

УДК 621.384.32  
EDN: OXNUZX

PACS: 42.72. Ai, 42.79. Pw.



## О возможности упрощения методики измерения температурно-частотной характеристики несканирующих тепловизионных приборов

В. А. Овсянников, Я. В. Овсянников

*Выполнен анализ правомерности использования упрощенной методики экспериментальной оценки статической температурно-частотной характеристики (ТЧХ) современных несканирующих тепловизионных приборов, работающих в контрастно-ограниченном режиме, в котором их эффективность лимитируется предельной контрастной чувствительностью зрительного аппарата оператора. Методика основана на обнаружении провала в изображении двух смежных полос стандартной четырехполосной тепловой миры, расположенной в оптимальной фазе относительно структуры матричного фотоприемника, когда глубина этого провала максимальна. Установлена взаимосвязь данной характеристики с динамической ТЧХ, наиболее точно определяющей возможности приборов при обнаружении и распознавании объектов, измеряемой при поперечном движении поля зрения прибора относительно миры. Сформулированы практические рекомендации по пересчету измеренной статической ТЧХ к динамической.*

*Ключевые слова:* тепловизионный прибор, температурно-частотная характеристика, стендовые испытания.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-61-70

### Введение

Основным показателем эффективности тепловизионных приборов (ТВП) является дальность действия – дальность вскрытия (обнаружения и/или распознавания) зачетного объекта с заданной вероятностью, что предопределяет необходимость контроля реализации этой дальности, по крайней мере на этапе предварительных или государственных испы-

таний, путем проведения натуральных испытаний ТВП. Однако прямое измерение или контроль дальности действия ТВП, особенно при их серийном производстве, требуют значительных затрат времени, сил и средств. Кроме того, полученные экспериментальные оценки дальности действия ТВП обычно сопряжены со случайными и систематическими ошибками, поскольку эта дальность зависит от множества факторов, не связанных с самим ТВП, таких, как: алфавит вскрываемых объектов, в частности степень различия их тепловых портретов; текущее состояние и стратификация атмосферы; квалификация, психофизическое состояние и число задействованных операторов-дешифровщиков, а также используемые ими критерии вскрытия объектов; характер и степень тепловой неоднородности фона; локализация, в том числе в поле зрения ТВП, и видимые размеры объекта, учитывающие его возможное частичное экранирование, напри-

---

Овсянников Владимир Александрович, гл.н.с., д.т.н.  
Овсянников Ярослав Владимирович, инженер-программист 1 кат.  
АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики».  
Россия, 420075, г. Казань, ул. Липатова, 2.  
E-mail: gipo@telebit.ru

Статья поступила в редакцию 1.11.2022  
После доработки 15.11.2022  
Принята к публикации 29.11.2022

© Овсянников В. А., Овсянников Я. В., 2023

мер, растительностью; вариации радиационной температуры по площади объекта; наличие у объекта, особенно на его контуре, характерных элементов и средств маскировки; ракурс наблюдения и движение объекта; условия дешифрирования полученного изображения (яркость, контрастность, зашумленность, видимое увеличение, ресурс времени) и возможность их оптимизации; наличие косвенных демаскирующих признаков объекта.

Поэтому любой ТВП аттестуется по отношению к специальным тест-объектам – периодическим прямоугольным мирам, причем в качестве основной рабочей характеристики ТВП используется температурно-частотная характеристика (ТЧХ)  $\Delta T_{\text{раз}} = f(\nu)$  – зависимость разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$ , К, от угловой частоты  $\nu$ , мрад<sup>-1</sup>, стандартной четырехполосной тепловой миры, разрешаемой по ее изображению с вероятностью 0,5, – которая и определяет посредством соответствующей операциональной модели ТВП, базирующейся на концепции эквивалентных мир, его дальность действия. Именно так во многих зарубежных странах, согласно стандарту STANAG 4347 Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems, 1995, аттестуются по дальности действия разрабатываемые ТВП [1]. При этом важно подчеркнуть, что реализация в современных несканирующих ТВП, особенно использующих квантовые матричные фотоприемники, весьма малых значений разности температур, эквивалентной шуму, обуславливает тот факт, что возможности этих ТВП, используемых для вскрытия объектов на естественном неоднородном фоне, лимитируются, в отличие от сравнительно малочувствительных сканирующих ТВП первых поколений, не шумом приборов, который на тепловизионном изображении практически отсутствует, а ограниченной контрастной чувствительностью зрительного аппарата оператора, анализирующего изображение [2]. Количественный критерий работы ТВП в подобном контрастно-ограниченном режиме предложен в [3], а специфика оценки их ТЧХ для этого режима детально рассмотрена в [4].

