находится центр тяжести изображения объекта;

$u$  и  $v$  – индексы элементов реконструированного пространственным фильтром формата  $N \times N$  (где  $N \leq M$ ) изображения в сигнальном кластере;

$h_{pq}$  – весовые коэффициенты элементов пространственного фильтра с индексами  $p$  и  $q$ ;

$P_{обн.ij}$  и  $P_{обн.uv}$  – условные вероятности обнаружения объекта на элементах с индексами  $i, j$  и  $u, v$  соответственно без пространственной фильтрации и с использованием пространственного фильтра;

$k_{ij}$  и  $k_{uv}$  – доля энергии излучения объекта на элементах с индексами  $i, j$  и  $u, v$  соответственно без пространственной фильтрации и с использованием пространственного фильтра;

$\Delta E_{об}(D)$  – эффективная облученность входного зрачка оптической системы прибора от объекта на дистанции  $D$ , приведенная к длине волны максимума спектральной характеристики чувствительности прибора;

$S_o$  – площадь объекта;

$B_o(\lambda, T_o)$  – спектральная плотность энергетической яркости объекта при температуре  $T_o$ ;

$B_{\text{фо}}(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической яркости фона, на котором визируется объект;

$\tau_a(\lambda, D)$  – спектральный коэффициент пропускания атмосферы на дистанции  $D$ ;

$S_{\text{отн}}(\lambda)$  – относительная спектральная характеристика чувствительности прибора;

$\Delta E_{эш.o.ij}$  и  $\Delta E_{эш.o.uv}$  – эффективные облученности входного зрачка, эквивалентные шуму, вызванному излучением объекта, на элементах с индексами  $i, j$  и  $u, v$  соответственно без пространственной фильтрации и с использованием пространственного фильтра.

Недостатком вышеизложенной методики является отсутствие учета изменения интен-



сивности излучения объекта от времени. Этот фактор может оказаться весьма существенным при анализе эффективности смотряще-сканирующих систем.

Рассмотрим временной ход силы излучения типового для таких систем объекта, представленный на рис. 2. Как видно, в моменты времени  $t \leq 0,5$  с излучение наиболее интенсивно, следовательно, покрытие объекта проекцией кадра МФПУ в пространство объектов в эти моменты времени обеспечит наибольшую дальность его обнаружения. Очевидно, что при увеличении периода обзора  $T_{обз}$  вероятность накрытия объекта в момент его наиболее яркого излучения снижается.

С другой стороны, поле зрения определяется в зависимости от зоны обзора по азимуту и углу места, частоты кадров МФПУ и периода обзора  $T_{обз}$  так, чтобы при сканировании зоны обзора любая точка этой зоны была накрыта кадром МФПУ хотя бы один раз, что позволяет уменьшать поле зрения с увеличением периода обзора, приводя при прочих равных условиях к увеличению отношения сигнал/шум [6].

Исходя из вышеуказанных предпосылок, можно сделать предположение о наличии некоторого значения периода обзора, при котором дальность обнаружения объекта за время, не превышающее максимально допустимое (принятое равным 4,5 с), максимальна. Назовем “оптимальным” наименьший период обзора, при котором достигается максимальная дальность обнаружения на заданном интервале времени (иными словами, нижнюю границу на множестве значений периода обзора, обеспечивающих локальный максимум дальности обнаружения).

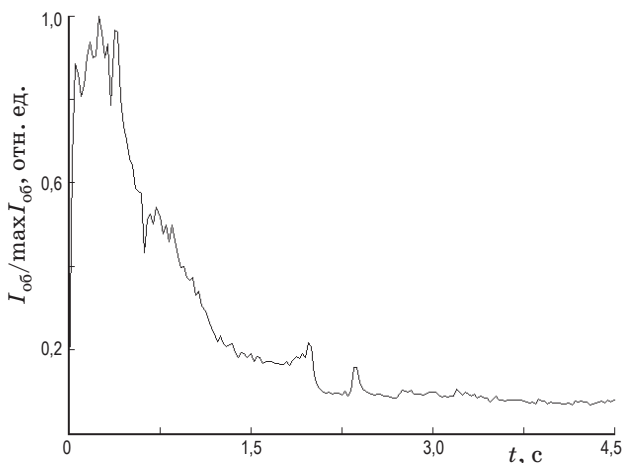


Рис. 2. Временной ход силы излучения объекта.

