

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.384.32

## МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НЕСКАНИРУЮЩИХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

© 2012 г. В. П. Иванов, доктор техн. наук; В. А. Овсянников, доктор техн. наук;  
В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: progipo@tnpko.ru

Предложен аналитический метод оптимального выбора основных технических параметров, а также параметров объектива несканирующего тепловизионного прибора, обеспечивающий вероятности обнаружения или распознавания заданной совокупности объектов, не меньшие требуемых значений, и минимальное значение диаметра объектива прибора, а значит, и его минимальные стоимостные и массогабаритные показатели.

**Ключевые слова:** тепловизионный прибор, оптимизация, эффективность, вероятность вскрытия.<sup>1</sup>

Коды OCIS: 120.4640.

Поступила в редакцию 18.05.2011.

### Введение и постановка задачи

При проектировании тепловизионных приборов (ТВП), как правило, возникает задача оптимального выбора их основных технических параметров, максимизирующего некий критерий качества этих ТВП. Обычно качество любой системы определяется с помощью двух показателей, имеющих достаточно общий характер, – эффективность  $\eta$  и стоимость  $V$ . Пусть для ТВП известны зависимости  $\eta(\mathbf{S})$  и  $V(\mathbf{S})$ , где  $\mathbf{S}$  – вектор искомых параметров ТВП. На практике обычно требуется обеспечить гарантированный уровень эффективности ТВП, не меньший требуемого значения  $\eta^*$ , и тогда общую задачу оптимального проектирования ТВП можно сформулировать следующим образом: для уровня эффективности  $\eta(\mathbf{S}) \geq \eta^*$  определить вектор параметров  $\mathbf{S}$ , для которого  $V(\mathbf{S}) = V_{\min}$ . При этом эффективность ТВП, как и любой другой видовой аппаратуры, целесообразно оценивать вероятностью  $P$  вскрытия

(обнаружения или распознавания) объектов местности, приняв  $\eta \equiv P$ .

Важнейшими компонентами ТВП, определяющими в значительной мере его стоимость, являются объектив и фотоприемное устройство (ФПУ), параметры которых подлежат первоочередному выбору. Поскольку образцы ФПУ обычно разрабатываются и изготавливаются отдельно и их номенклатура ограничена, сочетание параметров ФПУ, в отличие от параметров объектива, можно варьировать лишь дискретно, а для выбранного типа ФПУ минимизация стоимости ТВП нередко достигается путем минимизации диаметра его объектива, одновременно снижающей и массогабаритные показатели ТВП.

Таким образом, общая проблема оптимального синтеза ТВП значительно конкретизируется и по существу сводится к следующей задаче: для выбранного ФПУ необходимо найти значения таких основных технических параметров ТВП, как разность температур, эквивалентная шуму, и эффективная величина элементарного поля зрения, а также соответствующие значения диаметра объектива  $D_{об}$  и его фокусного расстояния  $f$ . Эти параметры для данного ТВП

<sup>1</sup> Под термином “вскрытие” понимается обнаружение и/или распознавание объекта. В англоязычной научно-технической литературе используется термин “acquisition”.

должны обеспечивать вероятность вскрытия  $P_i$  каждого из  $s$  различных объектов ( $i = \overline{1, s}$ ;  $s$  – любое целое) с соответствующими параметрами не меньше требуемых значений  $P_i^*$  при минимальном диаметре объектива. Насколько нам известно, в такой постановке задача оптимизации ТВП другими авторами не рассматривалась.