Другой важной особенностью несканирующих ТВП является наличие выборки (дискретизации сигналов) в обоих направлениях, превращающей цифровой ТВП в простран-

ственно-неинвариантную систему, что вызывает необходимость соответствующей модификации ТЧХ, поскольку она приобретает следующие нежелательные свойства (рис. 1) [2,5]:

- становится неоднозначной: для любых значений угловой частоты тепловой миры разрешаемая разность температур  $\Delta T_{\text{раз}}$  зависит от фазы этой миры – сдвига полос миры относительно структуры фотоприемника;

- является немонотонной: для любой фазы миры вследствие интерференции ее периодической структуры с периодической же структурой фотоприемника с увеличением частоты миры соответствующее значение  $\Delta T_{\text{раз}}$  на участке  $(0,6-0,9)\nu_n$  ( $\nu_n$  – частота Найквиста, равная половине частоты выборки) несколько снижается, причем на этом участке существует сильная зависимость значения  $\Delta T_{\text{раз}}$  от фазы миры и его вариации от оператора к оператору;

- оказывается ограниченной: изображение стандартной миры любого контраста с угловой частотой, превышающей  $\nu_n$ , содержит не более трех разрешаемых полос, и, следовательно, классический критерий разрешения миры, требующий различения на изображении всех ее четырех полос, здесь не реализуется. Поэтому обычная, статическая ТЧХ прибора с выборкой определяется лишь до частоты Найквиста, на которой эта характеристика становится параллельной оси ординат. Следовательно, учитывая, что для расчетной оценки дальности вскрытия объектов обычно имеет значение правая ветвь ТЧХ, данная оценка будет занижена.

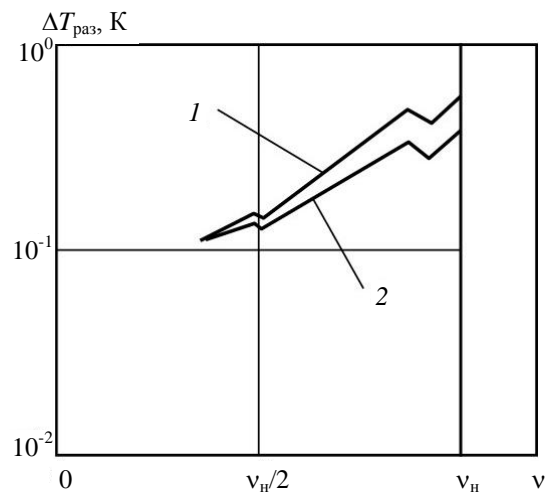


Рис. 1. ТЧХ цифрового ТВП при различных фазах миры: 1 – наимхудшая фаза; 2 – оптимальная фаза

В результате многих исследований по аттестации ТВП, использующих выборку, и визуальному дешифрированию соответствующих изображений было установлено, что наиболее точный прогноз реальных возможностей ТВП при вскрытии объектов местности обеспечивает динамическая ТЧХ, которая определяется при поперечном движении ТВП относительно миры или наоборот. Для этого ТВП ставится на специальную платформу, перемещающую или поворачивающую его из стороны в сторону относительно тест-объекта, находящегося в фокальной плоскости коллиматора. (Перемещение тест-объекта при неподвижном ТВП требует использования гораздо более широкопольного коллиматора и поэтому менее приемлемо). Амплитуда перемещений должна быть такой, чтобы изображение миры находилось в пределах 50 % поля зрения прибора. С ускорением движения поля зрения ТВП разрешаемая разность температур  $\Delta T_{\text{раз}}$  несколько уменьшается, достигая слабого минимума при скорости, выражаемой в числе элементов разложения в секунду, равном частоте кадров, после чего вследствие размывания изображения миры начинает медленно возрастать. При этом за счет инерции зрительного аппарата фазовые эффекты усредняются, и наблюдатель может с равным успехом разрешить на изображении все четыре полосы миры [5, 6].

Подчеркнем, что динамическая ТЧХ (рис. 2), в отличие от статической, однозначна, монотонна во всей области определения и ограничена не частотой Найквиста, а некоторым, обычно более высоким, пределом углового разрешения  $\nu_{\text{пр}}$ . Следовательно, данная ТЧХ – действительно вполне представительная характеристика ТВП с выборкой, причем она отнюдь не является искусственной, ибо в реальных условиях эксплуатации ТВП нередко имеет место взаимное перемещение объекта и ТВП или же прибор находится на вибрирующей или качающейся платформе. Использование динамической ТЧХ, которое при анализе и синтезе современных цифровых ТВП считается весьма перспективным, очевидно, предполагает определенную модернизацию существующего стендового оборудования для обеспечения перемещения поля зрения ТВП относительно тест-объекта, и это

является основным препятствием для широкого внедрения такой ТЧХ в практику тестирования несканирующих ТВП.

