

УДК 621.384.32

Особенности выбора основных параметров объективов современных тепловизионных приборов

© 2017 г. **В. А. Овсянников, доктор техн. наук; В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук**

Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики", Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Поступила в редакцию 18.10.2016

Предложена инженерная методика выбора диаметра и фокусного расстояния объективов современных высокочувствительных тепловизионных приборов, обеспечивающего заданную дальность действия приборов и их пороговую чувствительность. Методика учитывает возможность реализации за счет накопления сигналов весьма малых значений разности температур, эквивалентной шуму, при которых эффективность этих приборов ограничивается уже не отношением сигнал/шум, а контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, дальность действия, диаметр, фокусное расстояние объектива.

Коды OCIS: 010.7295

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Важной особенностью современных высокочувствительных цифровых тепловизионных приборов (ТВП) третьего поколения, использующих охлаждаемые квантовые матричные фотоприемные устройства (ФПУ), является реализация в них весьма малых значений разности температур, эквивалентной шуму, поэтому пороговый, обнаруживаемый глазом оператора тепловой контраст объектов нередко ограничивается не столько шумом прибора, сколько контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора, а также диапазоном яркости видеоконтрольного устройства (монитора), который к тому же, например, при наблюдении изображения в темноте или полутьме, полностью не используется. Это связано с тем, что для достижения максимально высокой температурной чувствительности ТВП требуется достаточно большая крутизна передаточной функции сигнала ТВП — зависимости яркости изображения от разности радиационных температур протяженного объекта и фона, такая, чтобы на изображении был заметен шум. Тогда потенциальные возможности ТВП по вскрытию (обнаружению и распознаванию) объектов реализуются полностью. Однако в современных высокочувствительных ТВП столь высокая крутизна может быть обеспечена в условиях всегда ограниченного рабочего диапазона яркостей монитора только за счет сужения диапазона регистрируемой разности температур. При этом объект, например, с по-

ложительным тепловым контрастом, расположенный на «гребне» фоновой температурной неоднородности, может не попасть в данный диапазон и, значит, он не будет виден на тепловизионном изображении. Следовательно, для эффективного поиска и вскрытия объектов на неоднородном фоне необходимо, чтобы диапазон регистрируемой разности температур был достаточно широким. Однако уменьшение крутизны передаточной функции сигнала, требуемое для выполнения этого условия, приводит к исчезновению на изображении шума и снижению контраста изображения объектов, в результате чего такой ТВП становится уже не шумограниченным, а контрастно-ограниченным прибором [1]. Считается, что современные несканирующие ТВП, построенные на охлаждаемых квантовых матричных ФПУ, при поиске и вскрытии объектов на естественном неоднородном фоне работают именно в контрастно-ограниченном режиме [2].

Вместе с тем требования технического задания по дальности действия ТВП (и соответственно контроль реализации этой дальности в натуральных условиях) обычно относятся к объекту, расположенному на квазиоднородном фоне, например, на зеленом лугу, в темное время суток, и в этом случае ТВП может работать в зависимости от конкретного сочетания теплового контраста объекта, вариаций радиационной температуры окружающих фоновых неоднородностей, пороговой чувствительности ТВП и условий дешифрирования

изображения как в контрастно-ограниченном, так и в шумо-ограниченном режиме.

В связи с изложенным, задачей работы является разработка инженерной методики выбора основных параметров — диаметра и фокусного расстояния, объектива современных ТВП с уже выбранным ФПУ, обеспечивающих, с учетом возможности их функционирования в обоих отмеченных режимах, заданные значения дальности действия при вскрытии объектов и разности температур, эквивалентной шуму. Ранее опубликованные работы по выбору параметров объективов (например [3–4]), как правило, относятся только к шумо-ограниченным ТВП, и в них такая задача не рассматривалась.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Оценим вначале значение относительного отверстия объектива ТВП, необходимое для обеспечения вскрытия малоконтрастных или замаскированных объектов в наиболее неблагоприятных метеоусловиях. Разность температур, эквивалентная шуму, ΔT , при этом должна составлять характерное для современных несканирующих ТВП значение $\Delta T = 0,02\text{--}0,04$ К [5]. Эта величина определяется формулой [1]