### Обоснование метода оптимизации

Выделим из заданных  $s$  объектов некоторый объект с номером  $j$ . Эмпирическое выражение для соответствующей вероятности вскрытия  $P_j$  хорошо аппроксимируется формулой [1]

$$P_j = 1 - \exp\left[-0,7 \left(\frac{N_j \gamma_0}{2C_j}\right)^2\right], \quad (1)$$

$$N_j = h_j/A_j, \quad h_j = \sqrt{S_j},$$

где  $h_j$  – критический размер  $j$ -го объекта в картинной плоскости,

$S_j$  – площадь  $j$ -го объекта,

$A_j$  – разрешение на местности – полупериод эквивалентной тепловой миры, разрешаемой с вероятностью 0,5;

$C_j$  – критерий Джонсона, отвечающий задаче вскрытия  $j$ -го объекта, средние значения которого, заимствованные из [2–4], приведены в табл. 1;

$\gamma_0$  – показатель квалификации оператора, равный 0,65–1,5 (от низкой до высокой соответственно).

Величина  $A_j$  в (1) рассчитывается по относительной температурно-частотной характе-

ристике (ТЧХ)  $E(x)$ , которая для несканирующих ТВП определяется приближенной формулой [1]

$$E(x) = \frac{|\Delta T_R| \tau_a r \alpha \vartheta}{\Delta T} = \max\left(0,3; \frac{3x}{K_\Sigma(x)}\right),$$

$$r = \frac{\sqrt{1 + \exp(-1/T_{\text{гл}} F)}}{\sqrt{1 - \exp(-1/T_{\text{гл}} F)}},$$

$$x = \nu \delta, \quad \vartheta = a/\Delta a, \quad \vartheta = \delta/\delta_0, \quad \delta_0 = a/f,$$

$$\nu = \frac{D}{2A} = \frac{DN}{2h}, \quad (2)$$

$$K_\Sigma(x) = \exp(-2\pi^2 \rho^2 x^2), \quad \rho = 0,55,$$

$$\alpha = n_c/R_c = n_k/R_k,$$

$$T_{\text{гл}} = 0,019 + 0,062(0,31/L')^{0,17},$$

где  $\nu$  – угловая частота разрешаемой эквивалентной тепловой миры,

$x$  – относительная частота этой миры,

$\Delta T_R$  – разность радиационных температур объекта и фона,

$D$  – дистанция до объекта,

$\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы на дистанции  $D$  в спектральном рабочем диапазоне ТВП  $\Delta\lambda$  (может быть найден, например, по методике [1]);

$T_{\text{гл}}$  – постоянная времени глаза,

$F$  – частота кадров ТВП,

$\delta$  и  $\delta_0$  – эффективное и номинальное значения элементарного поля зрения ТВП соответственно,

$\Delta T$  – разность температур, эквивалентная шуму;

$a$  – размер элемента ФПУ,

Таблица 1. Средние значения критерия Джонсона при вскрытии объектов

Задача	Условия	$C_j$
Обнаружение	Фон однородный или объект движущийся (на любом фоне)	0,5
	Фон со слабой неоднородностью (снежное поле, любой фон в дождь)	0,75
	Фон со средней неоднородностью (поле, луг, лес, море)	1,5
	Фон с сильной неоднородностью (горы, пустыня, город)	3
Классификация	Алфавит, содержащий сильно различающиеся классы объектов: гусеничная техника, колесная техника, самолеты, вертолеты, люди, животные и др.	3
Различение	Алфавит, содержащий похожие классы объектов (танки и БМП или автомашины и БТР, и др.)	3,5
Опознавание	Алфавит, содержащий сильно различающиеся типы объектов, в частности опознавание “свой-чужой” (танки Т-72 и М1А1, и др.)	5
Идентификация	Алфавит, содержащий похожие типы объектов (танки М1А1 и М1А2 или БМП-1, БМП-2 и БМП-3, и др.)	7
Селекция	Алфавит, содержащий реальный объект и его макет (имитатор)	7,5

$\Delta a$  – шаг элементов ФПУ,

$n_c$  и  $n_k$  – число элементов изображения по строке и кадру,

$R_c$  и  $R_k$  – число элементов (формат) ФПУ по строке и кадру,

$L'$  – яркость изображения фона,

$K_\Sigma(x)$  – результирующая функция передачи модуляции (ФПМ) ТВП в относительных единицах,

$\alpha$  – число выборок на элемент,

$\rho$  – параметр аппроксимации.

