

**Особенности измерения температурно-частотной характеристики высокочувствительных несканирующих тепловизионных приборов***В. А. Овсянников, Я. В. Овсянников*

*Рассмотрена специфика измерения температурно-частотной характеристики современных высокочувствительных несканирующих тепловизионных приборов, являющейся основой для оценки, прогнозирования и сравнения их информационной эффективности, в частности дальности действия, при обнаружении и распознавании объектов, расположенных на естественном неоднородном фоне местности. Проанализированы основные факторы, влияющие на эту характеристику, с учетом того, что данные приборы обычно функционируют в контрастно-ограниченном режиме, в котором их эффективность лимитируется не шумом прибора, а ограниченной контрастной чувствительностью зрительного аппарата оператора-дешифровщика.*

*Ключевые слова:* тепловизионный прибор, температурно-частотная характеристика, стендовая аттестация.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2022-10-1-53-62

**Введение**

Оценка информационной эффективности, в том числе дальности действия, тепловизионных приборов (ТВП) обычно базируется на концепции эквивалентных мир, согласно которой вероятность вскрытия (обнаружения и распознавания) объекта определяется числом периодов еще разрешаемой эквивалентной тепловой миры, укладываемых в критический размер объекта – корень квадратный из его видимой площади. Для этого необходимо знание соответствующей температурно-частотной характеристики (ТЧХ) прибора  $\Delta T_{\text{раз}} = f(\nu)$  – зависимости разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$ , К, от угловой частоты  $\nu$ , мрад<sup>-1</sup>, стандартной периодической теп-

ловой миры, полосы которой разрешаются по ее изображению с вероятностью 0,5. Это означает, что мира разрешается в среднем половиной задействованных при испытаниях операторов, каждый из которых ее разрешает не менее чем в 50 % времени наблюдения.

В тепловизионном приборостроении экспериментально снятая ТЧХ используется:

- для оценки, прогнозирования и сравнения показателей эффективности образцов ТВП при вскрытии объектов в реальных условиях применения;
- для верификации математических моделей ТЧХ ТВП, особенно нового типа.

При этом важно отметить, что реализация в современных высокочувствительных несканирующих ТВП, использующих квантовые матричные фотоприемные устройства, весьма малых значений разности температур, эквивалентной шуму, определяет тот факт, что возможности этих ТВП, используемых для вскрытия объектов на естественном неоднородном фоне, лимитируются, в отличие от малочувствительных ТВП первых поколений, не шумом приборов, а ограниченной контрастной чувствительностью зрительного аппарата оператора, анализирующего изображение, –

**Овсянников Владимир Александрович**, гл.н.с., д.т.н.  
E-mail: gipo@telebit.ru

**Овсянников Ярослав Владимирович**, инженер-программист.

АО «НПО Государственный институт прикладной оптики».

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

Статья поступила в редакцию 20 октября 2021 г.

© Овсянников В. А., Овсянников Я. В., 2022

факт, который многими специалистами еще в должной мере не осознан и в используемых сегодня в стране традиционных методиках оценки эффективности ТВП, как правило, игнорируется.

Дело в том, что для реализации максимально высокой температурной чувствительности ТВП требуется достаточно большая крутизна передаточной функции сигнала – зависимости  $L' = f(\Delta T_R)$  яркости  $L'$ , кд/м<sup>2</sup>, изображения от разности радиационных температур  $\Delta T_R$ , К, протяженного объекта и фона, – такая, чтобы на изображении был заметен шум. Тогда потенциальные возможности ТВП по обнаружению объектов реализуются полностью. Однако такая высокая крутизна может быть обеспечена – при всегда ограниченном рабочем диапазоне яркости монитора  $\Delta L'_M$  – только за счет сужения диапазона регистрируемой разности температур  $\Delta T_M$ . При этом объект, например, с положительным тепловым контрастом, расположенный на гребне фоновой температурной неоднородности, не попадет в данный диапазон и, значит, не будет виден на изображении. Аналогичная проблема возникает и при рас-

познавании уже обнаруженного объекта, когда для повышения качества дешифрирования требуется воспроизвести на изображении распределение радиационной температуры по площади объекта. Следовательно, для обеспечения эффективного поиска и вскрытия объектов на неоднородном фоне диапазон регистрируемой разности температур должен быть достаточно широким. Однако уменьшение крутизны  $\psi = \Delta L'_M / \Delta T_M$  передаточной функции сигнала, определяемой коэффициентом усиления видеосигналов, обеспечивающее расширение данного диапазона, приводит к исчезновению на изображении шума и снижению контраста изображения объектов, и ТВП из шумо-ограниченного переходит в контрастно-ограниченный режим работы, ТЧХ в котором сильно зависит от выбираемого оператором контраста изображения миры и диапазона яркости видеоконтрольного устройства, причем этот диапазон нередко – при наблюдении изображения в темноте или полутьме – полностью не используется [1].

Передаточные функции сигнала контрастно-ограниченного и шумо-ограниченного ТВП схематически представлены на рис. 1.