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_t^2 + \Delta T_{sp}^2}, \quad \Delta T = \sqrt{\Delta T_{hum}^2 + \Delta T_{dev}^2}, \quad (1)$$

где ΔT_t , ΔT_{sp} — разности температур (К), эквивалентные, соответственно, временному и пространственному шумам, ΔT_{hum} , ΔT_{dev} — разности температур (К), эквивалентные, соответственно, внешнему фотонному и внутреннему аппаратурному шумам.

Здесь учтено, что для описания несканирующих ТВП используется динамическая температурно-частотная характеристика (ТЧХ) — зависимость $\Delta T_{res} = f(\nu)$ минимальной разрешаемой разности температур от угловой частоты тепловой миры, которая определяется при поперечном движении миры относительно ТВП или наоборот [1]. При этом за счет инерции зрительного анализатора фазовые эффекты усредняются и оператор может практически с равным успехом разрешить на изображении все четыре полосы миры. Данная характеристика, в отличие от статической, однозначна, монотонна и не ограничена частотой Найквиста, что обеспечивает более точный прогноз эффективности ТВП при вскрытии объектов местности. Пространственный шум, вызванный остаточным разбросом чувствительности элементов ФПУ, в этом случае, по сути, преобразуется во временной, не коррелированный в смежных кадрах, что и определяет справедливость выражения (1).

Согласно работе [1], в фактических условиях работы ТВП значения ΔT_{hum} , ΔT_{dev} в формуле (1) составляют

$$\begin{aligned} \Delta T_{hum} &= \Delta T_1 \sqrt{B}, \quad \Delta T_{dev} = \Delta T_2 B, \\ \Delta T_1 &= \Delta T_{hum0} \sqrt{M_\Sigma / q \sqrt{B_0 M_0}}, \\ \Delta T_2 &= \Delta T_{dev0} / q B_0, \quad M_0 = \int_{\Delta\lambda} M_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta T_{dev0} = (\Delta T_{phd}^2 - \Delta T_{hum0}^2)^{1/2}, \quad B = \frac{4}{\omega^2} + 1, \quad (3)$$

$$B_0 = \frac{4}{\omega_0^2} + 1, \quad \omega_0 = 2 \operatorname{tg} \sigma_0, \quad q = \frac{Y \sqrt{t_{acc}}}{Y_0 \sqrt{t_{acc0}}},$$

где

$$Y = \frac{1,44 \times 10^4 \tau_0}{T^2} \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \lambda,$$

$$Y_0 = \frac{1,44 \times 10^4}{T_0^2} \int_{\Delta\lambda} M_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \lambda,$$

ΔT_{phd} — разность температур (К), эквивалентная временному шуму ФПУ, измеренная в нормированных условиях его паспортизации, в частности в отсутствие объектива, но со встроенным охлаждаемым спектральным фильтром и охлаждаемой диафрагмой, σ_0 — апертурный угол (рад) этой диафрагмы, ΔT_{hum0} , ΔT_{dev0} — разности температур (К), эквивалентные, соответственно, фотонному и аппаратурному шумам, в нормированных условиях, ω — относительное отверстие объектива, согласованное с апертурным углом охлаждаемой диафрагмы в фактических условиях, t_{acc0} , t_{acc} — время (с) накопления заряда в нормированных и фактических условиях соответственно, M_Σ — суммарная энергетическая светимость (Вт/см²) окружающего пространства в спектральном рабочем диапазоне ТВП $\Delta\lambda$, $M_0(\lambda)$, $M(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической светимости (Вт/(см² мкм)) черного тела с нормированной T_0 и фактической T температурами (К) фона, отвечающими нормированным и фактическим условиям соответственно, $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность ФПУ, τ_0 — среднее значение коэффициента пропускания объектива в диапазоне $\Delta\lambda$.