В данной записи функции  $K_\Sigma(x)$  и  $E(x)$  являются общими для любых образцов ТВП. При этом зависимость  $E(x)$  (для  $x \leq 0,75$ ) можно приближенно аппроксимировать формулой

$$E(x) = 0,3 \exp(3,7x^2 + 4,35x). \quad (3)$$

При  $x > 0,75$  имеем  $E(x) \rightarrow \infty$ .

Следовательно, значение  $A_j$  в (1) составляет

$$A_j = \frac{D_j \delta}{2x_j},$$

$$x_j = E^{-1}(m) =$$

$$= \min(0,75; 0,59(\sqrt{1 + 0,78 \ln(m/0,3)} - 1)), \quad (4)$$

$$m = \frac{|\Delta T_{Rj}| \tau_{aj} r \alpha \alpha \vartheta}{\Delta T}, \quad (m \geq 0,3),$$

где  $m$  – отношение сигнал/шум.

При этом если в ТВП имеет место четырехпозиционное микросканирование, то в (2) и (4) значение  $\alpha = 2$ , а в отсутствие микросканирования  $\alpha = 1$ .

В случае использования динамической ТЧХ, наиболее адекватно отражающей эффективность несканирующих ТВП, пространственный шум, вызванный остаточной неоднородностью чувствительности элементов матричного ФПУ, по сути, преобразуется во временной, не коррелированный в смежных кадрах [1]. Поэтому можно считать, что разность температур  $\Delta T$ , эквивалентная шуму, составляет

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_{вр}^2 + \Delta T_{пр}^2},$$

где  $\Delta T_{вр}$  и  $\Delta T_{пр}$  – разности температур, эквивалентные временному и пространственному шуму соответственно.

Пороговая чувствительность современных фотонных ФПУ, содержащих охлаждаемый спектральный фильтр, обычно задается разностью температур  $\Delta T_0$ , эквивалентной временному шуму, определенной в нормированных условиях – для температуры фона  $T_0$  (обычно 295 К) в отсутствие объектива при относи-

тельном отверстии охлаждаемой диафрагмы  $\varepsilon_0$  (обычно 1:2) для частоты кадров  $F_0$  (обычно 100 Гц) и уровня заполнения зарядовой емкости элемента  $\alpha_0$  (обычно 0,5). Тогда, полагая шум считывания пренебрежимо малым, можно, используя результаты работы [1], показать, что для фактических условий применения ТВП – температуры фона  $T$ , относительного отверстия охлаждаемой диафрагмы  $\varepsilon$  и частоты кадров  $F$ , – разность температур  $\Delta T_{вр}$ , эквивалентная временному шуму, составит

$$\Delta T_{вр} = (\Delta T_{\phi}^2 + \Delta T_{в}^2)^{1/2},$$

$$\Delta T_{\phi} = \frac{\Delta T_{\phi 0} \sqrt{B} \sqrt{M}}{q \sqrt{B_0} \sqrt{M_0}}, \quad (5)$$

$$\Delta T_{в} = \frac{\Delta T_{в 0} B}{q B_0},$$

$$\Delta T_{в 0} = (\Delta T_0^2 - \Delta T_{\phi 0}^2)^{1/2},$$

$$B = \frac{4}{\varepsilon^2} + 1, \quad B_0 = \frac{4}{\varepsilon_0^2} + 1,$$

$$q = Y \sqrt{F_0} \sqrt{\alpha_m} / Y_0 \sqrt{F^*},$$

$$M = \int_0^{\infty} M(\lambda) S(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) d\lambda,$$

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_0(\lambda) S(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = \frac{1,44 \times 10^4}{T^2} \int_0^{\infty} M(\lambda) S(\lambda) \tau_{об}(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) d\lambda / \lambda,$$

$$Y_0 = \frac{1,44 \times 10^4}{T_0^2} \int_0^{\infty} M_0(\lambda) S(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) d\lambda / \lambda,$$

$$F^* = \begin{cases} F & (\text{для } F \geq \alpha_0 F_0) \\ \alpha_0 F_0 & (\text{для } F \leq \alpha_0 F_0), \end{cases}$$

