

УДК 621.384.32
EDN: KBOFIM

PACS: 07.57. Kp



О влиянии температуры фона на пороговую чувствительность современных тепловизионных приборов

В. А. Овсянников, Я. В. Овсянников

Разработана инженерная методика пересчета пороговой чувствительности современных высокочувствительных несканирующих тепловизионных приборов (ТВП), определяемой разностью температур, эквивалентной шуму, с нормированной температуры фона 295 К на его фактическую температуру. Методика учитывает фотонный шум, вызванный излучением фона и самого ТВП, шум темнового тока и пространственный шум, возникающий из-за остаточного, после коррекции, разброса чувствительности элементов матричного фотоприемного устройства. Исследована зависимость пороговой чувствительности ТВП от температуры фона и параметров фотоприемного устройства. Полученные результаты представлены в форме, удобной для практического использования. Сделан вывод о сохранении высокой пороговой чувствительности современных ТВП и при низких температурах фона.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, пороговая чувствительность, температура фона.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-1-82-90

Введение

Существующие сегодня методики прогнозирования эффективности тепловизионных приборов (ТВП), входящих в состав многих технических комплексов, при вскрытии (обнаружении и/или распознавании) объектов, как правило, базируются на определенной операциональной модели, связывающей показатели этой эффективности, в частности дальность действия, с параметрами ТВП и фоноцелевой обстановки [1]. При этом нередки си-

туации, когда объект, особенно низкотемпературный, находится на квазиоднородном фоне (например, чистое поле) или же имеется возможность подбора для каждого фоно-целевого сюжета оптимальных значений яркости и контрастности изображения; такая возможность возникает при вскрытии объекта с известным местоположением, а также при неограниченном ресурсе времени поиска объекта на местности и на изображении. В указанных случаях широкий диапазон регистрируемой разности температур, необходимый в иных ситуациях для обеспечения оперативного поиска и вскрытия объектов, расположенных на горбах и впадинах температурных фоновых неоднородностей, не требуется и в ТВП используется достаточно высокий коэффициент усиления видеосигналов, чтобы на изображении был заметен шум. Важнейшим техническим параметром подобных «шумо-ограниченных» ТВП, потенциальные возможности которых при вскрытии объектов реализуются в максимально полной степени, является пороговая

Овсянников Владимир Александрович, гл.н.с., д.т.н.

Овсянников Ярослав Владимирович, инженер-программист 1 кат.

E-mail: JAR_OVS@mail.ru

АО «НПО Государственный институт прикладной оптики».

Россия, 420075, г. Казань, ул. Липатова, 2.

Статья поступила в редакцию 7.11.2023

Принята к публикации 12.02.2024

Шифр научной специальности: 2.2.6.

© Овсянников В. А., Овсянников Я. В., 2024

чувствительность – разность температур, эквивалентная шуму ΔT , К, соответствующая конкретной температуре фона T , К, варьирующейся в весьма широких пределах.

Хорошо известно, что для низкочувствительных сканирующих ТВП первых поколений значение ΔT с понижением температуры фона увеличивается, что приводит к снижению их эффективности. Так, при уменьшении T с 295 К (22 °С) до 230 К (-43 °С) значение ΔT для ТВП, работающих в диапазоне спектра 8–12 мкм, возрастает в 2–3 раза, а в диапазоне 3–5 мкм – уже в 10–12 раз, и это обстоятельство, нередко распространяемое без достаточных оснований и на все другие ТВП, обычно играет решающую роль при выборе спектрального рабочего диапазона ТВП, предназначенных для эксплуатации в том числе в холодное время года (например, [2–4]).

Однако современные высокочувствительные несканирующие ТВП имеют ряд существенных особенностей, которые радикально изменяют традиционный вид зависимости пороговой чувствительности от температуры фона:

- применение в ТВП считывающих устройств с определенной емкостью, ограничивающей время накопления зарядов;

- использование высококачественных малозумящих фотоприемных устройств (ФПУ), обеспечивающих работу ТВП в режиме, близком к режиму ограничения фоном (BLIP);

- появление на тепловизионном изображении дополнительного, пространственного шума, обусловленного, в основном, остаточным (после коррекции) разбросом интегральной чувствительности элементов матричного ФПУ и, следовательно, в отличие от временного шума, коррелированного в смежных кадрах ТВП.

В связи с этим нашей задачей является разработка инженерной методики оценки разности температур, эквивалентной шуму, данных ТВП и исследование ее зависимости как от температуры фона, так и от указанных выше факторов, что позволит сделать более аргументированный выбор спектрального рабочего диапазона ТВП для конкретных условий применения, в частности при по-

ниженной температуре окружающей среды. Можно полагать, что данная статья будет полезным дополнением работы [5], посвященной анализу влияния на пороговую чувствительность ТВП зарядовой емкости устройства считывания.