Методики расчета значений ΔT_{hum0} , M_Σ и t_{acc} описаны в публикации [1].

Разность температур, эквивалентная пространственному шуму ΔT_{sp} , определяется выражением [1]

$$\Delta T_{sp} = \lambda_0 T^2 \sigma_{rel} / 1,44 \times 10^4 \tau_0, \quad (4)$$

где σ_{rel} — относительное среднеквадратическое отклонение остаточного разброса чувствительности элементов ФПУ (обычно $\sigma_{rel} = 10^{-5}\text{--}10^{-3}$), λ_0 — средняя длина волны (мкм) диапазона $\Delta\lambda$.

При $M_\Sigma = M_0$ и $T = T_0$ соответствующая разность температур, эквивалентная временному шуму ΔT_t , рассчитываемая по формулам (1)–(3) при $Y/Y_0 = \tau_0$, становится равной ее паспортному значению, которое, как правило, и приводится в технических описаниях образцов ТВП.

Требуемое значение ΔT определяет, согласно выражениям (1)–(3), соответствующее относительное отверстие объектива ω

$$\omega = \frac{2}{\sqrt{B-1}}, \quad B = \frac{\Delta T_1^2}{2 \Delta T_2^2} \left(\sqrt{1 + \frac{4 \Delta T_2^2 (\Delta T^2 - \Delta T_{sp}^2)}{\Delta T_1^4}} - 1 \right), \quad (5)$$

где значения ΔT_1 , ΔT_2 рассчитываются по формуле (2).

Учтем далее, что необходимым условием успешной коррекции аберраций объектива ТВП, такой, при которой аберрационное пятно рассеяния объектива будет значительно меньше дифракционного, является выполнение соотношения $\omega \leq \omega_{\max}$, где значение ω_{\max} близко к 1. (При $\omega = \omega_{\max}$ соответствующее реально достижимое фокусное расстояние объектива обычно не превышает 200 мм [5, 6]; с уменьшением ω это расстояние увеличивается.) С другой стороны, для исключения существенного снижения эффективности ТВП при обнаружении точечных объектов отношение диаметра дифракционного кружка рассеяния объектива d_{dif} (мкм) к шагу элементов ФПУ Δa (мкм) не должно превышать $\alpha_{\max} = 2-3$. Так, в работе [7] с учетом случайной ориентации изображения точечного излучателя относительно структуры ФПУ рекомендуется выдерживать соотношение $\lambda_0/(\omega \Delta a) = 1,1$, что дает значение $\alpha_{\max} = 2,44 \times 1,1 = 2,7$. Тогда для относительного отверстия объектива ω получаем двустороннее ограничение

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}, \quad \omega_{\min} = 2,44\lambda_0/(\alpha_{\max}\Delta a), \quad \omega_{\max} = 1. \quad (6)$$

$$M(v') = \frac{(1 + 0,7/L')^{0,2} \left[1 + 12 / \left(w'(1 + v'/3)^2 \right) \right]}{540v' \exp \left(-0,3(1 + 100/L')^{0,15} v' \right) \sqrt{1 + 0,06 \exp \left(0,3(1 + 100/L')^{0,15} v' \right)}}, \quad (7)$$

где v' — угловая частота (град⁻¹) в пространстве изображений, L' — яркость (кд/м²) изображения фона, w' — угловой (град) размер изображения миры.

Комфортная яркость изображения фона определяется условиями освещения при дешифрировании изображений и ее можно принять равной [8] $L' = 0,3-1$ кд/м² (дешифрирование в темноте), $L' = 3-30$ кд/м² (в полутьме), $L' = 100$ кд/м² (на свету).