где  $\Delta T_{\phi}$  и  $\Delta T_{\phi 0}$  – разности температур, эквивалентные шуму фона, для фактических и нормированных условий соответственно;

$\Delta T_{в}$  и  $\Delta T_{в 0}$  – разности температур, эквивалентные внутреннему шуму, для фактических и нормированных условий соответственно;

$M(\lambda)$  и  $M_0(\lambda)$  – спектральные плотности энергетической светимости черного тела при температуре  $T$  и  $T_0$  соответственно,

$S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность ФПУ,

$\tau_{об}(\lambda)$  и  $\tau_{\phi}(\lambda)$  – спектральные коэффициенты пропускания объектива и оптического фильтра,

$\alpha_m$  – отношение времени накопления зарядов при микросканировании к таковому при его отсутствии; можно считать, что для четырехпозиционного микросканирования  $\alpha_m = 0,1-0,15$  (в отсутствие микросканирования  $\alpha_m = 1$ ).

Величина  $\Delta T_{\Phi 0}$  в (5) определяется формулой [1]

$$\begin{aligned} \Delta T_{\Phi 0} &= \frac{B_0 \sqrt{\Delta f}}{a D_m^* Y_0} = \frac{\sqrt{hc M_0 B_0 F_0}}{a Y_0 \sqrt{\lambda_m \eta_m}} \approx \\ &\approx \frac{\lambda T_0^2 \sqrt{hc B_0 F_0}}{1,44 \times 10^4 a \sqrt{\lambda_m \eta_m M_0}}, \quad (6) \\ D_m^* &= \frac{\sqrt{\lambda_m \eta_m B_0}}{\sqrt{2hc M_0}}, \\ \Delta f &= \frac{1}{2t_H} = \frac{F_0}{2}, \end{aligned}$$

где  $\Delta f$  – шумовая полоса пропускания,

$D_m^*$  – удельная обнаружительная способность ФПУ для режима ограничения фоном (ОФ) на длине волны  $\lambda_m$ , для которой  $S(\lambda_m) = S_{\max}$ ;

$\eta_m$  – квантовая эффективность ФПУ на длине волны  $\lambda_m$ ,

$\lambda$  – среднее значение длины волны спектрального рабочего диапазона  $\Delta\lambda$ ,

$h = 6,62 \times 10^{-34}$  Дж с – постоянная Планка,

$c = 3 \times 10^{10}$  мкм/с – скорость света,

$t_H$  – время накопления.

Для режима ОФ  $\Delta T_0 = \Delta T_{\Phi 0}$  и значение  $\Delta T_B = 0$ . При использовании неохлаждаемых тепловых ФПУ, работающих в режиме ограничения шумом (ОШ), в (5) следует принять  $\Delta T_{\Phi} = 0$  и  $S(\lambda) = 1$ .

Разность температур, эквивалентная пространственному шуму,  $\Delta T_{\text{пр}}$  для фотонного ФПУ равна [1]

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{M \sigma_{\text{отн}}}{Y} \approx \frac{\lambda T^2 \sigma_{\text{отн}}}{1,44 \times 10^4 \tau_{\text{об}}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{отн}}$  – относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) остаточного разброса чувствительности элементов ФПУ (обычно  $\sigma_{\text{отн}} = 10^{-5} - 10^{-3}$ );

$\tau_{\text{об}}$  – среднее значение коэффициента пропускания объектива в диапазоне  $\Delta\lambda$ .

Неохлаждаемые тепловые ФПУ воспринимают излучение во всей полусфере, поэтому для них значение  $\Delta T_{\text{пр}}$  составляет [1]

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{\sigma T^4 \sigma_{\text{отн}} B}{Y} \approx \frac{\lambda T^2 \sigma_{\text{отн}} B}{1,44 \times 10^4 \tau_{\text{об}} \tau_{\Phi} K}, \quad (8)$$

где  $K$  – доля излучения черного тела с температурой  $T$ , приходящаяся на диапазон спектра  $\Delta\lambda$ ;

$\sigma = 5,67 \times 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана;

$\tau_{\Phi}$  – среднее значение коэффициента пропускания оптического фильтра в диапазоне  $\Delta\lambda$ .