Методика решения задачи

Для простоты и повышения обзорности результатов решения поставленной задачи примем, что температура окружающей среды и корпуса ТВП, включая его объектив, равна температуре фона, а солнечная засветка местности отсутствует. Иначе говоря, рассматриваются ТВП наземного базирования, работающие в ночное время суток. Далее считаем, что ТВП использует квантовые ФПУ на InSb (диапазон спектра 3–5 мкм) или же на CdHgTe (диапазон 8–12 мкм), причем эти ФПУ имеют встроенный охлаждаемый спектральный фильтр, а апертурный угол охлаждаемой диафрагмы совпадает с задним апертурным углом объектива.

Номинальная результирующая разность температур, эквивалентная шуму ΔT_0 , К, составляет [1]

$$\Delta T_0 = \sqrt{\Delta T_{в0}^2 + \Delta T_{п0}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{в0}$, $\Delta T_{п0}$ – разности температур, эквивалентные временному и пространственному шуму соответственно, определяемые для некоторой нормированной температуры фона T_0 , обычно 295 К.

Здесь предполагается, что для описания несканирующих ТВП используется динамическая температурно-частотная характеристика, которая определяется при поперечном движении миры относительно ТВП или наоборот, что обеспечивает более точный прогноз эффективности ТВП при вскрытии объектов местности [6]. Пространственный шум при этом, по сути, преобразуется во временной, некоррелированный в смежных кадрах, что и обуславливает справедливость формулы (1).

На практике нередко имеет место типовое соотношение [7] $\Delta T_{п0} = 0,4\Delta T_{в0}$, при котором значение ΔT_0 из-за наличия пространственного шума возрастает всего на 8 %. Поэтому в технической документации на любой ТВП в ка-

честве паспортного значения его пороговой чувствительности $\Delta T_{\text{пас}}$, как правило, приводится величина $\Delta T_{\text{в0}}$.

Однако реальные условия работы ТВП в общем случае отличаются от условий его аттестации, т. к. фактическая температура фона T может не совпадать с нормированной. Поэтому практически важно решить задачу пересчета параметров $\Delta T_{\text{пас}} = \Delta T_{\text{в0}}$ и $\Delta T_{\text{п0}}$, полученных для температуры фона T_0 , на его температуру T , которой отвечают соответствующие рабочие значения разностей температур, эквивалентных временному $\Delta T_{\text{в}}$ и пространственному $\Delta T_{\text{п}}$ шуму, определяющие результирующую разность температур, эквивалентную шуму ΔT :

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_{\text{в}}^2 + \Delta T_{\text{п}}^2}. \quad (2)$$

Поскольку шум считывания в ТВП пренебрежимо мал [8], значение $\Delta T_{\text{в}}$ в (2) для реальных условий применения ТВП оценивается как

$$\Delta T_{\text{в}} = \sqrt{\Delta T_{\text{ф}}^2 + \Delta T_{\text{т}}^2}, \quad (3)$$

где $\Delta T_{\text{ф}}$, $\Delta T_{\text{т}}$ – разности температур, эквивалентные фотонному шуму и шуму темнового тока соответственно для температуры фона T .

Получим вначале удобные для дальнейшего анализа формулы для $\Delta T_{\text{ф}}$ и $\Delta T_{\text{т}}$. Допустим, что при облучении элемента ФПУ монохроматическим потоком излучения от объекта $P_{\text{об}}(\lambda)$, Вт, равным

$$P_{\text{об}}(\lambda) = 10^{-8} hca^2 Q_{\text{об}}(\lambda) / \lambda,$$

где λ – длина волны излучения, мкм; $Q_{\text{об}}(\lambda)$ – спектральная плотность потока фотонов от объекта, фотон/см²·с·мкм; a – размер чувствительного элемента ФПУ, мкм; $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \times 10^{14}$ мкм/с – скорость света, этот элемент вырабатывает сигнал (в числе электронов) $N_{\text{об}}(\lambda)$, составляющий

$$N_{\text{об}}(\lambda) = 10^{-8} a^2 Q_{\text{об}}(\lambda) \eta(\lambda) t,$$

где $\eta(\lambda)$ – спектральная квантовая эффективность ФПУ; t – время накопления зарядов, с.

Дисперсия фотонного шума от фона $N_{\text{ф}}$, равная числу накопленных фотоэлектронов, при этом определяется формулой:

$$N_{\text{ф}} = 10^{-8} Q \eta a^2 t, \quad (4)$$

где Q – поток фотонов от фона в спектральном рабочем диапазоне $\Delta \lambda$, попадающий на элемент ФПУ, фотон/см²·с; η – средняя квантовая эффективность ФПУ в диапазоне $\Delta \lambda$.