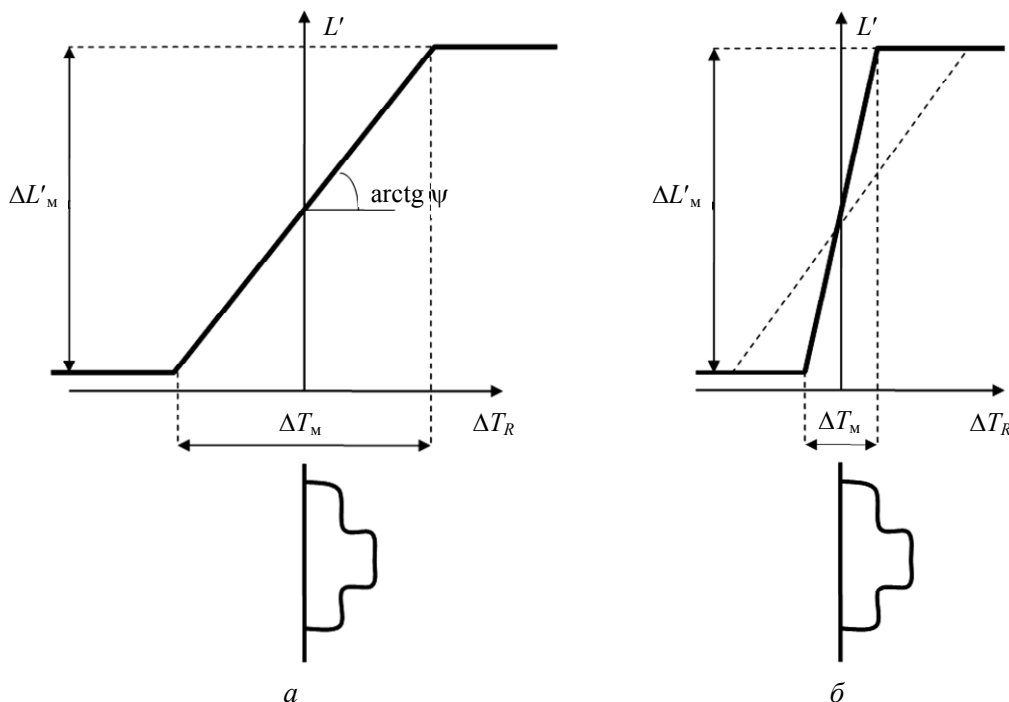


Рис. 1. Передаточная функция сигнала ТВП и объект на температурном пьедестале: а – контрастно-ограниченный ТВП (объект виден); б – шумо-ограниченный ТВП (объект не виден)

Количественным условием работы ТВП в контрастно-ограниченном режиме является следующее [2]. Если разность температур, эквивалентная шуму  $\Delta T$ , К, меньше порогового значения  $\Delta T^*$ , К, равного

$$\Delta T^* = \frac{0,18\beta r \Delta T_m}{K_m};$$

$$\beta = \left( \frac{0,13 + 0,18L_0'^{-0,42}}{Z\delta_0'} \right)^{1,5} + 0,02;$$

$$K_m = \frac{\Delta L_m'}{L_2' + L_1'}; \quad L_0' = \frac{L_2' + L_1'}{2}; \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{1 + \exp(-1/FT_{\text{гл}})}{1 - \exp(-1/FT_{\text{гл}})}};$$

$$T_{\text{гл}} = 0,019 + 0,051/L_0'^{0,17}; \quad \Delta L_m' = L_2' - L_1',$$

где  $L_0'$ ,  $L_1'$ ,  $L_2'$  – средняя, минимальная и максимальная яркость изображения соответственно, кд/м<sup>2</sup> (можно принять [3]:  $L_0' = 100$  кд/м<sup>2</sup>

при дешифрировании изображения на свету,  $L_0' = 3-30$  кд/м<sup>2</sup> – в полутьме,  $L_0' = 0,3-1$  кд/м<sup>2</sup> – в темноте);  $r$  – коэффициент, учитывающий визуальное накопление видеосигналов в смежных кадрах ТВП;  $F$  – частота кадров, Гц;  $T_{\text{гл}}$  – постоянная времени глаза, с;  $Z$  – электронное увеличение изображения;  $\delta_0'$  – угловой размер элемента изображения, соответствующий шагу (периоду) элементов фотоприемника ТВП, мрад;  $K_m$  – коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта, при  $L_1' \ll L_2'$  близкий к 1, то ТВП работает в контрастно-ограниченном режиме, в противном случае – в шумо-ограниченном.

На рис. 2 для ряда значений средней яркости изображения  $L_0'$  и типовых значений  $K_m = 0,95$ ,  $Z = 1$  и  $\delta_0' = 0,95$  мрад приведены зависимости пороговой разности температур, эквивалентной шуму  $\Delta T^*$ , от частоты кадров  $F$  при нормирующем условии  $\Delta T_m = 1$  К.