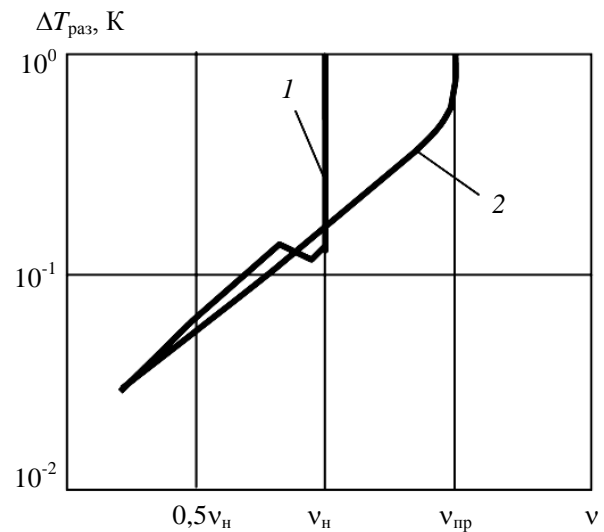


Рис. 2. Статическая (1) и динамическая (2) ТЧХ ТВП

Для исключения отмеченного недостатка при оценке ТЧХ цифровых ТВП авторами германской операциональной модели ТВП TRM3 предложено вместо разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$  ввести понятие «различаемая (perceived) разность температур»  $\Delta T_{\text{раз}}^*$ , определив ее как минимальную разность радиационных температур стандартной тепловой миры и фона, при которой на изображении разрешаются хотя бы две смежные полосы этой миры при ее оптимальной фазе [7]. При этом под оптимальной понимается фаза миры, при которой средняя глубина модуляции  $\Delta S_{\Sigma}(\nu)$  изображения миры с угловой частотой  $\nu$ , равная

$$\Delta S_{\Sigma}(\nu) = \frac{1}{n_{\Sigma} - 1} \sum_{i=0}^{n_{\Sigma}-1} |S_i - S_{i+1}|,$$

где  $S_i$  – значения последовательных пиков и провалов выходного сигнала от полос миры (рис. 3);  $n_{\Sigma}$  – общее число пиков и провалов выходного сигнала, зависящее от угловой частоты миры (для стандартной 4-х полосной миры  $n_{\Sigma} \leq 7$ ), достигает максимума, а, следовательно, различаемая разность температур  $\Delta T_{\text{раз}}^*$  – минимума.

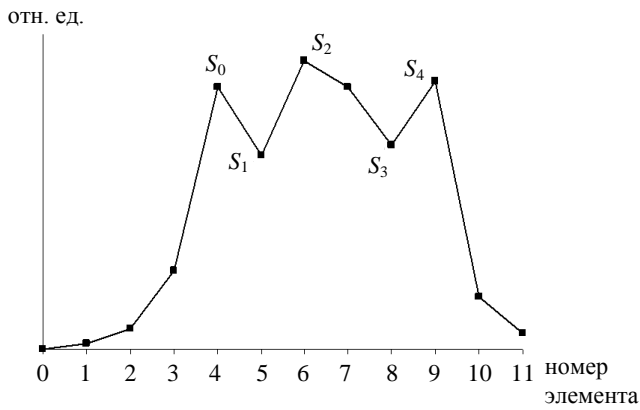


Рис. 3. Пики и провалы выходного сигнала ТВП

Зависимость  $\Delta S_{\Sigma}(v)$ , нормированная при  $v = 0$  к единице, умноженная на поправочный коэффициент  $\pi/4$ , играет роль некоего аналога функции передачи модуляции ТВП при оценке соответствующей модифицированной ТЧХ  $\Delta T_{\text{раз}}^* = f(v)$ . Хотя функция  $\Delta S_{\Sigma}(v)$  не вполне монотонна, зависимость  $\Delta T_{\text{раз}}^* = f(v)$  оказывается однозначной и, преодолевая частоту Найквиста, ограничивается лишь значением, отвечающим пределу углового разрешения. При этом в современной операциональной модели ТВП TRM4, являющейся дальнейшим развитием модели TRM3, для повышения точности прогнозирования дальности действия вместо измеренной ТЧХ  $\Delta T_{\text{раз}}^* = f(v)$  используется скорректированная ТЧХ  $\Delta T_{\text{раз}}^{**} = f(v)$ , определяемая как [8]

$$\Delta T_{\text{раз}}^{**} = \frac{3}{n-1} \Delta T_{\text{раз}}^*,$$

где  $n$  – число пиков выходного сигнала, зависящее от угловой частоты миры  $v$  (для стандартной 4-х полосной миры  $n \leq 4$ ).

Очевидным достоинством данной ТЧХ является то, что ее измерение не требует никакой доработки существующего стендового оборудования. Выполненные ранее за рубежом эксперименты продемонстрировали вполне приемлемую точность прогноза посредством этой модели дальности действия ТВП: возникающее в ряде случаев некоторое завышение ее оценки не превосходит 10%. К недостаткам модели следует отнести сложность расчета и измерения ТЧХ, поэтому в

отечественной практике при измерении ТЧХ обычно в качестве критерия разрешения миры используется просто обнаружение провала в изображении любых двух смежных полос миры при ее оптимальной фазе, которой отвечает максимальная глубина данного провала. Поскольку здесь достаточно иметь миру, состоящую всего лишь из двух полос, вместо изготовления набора соответствующих тест-объектов с различной угловой частотой иногда объединяют в одном блоке несколько таких мир с последовательно увеличивающейся, обычно в  $\gamma = 2^{1/6} = 1,12$  раза, шириной полос так, что одна полоса каждой миры является общей для двух смежных мир (рис. 4) [9].