Тогда пороговая облученность ФПУ ΔE_m , Вт/см², на длине волны λ_m , соответствующей максимальному значению относительной спектральной чувствительности ФПУ $S(\lambda)$, равна

$$\Delta E_m = \frac{10^8 P_{\text{об}}(\lambda_m) \sqrt{N_{\text{ф}}}}{a^2 N_{\text{об}}(\lambda_m)} = \frac{10^4 hc \sqrt{Q \eta}}{a \lambda_m \eta_m \sqrt{t}}, \quad (5)$$

а удельная обнаружительная способность ФПУ D_m^* , см·Гц^{1/2}/Вт, на длине волны λ_m составляет

$$D_m^* = \frac{10^4 \sqrt{\Delta f}}{a \Delta E_m} = \frac{\lambda_m \eta_m}{hc \sqrt{2Q \eta}} = \frac{\sqrt{\lambda_m \eta_m B}}{\sqrt{2hcM}}; \quad (6)$$

$$\eta_m = \eta(\lambda_m); \quad Q = \frac{1}{B} \int_{\Delta \lambda} Q(\lambda) d\lambda; \quad B = \frac{4}{\omega^2} + 1;$$

$$Q(\lambda) = \frac{\lambda M(\lambda)}{hc}; \quad \Delta f = \frac{1}{2t};$$

$$M = \int_{\Delta \lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $Q(\lambda)$ – спектральная плотность потока фотонов, фотон/см²·с·мкм; $M(\lambda)$ – определяемая формулой Планка спектральная плотность энергетической светимости фона, Вт/см²·мкм; M – эффективная энергетическая светимость фона в диапазоне $\Delta \lambda$, Вт/см²; ω – относительное отверстие объектива ТВП; Δf – шумовая полоса пропускания, Гц.

Здесь учтено, что средняя квантовая эффективность η в (6) определяется как

$$\eta = \frac{\int_{\Delta \lambda} Q(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta \lambda} Q(\lambda) d\lambda}.$$

При этом, имея в виду, что

$$Q(\lambda) = \lambda M(\lambda) / hc; \quad S(\lambda) = \lambda \eta(\lambda) / \lambda_m \eta_m,$$

получаем выражение для η :

$$\eta = \lambda_m \eta_m M / \int_{\Delta\lambda} \lambda M(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Тогда разность температур, эквивалентная фотонному шуму ΔT_ϕ , будет равна

$$\begin{aligned} \Delta T_\phi &= \frac{10^4 B \sqrt{\Delta f}}{a D_m^* Y \tau_o} = \frac{10^4 \sqrt{hc B M}}{a Y \tau_o \sqrt{\lambda_m \eta_m t}} = \\ &= \frac{R \sqrt{B M M_0}}{a Y \tau_o \sqrt{\eta_0 t}} = \frac{W q \sqrt{\zeta}}{\psi \tau_o \sqrt{t}}; \\ \psi &= \frac{Y}{Y_0}; \quad \zeta = \frac{M}{M_0}; \quad q = \frac{\sqrt{B / \eta_0}}{a}; \\ R &= 10^4 \sqrt{hc} / \sqrt{\int_{\Delta\lambda} \lambda M_0(\lambda) d\lambda}; \\ W &= M_0 R / Y_0; \quad Y = dM / dT = \\ &= (1,44 \times 10^4 / T^2) \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \lambda, \end{aligned} \quad (8)$$

где Y – производная от эффективной энергетической светимости фона по температуре в диапазоне $\Delta\lambda$, Вт/см²·К; τ_o – коэффициент пропускания объектива ТВП в диапазоне $\Delta\lambda$; M_0 , Y_0 , η_0 – значения M , Y и η соответственно при температуре фона $T = T_0$, а формула (4) для дисперсии фотонного шума N_ϕ с учетом (6)–(8) переписывается в виде:

$$\begin{aligned} N_\phi &= \frac{10^{-8} a^2 t \int_{\Delta\lambda} Q(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda}{B} = \\ &= \frac{10^{-8} M a^2 t \lambda_m \eta_m}{B h c} = \frac{\zeta t}{R^2 q^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично, заменяя N_ϕ в (5) на дисперсию шума темнового тока N_τ , также равную числу накопленных фотоэлектронов, получаем следующее выражение для разности температур, эквивалентной шуму темнового тока ΔT_τ :

$$\begin{aligned} \Delta T_\tau &= \frac{10^8 hc B \sqrt{N_\tau}}{a^2 \lambda_m \eta_m \tau_o Y t} = \frac{R^2 B M_0 \sqrt{N_\tau}}{a^2 Y \eta_0 \tau_o t} = \\ &= \frac{R^2 q^2 M_0 \sqrt{I / e}}{Y \tau_o \sqrt{t}} = \frac{G q^2 \sqrt{I / e}}{\psi \tau_o \sqrt{t}}; \\ N_\tau &= I t / e; \quad G = R^2 M_0 / Y_0 = R W, \end{aligned} \quad (10)$$

где I – темновой ток, А; $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Время накопления зарядов t в (8), (10) определяется частотой кадров F , Гц, или же условием отсутствия переполнения зарядовой емкости устройства считывания при воздействии темнового тока и излучения фона, что, учитывая (9), дает:

$$t = \min(t_1, t_2); \quad t_1 = \frac{\alpha N_m}{\zeta / R^2 q^2 + I / e}; \quad t_2 = \frac{1}{F}, \quad (11)$$

где N_m – зарядовая емкость считывающего устройства, электрон (для современных кремниевых устройств $N_m \leq 4 \times 10^7$ [5]); α – допустимый уровень заполнения этой емкости ($\alpha = 0,5-0,7$ [8]).