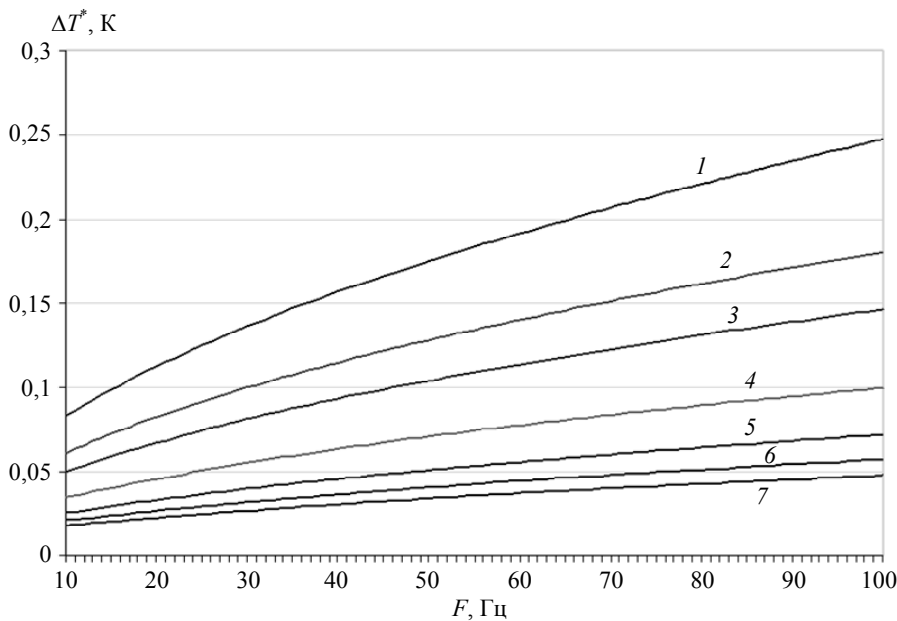


Рис. 2. Зависимость пороговой разности температур, эквивалентной шуму  $\Delta T^*$ , от частоты кадров ТВП  $F$  для средней яркости изображения  $L_0'$ : 1 –  $L_0' = 0,3$  кд/м<sup>2</sup>; 2 –  $L_0' = 0,6$  кд/м<sup>2</sup>; 3 –  $L_0' = 1$  кд/м<sup>2</sup>; 4 –  $L_0' = 3$  кд/м<sup>2</sup>; 5 –  $L_0' = 10$  кд/м<sup>2</sup>; 6 –  $L_0' = 30$  кд/м<sup>2</sup>; 7 –  $L_0' = 100$  кд/м<sup>2</sup>

Понятно, что в зависимости от выбранного коэффициента усиления видеосигналов, определяющего диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$ , любой конкретный ТВП с фиксированным значением разности температур, эквивалентной шуму  $\Delta T$ , может функционировать как в контрастно-ограниченном

режиме (при  $\Delta T_m > \Delta T_m^*$ ), так и в шумо-ограниченном режиме (при  $\Delta T_m < \Delta T_m^*$ ), где, по (1), пороговое значение регистрируемой разности температур  $\Delta T_m^*$  равно

$$\Delta T_m^* = 5,6\Delta TK_m / \beta r, \quad (2)$$

однако в последнем случае диапазон  $\Delta T_M$  на практике всегда расширяется до  $\Delta T_M^*$  – для поддержания еще приемлемой зашумленности изображения, – и при этом новом значении  $\Delta T_M$  ТВП фактически будет работать в обоих режимах одновременно; данную ситуацию можно считать оптимальной, ибо здесь, с одной стороны, тепловизионное изображение еще не слишком зашумлено, а с другой – обеспечивается достаточно высокий контраст этого изображения.

Из (2) следует, что для типовых значений средней яркости изображения  $L'_0 = 10$  кд/м<sup>2</sup> (дешифрирование изображения, например, в кабине транспортного средства), частоты кадров  $F \geq 25$  Гц, электронного увеличения  $Z = 1$ , коэффициента сохранения контраста  $K_M = 0,95$  и разности температур, эквивалентной шуму, которая для современных высокочувствительных ТВП находится в пределах  $\Delta T = 0,015\text{--}0,05$  К (см., например, справочное издание [4]), пороговая величина  $\Delta T_M^*$  составляет всего 0,4–1,4 К; при этом в большинстве случаев требуемый для вскрытия объектов диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_M$  превышает  $\Delta T_M^*$ , и, значит, данные ТВП работают в контрастно-ограниченном режиме.

Между тем существующие методики (например, [5–9]) измерения ТЧХ, в том числе с использованием компьютерного имитационного моделирования [9], по сути, относятся к аттестации шумо-ограниченных ТВП первых поколений с невысокой пороговой чувствительностью. Их ТЧХ можно оценить по предложенной еще в работе [10] формуле, которая после адаптации к несканирующим ТВП с учетом ограниченных возможностей зрительного анализатора оператора по пространственно-временному интегрированию визуальных сигналов [1] для порогового отношения сигнал/шум 2,8 [3] имеет вид:

$$\Delta T_{\text{раз}} = \frac{\Delta T}{r \varkappa} \max \left( 0, 26; \frac{2,6v\delta_0}{K(v)} \right);$$

$$\varkappa = a/\Delta a; \quad \delta_0 = a/f; \quad (3)$$

$$K(v) = \exp(-2\pi^2\sigma^2v^2); \quad \sigma = 0,55\delta,$$

где  $\delta_0$  и  $\delta$  – номинальное и эффективное значение элементарного поля зрения ТВП соот-

ветственно, мрад, определяемое всем информационным трактом прибора (далее используем типовое соотношение  $\delta = 1,6\delta_0$ );  $a, \Delta a$  – размер и шаг элементов матричного фотоприемника соответственно, мкм;  $\varkappa$  – коэффициент заполнения фотоприемника по одной координате;  $f$  – фокусное расстояние объектива, мм;  $K(v)$  – функция передачи модуляции ТВП;  $\sigma$  – параметр ее гауссовской аппроксимации, мрад.