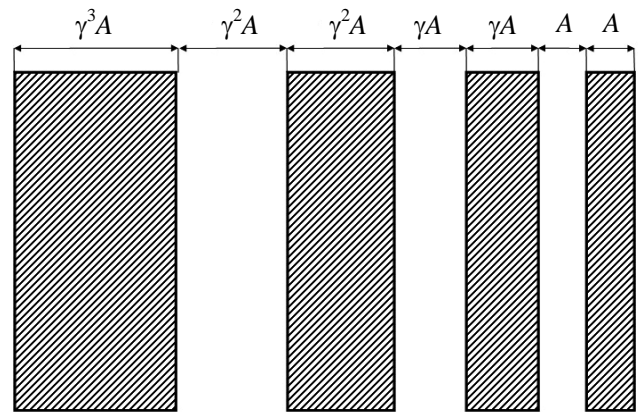


Рис. 4. Объединение тепловых мир с различной угловой частотой

Несмотря на широкое распространение подобной упрощенной процедуры измерения соответствующей статической ТЧХ  $\Delta T_{\text{раз1}} = f(v)$ , научное обоснование правомерности ее использования для аттестации ТВП в литературе отсутствует, в связи с чем задачей настоящей статьи является установление и анализ взаимосвязи этой ТЧХ с динамической ТЧХ  $\Delta T_{\text{раз2}} = f(v)$ , наиболее адекватно отражающей возможности несканирующих ТВП по вскрытию объектов.

### Методика решения задачи

Контрастная чувствительность зрительного анализатора оператора, существенно определяющая ТЧХ современных высокочувствительных ТВП, характеризуется функцией порогового контраста  $M(v')$  – зависимостью

минимального еще обнаруживаемого зрительным анализатором оператора относительного 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, [10]):

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

$$c = 0,3(1 + 100/L'_0)^{0,15}; \quad L'_0 = (L'_1 + L'_2)/2,$$

где  $v'$  – угловая частота миры в пространстве изображений, град<sup>-1</sup>;  $L'_0, L'_1, L'_2$  – средняя, минимальная и максимальная яркости изображения соответственно, кд/м<sup>2</sup> (можно принять:  $L'_0 = 100$  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);  $w'$  – угловой размер изображения миры, град (для стандартной миры с соотношением сторон полос 7:1 имеем  $w' = 7/2v'$ ).

Связь частоты  $v'$  с соответствующей угловой частотой  $v$ , мрад<sup>-1</sup>, в пространстве предметов и относительной частотой миры  $g = v\delta_0/\alpha$  устанавливается формулой

$$v' = 17,45v/\Gamma = 17,45v\delta_0/\alpha\Delta\delta' = 17,45g/\Delta\delta'; \quad (1)$$

$$\Gamma = \Delta\delta'\alpha/\delta_0; \quad \alpha = a/\Delta a,$$

где  $\Gamma$  – видимое увеличение ТВП – отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта;  $a, \Delta a$  – размер и шаг (период) элементов фотоприемника соответственно, мкм;  $\alpha$  – коэффициент заполнения фотоприемника по одной координате;  $\delta_0$  – элементарное поле зрения ТВП – угловой размер элемента фотоприемника, мрад;  $\Delta\delta'$  – угловой размер элемента изображения, отвечающий шагу элементов фотоприемника (согласно [11], оптимальное значение  $\Delta\delta' = 0,95$  мрад).

При выводе выражения для разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз1}}$  учтем, что в данном случае две смежные полосы тепловой миры с угловой частотой  $v = 1/\Delta\varphi$ , обратной их угловому периоду  $\Delta\varphi$ , ориентированы так, что центр промежутка между ними совпадает с центром одного из элементов фотоприемника с угловым размером  $\delta_0$  (рис. 5).

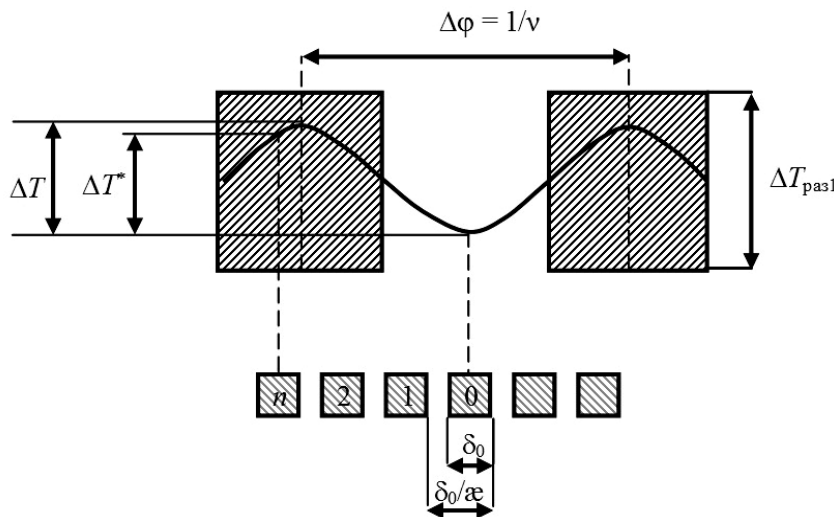


Рис. 5. Взаимная ориентация полос миры и элементов строки фотоприемника

В результате пространственной фильтрации, осуществляемой объективом с угловым диаметром кружка рассеяния  $\delta_{об}$  и элементами фотоприемника, разность радиационных температур полос миры и фона, изначально равная  $\Delta T_{\text{раз1}}$ , снижается до уровня  $\Delta T$ , составляющего [2, 10]