Разность температур, эквивалентная пространственному шуму ΔT_n , в (2) от относительного отверстия объектива не зависит и для температуры фона T определяется выражением [1]:

$$\begin{aligned} \Delta T_n &= M \sigma_{отн} / Y \tau_o = \Delta T_{n0} \zeta / \psi; \\ \Delta T_{n0} &= M_0 \sigma_{отн} / Y_0 \tau_o, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\sigma_{отн}$ – относительное среднеквадратическое значение остаточного разброса чувствительности элементов ФПУ ($\sigma_{отн} = 10^{-5}-10^{-3}$).

Значения комплексов R , G и W для типового вида относительной спектральной чувствительности ФПУ $S(\lambda)$ в диапазонах спектра 3–5 и 8–12 мкм приведены ниже в таблице.

$\Delta\lambda$, мкм	R , мкм·с ^{1/2}	G , К·мкм ² ·с	W , К·мкм·с ^{1/2}
3–5	$0,94 \times 10^{-4}$	$0,24 \times 10^{-6}$	$2,55 \times 10^{-3}$
8–12	$0,13 \times 10^{-4}$	$0,98 \times 10^{-8}$	$7,55 \times 10^{-4}$

Анализ также показывает, что зависимости отношений $\psi = Y / Y_0$ и $\zeta = M / M_0$ от температуры фона T , необходимые для вычисления ΔT_ν и ΔT_n , могут быть аппроксимированы следующими формулами:

$$\begin{aligned} \psi &= \begin{cases} (T / 295)^{13,2-4,19(T/295)} & (3-5 \text{ мкм}); \\ (T / 295)^{4,62-1,14(T/295)} & (8-12 \text{ мкм}); \end{cases} \\ \zeta &= \begin{cases} (T / 295)^{16,4-5,33(T/295)} & (3-5 \text{ мкм}); \\ (T / 295)^{7,32-2,15(T/295)} & (8-12 \text{ мкм}). \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

Полученные соотношения, в принципе, обеспечивают оперативную оценку пороговой чувствительности ТВП ΔT для любой температуры фона.

Однако темновой ток, в отличие от $\Delta T_{\text{пас}}$, в спецификации ТВП обычно не указывается, поэтому значение I в (10) приходится устанавливать, вычлняя из величины $\Delta T_{\text{пас}}$ составляющую, обусловленную фотонным шумом, соответствующим температуре фона T_0 и времени накопления зарядов t_0 , отвечающему этой температуре, что дает соответствующую разность температур, эквивалентную шуму темнового тока $\Delta T_{\text{т0}}$, равную, с учетом формул (8), (10), в которых следует принять $\zeta = 1$, $\psi = 1$,

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{т0}} &= \sqrt{\Delta T_{\text{пас}}^2 - \Delta T_{\text{ф0}}^2} = Gq^2 \sqrt{I/e} / \tau_0 \sqrt{t_0}; \\ \Delta T_{\text{ф0}} &= Wq / \tau_0 \sqrt{t_0}. \end{aligned} \quad (14)$$

Время накопления зарядов t_0 здесь задается формулой вида (11) при $\zeta = 1$:

$$\begin{aligned} t_0 &= \min(t_{01}, t_{02}); \quad t_{01} = \frac{\alpha N_m}{1/R^2 q^2 + I/e}; \\ t_{02} &= t_{01} = \frac{1}{F}. \end{aligned} \quad (15)$$

Очевидно, при значении t_0 , определяемом по (15), паспортная разность температур, эквивалентная шуму $\Delta T_{\text{пас}}$, достигает минимального значения, которое и приводится в спецификации ТВП.

Принимая в (14) $t_0 = t_{01}$ и решая уравнения (14) и (15) совместно относительно времени накопления t_{01} , получаем:

$$t_{01} = \frac{Gq^2 \sqrt{\alpha N_m}}{\Delta T_{\text{пас}} \tau_0}, \quad (16)$$

что, согласно (14), дает выражение для темнового тока I :

$$I = \frac{(\Delta T_{\text{пас}}^2 \tau_0^2 t_0 - W^2 q^2) e}{G^2 q^4}, \quad (17)$$

где t_0 рассчитывается по (15) с учетом (16).