Поэтому экспериментально снятая ТЧХ, полученная при достаточно высоком, обеспечивающем появление на изображении видимого шума, коэффициенте усиления видеосигналов, даже идеально совпадающая с расчетной согласно (3) и являющаяся при указанном условии вполне достоверной, не будет определять реально достижимую эффективность современных высокочувствительных ТВП, ибо их диапазон регистрируемой разности температур при этом оказывается слишком узким и не обеспечивает вскрытия объектов на неоднородном фоне.

Напротив, ТЧХ контрастно-ограниченных ТВП от разности температур, эквивалентной шуму  $\Delta T$ , являющейся неперенным атрибутом моделей вида (3), не зависит, поскольку тепловизионное изображение здесь практически не зашумлено, но, вместе с тем, оказывается зависящей от контрастной чувствительности зрительного анализатора оператора при восприятии им видеоинформации и требуемого в каждом данном случае диапазона регистрируемой разности температур и, значит, в немалой степени теряет свою определенность. Кроме того, из-за наличия в несканирующих ТВП выборки (дискретизации сигналов) в обоих направлениях традиционные процедуры измерения ТЧХ применимы лишь для ограниченного сверху диапазона угловых частот стандартной 4-х полосной мира, для которого эта мира еще разрешается по классическому критерию. Эти и другие обстоятельства, связанные с недооценкой широким кругом специалистов особенностей аттестации несканирующих ТВП, вызывают необходимость определенной модификации существующих моделей и методик измерения ТЧХ данных ТВП и надлежущей доработки руководств по их стендовым испытаниям. Нашей задачей здесь является анализ ключевого фактора – особенностей измерения ТЧХ ТВП,

функционирующих в контрастно-ограниченном режиме.

### Анализ задачи и ее решение

Контрастная чувствительность зрительного аппарата человека, существенно влияющая на эффективность современных ТВП, описывается функцией порогового контраста  $M(v')$  – зависимостью минимального еще обнаруживаемого глазом оператора контраста  $M = (L'_{\max} - L'_{\min}) / (L'_{\max} + L'_{\min})$ , где  $L'_{\max}$ ,  $L'_{\min}$  – максимальное и минимальное значения яркости соответственно, изображения разрешаемой синусоидальной миры от ее угловой

частоты. Для функции  $M(v')$  известно следующее эмпирическое выражение (например, [3]):

$$M(v') = \frac{(1 + 0,7 / L'_0)^{0,2} \left[ 1 + 12 / (w'(1 + v'/3)^2) \right]}{540v' \exp(-cv') \sqrt{1 + 0,06 \exp(cv')}};$$

$$c = 0,3(1 + 100/L'_0)^{0,15},$$

где  $v'$  – угловая частота в пространстве изображений, град<sup>-1</sup>;  $w'$  – угловой размер изображения миры, град, который для стандартной тепловой миры с отношением сторон полос 7:1 равен  $w' = 7/2v'$ .

Графики функции  $M(v')$  для этой миры представлены на рис. 3.

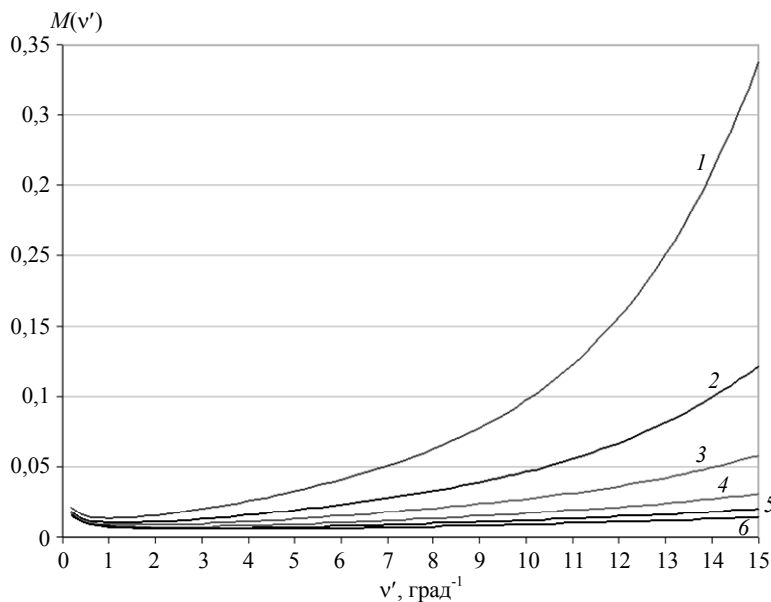


Рис. 3. Функция порогового контраста  $M(v')$  зрительного анализатора для различной средней яркости изображения  $L'_0$ : 1 –  $L'_0 = 0,3$  кд/м<sup>2</sup>; 2 –  $L'_0 = 1$  кд/м<sup>2</sup>; 3 –  $L'_0 = 3$  кд/м<sup>2</sup>; 4 –  $L'_0 = 10$  кд/м<sup>2</sup>; 5 –  $L'_0 = 30$  кд/м<sup>2</sup>; 6 –  $L'_0 = 100$  кд/м<sup>2</sup>

Связь частоты  $v'$  с соответствующей угловой частотой  $v$ , мрад<sup>-1</sup>, в пространстве предметов устанавливается формулой:

$$v' = 17,45v/\Gamma; \quad \Gamma = \alpha Z \delta'_0 / \delta_0,$$

где  $\Gamma$  – видимое увеличение ТВП – отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта.