$$\Delta T = (4/\pi)\Delta T_{\text{раз1}}K_{об}(g)K_{фп}(g)K_{вкy}(g);$$

$$g = v\delta_0/\alpha; \quad K_{об}(g) = \exp(-2\pi^2\rho^2\alpha^2g^2); \quad (2)$$

$$K_{фп}(g) = K_{вкy}(g) = \sin(\pi\alpha g)/\pi\alpha g;$$

$$\rho = 0,26\theta; \quad \theta = \delta_{об}/\delta_0,$$

где  $K_{об}(g)$ ,  $K_{фп}(g)$ ,  $K_{вкы}(g)$  – функции передачи модуляции объектива, элемента фотоприемника и светового пятна видеоконтрольного устройства – светодиодного монитора соответственно в зависимости от относительной частоты миры  $g$ .

Здесь  $4/\pi$  – амплитуда первой гармоники единичной прямоугольной волны.

Далее, можно показать, что разность сигналов, снимаемых с нулевого и  $n$ -го элементов строки фотоприемника, которым отвечают минимальный и максимальный сигналы соответственно, пропорциональна величине  $\Delta T^*$ , равной

$$\Delta T^* = \Delta T [1 - \cos(2\pi n g)] / 2; \quad (3)$$

$$n = \text{int} [0,5(1/g + 1)],$$

где  $\text{int}(x)$  – целая часть  $x$ .

Поэтому при относительной частоте миры  $g = 1/(2n - 1)$  одинаковые максимальные сигналы возникают сразу на двух смежных элементах строки фотоприемника с номерами  $n$  и  $n + 1$ , расположенных симметрично относительно оси полосы миры.

Очевидно, между значением  $\Delta T^*$ , зависящим от разрешаемой разности температур  $\Delta T_{раз1}$ , и соответствующей разрешаемой разностью яркостей изображения  $\Delta L'_{раз}$  имеет место соотношение

$$\Delta L'_{раз} = \Delta T^* \Delta L'_m / \Delta T_m, \quad (4)$$

где  $\Delta T_m$  – диапазон регистрируемой разности температур, К, определяемый рабочим диапазоном яркости монитора  $\Delta L'_m = L'_2 - L'_1$ , кд/м<sup>2</sup>.

С другой стороны, учитывая, что яркость изображения фона соответствует середине рабочего диапазона яркости монитора – это необходимо для воспроизведения как положительных, так и отрицательных тепловых контрастов объектов, – функцию порогового контраста  $M(g)$ , согласно ее определению, можно представить в виде

$$M(g) = \Delta L'_{раз} / (L'_2 + L'_1),$$

что, с учетом (1)–(4), дает искомое выражение для ТЧХ  $\Delta T_{раз1} = f(g)$  как функции относительной частоты миры  $g$ :

$$\Delta T_{раз1} = \pi \Delta T_m M(g) / 4 K_{об}(g) K_{фп}(g) K_{вкы}(g) \times$$

$$\times K_m [1 - \cos(2\pi n g)] / 2; \quad (5)$$

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

где  $K_m$  – коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта; при  $L'_2 \gg L'_1$  значение  $K_m \approx 1$  и величина  $\Delta T_{раз1}$  от диапазона яркости монитора уже практически не зависит.

Здесь подразумевается, что с изменением угловой частоты миры  $\nu$  коэффициент усиления видеосигналов остается постоянным, соответствующим требуемому диапазону регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$ . С ростом частоты  $\nu$  разрешаемая разность температур  $\Delta T_{раз1}$ , естественно, увеличивается.

Угловой диаметр кружка рассеяния объектива  $\delta_{об}$  в (2) определяется формулой [2, 10]

$$\delta_{об} = \sqrt{(0,84\delta_d)^2 + \delta_a^2}; \quad \delta_d = 2,44\lambda_0\delta_0/\omega a,$$

где  $\delta_d$ ,  $\delta_a$  – угловые диаметры дифракционного и абберационного кружков рассеяния объектива с концентрацией энергии 85 % соответственно, мрад;  $\lambda_0$  – средняя длина волны спектрального рабочего диапазона ТВП, мкм;  $\omega$  – относительное отверстие объектива.

Для исключения существенного снижения эффективности ТВП при обнаружении точечных объектов отношение  $\theta$  диаметра кружка рассеяния объектива к размеру элементов фотоприемника не должно быть слишком большим и обычно не превышает  $\theta = 3$ . Так, в [12] с учетом случайной ориентации изображения точечного излучателя относительно структуры фотоприемника рекомендуется выдерживать соотношение  $\lambda_0/\omega a = 1,1$ , что при  $\delta_a = \delta_0$  дает значения  $\delta\delta_{об} = 2,5\delta_0$  и  $\theta = 2,5$ .