В диапазоне 3–5 мкм нередко (а в диапазоне 8–12 мкм – как правило) выполняется со-

отношение $t_{01} < t_{02}$, и тогда вместо (17) имеет место формула:

$$I = \frac{(\Delta T_{\text{пас}} \tau_0 \sqrt{\alpha N_m} - W^2 / G) e}{Gq^2}.$$

Если же справедливо соотношение $t_{01} > t_{02}$, то значение I равно

$$I = \frac{(\Delta T_{\text{пас}}^2 \tau_0^2 / F - W^2 q^2) e}{G^2 q^4}.$$

При использовании высококачественного ФПУ прибор может работать в режиме ограничения фоном, когда существен лишь фотонный шум, ибо темновой ток пренебрежимо мал ($I = 0$) что, по (17), эквивалентно условию:

$$\Delta T_{\text{пас}} = Wq / \tau_0 \sqrt{t_0}. \quad (18)$$

Поскольку всегда $I \geq 0$, паспортная пороговая чувствительность ТВП $\Delta T_{\text{пас}}$ не может быть меньше значения, определяемого по (18).

Тогда, учитывая (8), находим выражение для разности температур, эквивалентной временно шуму $\Delta T_{\text{в}}$:

$$\Delta T_{\text{в}} = \Delta T_{\text{пас}} \sqrt{\zeta} / \psi \sqrt{\theta}; \quad \theta = t / t_0. \quad (19)$$

Если, кроме того, оба значения t и t_0 ограничиваются зарядовой емкостью считывающего устройства и, следовательно, по (11), (15), отношение $\theta = 1/\zeta$, то величина $\Delta T_{\text{в}}$ будет определяться формулой:

$$\Delta T_{\text{в}} = \Delta T_{\text{пас}} \zeta / \psi. \quad (20)$$

При этом величина $\Delta T_{\text{пас}}$, согласно (14), (15), составляет

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{пас}} &= \frac{W}{\tau_0 R \sqrt{\alpha N_m}} = \frac{M_0}{\tau_0 Y_0 \sqrt{\alpha N_m}} \approx \\ &\approx \frac{\lambda_m T_0^2}{1,44 \times 10^4 \tau_0 \sqrt{\alpha N_m}}, \end{aligned} \quad (21)$$

и для типовых значений $N_m = 5 \times 10^6$ электрон (диапазон спектра 3–5 мкм) и $N_m = 2 \times 10^7$ электрон (диапазон 8–12 мкм) достигает 0,015–0,02 К.

Здесь необходимо подчеркнуть, что разработка ТВП с паспортной пороговой чувствительностью, меньшей указанного значения, нецелесообразна, даже если технические возможности и позволяют это осуществить, ибо столь высокая пороговая чувствительность практически никогда не будет реализована: эффективность такого ТВП при вскрытии объектов, в том числе расположенных на квазиоднородном фоне, по сути, будет ограничена не отношением сигнал/шум, а контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора-дешифровщика [9]. Нам не известен ни один образец современных ТВП, предназначенных для решения данной задачи, который имел бы меньшее значение $\Delta T_{\text{пас}}$ (см., например, обзор [10]).

Уместно заметить, что для низкочувствительных сканирующих ТВП, работающих в режиме ограничения шумом, когда фотонный шум невелик по сравнению с шумом темного тока, можно принять $\Delta T_{\text{пас}} = \Delta T_{\text{т}}$, $\Delta T_{\text{ф}} = 0$, $\theta = 1$, и тогда вместо (20) получаем:

$$\Delta T_{\text{в}} = \Delta T_{\text{пас}} / \psi. \quad (22)$$

Из сравнения (20) и (22) с учетом (13) и видна отмеченная выше сильная зависимость разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона для низкочувствительных сканирующих ТВП и гораздо более слабая такая зависимость для высокочувствительных несканирующих ТВП благодаря наличию в (20) компенсирующего множителя ζ .

Отметим, что формулу (20) для $\Delta T_{\text{в}}$ и соответствующее выражение для разности температур, эквивалентной пространственному шуму $\Delta T_{\text{п}}$, можно, по аналогии с (21), переписать так:

$$\Delta T_{\text{в}} = \frac{M}{\tau_0 Y \sqrt{\alpha N_m}} \approx \frac{\lambda_m T^2}{1,44 \times 10^4 \tau_0 \sqrt{\alpha N_m}};$$

$$\Delta T_{\text{п}} \approx \frac{0,4 \lambda_m T^2}{1,44 \times 10^4 \tau_0 \sqrt{\alpha N_m}}.$$

Поэтому, при условии реализации равенств $t = t_1$ и $t_0 = t_{01}$ для времени накопления зарядов, результирующая разность температур, эквивалентная шуму ΔT , ТВП, работающего в режиме ограничения фоном, со снижением температуры фона уменьшается в обоих диапазонах спектра.

Однако фактически в диапазоне спектра 3–5 мкм при некоторой температуре фона T^* , определяемой согласно (11), (13) из уравнения

$$\alpha N_m R^2 q^2 F = (T^* / 295)^{16,4-5,33(T^*/295)},$$

выполняется равенство $t = t_2$ и, значит, при $T < T^*$ отношение θ в (19) стабилизируется и коэффициент ψ начинает доминировать, в связи с чем дальнейшее уменьшение температуры фона приводит в этом диапазоне уже к возрастанию результирующей пороговой чувствительности ΔT и, как следствие, к появлению экстремума (здесь – минимума) функции $\Delta T = f(T)$.