Наиболее теоретически последовательное выражение для ТЧХ контрастно-ограниченного ТВП приведено в [11], однако для дальнейшего изложения достаточно использовать более обзримую, приближенную формулу для разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$ , эквивалентные варианты которой имеют вид [1]:

$$\Delta T_{\text{раз}} = \pi \Delta T_m M(v) / 4K(v) K_m = \pi L'_0 M(v) / 2\psi K(v).$$

Следовательно, ТЧХ зависит от коэффициента усиления видеосигнала (определяется диапазонами регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$  и яркости монитора  $\Delta L'_m$ ), видимого увеличения ТВП и средней яркости монитора  $L'_0$ , которые определяют функцию порогового контраста  $M(v)$ , и от функции передачи модуляции прибора  $K(v)$ .

Функция передачи модуляции  $K(v)$  в (4) обычно близка к гауссовской, однако цифровая обработка изображений (интерполяция отсчетов, высокочастотная фильтрация и др.), нередко реализуемая в самом информа-

ционном тракте ТВП, изменяет форму этой функции и, следовательно, ТЧХ, что учитывается в созданной в последние годы в Центре ночного видения и электронных датчиков (США) и активно внедряемой в практику новой операциональной модели ТВП NVThermIP (например, [12]). Данная модель, в отличие от модели NVTherm, основанной на критериях Джонсона, связывает вероятность вскрытия объектов не с одной-единственной величиной – максимальной угловой частотой  $\nu_{\max}$  разрешаемой эквивалентной миры, по сути определяющей разрешающую способность ТВП, а с целой совокупностью угловых частот этой миры, не превышающих максимальную, что, в принципе, позволяет более полно и точно отразить зависимость указанной вероятности от всей ТЧХ.

Диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$  контрастно-ограниченного ТВП, обеспечивающего оперативный поиск и вскрытие объектов с положительным или отрицательным тепловым контрастом, локализованных на температурных пьедесталах – соответственно на горбах или впадинах температурных фоновых неоднородностей, – должен удовлетворять условию:

$$\Delta T_m \geq (\Delta T_{\text{фон}} + 2 |\Delta T_R|) \tau_{\text{ат}}, \quad (5)$$

где  $\Delta T_{\text{фон}}$  – максимальная величина вариаций радиационной температуры фоновых неоднородностей, К (можно приближенно считать: в летний солнечный день  $\Delta T_{\text{фон}} = 7$  К, в облачный день  $\Delta T_{\text{фон}} = 4$  К, ночью  $\Delta T_{\text{фон}} = 2$  К);  $\Delta T_R$  – тепловой контраст объекта – разность радиационных температур объекта и фона, К;  $\tau_{\text{ат}}$  – максимальный коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ТВП, отвечающий минимальной дистанции до объектов.

Для наземных ТВП при поиске объектов (по рубежам), которые, как правило, располагаются на разных дальностях, в (5) обычно можно принять  $\tau_{\text{ат}} = 1$ , однако для ТВП воздушного базирования, работающих по наземным объектам, по сути находящимся на фиксированной дальности, под величиной  $\tau_{\text{ат}}$  целесообразно понимать коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a$  на фактической дис-

танции до объектов, что повышает контраст их изображения, т. к. для реализации меньшего диапазона  $\Delta T_m$  здесь требуется больший коэффициент усиления видеосигналов. Поскольку значения  $\Delta T_{\text{фон}}$  и, отчасти,  $\Delta T_R$  обычно коррелированы с погодными условиями, нередко в данных случаях принимают:  $\Delta T_m = 20$  К (день, ясно),  $\Delta T_m = 10$  К (ночь, ясно),  $\Delta T_m = 6$  К (облачность),  $\Delta T_m = 2$  К (туман или осадки).

При неограниченном ресурсе времени поиска объектов, а также при вскрытии объектов с известным местоположением, в частности при распознавании уже обнаруженных объектов (наиболее актуальная задача вскрытия), когда величина  $\Delta T_{\text{фон}}$  роли практически не играет, оператор может подобрать яркость и контраст их изображения таким образом, чтобы диапазон  $\Delta T_m$ , согласно, например, рекомендациям [3], составлял (рис. 4)

$$\Delta T_m = q |\Delta T_R| \tau_a; \quad q = 6-10, \quad (6)$$

где меньшее значение коэффициента  $q$  отвечает узкопольным ТВП, а большее – широкопольным.