Связь частоты v' в формуле (7) с соответствующей угловой частотой v (мрад⁻¹) в пространстве предметов устанавливается формулой

$$v' = 17,45v/\Gamma, \quad \Gamma = \varphi \alpha Z \delta'_0 / \delta_0, \\ \alpha = a/\Delta a, \quad \delta_0 = a/f,$$

где Γ — видимое увеличение ТВП — отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта, Z — электронное увеличение изображения, δ_0 — элементарное поле зрения (мрад) ТВП, δ'_0 — угловой (мрад) размер элемента изображения, соответствующий δ_0 , при $Z = 1$ (обычно $\delta'_0 = 0,8-1$ мрад [9]), оптимальное значение $\delta'_0 = 0,95$ мрад); α — коэффициент заполнения ФПУ (по одной координате), a — размер (мкм) элемента ФПУ, φ — число выборок на элемент (для ТВП без микросканирования $\varphi = 1$, с четырехпозиционным микросканированием $\varphi = 2$), f — фокусное расстояние (мм) объектива.

В случае эквивалентной миры угловой размер w' ее изображения

$$w' = \Gamma h / 17,45D = \varphi \alpha Z \delta'_0 h / 17,45D \delta_0, \quad (8)$$

Для реальных параметров элементов ФПУ, как правило, имеет место соотношение $\omega_{\min} < \omega_{\max}$. Если при этом соотношение $\omega < \omega_{\max}$ не выполняется, то требуемое значение ΔT не достигается и следует использовать ФПУ с меньшим значением $\Delta T_{\text{ph d}}$, обеспечивающим выполнение данного неравенства. Невыполнение же соотношения $\omega > \omega_{\min}$ означает, что ТВП с относительным отверстием $\omega = \omega_{\min}$ будет иметь некоторый запас по пороговой чувствительности, определяемой разностью температур, эквивалентной шуму ΔT , что вполне допустимо.

Рассмотрим далее ТЧХ прибора, необходимую для конкретизации выбора относительного отверстия и соответствующего диаметра объектива ТВП. Для контрастно-ограниченного прибора эта ТЧХ в существенной мере определяется функцией порогового контраста $M(v')$ — зависимостью минимального обнаруживаемого оператором контраста $M = (L'_{\max} - L'_{\min}) / (L'_{\max} + L'_{\min})$ (L'_{\max} , L'_{\min} — максимальное и минимальное значения яркости) изображения разрешаемой синусоидальной миры от ее угловой частоты. Данная зависимость описывается следующим эмпирическим выражением [8]:

где h — критический размер объекта — корень квадратный из его видимой площади (м), D — дистанция (км) до объекта.

При нахождении выражения для ТЧХ учтем, что между разрешаемой разностью температур ΔT_{res} и соответствующей разрешаемой разностью яркостей изображения $\Delta L'_{\text{res}}$ существует взаимосвязь [1]

$$\Delta L'_{\text{res}} = (4/\pi) \Delta T_{\text{res}} \Delta L'_m K(v) / \Delta T_m, \quad (9)$$

$$K(v) = \exp(-2\pi^2 \rho^2 \delta^2 v^2),$$

где ΔT_m — диапазон регистрируемой разности радиационных температур (К), определяемый рабочим диапазоном яркостей (кд/м²) монитора $\Delta L'_m = L'_2 - L'_1$, $K(v)$ — функция передачи модуляции ТВП и ее гауссова аппроксимация с параметром $\rho = 0,55$, δ — эффективное значение элементарного поля зрения (мрад) ТВП, зависящее от всего информационного тракта прибора. Здесь $4/\pi$ — поправочный коэффициент, учитывающий различие амплитуд выходных сигналов прямоугольной миры, по отношению к которой устанавливается ТЧХ, и синусоидальной миры, используемой при определении функции порогового контраста.