Из вышеизложенного вытекает, что в общем случае для реальных ТВП расчетные выражения для разностей температур, эквивалентных временному и пространственному шуму $\Delta T_{\text{в}}$, $\Delta T_{\text{п}}$, определяющих по (2) результирующую пороговую чувствительность ΔT , удобно представить в виде:

$$\Delta T_{\text{в}} = \sqrt{W^2 q^2 (\zeta - 1) / \tau_0^2 t_0 + \Delta T_{\text{пас}}^2} / \psi \sqrt{\theta}; \quad (23)$$

$$\Delta T_{\text{п}} = 0,4 \Delta T_{\text{пас}} \zeta / \psi.$$

Таким образом, оценка результирующей разности температур, эквивалентной шуму ΔT , для произвольной температуры фона T производится в следующем порядке:

- для относительного отверстия объектива ω рассчитывается по (6) параметр B и далее по (8) для размера элемента ФПУ a и его средней квантовой эффективности η_0 параметр q ;
- для температуры фона T рассчитываются по (13) значения отношений ψ и ζ ;
- для спектрального рабочего диапазона $\Delta \lambda$ устанавливаются по таблице значения R , G и W ;
- для паспортной пороговой чувствительности $\Delta T_{\text{пас}}$, коэффициента пропускания объектива τ_0 , частоты кадров F , зарядовой емкости устройства считывания N_m и допустимого уровня ее заполнения α рассчитываются по (16) и (15) для нормированной температуры фона T_0 значения времени накопления t_{01} , t_{02} и t_0 ;
- рассчитывается по (17) темновой ток I и далее по (11) для температуры фона T значения времени накопления t_1 , t_2 и t ;

– для отношения $\theta = t/t_0$ рассчитываются по (23) разности температур, эквивалентные временному и пространственному шуму $\Delta T_{\text{в}}$, $\Delta T_{\text{п}}$ и далее по (2) результирующая разность температур, эквивалентная шуму ΔT .

Расчетные зависимости $\Delta T = f(T)$ результирующей разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона для типовых значений частоты кадров $F = 25$ Гц, коэффициента пропускания объектива $\tau_0 = 0,85$ и параметров q , $\Delta T_{\text{нас}}$ и N_m , характерных для современных ТВП, даны на рис. 1–4.

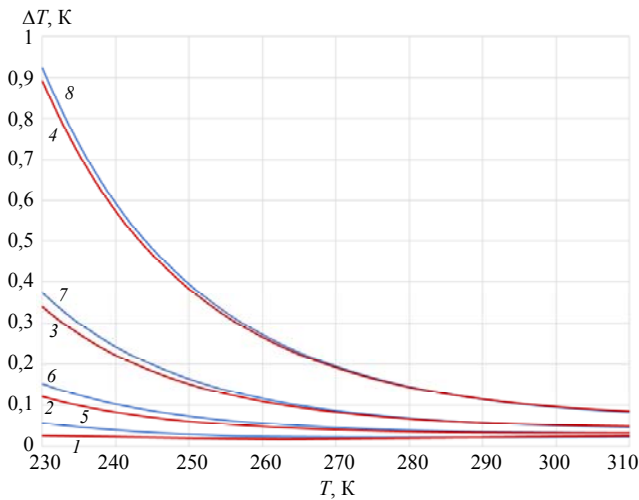


Рис. 1. Зависимости $\Delta T = f(T)$ разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона в диапазоне спектра 3–5 мкм при $q = 0,7 \text{ мкм}^{-1}$: 1–4 – $N_m = 5 \times 10^6$, 5–8 – $N_m = 7 \times 10^6$; 1,5 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,02 \text{ К}$; 2,6 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,03 \text{ К}$; 3,7 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,05 \text{ К}$; 4,8 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,1 \text{ К}$

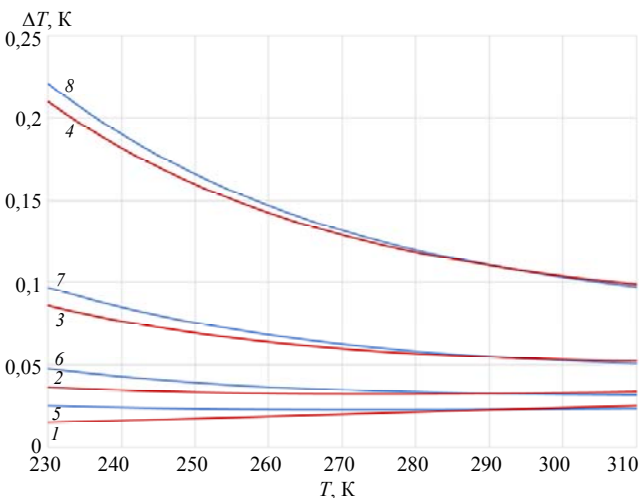


Рис. 2. Зависимости $\Delta T = f(T)$ разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона в диапазоне спектра 8–12 мкм при $q = 0,4 \text{ мкм}^{-1}$: 1–4 – $N_m = 2 \times 10^7$, 5–8 – $N_m = 4 \times 10^7$; 1,5 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,02 \text{ К}$, 2,6 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,03 \text{ К}$, 3,7 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,05 \text{ К}$, 4,8 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,1 \text{ К}$