Эффективное значение элементарного поля зрения  $\delta$  – это элементарное поле зрения “нормального” ТВП, имеющего ширину ФПМ, равную таковой для данного ТВП. При этом под “нормальным” понимается ТВП, результирующая ФПМ которого, аппроксимируемая формулой

$$K_{\Sigma}(v) = \exp(-2\pi^2 \sigma_{\Sigma}^2 v^2), \quad (9)$$

где  $\sigma_{\Sigma}$  – параметр аппроксимации, в равной степени определяется ФПМ всех четырех его компонентов (объектива, ФПУ, усилителя и индикатора) с соответствующим параметром  $\sigma_0$  аппроксимирующей гауссовской функции,

причем  $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{4\sigma_0^2} = 0,55\delta_0$  [1].

Учтем далее, что в несканирующих ТВП имеет место выборка с ФПМ [2]

$$K_B(v) = \frac{\sin(\pi v \delta_0 / \alpha x)}{\pi \delta_0 / \alpha x}, \quad (10)$$

также аппроксимируемой гауссовской зависимостью вида (9) с параметром  $\delta_B = 0,28\delta_0 / \alpha x$ , и смаз изображения, возникающий при использовании динамической ТЧХ, с ФПМ, определяемой той же самой формулой (9) (т. е. с параметром аппроксимации  $\sigma_c = \sigma_B$ ), а параметр  $\sigma_{\text{и}}$  гауссовской ФПМ индикатора составляет  $\sigma_{\text{и}} = \sigma_0 / \alpha x$ . Кроме того, в действительности отношение  $\alpha_{\text{об}} = \delta_{\text{об}} / \delta_0$  углового диаметра кружка рассеяния объектива  $\delta_{\text{об}}$  к элементарному полю зрения  $\delta_0$  может существенно отличаться от 1. Тогда выражение для  $\delta$  будет иметь вид

$$\begin{aligned} \delta &= 9\delta_0, \\ 9 &= \frac{\sqrt{2\sigma_0^2 + \alpha_{\text{об}}^2 \sigma_0^2 + \sigma_B^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{\text{и}}^2}}{\sigma_{\Sigma}} = \\ &= \sqrt{0,5 + 0,25\alpha_{\text{об}}^2 + 0,77/\alpha^2 x^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом значение  $\alpha_{\text{об}}$  определяется формулой [2]

$$\alpha_{\text{об}} = \sqrt{\alpha_{\text{дэ}}^2 + \alpha_{\text{а}}^2}, \quad \alpha_{\text{дэ}} = 0,84\alpha_{\text{д}}, \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{д}} = d_{\text{д}} / a = 2,44 \times 10^{-4} \lambda / \varepsilon a, \quad \alpha_{\text{а}} = d_{\text{а}} / a,$$

где  $d_{\text{д}}$  и  $d_{\text{а}}$  – диаметры дифракционного и абберационного кружков рассеяния объектива соответственно.

Тогда, с учетом (11), получаем выражение для 9

$$\begin{aligned} \vartheta &= \sqrt{\vartheta_m^2 + \vartheta_0^2(B-1)}, \\ \vartheta_m &= \left(0,5 + 0,25(d_a/a)^2 + 0,77/\alpha^2 \alpha^2\right)^{1/2}, \\ \vartheta_0 &= 0,51 \times 10^{-4} \lambda/a. \end{aligned} \quad (13)$$

Для “нормального” ТВП имеем  $\alpha_{об} = 1$ ,  $\sigma_b = 0$ ,  $\sigma_c = 0$ ,  $\sigma_n = \sigma_0$ ,  $\vartheta = 1$ .