С другой стороны, полагая, что яркость изображения фона соответствует середине рабочего диапазона яркостей монитора (это необходимо для воспроизведения как положительных, так и отрицательных тепловых контрастов объектов), значение функции порогового контраста здесь составляет

$$M(v) = \Delta L'_{\text{res}} / (L'_2 + L'_1),$$

что дает искомое выражение для ΔT_{res}

$$\Delta T_{\text{res}} = \pi \Delta T_m M(v) / 4K(v) K_m, \quad (10)$$

$$K_m = (L'_2 - L'_1) / (L'_2 + L'_1),$$

где K_m — коэффициент сохранения контраста протяженного объекта, близкий к 1 при $L'_2 \gg L'_1$.

Для обеспечения поиска и вскрытия объектов с положительным или отрицательным тепловым контрастом, локализованных соответственно на “горбах” или “впадинах” температурных фоновых неоднородностей, диапазон регистрируемой разности температур ΔT_m должен удовлетворять условию

$$\Delta T_m \geq (\Delta T_{\text{hum m}} + 2\Delta T_R) \tau_{\text{atm m}}, \quad (11)$$

где $\Delta T_{\text{hum m}}$ — максимальное значение вариаций радиационной температуры (К) фоновых неоднородностей (обычно 2–7 К), ΔT_R — тепловой контраст объекта (К), $\tau_{\text{atm m}}$ — максимальный коэффициент пропускания атмосферы в диапазоне $\Delta\lambda$, отвечающий минимально возможной дистанции до объектов.

При этом под тепловым контрастом объекта ΔT_R целесообразно понимать так называемый контраст Дойла, определяемый как [1, 8]

$$\Delta T_R = (\Delta T_{R0}^2 + \sigma_{\Delta T}^2)^{1/2},$$

где ΔT_{R0} — средний по площади объекта тепловой (К) контраст (разность радиационных температур объекта и фона), $\sigma_{\Delta T}$ — среднеквадратическое отклонение вариаций теплового контраста (К) по площади объекта, находящегося, например, для объектов транспортной техники в пределах от 0,1 К (пассивный объект в стабильную ненастную погоду) до 1 К (активный объект).

В рабочем интервале угловых частот $v' = 3\text{--}15 \text{ град}^{-1}$, отвечающем оптимальному видимому увеличению ТВП, функция порогового контраста $M(v')$ для типовых угловых размеров изображения мира w' достаточно хорошо аппроксимируется формулой $M(v') = \mu \exp(\xi v'^2)$ с параметрами μ и ξ , зависящими от значения w' , определяемого по формуле (8), и яркости изображения фона L' . Зависимости $\mu = f(w')$ и $\xi = f(w')$ для ряда типовых значений L' приведены в таблице.

$$\frac{\Delta T_{\text{res}} K_m}{\Delta T_m} = \frac{\pi \mu \exp[\xi (17,45v/\Gamma)^2]}{4 \exp[-2\pi^2 (0,55\delta)^2 v^2]} = 0,79\mu \exp[(305\xi / (\Gamma\delta)^2 + 5,97)x^2] =$$

$$= 0,79\mu \exp\left[\left[\left(305\xi / (\varphi\alpha Z\delta_0')^2 + 5,97\vartheta_m^2\right)\omega^2 + 5,97\vartheta_0^2\right](Da / 2D_0A)^2\right], \quad x = v\delta,$$

где x — относительная частота мира.

Решая это уравнение при $\Delta T_{\text{res}} = \Delta T_R \tau_{\text{atm}}$, где τ_{atm} — коэффициент пропускания атмосферы в диапазоне $\Delta\lambda$ на дистанции до объекта, рассчитываемый, например по методике [1], находим значение диаметра объектива D_0

$$D_0 = \frac{0,5Da}{A} \sqrt{\frac{[305\xi / (\varphi\alpha Z\delta_0')^2 + 5,97\vartheta_m^2]\omega^2 + 5,97\vartheta_0^2}{\ln(1,27\Delta T_R \tau_{\text{atm}} K_m / \Delta T_m \mu)}}. \quad (15)$$