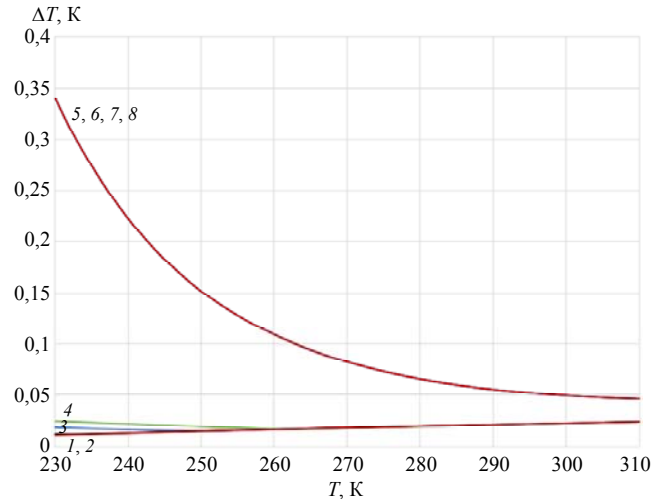


Рис. 3. Зависимости $\Delta T = f(T)$ разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона в диапазоне спектра 3–5 мкм при $N_m = 5 \times 10^6$: 1–4 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,02 \text{ К}$, 5–8 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,05 \text{ К}$; 1,5 – $q = 0,2 \text{ мкм}^{-1}$, 2,6 – $q = 0,3 \text{ мкм}^{-1}$, 3,7 – $q = 0,5 \text{ мкм}^{-1}$, 4,8 – $q = 0,7 \text{ мкм}^{-1}$

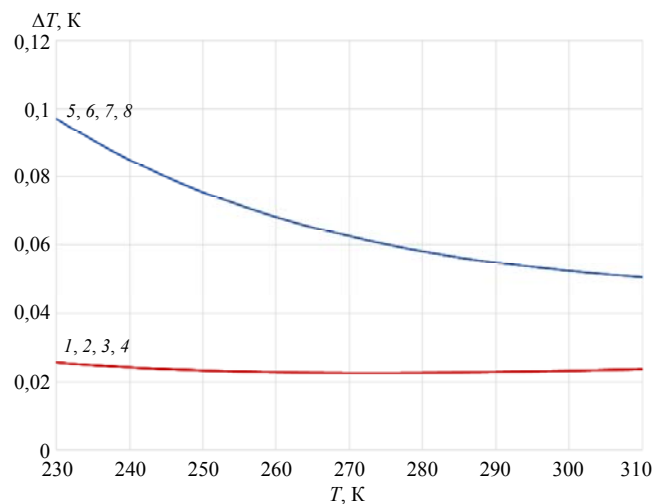


Рис. 4. Зависимости $\Delta T = f(T)$ разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона в диапазоне спектра 8–12 мкм при $N_m = 4 \times 10^7$: 1–4 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,02 \text{ К}$, 5–8 – $\Delta T_{\text{нас}} = 0,05 \text{ К}$; 1,5 – $q = 0,1 \text{ мкм}^{-1}$, 2,6 – $q = 0,2 \text{ мкм}^{-1}$, 3,7 – $q = 0,3 \text{ мкм}^{-1}$, 4,8 – $q = 0,4 \text{ мкм}^{-1}$

Анализ полученных результатов расчетов позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Зависимость $\Delta T = f(T)$ результирующей разности температур, эквивалентной шуму, от температуры фона для современных высокочувствительных ТВП с паспортной пороговой чувствительностью $\Delta T_{\text{нас}} \approx 0,02 \text{ К}$, работающих в режиме, близком к режиму ограничения фоном (кривые 1 на рис. 1–2), в спектральном рабочем диапазоне 3–5 мкм имеет слабовыраженный минимум, обуслов-

ленный тем фактом, что время накопления зарядов, увеличиваясь с понижением температуры фона, обычно первоначально ограниченное зарядовой емкостью считывающего устройства N_m , при некотором значении этой температуры начинает лимитироваться частотой кадров. В диапазоне спектра 8–12 мкм время накопления всегда ограничивается значением N_m и при понижении температуры фона величина ΔT уменьшается. С увеличением $\Delta T_{\text{пас}}$ доля шума темного тока растет и значения ΔT со снижением температуры фона повышаются, причем в большей степени – в диапазоне 3–5 мкм.