Рассматривая для простоты два предельных случая – режим ОФ ( $\Delta T_b = 0$ ) и режим ОШ ( $\Delta T_\phi = 0$ ), из (5) видим, что между параметрами ТВП  $\Delta T_{вр}$  и  $\delta_0$  существует следующее обменное соотношение (при  $\varepsilon < 1$ ):

$$\begin{aligned} \Delta T_{вр} \delta_0^n &= \frac{Q}{D_{об}^2} = Q^*, \\ \text{где } Q &= \frac{4\Delta T_n a^n}{q}, \quad \Delta T_1 = \frac{\Delta T_{\phi 0} \sqrt{M}}{\sqrt{B_0} \sqrt{M_0}}, \\ \Delta T_2 &= \frac{\Delta T_{в0}}{B_0}; \end{aligned} \quad (14)$$

при этом для режима ОФ  $n = 1$ , а для режима ОШ  $n = 2$ .

С другой стороны, из (2) вытекает, что для значения  $\Delta T_{вр}$  имеет место выражение

$$\begin{aligned} \Delta T_{вр} &= \Delta T_{Rj}^* \vartheta \sqrt{\frac{1}{E^2(x_j)} - M_j^2}, \\ \Delta T_{Rj}^* &= |\Delta T_{Rj}| \tau_{aj} r \alpha \alpha; \quad M_j = \Delta T_{пр} / \Delta T_{Rj}^* \vartheta. \end{aligned} \quad (15)$$

Найдем сейчас такие значения  $\Delta T_{вр}$  и  $\delta_0$ , чтобы для заданных величин  $P_j$  и  $Q$  (т. е. для требуемой вероятности вскрытия  $P_j = P_j^*$  и выбранного ФПУ) величина  $Q^* = Q_{\max}$  (т. е.  $D_{об} = D_{об \min}$ ). Подставляя в инвариант (14) значение  $\Delta T_{вр}$  из (15) и учитывая, что  $\delta_0 = x_j/v_j \vartheta$ , получаем

$$Q^* = \beta x_j^n \sqrt{\frac{1}{E^2(x_j)} - M_j^2}, \quad (16)$$

где  $\beta$  – коэффициент, не зависящий от  $x_j$ .

Зависимости значений  $x_j = x_j^* = f(M_j)$ , при которых  $Q^* = Q_{\max}$ , приведены для  $n = 1$  и  $n = 2$  в табл. 2.

Поскольку пики функций  $Q^* = f(x_j)$  выражены нерезко, а различие между оптимальными значениями  $x_j^*$  для режимов ОФ и ОШ невелико, для всех промежуточных случаев значение  $x_j^*$  можно определить путем линейной интерполяции согласно соотношению значений  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ .

Соответствующие величине  $x_j$  значения основных технических параметров ТВП  $\Delta T_{вр}$  и  $\delta$  с учетом (2) будут равны

$$\begin{aligned} \Delta T_{вр} &= |\Delta T_{Rj}| \tau_{aj} r \alpha \alpha \sqrt{\frac{1}{E^2(x_j)} - M_j^2}, \\ \delta &= \frac{2h_j x_j}{D_j N_j}, \end{aligned} \quad (17)$$

где согласно (1)

$$N_j = 2,4 C_j \sqrt{-\ln(1 - P_j^*)} / \gamma_0. \quad (18)$$

Учтем теперь наличие других объектов вскрытия. Так как определяемые по (17) значения  $\Delta T_{вр}$  и  $\delta$ , естественно, должны быть общими для любого  $i$ -го объекта, то выполнение равенств  $P_i = P_i^*$  для всех  $i = \overline{1, s}$ , вообще говоря, невозможно. Поэтому примем далее, что требуемая вероятность вскрытия строго реализуется лишь для одного  $j$ -го объекта ( $P_j = P_j^*$ ), а для остальных  $s - 1$  объектов обеспечивается выполнение соотношений  $P_i \geq P_i^*$  ( $i \neq j$ ). Тогда для  $j$ -го и любого другого  $i$ -го объекта из (2) имеем тождества (различием значений  $M_j$  и  $M_i$  здесь пренебрегаем, поскольку пространственный шум в несканирующих ТВП обычно сравнительно невелик):

$$\frac{h_j x_j}{N_j D_j} = \frac{h_i x_i}{N_i D_i}, \quad \frac{\Delta T_{Rj}^*}{E(x_j)} = \frac{\Delta T_{Ri}^*}{E(x_i)}, \quad (19)$$

где  $N_i$  определяется по (18) с заменой  $C_j$  и  $P_j^*$  на  $C_i$  и  $P_i^*$  соответственно.