Эффективное значение элементарного поля зрения δ в формуле (9) составляет [1]

$$\delta = \vartheta \delta_0, \quad (12)$$

$$\vartheta = \sqrt{0,5 + 0,25(d/a)^2 + 0,52/\varphi^2 \alpha^2 + 0,26/\kappa^2 \alpha^2 Z^2},$$

где

$$d = \sqrt{(0,84d_{\text{dif}})^2 + d_a^2}, \quad d_{\text{dif}} = 2,44\lambda_0/\omega,$$

d — диаметр (мкм) суммарного кружка рассеяния объектива, d_a — диаметр (мкм) абберационного кружка рассеяния объектива с концентрацией энергии 85%, κ — отношение числа элементов изображения монитора к числу элементов ФПУ (по одной координате).

Поскольку d_a зависит от искомых значений относительного отверстия и фокусного расстояния объектива, обычно близкого к дифракционно-ограниченному, на начальном этапе проектирования можно принять, что отношение $\beta = d_a/d_{\text{dif}} = [(d/d_{\text{dif}})^2 - 0,71]^{1/2}$ имеет достаточно малое значение, например 0,2–0,3. При этом выбор данного отношения не является критичным: например, при $\beta = 0,3$ значение δ по выражению (12), определяющее угловое разрешение ТВП, увеличивается в типовых случаях не более чем на 3–4% по сравнению с таковым у дифракционно-ограниченного объектива, т.е. при $\beta = 0$.

Формулу для коэффициента ϑ в выражении (12) для дальнейшего удобно переписать так

$$\vartheta = \sqrt{\vartheta_m^2 + \frac{\vartheta_0^2}{\omega^2}}, \quad \vartheta_m = \sqrt{0,5 + \frac{0,52}{\varphi^2 \alpha^2} + \frac{0,26}{\kappa^2 \alpha^2 Z^2}}, \quad (13)$$

$$\vartheta_0 = \frac{\lambda_0 \sqrt{1,05 + 1,49\beta^2}}{a}.$$

Тогда, учитывая формулу (10) и соотношения

$$\delta_0 = a\omega / D_0, \quad v = D / 2A, \quad (14)$$

где D_0 — диаметр (мм) объектива, A — требуемое разрешение (м) на местности — полупериод эквивалентной мира, разрешаемой с вероятностью 0,5, соответствующая относительная ТЧХ прибора применительно к эквивалентной мире может быть представлена в следующем виде:

Зависимости параметров μ и ξ аппроксимационной формулы для ТЧХ от углового размера изображения миры w' при типовых значениях яркости изображения фона L'

$w', \text{град}$	$L' = 0,6 \text{ кд/м}^2$		$L' = 10 \text{ кд/м}^2$		$L' = 100 \text{ кд/м}^2$	
	μ	ξ	μ	ξ	μ	ξ
0,1	0,091	0,0048	0,036	0,0015	0,022	0,0006
0,2	0,047	0,0056	0,019	0,0021	0,012	0,0011
0,3	0,032	0,0062	0,014	0,0026	0,0082	0,0015
0,4	0,025	0,0067	0,011	0,0029	0,0066	0,0018
0,5	0,021	0,0071	0,0091	0,0033	0,0056	0,0021
0,6	0,018	0,0074	0,0080	0,0035	0,0050	0,0023
0,7	0,016	0,0077	0,0072	0,0038	0,0044	0,0025
0,8	0,015	0,0080	0,0066	0,0040	0,0041	0,0027
0,9	0,014	0,0082	0,0061	0,0042	0,0038	0,0029
1,0	0,013	0,0084	0,0057	0,0044	0,0036	0,0030
1,1	0,012	0,0086	0,0054	0,0046	0,0034	0,0032
1,2	0,012	0,0088	0,0051	0,0047	0,0033	0,0033
1,3	0,011	0,0089	0,0049	0,0049	0,0031	0,0034
1,4	0,011	0,0090	0,0047	0,0050	0,0030	0,0035
1,5	0,010	0,0092	0,0046	0,0051	0,0029	0,0036