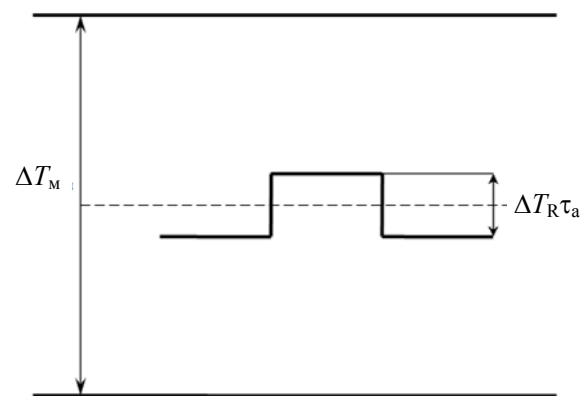


Рис. 4. Выбор диапазона регистрируемой разности температур (для положительного контраста объекта)

Довольно большое значение  $q$  здесь учитывает необходимость регистрации распределения радиационной температуры по площади объекта, возможно содержащего высокотемпературные детали, что важно для его распознавания. Контраст изображения объекта  $K'$ , определяемый как

$$\begin{aligned}
 K' &= \frac{L'_{об} - L'}{L'_{об} + L'} = \\
 &= \frac{\Delta T_R \tau_a}{(\Delta T_m / 2 + \Delta T_R \tau_a / 2) + (\Delta T_m / 2 - \Delta T_R \tau_a / 2)} = \\
 &= \frac{\Delta T_R \tau_a}{\Delta T_m},
 \end{aligned}$$

где  $L'_{об}$ ,  $L'$  – яркость изображения объекта и фона соответственно, модуль которого при обычно рекомендуемом для использования коэффициенте  $q = 6$  в (6) равен оптимальной величине [13]  $|K'| = 1/q = 1/6$ , от значений  $\Delta T_R$  и  $\tau_a$  в этом случае не зависит, – разумеется, если при вариациях диапазона  $\Delta T_m$  ТВП остается в контрастно-ограниченном режиме.

Как вытекает из (4), для снижения  $\Delta T_{раз}$  коэффициент сохранения контраста  $K_m$  должен быть максимально высоким, что при фиксированной средней яркости монитора  $L'_0$  требует по возможности меньшего значения отношения его минимальной яркости к максимальной, составляющего  $g = L'_1 / L'_2 = (1 - K_m) / (1 + K_m)$ . Следовательно, значение  $L'_2 = 2L'_0 / (1 + g)$  даже при  $g = 0$  не превышает  $2L'_0$ , что при максимальной требуемой средней яркости  $L'_0 = 100 \text{ кд/м}^2$  (дешифрирование на свету) составляет  $L'_2 = 200 \text{ кд/м}^2$ . Современные мониторы такую яркость вполне обеспечивают [5]. С той же целью, как показывает анализ, среднюю яркость монитора  $L'_0$  в каждом случае целесообразно выбирать достаточно большой, близкой к верхней границе рекомендуемого диапазона яркости изображения фона.

Поэтому при измерении ТЧХ, когда мира, расположенная в фокальной плоскости объектива коллиматора, по существу находится на однородном фоне, следует, отключив устройство автоматической регулировки усиления, использовать значения коэффициента усиления видеосигнала и соответствующего ему контраста изображения миры не максимально высокими, как это обычно делается из конъюнктурных соображений с целью уменьшения разрешаемой разности температур  $\Delta T_{раз}$  для каждой данной угловой частоты миры или же прямо регламентируется в некоторых практи-

ческих руководствах по измерению ТЧХ, а отвечающими наблюдению объектов на реальном неоднородном фоне, соответствующими требуемому диапазону регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$ . Следовательно, для контрастно-ограниченного ТВП, когда коэффициент усиления и, значит, контраст изображения не связаны с еще приемлемым для оператора-дешифровщика уровнем зашумленности изображения, лимитирующим диапазон изменения этого коэффициента, вариации ТЧХ значительно больше, чем для шумо-ограниченного. Такой же эффект достигается, если поместить вблизи миры протяженный излучатель – имитатор фоновых неоднородностей с определенной температурой, отличной от температуры миры, наличие которого автоматически приводит к снижению коэффициента усиления и расширению диапазона  $\Delta T_m$  до необходимого уровня. В противном случае, без этого имитатора, устройство автоматической регулировки усиления обеспечит максимально возможный коэффициент усиления видеосигналов и, соответственно, максимальный контраст изображения миры, вследствие чего экспериментально снятая ТЧХ расположится ниже реальной, и, значит, использование такой характеристики для прогноза эффективности ТВП при вскрытии объектов на естественном неоднородном фоне приведет к завышенной оценке этой эффективности.

Таким образом, измеренная в стендовых условиях ТЧХ контрастно-ограниченного ТВП, зависящая от диапазона регистрируемой разности температур, выбор которого, в свою очередь, зависит от конкретной фоно-целевой обстановки, не является уникальной, однозначной характеристикой, и, следовательно, отдельно взятая конкретная ТЧХ не определяет в достаточно полной степени эффективности данного ТВП. Для использования ТЧХ, например, с целью прогноза дальности действия ТВП в широком диапазоне условий применения необходимо иметь целую совокупность этих характеристик, отвечающих разным значениям  $\Delta T_m$ , или применять расчетную ТЧХ, которая формируется, в частности, на основе измеренных значений функции передачи модуляции прибора  $K(v)$  согласно (4); при этом реализуется объективная, хотя и

косвенная, оценка этой характеристики и, тем самым, разрешается противоречие между принципиальной субъективностью ТЧХ ТВП и возможностью ее объективной оценки.