Оптимальное значение периода обзора  $T_{обз.о}$  определяется из следующих условий:

$$T_{обз.о}(I_{об}(t), F_{лт}, P_{обн.тр}) = \inf \left\{ T_{обз} \left( D_{\max}(I_{об}(t), H, \sigma_{\phi}^2, \varphi_{н}, t_{н.о}, F_{лт}, P_{обн.тр}) \right) \right\},$$

$$t_{н.о}(I_{об}(t), T_{обз}, F_{лт}, P_{обн.тр}) = t_{н} \left( \max_{t_{н}=1 \dots 100 \text{ мкс}} D(I_{об}(t), 2\omega(T_{обз}), \omega_o, H, \varphi_{н}, \sigma_{\phi}^2, F_{лт}, P_{обн.тр}) \right),$$

где  $t_{н.о}$  — “единое” оптимальное время накопления для варьируемых параметров,

$I_{об}(t)$  — временной ход силы излучения объекта,

$H$  — высота носителя прибора и объекта,

$2\omega$  — поле зрения,

$D_{\max}(I_{об}(t), H, \sigma_{\phi}^2, \varphi_{н}, t_{н.о}, F_{лт}, P_{обн.тр})$  — локальный максимум зависимости дальности обнаружения  $D$  от периода обзора  $T_{обз}$  в диапазоне значений  $T_{обз} = 0-4,5$  с при фиксированных  $I_{об}(t), H, \sigma_{\phi}^2, \varphi_{н}, t_{н.о}, F_{лт}, P_{обн.тр}$ .

Для расчета оптимального периода обзора методика [5] была доработана с учетом временного хода силы излучения объекта  $I_{об}(t)$  и текущего значения периода обзора  $T_{обз}$ , в результате чего вероятность обнаружения на любой дальности определяется как среднее значение для всех величин силы излучения в интервале времени  $t = 0-T_{обз}$  —

$$P_{обн}(D) = \left( \int_0^{T_{обз}} P_{обн}(D, t) dt \right) / T_{обз},$$

где  $P_{обн}(D, t)$  — вероятность обнаружения объекта с силой излучения  $I_{об}(t)$  на дистанции  $D$  с учетом случайного расположения центра изображения объекта относительно структуры МФПУ, определяемая для каждого значения  $I_{об}(t)$  по формулам (1) и (2).

Таким образом, учитываются возможности накрытия цели в момент наиболее яркого ее излучения в предположении, что вероятность появления цели в любой точке поля обзора в любой момент времени одинакова.

Рассмотрим случай использования равномерного закона сканирования полусферического поля обзора по азимуту и углу места как наиболее часто реализуемого. Поле зрения определяется из условия заполнения с некоторым перекрытием  $k_{у.п}$  поля обзора  $t_{обз} F$  числом кадров ( $t_{обз} = T_{обз} \eta_{ск}$  — время обзора,  $\eta_{ск}$  — коэффициент полезного действия скани-

рования,  $k_{y.п}$  – некоторый коэффициент увеличения поля зрения для создания небольшого перекрытия кадров) по угломестной и азимутальной координатам

$$2\omega = 2\omega_1 k_{y.п},$$

где

$$2\omega_1 = \frac{\alpha_{обз} + \sqrt{\alpha_{обз}^2 + 4t_{обз}F\alpha_{обз}\beta_{обз}}}{2t_{обз}F}.$$

Параметры закона сканирования в зависимости от периода обзора определяются следующим образом:

$$N_{об} = \frac{\beta_{обз}}{2\omega_1} + 1, \quad \omega_{аз} = \frac{N_{об}\alpha_{обз}}{t_{обз}},$$

$$\beta_{min} = \omega_1; \quad \beta_{max} = \beta_{обз} - \omega_1,$$

$$t_{н.п} = t_{обз}/N_{об}, \quad t_{к.п} = t_{обз} - t_{н.п},$$

$$\omega_{ум} = \frac{\beta_{max} - \beta_{min}}{t_{к.п} - t_{н.п}}.$$

Здесь  $\alpha_{обз}$  и  $\beta_{обз}$  – поля обзора в азимутальном и угломестном направлениях, равные для полусферы  $360^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно;

$N_{об}$  – количество оборотов азимутального привода за время обзора  $t_{обз}$ ,

$\omega_{аз}$  и  $\omega_{ум}$  – угловые скорости сканирования по азимуту и углу места соответственно,

$\beta_{min}$  и  $\beta_{max}$  – начальное и конечное положение поля зрения по углу места,

$t_{н.п}$  и  $t_{к.п}$  – моменты начала и окончания “подъема” поля зрения по углу места.