При шумо-ограниченном режиме работы ТВП носительную ТЧХ в случае эквивалентной миры можно аппроксимировать формулой [1]

$$\Delta T_{\text{res}} r \varphi \varepsilon \vartheta / \Delta T = 0,3 \psi \exp(3,7x^2 + 4,35x),$$

$$r = \sqrt{[1 + \exp(-1/FT_{\text{ey}})] / [1 - \exp(-1/FT_{\text{ey}})]},$$

$$T_{\text{ey}} = 0,019 + 0,051 / L'^{0,17},$$

где r — коэффициент, учитывающий временное накопление визуальных сигналов в смежных кадрах, ψ — коэффициент, учитывающий различие размеров эквивалентной и стандартной миры, используемой для ат-

тестации ТВП, F — частота (Гц) кадров, T_{ey} — постоянная времени (с) глаза оператора.

Принимая, что в современных высокочувствительных ТВП рабочей является высокочастотная ветвь ТЧХ, которой отвечает сравнительно небольшая длина изображения полос указанных мир, не превышающая пределов области пространственного интегрирования визуальных сигналов глазом оператора, и учитывая, что длина полос стандартной миры составляет $7A$, а эквивалентной миры — h , находим значение коэффициента $\psi = (7A/h)^{0,5}$.

Аналогично, решая данное уравнение при $\Delta T_{\text{res}} = \Delta T_R \tau_{\text{atm}}$ с учетом формулы (14), определяем значение D_0

$$D_0 = \frac{0,85 Da \sqrt{\vartheta_m^2 \omega^2 + \vartheta_0^2}}{A \left[\sqrt{1 + 0,78 \ln \left(1,26 \Delta T_R \tau_{\text{atm}} r \varphi \varepsilon \sqrt{h (\vartheta_m^2 + \vartheta_0^2 / \omega^2)} / (\Delta T \sqrt{A}) \right)} - 1 \right]}. \quad (16)$$

Следует также учитывать, что в обоих случаях относительная частота x разрешаемой миры не может превышать значения 0,75, при котором ТЧХ становится практически параллельной оси ординат [1], и это, согласно формулам (13), (14), приводит к минимально возможному при фиксированном относительном отворствии объектива значению D_0 , равному

$$D_0 = 0,67 Da \sqrt{\vartheta_m^2 \omega^2 + \vartheta_0^2} / A. \quad (17)$$

Как вытекает из выражений (15)–(17), для минимизации диаметра объектива, а значит, массогабаритных показателей ТВП, относительное отворствие ω должно быть по возможности наименьшим. При этом в качестве искомого диаметра объектива D_0 следует принять

наибольшее из значений, получаемых по формулам (15)–(17).

Взаимосвязь разрешения на местности A с вероятностью вскрытия объекта P устанавливается следующей приближенной формулой [1], основанной на известной операционной модели ТВП NVTherm (США) [8],

$$P = 1 - \exp[-0,7(h\gamma/2AC)^2],$$

где C — критерий Джонсона, отвечающий вероятности вскрытия объекта 0,5, в среднем равный 1 при выделении (обнаружении на неоднородном фоне), $C = 3$ — при классификации, $C = 6$ — при идентификации объекта (более дифференцированные значения C приведены, например, в публикации [1]), $\gamma = 0,65$ – $1,5$ — показатель

квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно).