Сравним далее полученную статическую ТЧХ  $\Delta T_{раз1} = f(g)$  с динамической ТЧХ  $\Delta T_{раз2} = f(g)$ , которую, с учетом результатов [2, 10], можно описать выражением

$$\Delta T_{раз2} = \pi \Delta T_m M(g) /$$

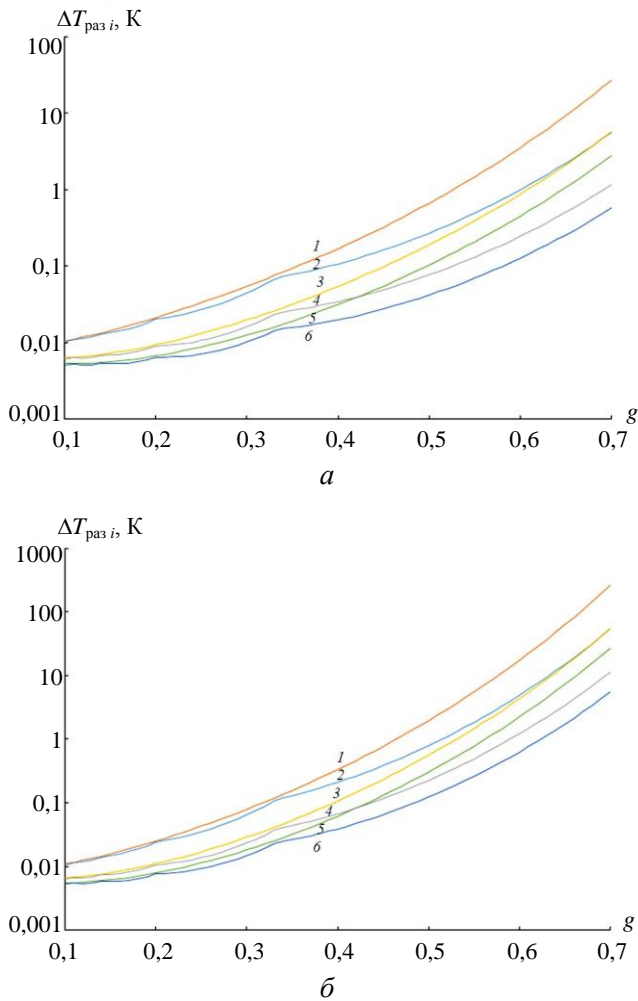
$$/ 4 K_{об}(g) K_{фп}(g) K_{выб}(g) K_{вкы}(g) K_{см}(g) K_m; \quad (6)$$

$$K_{выб}(g) = K_{см}(g) = \sin(\pi g) / \pi g,$$

где  $K_{выб}(g)$ ,  $K_{см}(g)$  – функции передачи модуляции выборки и смаза изображения, возни-

кающего при движении поля зрения ТВП, соответственно.

Зависимости  $\Delta T_{раз i} = f(g)$  ( $i = 1, 2$ ) для ряда значений средней яркости изображения  $L'_0$  и коэффициента заполнения фотоприемника  $\alpha$  представлены для типового значения  $\theta = 2,5$  и нормирующего условия  $\Delta T_M / K_M = 1$  К на рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимости  $\Delta T_{раз1} = f(g)$  и  $\Delta T_{раз2} = f(g)$  для ряда значений  $L'_0$  и  $\alpha$  ( $a - \alpha = 0,8$ ,  $b - \alpha = 1$ ; 1 –  $\Delta T_{раз2}$ ,  $L'_0 = 0,6$  кд/м<sup>2</sup>; 2 –  $\Delta T_{раз1}$ ,  $L'_0 = 0,6$  кд/м<sup>2</sup>; 3 –  $\Delta T_{раз2}$ ,  $L'_0 = 10$  кд/м<sup>2</sup>; 4 –  $\Delta T_{раз1}$ ,  $L'_0 = 10$  кд/м<sup>2</sup>; 5 –  $\Delta T_{раз2}$ ,  $L'_0 = 100$  кд/м<sup>2</sup>; 6 –  $\Delta T_{раз1}$ ,  $L'_0 = 100$  кд/м<sup>2</sup>)

Следовательно, отношение  $\alpha(g) = \Delta T_{раз2} / \Delta T_{раз1}$ , по (5), (6), составляет

$$\alpha(g) = \frac{1 - \cos(2\pi ng)}{2[\sin(\pi g) / \pi g]^2}.$$

Зависимость  $\alpha(g)$  приведена ниже:

$g \dots 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7$   
 $\alpha \dots 1 \ 1,03 \ 1,03 \ 1,23 \ 1,58 \ 2,47 \ 3,57 \ 4,76.$

Поэтому, измерив по описанной упрощенной методике статическую ТЧХ прибора  $\Delta T_{раз1}(v)$ , динамическую ТЧХ  $\Delta T_{раз2}(v)$ , более точно характеризующую эффективность ТВП при вскрытии объектов, можно получить согласно формуле

$$\Delta T_{раз2}(v) = \alpha(v \delta_0 / \alpha) \Delta T_{раз1}(v). \quad (7)$$

Как видно, искомая ТЧХ  $T_{раз2}(v)$  во всех точках превышает измеренную ТЧХ  $\Delta T_{раз1}(v)$ , что вполне естественно, ибо последняя определяется при оптимальной фазе миры, в то время как при оценке динамической ТЧХ производится ее усреднение по всем возможным фазам, чем, по сути, учитывается факт случайной равновероятной локализации изображения наблюдаемого объекта относительно структуры фотоприемника.