Ниже приводятся формулы, описывающие законы сканирования  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$  по азимуту и углу места за один цикл сканирования:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \omega_{аз}t,$$

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_{min} & \text{при } t \leq t_{н.п}, \\ \beta_{min} + \omega_{ум}(t - t_{н.п}) & \text{при } t_{н.п} < t \leq t_{к.п}, \\ \beta_{max} & \text{при } t_{к.п} < t \leq t_{обз}. \end{cases}$$

Здесь  $\alpha_0$  – начальное положение по азимуту.

Фокусное расстояние и диаметр входного зрачка оптической системы прибора в зависимости от поля зрения составляют соответственно

$$f = l_k/2\sin\omega, \quad D_{вх.зр} = f/K,$$

где  $l_k$  – размер кадра МФПУ, определяющийся количеством элементов разложения изображе-

ния по строке  $R_{стр}$  или по столбцу  $R_{ст}$ . В данном случае предполагается, что  $R_{стр} = R_{ст}$ , т. е. кадр представляет собой квадрат размером  $l_k \times l_k$ , где  $l_k = R_{стр}\Delta a = R_{ст}\Delta a$ .

Расчеты дальности обнаружения объекта проводились при значениях периода обзора  $T_{обз} = 0,25-4,5$  с, требуемой вероятности обнаружения  $P_{обн.тр} = 0,95$  и средней частоты ложных тревог  $F_{лт} = 10^{-4}$  Гц. Коэффициент полезного действия сканирования принят равным  $\eta_{ск} = 0,8$ .

В аппаратуре используется МФПУ на основе соединения кадмий–ртуть–теллур (КРТ), чувствительное в диапазоне  $3,5-5,0$  мкм. Частота кадров МФПУ составляет  $F = 370$  Гц при формате изображения  $256 \times 256$  элементов.

Угловая скорость перемещения объекта в поле зрения принята равной угловой скорости азимутального сканирования

$$\omega_o = \omega_{аз}.$$

Расчет спектрального коэффициента пропускания атмосферы  $\tau_a(\lambda, D)$ , спектральной плотности энергетической светимости внешнего фона  $M_{вф}(\lambda)$  и спектральной плотности энергетической яркости фона  $V_{фо}(\lambda)$ , на котором визируется объект, был проведен по специализированной программе Atm2005 (разработки ГИПО) при следующих условиях:

- модель атмосферы – “среднеширотное лето”,
- метеорологическая дальность видимости  $S_m = 10$  км,
- модель аэрозоля – “сельский”,
- высота носителя прибора и объекта  $H = 0, 5, 10$  км,
- зенитный угол Солнца  $z_s = 30^\circ$ .

В расчетах принято, что пространственный шум, вызванный разбросом чувствительности элементов МФПУ, скорректирован до уровня временного шума.

При расчете составляющей шума  $\Delta P_n$  использовался ряд значений  $\sigma_{\phi}^2$ , соответствующих экспериментальным данным дисперсии яркости фонов в рабочем спектральном диапазоне прибора для следующих фоновых ситуаций:

- 1)  $\sigma_{\phi}^2 = 0$  (Вт/см<sup>2</sup> ср)<sup>2</sup> – равномерный фон;
- 2)  $\sigma_{\phi}^2 = 10^{-12}$  (Вт/см<sup>2</sup> ср)<sup>2</sup> – слабый фон (земные фоны в холодное время года, чистое небо на средних и больших высотах);
- 3)  $\sigma_{\phi}^2 = 10^{-11}$  (Вт/см<sup>2</sup> ср)<sup>2</sup> – средний фон (горизонт, слоисто-кучевые и кучевые облака, земные фоны летом при визировании со средних и больших высот);

4)  $\sigma_{\Phi}^2 = 10^{-10}$  (Вт/см<sup>2</sup> ср)<sup>2</sup> – сильный фон (земные фоны летом при наблюдении с малых высот).

Средний угловой размер фоновых неоднородностей был принят  $\varphi_n = 0,5^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ .

Для конкретизации расчетов остальные параметры оптического датчика имели следующие значения:  $S_n = 7,84 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>,  $\lambda_m = 4,6$  мкм,  $\eta_m = 0,77$ ,  $D_m^* = 5,0 \times 10^{11}$  см Гц<sup>1/2</sup>/Вт,  $N_n = 3,7 \times 10^7$  фотоэлектронов,  $T_0 = 293$  К,  $K_0 = 2$ ,  $\sigma_{вр0} = 0,1$ ,  $R_{стр} = R_{ст} = 256$ ,  $\Delta a = 30$  мкм,  $N_c = 500$  фотоэлектронов,  $K = 2$ ,  $k_3 = 0,7$ ,  $k_n = 0,59$ .

Коэффициент увеличения поля зрения  $k_{y,п}$  принят равным 1,1.

Условный источник излучения с площадью  $S_0 = 450$  см<sup>2</sup> (в пиковый момент излучения) для расчета дальности обнаружения был принят в виде абсолютно черного тела при температуре  $T_0 = 2000$  К.

Расчеты проводились для горизонтальных трасс на высотах  $H = 0, 5, 10$  км для случаев отсутствия пространственной фильтрации и применения пространственного фильтра формата 6×6 элементов, весовые коэффициенты которого приведены ниже:

$$h_{pq} = \begin{cases} 1 & \text{если } (p = 3; 4) \cap (q = 3; 4), \\ -0,125 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Для всех рассматриваемых случаев для каждого значения периода обзора определялось оптимальное время накопления МФПУ, при котором дальность обнаружения объекта

на среднем фоне максимальна. Рассматривался сигнальный кластер формата 15×15 элементов, в который укладывалось практически все изображение объекта при значениях времени накопления  $t_n \leq 100$  мкс и при всех рассмотренных значениях периода обзора (смаз изображения  $\Delta_{см}$  вдоль оси  $x$  при заданных параметрах системы составлял не более 8,7 элемента МФПУ). Формат реконструированного вышеупомянутым 36-элементным пространственным фильтром изображения в сигнальном кластере составил, следовательно, 10×10 элементов.

В работе [7] показано, что оптимальное время накопления варьируется в зависимости от дисперсии энергетической яркости фоновых неоднородностей, однако проведенные в данной работе расчеты показали, что выбор “единого” оптимального времени накопления, соответствующего среднему фону  $\sigma_{\Phi}^2 = 10^{-11}$  (Вт/см<sup>2</sup> ср)<sup>2</sup>, не приводит к существенному уменьшению дальности обнаружения на всех остальных фонах. Ввиду того, что время прохождения центром абберационного пятна рассеяния расстояния, равного шагу МФПУ  $\Delta a$ , мало изменяется в зависимости от периода обзора (при значениях периода обзора 0,25–4,5 с это время составляет 11,52–11,61 мкс), можно принять для всех значений периода обзора одинаковое оптимальное время накопления, что также не приводит к существенному уменьшению дальности обнаружения.

Таким образом, некое “единое” для ряда ситуаций оптимальное время накопления составило

$$t_{н.о} = \begin{cases} 16 \text{ мкс} & \text{без пространственной фильтрации,} \\ 26 \text{ мкс} & \text{с 36-элементным пространственным фильтром.} \end{cases}$$

На рис. 3 для примера приведены результаты расчета дальности обнаружения объекта с переменной силой излучения на горизонтальной трассе высотой  $H = 5$  км в зависимости от периода обзора и уровня фоновых неоднородностей без пространственной фильтрации и с использованием пространственного фильтра при  $\varphi_n = 0,5^\circ$ .