Электронное увеличение изображения миры при измерении ТЧХ также должно подбираться не с целью минимизации значения  $\Delta T_{\text{раз}}$  для миры каждой данной угловой частоты, а отвечать условиям дешифрирования изображений реальных объектов местности, когда это увеличение обеспечивает не только достаточно детальное восприятие тонкой структуры изображения объекта, но и отсутствие дискомфорта, связанного с нерезкостью изображения при слишком большом его увеличении. Поэтому увеличение изображения должно быть таким, чтобы угловой размер его элемента составлял 0,8–1 мрад (согласно [14], оптимальное значение  $\delta'_0 = 0,95$  мрад).

В качестве иллюстрации на рис. 5 для типовых значений параметров  $L'_0 = 10$  кд/м<sup>2</sup>,  $\delta'_0 = 0,95$  мрад,  $\alpha = 0,9$ ,  $Z = 1$ ,  $K_m = 0,95$  и ряда значений диапазона регистрируемой разности

температур  $\Delta T_m$  представлены в полулогарифмическом масштабе рассчитанные по (4) зависимости  $\Delta T_{\text{раз}} = f(x)$  разрешаемой разности температур от относительной частоты миры  $x = \nu\delta$ . Там же для сравнения приведена полученная по (3) аналогичная зависимость для шумо-ограниченного ТВП с разностью температур, эквивалентной шуму,  $\Delta T = 0,02$  К и частотой кадров  $F = 25$  Гц.

Видно, что для контрастно-ограниченного ТВП, когда коэффициент усиления и, следовательно, контраст изображения не ограничены еще приемлемой для оператора зашумленностью изображения, имеют место значительные вариации ТЧХ.

Другие аспекты проблемы измерения ТЧХ, общие для контрастно-ограниченных и шумо-ограниченных ТВП, – требования к тепловым мирам и операторам-дешифровщикам, выбор критерия разрешения мир, учет влияния дискретизации видеосигналов, оценка достоверности результатов измерения и анализ путей ее повышения – детально рассмотрены в работах [15–17].

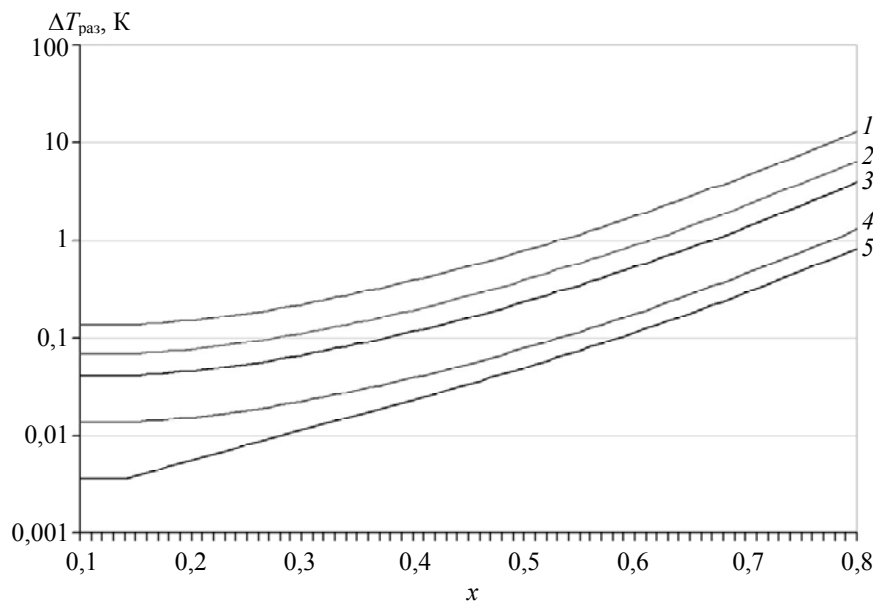


Рис. 5. ТЧХ ТВП: 1–4 – контрастно-ограниченного (1 –  $\Delta T_m = 20$  К, 2 –  $\Delta T_m = 10$  К, 3 –  $\Delta T_m = 6$  К, 4 –  $\Delta T_m = 2$  К); 5 – шумо-ограниченного

### Заключение

Таким образом, современные высокочувствительные ТВП при вскрытии объектов на естественном неоднородном фоне практически всегда работают в контрастно-ограничен-

ном режиме, поэтому измеряемая в стендовых условиях их ТЧХ, соответствующая этому режиму, не является уникальной, однозначной характеристикой ТВП. Она должна соответствовать реальным условиям работы прибора, зависеть от них и, значит, является представи-



тельной только для этих условий. Поэтому для прогнозирования на основе ТЧХ показателей эффективности, в частности дальности действия, конкретного ТВП в широком диапазоне условий его применения необходимо иметь целое семейство таких ТЧХ, отвечающих данным условиям. При этом ТЧХ ТВП зависит:

– от диапазона регистрируемой разности температур и средней яркости монитора, выбор которых, в свою очередь, определяется конкретной фоно-целевой обстановкой;

– от видимого увеличения и наличия цифровой обработки изображений, от которой зависит вид функции передачи модуляции прибора.