2. По той же причине при фиксированном значении паспортной пороговой чувствительности ТВП $\Delta T_{\text{пас}}$ увеличение зарядовой емкости устройства считывания N_m приводит к возрастанию результирующей разности температур, эквивалентной шуму ΔT , тем более сильному, чем ниже температура фона и больше это значение $\Delta T_{\text{пас}}$. При этом от параметра q , определяемого относительным отверстием объектива, квантовой эффективностью ФПУ и размером его элементов, величина ΔT практически не зависит.

Представленные результаты мало критичны к конкретному виду относительной спектральной чувствительности ФПУ $S(\lambda)$.

Заключение

Результирующая пороговая чувствительность высокочувствительных несканирующих ТВП, определяемая разностью температур, эквивалентной шуму, работающих в режиме, близком к режиму ограничения фоном, в от-

личие от низкочувствительных сканирующих ТВП первых поколений, при снижении температуры фона не ухудшается даже в диапазоне спектра 3–5 мкм, и это обстоятельство является дополнительным аргументом в пользу обоснованного в [11] вывода о предпочтительности использования в современных наблюдательных ТВП этого спектрального рабочего диапазона.

Можно полагать, что представленная методика будет полезна для оперативной инженерной оценки пороговой чувствительности современных ТВП, работающих в широком диапазоне температур окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балоев В. А., Ильин Г. И., Овсянников В. А., Филиппов В. Л. Эффективность, помехозащищенность и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2015.
2. Dhar V., Khan Z., Sharma R., Muralidharan R. / Proc. SPIE. 2011. Vol. 8014. P. 80140P-1.
3. Findlay G., Cutten D. / Applied Optics. 1989. № 23. P. 323.
4. Hodgkin A., Kowalewski B., Tomkinson D., Teaney B., Corbin T., Driggers R. / Proc. SPIE. 2006. Vol. 6207. P. 620708-1.
5. Лу И. И. / Автометрия. 2001. № 2. С. 131.
6. Webb C., Halford C. / Optical Engineering. 1999. Vol. 38. № 5. P. 845.
7. Holst G. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003.
8. Патрашин А. И. / Прикладная физика. 2010. № 2. С. 103.
9. Овсянников В. А., Овсянников Я. В., Филиппов В. Л. / Контенант. 2019. № 1. С. 60.
10. Ebbutt G., Griffith H., Williamson J. Jane's C4ISR and mission systems. Joint and common equipment 2017-2018. – US: IHS Markit, 2018.
11. Овсянников В. А., Филиппов В. Л. / Контенант. 2019. № 4. С. 68.

On the influence of background temperature on the threshold sensitivity of a modern thermal imaging devices

V. A. Ovsyannikov and Y. V. Ovsyannikov

JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”
2 Lipatova st., Kazan, 420075, Russia
E-mail: JAR_OVS@mail.ru

Received 7.11.2023; accepted 12.02.2024

An engineer’s method has been developed for recalculating the threshold sensitivity of modern highly sensitive staring thermal imaging devices (TID), determined by a noise equivalent temperature difference, from the normalized background temperature of 295 K to its actual temperature. The technique takes into account the photonic noise caused by the radiation of the background and the TID itself, the noise of the dark current and the spatial noise arising from the residual, after correction, the sensitivity spread of the elements of the matrix photodetector (focal plane array). The dependence of the threshold sensitivity of the TID on the background temperature and parameters characterizing the photodetector is investigated. The research results are presented in a form convenient for practical use. It is concluded that the high threshold sensitivity of modern TIDs is maintained even at low background temperatures.

Keywords: thermal imaging device, threshold sensitivity, background temperature.

REFERENCES

1. Baloev V. A., Il’in G. I., Ovsyannikov V. A. and Filippov V. L., Efficiency, clutter-protection and clutter-stability of electro-optical imaging systems, Kazan, KGTU izdatel’stvo, 2015 [in Russian].
2. Dhar V., Khan Z., Sharma R. and Muralidharan R., Proc. SPIE **8014**, 80140P-1 (2011).
3. Findlay G. and Cutten D., Applied Optics, № 23, 323 (1989).
4. Hodgkin A., Kowalewski B., Tomkinson D., Teaney B., Corbin T. and Driggers R., Proc. SPIE **6207**, 620708-1 (2006).
5. Li I. I., Avtometriya, № 2, 131 (2001) [in Russian].
6. Webb C. and Halford C., Optical Engineering **38** (5), 845 (1999).
7. Holst G., Electro-optical imaging system performance. 3 ed., US, SPIE press, 2003.
8. Patrashin A. I., Applied Physics, № 2, 103 (2010) [in Russian].
9. Ovsyannikov V. A., Ovsyannikov Y. V. and Filippov V. L., Kontenant, № 1, 60 (2019) [in Russian].
10. Ebbutt G., Griffith H. and Williamson J., Jane’s C4ISR and mission systems. Joint and common equipment 2017-2018, US, IHS Markit, 2018.
11. Ovsyannikov V. A. and Filippov V. L., Kontenant, № 4, 68 (2019) [in Russian].