Отсюда легко видеть, что требуемое соотношение  $P_i \geq P_i^*$  эквивалентно условию

$$\rho(x_j) = \frac{E(x_j)}{\alpha_i E(\beta_i x_j)} \geq 1, \quad (20)$$

$$\text{где } \alpha_i = \frac{\Delta T_{Rj}^*}{\Delta T_{Ri}^*} = \frac{|\Delta T_{Rj}| \tau_{aj}}{|\Delta T_{Ri}| \tau_{ai}}, \quad \beta_i = \frac{x_i}{x_j} = \frac{h_j N_i D_i}{h_i N_j D_j}. \quad (21)$$

Это условие реализуется, если для  $x_j$  выполняется одно из следующих неравенств ( $i = \overline{1, s}$ ;  $i \neq j$ ):

$$\begin{aligned} x_j &> x_{ji} (\alpha_i \geq 1, \beta_i < 1), \\ x_j &< x_{ji} (\alpha_i \leq 1, \beta_i > 1), \\ x_j &< \infty (\alpha_i < 1, \beta_i < 1), \\ x_j &> \infty (\alpha_i > 1, \beta_i > 1), \end{aligned} \quad (22)$$

где  $x_{ji}$  – корень уравнения  $\rho(x_{ji}) = 1$ .

**Таблица 2.** Оптимальные значения  $x_j^*$  в зависимости от  $M_j$

$M_j$	0	0,2	0,4	0,6
$x_j^*(n=1)$	0,22	0,18	0,15	0,12
$x_j^*(n=2)$	0,33	0,29	0,25	0,22



Очевидно, третья строка (22) по сути означает, что соотношение (20) выполняется для любого значения  $x_j$ , а четвертая – что оно не выполняется ни для какого  $x_j$ .

С учетом аппроксимации (3) искомое значение корня  $x_{ji}$  может быть найдено по формуле

$$x_{ji} = \frac{0,59}{1 + \beta_i} \left( \sqrt{1 + \frac{0,78(1 + \beta_i) \ln \alpha_i}{1 - \beta_i}} - 1 \right). \quad (23)$$

В частности, для обеспечения правильной ориентации ТВП на местности обычно бывает необходимо, чтобы наряду с классификацией основного объекта вскрытия ( $j = 1$ ) он обеспечивал обнаружение на той же дальности элемента фона ( $i = 2$ ) такого же размера, но с тепловым контрастом в 10 раз меньшим. Тогда, полагая, согласно (21) и данным табл. 1,  $\alpha_2 = 10$ ,  $\beta_2 = 1/6$ , по формуле (23) находим  $x_{12} = 0,44$  и по (22) – соответствующее условие  $x_1 > 0,44$ .

Учтем далее, что для успешной коррекции аберраций объектива его относительное отверстие  $\varepsilon$  не должно превышать 0,8–1. С другой стороны, для исключения существенного снижения эффективности ТВП при обнаружении малоразмерных объектов отношение  $\alpha_d = d_d/a$  не должно превосходить  $\alpha_{\max} = 2-3$ . Тогда имеем дополнительное к (22) ограничение

$$\varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}, \quad \varepsilon_{\min} = 2,44 \times 10^{-4} \lambda / a \alpha_{\max}, \quad (24)$$

$$\varepsilon_{\max} = 0,8 - 1.$$

Учитывая, что согласно (2)–(5)

$$B = \frac{(q^2 \vartheta_0^2 \delta T^2 - \Delta T_1^2) + \sqrt{(q^2 \vartheta_0^2 \delta T^2 - \Delta T_1^2)^2 + 4 \Delta T_2^2 q^2 (\delta T^2 (\vartheta_m^2 - \vartheta_0^2) - \Delta T_{\text{пр}}^2)}}{2 \Delta T_2^2},$$