Можно полагать, что представленные в статье результаты будут способствовать улучшению теоретического и методологического обеспечения решения широкого спектра задач оценки и повышения эффективности современных несканирующих ТВП, высокие потребительские качества которых уже сегодня раздвигают горизонты мирового рынка тепловизионной техники.

#### 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. Овсянников В. А., Филиппов В. Л. // Оборонная техника. 2017. № 3. С. 3.

3. Holst G. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003.

4. Ebbutt G., Griffith H., Williamson J. Jane's C4ISR and mission systems. Joint and common equipment 2017–2018. – US: IHS Markit.

5. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. – М.: Логос, 2004.

6. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. – Poland, Warsaw: Military university of technology, 2010.

7. Knezevic D., Redjimi A., Miskovic K., Vasiljevic D., Mikolic Z., Babic J. // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. P. 332.

8. ГОСТ Р 53466-2009 «Тепловизоры медицинские. Общие технические требования. Методы измерения основных параметров». – М.: Стандартинформ, 2011.

9. Chrzanowski K., Hong Viet N. // Optica Applicata. 2020. № 4. P. 671.

10. Ллойд Д. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.

11. Vollmerhausen R. // Optical Engineering. 2009. № 7. P. 076401-1.

12. Barela J., Kastek M., Firmanty K., Trzaskawka P., Dulski R. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8355. P. 83551E-1.

13. Hodgkin A., Maurer T., Halford C., Vollmerhausen R. // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6543. P. 654307-1.

14. Holst G. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 94520K-1.

15. Овсянников В. А., Овсянников Я. В., Филиппов В. Л. // Авиакосмическое приборостроение. 2021. № 4. С. 24.

16. Овсянников В. А., Филиппов В. Л. // Контенант. 2017. № 2. С. 34.

17. Овсянников В. А., Филиппов В. Л. // Оборонная техника. 2017. № 3. С. 14.

PACS: 42.72. Ai, 42.79. Pw.

## Specifics of measuring temperature-frequency characteristics of high-sensitive staring thermal imagers

V. A. Ovsyannikov and Y. V. Ovsyannikov

JSC NPO “State Institute of Applied Optics”

2 Lipatova st., Kazan, 420075, Russia

E-mail: gipo@telebit.ru

Received October 20, 2021

*This paper examines the specifics of measuring temperature-frequency characteristics of modern high-sensitive staring thermal imagers, which serves as a basis for estimating, predicting and comparing their information efficiency (particularly range) during detection and recognition of targets located on natural heterogeneous terrain background. The main*

***factors affecting this characteristic have been analyzed with consideration for the fact that these devices usually function in a contrast-limited mode where their efficiency is restricted not by the noise of the device but by limited contrast sensitivity of the decoder's human eye.***

*Keywords:* thermal imager, temperature-frequency characteristics, bench testing.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2022-10-1-53-62

#### REFERENCES

1. V. A. Baloev, G. I. Ilyin, V. A. Ovsyannikov, and V. L. Filippov, *Efficiency, clutter-protection and clutter-stability of electro-optical imaging systems* (KGTU izdatelstvo, Kazan, 2015) [in Russian].
2. V. A. Ovsyannikov and V. L. Filippov, *Oboronaya tekhnika*, No. 3, 3 (2017) [in Russian].
3. G. Holst, *Electro-optical imaging system performance. 3 ed.* (SPIE press, US, 2003).
4. G. Ebbutt, H. Griffith, and J. Williamson, *Jane's C4ISR and mission systems. Joint and common equipment 2017–2018.* (US, IHS Markit).
5. V. V. Tarasov and Y. G. Yakushenkov, *Forward looking infrared systems* (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
6. K. Chrzanowski, *Testing thermal imagers* (Military university of technology, Poland, Warsaw, 2010).
7. D. Knezevic, A. Redjimi, K. Miskovic, D. Vasiljevic, Z. Mikolic, and J. Babic, *Optical and Quantum Electronics* **48**, 332 (2016).
8. Standard P 53466-2009 *Medical thermal imagers. General technical requirements. Measurements of principal parameters* (Standartinform, Moscow, 2011) [in Russian].
9. K. Chrzanowski and N. Hong Viet, *Optica Applicata*, No. 4, 671 (2020).
10. J. Lloyd, *Thermal imaging systems* (Plenum Press, New York, 1975; Mir, Moscow, 1978).
11. R. Vollmerhausen, *Optical Engineering*, No. 7, 076401-1 (2009).
12. J. Barela, M. Kastek, K. Firmanty, P. Trzaskawka, and R. Dulski, *Proc. SPIE* **8355**, 83551E-1 (2012).
13. A. Hodgkin, T. Maurer, C. Halford, and R. Vollmerhausen, *Proc. SPIE* **6543**, 654307-1 (2007).
14. G. Holst, *Proc. SPIE* **9452**, 94520K-1 (2015).
15. V. A. Ovsyannikov, Y. V. Ovsyannikov, and V. L. Filippov, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, No. 4, 24 (2021) [in Russian].
16. V. A. Ovsyannikov and V. L. Filippov, *Kontenant*, No. 2, 34 (2017) [in Russian].
17. V. A. Ovsyannikov and V. L. Filippov, *Oboronaya tekhnika*, No. 3, 14 (2017) [in Russian].