Однако параметры  $\alpha$  и  $\delta_0$  исследуемого ТВП, входящие в поправочную функцию  $\alpha(g)$ , могут быть неизвестны, и в этом случае для оценки динамической ТЧХ предлагается следующий подход.

При стендовой (с использованием ТЧХ) аттестации ТВП, имеющей целью оценку его дальности действия при вскрытии объектов в нормированных условиях, обычно предполагается, что задача поиска объектов не стоит и, значит, температурные фоновые неоднородности значения не имеют, особенно в ночное время суток при наличии сплошной облачности, когда данные неоднородности сравнительно невелики, а влиянием турбулентности атмосферы, размывающей изображение объектов, можно пренебречь. Как правило, эти дальности, установленные по отношению к типовому объекту наблюдения – танку, и приводятся в технических описаниях образцов ТВП и в соответствующих рекламных проспектах. При этом оператор может отрегулировать контраст его изображения так, чтобы он оставался постоянным независимо от энергетического состояния объекта и прозрачности атмосферы, для чего необходимо, чтобы диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_M$  удовлетворял условию [4, 10]

$$\Delta T_M = q |\Delta T_R| \tau_a; \quad q = 6-10, \quad (8)$$

где  $\Delta T_R$  – тепловой контраст объекта (разность радиационных температур объекта и фона), К;

$\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ТВП на трассе до объекта.

Меньшее значение коэффициента  $q$  в (8) отвечает узкопольным ТВП, а большее – широкопольным. Довольно большое значение  $q$  здесь учитывает целесообразность регистрации распределения радиационной температуры по площади объекта, нередко содержащего высокотемпературные детали, что важно для его распознавания, а также возможность наблюдения близлежащих фоновых неоднородностей, облегчающего привязку объекта к местности. Относительный контраст изображения объекта  $K'$ , определяемый как

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

где  $L'_{об}$ ,  $L'$  – яркости изображения объекта и фона соответственно, модуль которого при обычно рекомендуемом для использования коэффициенте  $q = 6$  равен оптимальной величине  $|K'| = 1/q = 1/6$ , 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. Поэтому дальность действия таких ТВП от теплового контраста объектов и коэффициента пропускания атмосферы также не зависит.

Отсюда, поскольку, согласно концепции эквивалентных мир [2, 10], должны выполняться соотношения

$$\Delta T_{раз1} = \Delta T_{раз2} = |\Delta T_R| \tau_a,$$

из уравнений

$$\begin{aligned} \pi M(g_1) / 4K_{об}(g_1)K_{фн}(g_1)K_{вкв}(g_1) [1 - \cos(2\pi n g_1)] / 2 &= \\ = K_m / q; \\ \pi M(g_2) / 4K_{об}(g_2)K_{фн}(g_2)K_{выб}(g_2)K_{вкв}(g_2)K_{см}(g_2) &= \\ = K_m / q, \end{aligned}$$

вытекающих из (5), (6) и (8), для типовых значений  $K_m = 0,95$  и  $q = 6$  устанавливаем соответствующие значения относительной угловой частоты  $g_1$  и  $g_2$ , находящиеся в окрестности относительной частоты Найквиста  $g_H = v_H \delta_0 / \alpha =$

$= 0,5$ , и их отношение  $\beta = g_2/g_1 = 0,88$ , практически общее для всех значений средней яркости изображения  $L'_0 = 0,6-100$  кд/м<sup>2</sup>, коэффициента заполнения фотоприемника  $\alpha = 0,8-1$  и отношения диаметра кружка рассеяния объектива к размеру элемента фотоприемника  $\theta = 2-3$ , ибо вариации  $\beta$  не превышают 4%. Таким образом, для прогноза дальности действия ТВП на основе измеренной ТЧХ  $\Delta T_{раз1}(v)$  вполне допустимо использовать скорректированную ТЧХ  $\Delta T_{раз2}(v)$ , определяемую, вместо (7), выражением

$$\Delta T_{раз2}(v) = \Delta T_{раз1}(v/\beta).$$

Это означает, что для формирования искомой ТЧХ для каждой разрешаемой разности температур  $\Delta T_{раз1}$  отвечающие ей значения угловой частоты  $v$  измеренной ТЧХ необходимо умножить на поправочный коэффициент  $\beta = 0,88$ . Следовательно, реальная дальность действия контрастно-ограниченных ТВП будет составлять лишь  $\sim 0,88$  от дальности, спрогнозированной на базе непосредственно измеренной ТЧХ  $\Delta T_{раз1}(v)$ . Учет этой поправки, исключающий систематическую ошибку оценки дальности действия ТВП, целесообразен даже при возможном доминировании случайных ошибок, обусловленных перечисленными выше факторами, наличие которых маскирует значимость данной поправки, чем и объясняется существующее сегодня у многих специалистов представление о практической апробированности методики оценки дальности действия несканирующих ТВП, основанной на использовании статической ТЧХ  $\Delta T_{раз1}(v)$ .