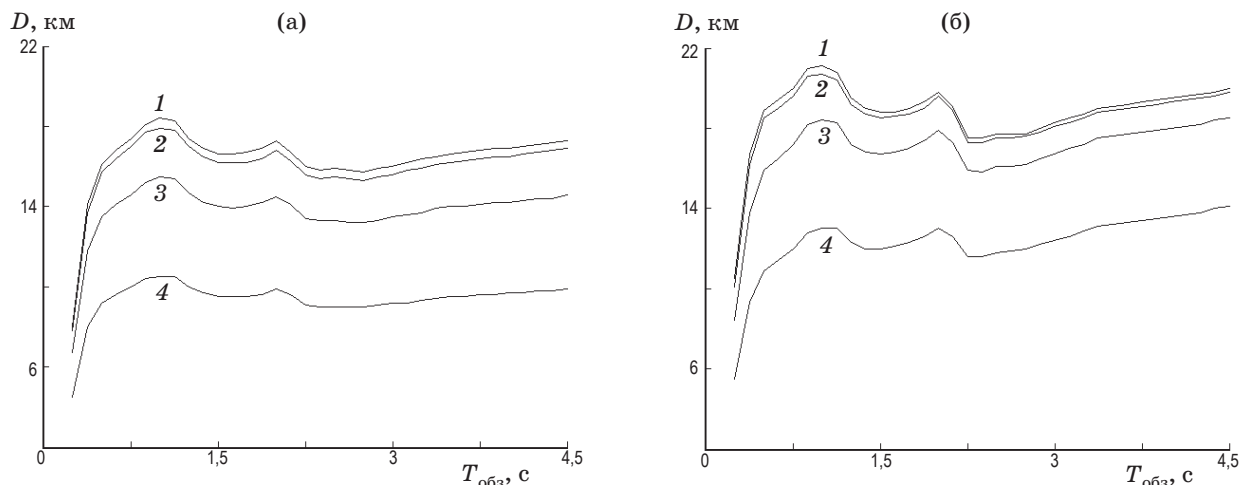
Можно видеть, что оптимальное по критерию “обнаружение на наибольшей дальности за наименьшее время” значение периода обзора  $T_{обз.о}$  составляет около 1 с и практически не зависит от условий наблюдения и примене-

ния пространственной фильтрации. Это свойство сохраняется и при других значениях  $H$  и  $\varphi_n$ , а также при уменьшенной и увеличенной вдвое с сохранением временного хода силой излучения.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

– разработана методика, позволяющая оптимизировать период обзора и время экспонирования МФПУ по критерию максимальной дальности обнаружения за минимальное время при заданной вероятности правильного обнаружения и частоте ложных тревог;





**Рис. 3.** Зависимость дальности обнаружения объекта от периода обзора и уровня фоновых неоднородностей.  $H = 5$  км, 1 – равномерный фон, 2 – слабый фон, 3 – средний фон, 4 – сильный фон. а – без пространственной фильтрации, б – с пространственной фильтрацией  $\varphi_H = 0,5^\circ$ .

– оптимальное значение периода обзора системы обнаружения объекта с принятым относительным временным ходом силы излучения при заданном законе сканирования по совокупности рассмотренных условий наблюдения (высота объекта и носителя, дисперсия энергетической яркости фоновых неоднородностей и их средний угловой размер) составило около 1 с;

– отступление на 0,5 с в большую или меньшую сторону от  $T_{\text{обз.о}}$  в рассмотренных случаях

приводит к уменьшению дальности обнаружения не более, чем на 20%;

– значение  $T_{\text{обз.о}}$  практически не зависит от абсолютного значения силы излучения объекта.

Отметим, что окончательный выбор периода обзора смотряще-сканирующей системы осуществляется с учетом особенностей конкретной конструкции сканирующего узла, возможностей азимутального и угломестного приводов, а также габаритных и массовых характеристик.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 416 с.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
3. Naveh O. Sensitivity of scanning and staring infrared seekers for air-to-air missiles // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 692–711.
4. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. М.: Советское радио, 1971. 200 с.
5. Габдрахманов Т.Р., Овсянников В.А., Яцык В.С. К развитию методик оценки дальности действия несканирующих авиационных приборов оптической локализации // Сб. матер. XX Всерос. межвуз. научно-технич. конф. Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Казань: Отечество, 2008. Ч. 2. С. 283–284.
6. Габдрахманов Т.Р., Яцык В.С. К вопросу выбора матричного фотоприемного устройства для смотряще-сканирующей оптико-электронной системы обнаружения высокотемпературных объектов // Сб. матер.

XXI Всерос. межвуз. научно-технич. конф. Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Казань: Отечество, 2009. Ч. 2. С. 228–230.

7. *Габдрахманов Т.Р., Язык В.С.* Оптимизация времени накопления сигнала смотряще-сканирующей оптико-электронной системы обнаружения малоразмерных объектов // Междунар. оптический конгресс “ОПТИКА–XXI век”. Санкт-Петербург. Труды общества им. Д.С. Рождественского. Междунар. конф. “Прикладная оптика-2008”. Том 1. Оптическое приборостроение. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. С. 21–27.
-