где

$$\delta T = \frac{\Delta T_{R_j}^*}{E(x_j)} = \frac{|\Delta T_{R_j}| \tau_{aj} r \alpha \varepsilon}{E(x_j)}.$$

Величина  $B$  определяет относительное отверстие  $\varepsilon$  объектива

$$\varepsilon = 2 / \sqrt{B - 1}.$$

При  $x_j = x_{j\min}$  или  $x_j = x_{j\max}$  следует сразу принять  $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$  или  $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$  соответственно.

Далее по (13) для соответствующего значения  $B$  определяется коэффициент  $\vartheta$ , по (17) – основные технические параметры ТВП  $\Delta T_{\text{вр}}$ ,

\* \* \* \* \*

$$x_j = E^{-1} \left( \Delta T_{R_j}^* \vartheta / \sqrt{\Delta T_{\text{вр}}^2 + \Delta T_{\text{пр}}^2} \right), \quad (25)$$

получаем вместо (24) ограничение

$$x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max}, \quad (26)$$

где  $x_{j\min}$ ,  $x_{j\max}$  определяются по (25) с учетом (5), (13) для  $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$  и  $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$  соответственно.

## Порядок оптимизации

Для минимизации диаметра объектива ТВП необходимо вначале определить по (24) граничные значения  $\varepsilon_{\min}$ ,  $\varepsilon_{\max}$  и отвечающие им значения  $B_{\min}$ ,  $B_{\max}$ , затем по (13) – соответствующие значения  $\vartheta_{\min}$ ,  $\vartheta_{\max}$  и рассчитать по (15) для выбранного  $j$ -го объекта значение  $\Delta T_{R_j}^*$ , а по (25) – граничные значения  $x_{j\min}$ ,  $x_{j\max}$ . Далее для остальных  $s - 1$  объектов следует вычислить по (21) значения  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ( $i = \overline{1, s}; i \neq j$ ) и по (23) – соответствующие граничные значения  $x_{ji}$ , после чего выбрать оптимальное значение  $x_j$ , удовлетворяющее одновременно полученным  $s - 1$  ограничениям (22) и условию (26), и вместе с тем максимально близкое к значению  $x_j^*$ , найденному по табл. 2. При несовместимости данных ограничений необходимо изменить номер  $j$  (т. е. обеспечить равенство  $P_j = P_j^*$  для другого объекта) и повторить расчет; при неэффективности этой операции – выбрать другое ФПУ, с меньшим значением  $\Delta T_0$ . Далее найденное значение  $x_j$  следует использовать для определения значения  $B$ , являющегося корнем уравнения (25) с учетом выражения (13):

$\delta$  и, наконец, рассчитываются искомые параметры объектива – его фокусное расстояние  $f$  и диаметр  $D_{\text{об}}$

$$f = a \vartheta / \delta, \quad D_{\text{об}} = \varepsilon f.$$

Можно полагать, что полученные результаты окажутся полезными для рационального выбора основных технических параметров несканирующих ТВП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 595 с.
  2. *Holst G.* Electro-optical imaging system performance. 3 ed. SPIE press. US, 2003. 442 p.
  3. *Driggers R., Jacobs E., Vollmerhausen R., O’Cane B., Self M., Mouer S., Hixon J., Page G.* Current IR target acquisition approach for military sensor design and wargaming // Proc. SPIE. 2006. V. 6207. P. 620709-1–620709-17.
  4. *Teaney B., Reynolds J., O’Connor J.* Guidance on methods and parameter for army target acquisition models // Proc. SPIE. 2007. V. 6543. P. 65430L-1–65430L-12.
-