Отсюда при заданной вероятности вскрытия P расчетного объекта получаем требуемое разрешение на местности A

$$A = h\gamma/2,4C\sqrt{-\ln(1-P)}. \quad (18)$$

Из изложенного вытекает, что параметры объектива ТВП рекомендуется выбирать в следующем порядке:

- по формуле (4) установить разность температур, эквивалентную пространственному шуму,
- для требуемого достаточно малого значения разности температур, эквивалентной шуму ΔT , отвечающего применению ТВП в наиболее неблагоприятных метеоусловиях, по формуле (2) с использованием методики [1] вычислить значения ΔT_1 и ΔT_2 , по формуле (5) — относительное отверстие ω и по формуле (6) — его граничные значения ω_{\min} и ω_{\max} ; при этом должно выполняться соотношение $\omega < \omega_{\max}$;
- выбрать искомое значение относительного отверстия объектива ω_0 по правилу $\omega_0 = \max(\omega, \omega_{\min})$,
- по формуле (13) рассчитать параметры ϑ_m и ϑ_0 и по формуле (18) — требуемое разрешение на местности A ,
- рассчитать, например, по методике [1] коэффициент пропускания атмосферы τ_{atm} на заданной дистанции до объекта D ,
- рассчитать по формуле (11) диапазон регистрируемой разности температур,
- приняв типовое значение углового размера изображения миры $w' = 0,1-0,15^\circ, 0,4-0,5^\circ$ или $0,8-1^\circ$, от-

вечающее выделению, классификации или идентификации объекта соответственно, установить по таблице для яркости изображения фона L' , отвечающей принятым условиям дешифрирования изображения, параметры μ и ξ аппроксимационной формулы для ТЧХ;

- приняв $\omega = \omega_0$, вычислить по формулам (15)–(17) значения D_0 и выбрать в качестве искомого диаметра объектива D_0 наибольшее из них,

- определить соответствующие значения фокусного расстояния объектива $f = D_0/\omega$ и элементарного поля зрения $\delta_0 = a/f$,

- рассчитать по формуле (8) значение углового размера изображения миры w' и, выполнив абберационный расчет объектива, уточнить коэффициент β в формуле (13); при существенном отличии их от принятых ранее значений w' и β установить по таблице уточненные значения параметров μ и ξ и, далее, согласно изложенному, параметров объектива D_0 и f до получения приемлемой сходимости результатов расчета (обычно требуется не более одной итерации).

Таким образом, параметры объектива ТВП, обеспечивающего в заданных метеоусловиях требуемую дальность вскрытия объекта с конкретными параметрами, зависят не только от параметров ФПУ, но и от степени неоднородности фона, условий дешифрирования изображений (яркости, контраста, увеличения) и квалификации оператора. Поэтому при неопределенности или вариации данных факторов следует ориентироваться на их наиболее неблагоприятное сочетание, определяющее выбор наибольшего диаметра объектива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балоев В.А., Ильин Г.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Эффективность, помехозащищенность и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем. Казань: изд. Казан. гос. техн. ун-та, 2015. 424 с.
2. Driggers R., Jacobs E., Vollmerhausen R., O'Cane B., Self M., Moyer S., Hixson J., Page G. Current infrared target acquisition approach for military sensor design and wargaming // Proc. SPIE. 2006. V. 6207. P. 620709-1–620709-17.
3. Шустер Н. Определение основных параметров ИК объективов // Оптический журнал. 1996. № 5. С. 43–48.
4. Крутиков В.Н. Аналитическое исследование влияния параметров оптико-электронного тракта тепловизионного прибора на его характеристики // Измерительная техника. 2003. № 2. С. 17–20.
5. Белозеров А.Ф., Иванов В.М. Зарубежные тепловизионные приборы. М.: НТИЦ «Информтехника», 2004. 92 с.
6. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. ИК системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
7. Olson C., Theisen M., Pace T., Halford C., Driggers R. Model development and system performance optimization for staring infrared search and track sensors // Proc. SPIE. 2016. V. 9820. P. 98200B-1–98200B-10.
8. Holst G. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. US: SPIE Press, 2003. 442 p.
9. Holst G. Optimum viewing distance for target acquisition // Proc. SPIE. 2015. V. 9452. P. 94520K-1–94520K-7.