## Заключение

Из-за наличия в несканирующих ТВП выборки в обоих направлениях измеряемая традиционным образом их ТЧХ является неоднозначной, немонотонной и ограниченной частотой Найквиста, что препятствует успешному применению этой ТЧХ для оценки дальности действия ТВП при обнаружении и распознавании объектов. Ввиду технической сложности реализации динамической ТЧХ, измеряемой при поперечном движении поля



зрения ТВИ относительно тест-объекта, наиболее точно определяющей дальность действия современных высокочувствительных несканирующих ТВИ, работающих в обычном для них контрастно-ограниченном режиме, для прогноза этой дальности допустимо использовать, с последующей корректировкой, упрощенную статическую ТЧХ, измерение которой основано на обнаружении провала в изображении двух смежных полос стандартной тепловой миры, расположенных в оптимальной фазе относительно структуры матричного фотоприемника, когда глубина данного провала максимальна. Корректировка, без которой оценка дальности действия контрастно-ограниченных ТВИ была бы завышена на ~14 %, заключается в том, что для каждой разрешаемой разности температур отвечающие ей значения угловой частоты измеренной ТЧХ умножаются на поправочный коэффициент 0,88, чем, по существу, устраняется систематическая ошибка оценки этой дальности. Сформулированные в статье практические рекомендации по пересчету измеренной статической ТЧХ к динамической вполне обеспечивают оперативную и, вместе с тем, достаточно точную оценку и сравнение

эффективности современных цифровых ТВИ при вскрытии объектов местности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Chrzanowski K.* Testing thermal imagers. – Poland, Warsaw: Military university of technology, 2010.
2. *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.
3. *Овсянников В. А., Филиппов В. Л.* / Оборонная техника. 2017. № 3. С. 3.
4. *Овсянников В. А., Овсянников Я. В.* / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 53. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-53-62
5. *Webb C., Halford C.* / Optical Engineering. 1999. Vol. 38. № 5. P. 845.
6. *Driggers R., Webb C., Pruchnic J., Halford C., Burroughs E.* / Optical Engineering. 1999. Vol. 38. № 5. P. 852.
7. *Wittenstein W.* / Optical Engineering. 1999. Vol. 38. № 5. P. 773.
8. *Teaney B., Reynolds J., Du Bosq T.* / Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 94520H-1.
9. *Штоколов Э. А., Шлычков В. И., Золотарев А. И.* / Контенант. 2012. № 1. С. 13.
10. *Holst G.* Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003.
11. *Holst G.* / Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 94520K-1.
12. *Olson C., Theisen M., Pace T., Halford C., Driggers R.* / Proc. SPIE. 2016. Vol. 9820. P. 98200B-1.

PACS: 42.72. Ai, 42.79. Pw.

## On the possibility of simplifying the technique for measuring the temperature-frequency characteristic of staring thermal imaging devices

*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 1.11.2022; revised 15.11.2022; accepted 29.11.2022*

*This paper presents an analysis of the legitimacy of using a simplified technique for experimental evaluation of the static temperature-frequency characteristic (TFC) of modern staring thermal imaging devices operating in a contrast-limited mode where their effectiveness is limited by extreme contrast sensitivity of the operator’s visual apparatus. The technique is based on detecting a dip in the image of two adjacent bands of a standard four-bar thermal test-target located in the optimal phase relative to the structure of the matrix photodetector when the depth of this dip is maximum. We have established the relationship of this characteristic with the dynamic TFC, which is measured during transverse motion of the device’s*

*field of view relative to the test-target, and is the most accurate at determining the capabilities of devices to detect and recognize objects. Practical recommendations for converting the measured static TFC to the dynamic one have been formulated.*

*Keywords:* thermal imaging device, temperature-frequency characteristic, bench testing.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-61-70

## REFERENCES

1. Chrzanowski K., Testing thermal imagers, Military university of technology, Poland, Warsaw, 2010.
2. 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, KGTU izdatel'stvo, Kazan, 2015 [in Russian].
3. Ovsyannikov V. A. and Filippov V. L., Oboronnyaya tekhnika, № 3, 3 (2017) [in Russian].
4. Ovsyannikov V. A. and Ovsyannikov Y. V., Usp. Prikl. Fiz. **10** (1), 53 (2022) [in Russian].  
DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-53-62
5. Webb C. and Halford C., Optical Engineering **38** (5), 845 (1999).
6. Driggers R., Webb C., Pruchnic J., Halford C. and Burroughs E., Optical Engineering **38** (5), 852 (1999).
7. Wittenstein W., Optical Engineering **38** (5), 773 (1999).
8. Teaney B., Reynolds J. and Du Bosq T., Proc. SPIE **9452**, 94520H-1 (2015).
9. Shtokolov E. A., Shlychkov V. I. and Zolotarev A. I., Kontenant № 1, 13 (2012) [in Russian].
10. Holst G., Electro-optical imaging system performance. 3 ed., SPIE press, US, 2003.
11. Holst G., Proc. SPIE **9452**, 94520K-1 (2015).
12. Olson C., Theisen M., Pace T., Halford C. and Driggers R., Proc. SPIE **9820**, 98200B-1 (2016).