

УДК 621.384.32

PACS: 06.20 – fb, 07.57 – c.

## Об оценке конкурентоспособности современных тепловизионных приборов по дальности действия

В. А. Овсянников, Я. В. Овсянников

*Развита методика прогнозирования основного показателя эффективности – дальности распознавания объектов – современных высокочувствительных тепловизионных приборов (ТВП), работающих в обычном для них контрастно-ограниченном режиме, в котором их эффективность лимитируются не шумом прибора, а предельной контрастной чувствительностью зрительного аппарата оператора-дешифровщика. Выполнен сравнительный анализ существующих зарубежных и отечественных условий и методик натурных испытаний ТВП на дальность распознавания ими типового тест-объекта – танка. Показано, что, несмотря на существенное различие методик, полученные экспериментальные оценки этого показателя эффективности могут быть корректно сопоставлены с соответствующими данными для зарубежных аналогов независимо от теплового контраста тест-объекта и погодных условий. Описана процедура оценки достоверности результатов полевых испытаний ТВП на дальность действия. Приведены примеры реализации полученных результатов.*

*Ключевые слова:* тепловизионные приборы, дальность распознавания, полевые испытания.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-447-458

### Введение

Дальность действия – дальность вскрытия (обнаружения и/или распознавания) зачетного объекта с заданной вероятностью – является основным показателем эффективности, или тактико-технической характеристикой, наблюдательных тепловизионных приборов (ТВП) в статическом режиме работы, когда прибор и объект неподвижны относительно друг друга, а время наблюдения не ограничено, и именно по этому показателю оценивается

сравнительная эффективность и, следовательно, в немалой степени, конкурентоспособность существующих или разрабатываемых образцов ТВП – важнейшее требование к любой промышленной продукции. При этом особый интерес представляет оценка дальности распознавания, обычно классификации, объектов на основе анализа их прямых демаскирующих признаков (контраста, формы, размеров и др.), выявляемых на изображении, – дешифровочных признаков изображения, – которая, в отличие от дальности обнаружения, практически не зависит от степени тепловой неоднородности фона и, значит, является гораздо более определенной. Как правило, эта дальность, рассчитанная или измеренная по отношению к типовому объекту наблюдения – танку, и приводится в технических описаниях как зарубежных (например, [1]), так и российских (например, [2]) образцов ТВП и в соответствующих справочных и рекламных материалах.

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 05 сентября 2022 г.

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

При оценке и аттестации ТВП во многих зарубежных странах, в соответствии со стандартом STANAG 4347 Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems, 1995 [3], под дальностью распознавания понимается дистанция  $D$ , на которой в критический размер (корень квадратный из видимой площади) танка  $h = 2,3$  м с тепловым контрастом (разностью радиационных температур объекта и фона)  $\Delta T_R = 2$  К, наблюдаемого в лобовой проекции в благоприятных погодных условиях, характеризуемых показателем ослабления излучения в атмосфере  $\sigma = 0,2 \text{ км}^{-1}$ , и расположенного на фоне с температурой  $T = 288$  К, укладывается  $C = 3$  периода разрешаемой эквивалентной тепловой миры. При этом дальность распознавания  $D$ , км, согласно известной операциональной модели ТВП NVTherm [4], связывающей показатели эффективности ТВП с его основными техническими параметрами и характеристиками, определяется как решение уравнения

$$\Delta T_R \tau_a = \Delta T_{\text{раз}}(v); \quad v = DC / h,$$

где  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ТВП на дистанции  $D$ ;  $\Delta T_{\text{раз}} = f(v)$  – температурно-частотная характеристика – зависимость минимальной разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$ , К, от угловой частоты  $v$ , мрад<sup>-1</sup>, эквивалентной тепловой миры [5].

В последние годы за рубежом для прогнозирования дальности действия ТВП используется более точная (но гораздо менее обзримая) операциональная модель NVThermIP [6].

Для получения достаточно представительных и сопоставимых экспертных оценок дальности действия ТВП их полевые испытания, в принципе, следует проводить в нормированных условиях, в частности при определенных значениях параметров фоно-целевой и метеосиноптической обстановки, или же пересчитывать результаты испытаний ТВП на данные условия. В соответствии с этим натурные испытания отечественных ТВП, согласно существующим общим техническим требованиям, должны проводиться в следующих нормированных условиях [7, 8]: температура воздуха  $(17 \pm 10)^\circ\text{C}$ ; его относительная влажность  $(75 \pm 15)\%$ ; метеорологическая

дальность видимости не менее 5 км; отсутствие осадков; темное время суток с естественной ночной освещенностью не более 0,5 лк; температурный контраст объекта не менее 1,5 К. При этом задается и вероятность вскрытия объекта, равная 0,8.

Необходимо отметить, что в традиционной практике дешифрирования изображений, в том числе при аттестации наземных ТВП, когда оценивается дальность классификации танка, находящегося в составе группы из нескольких различных объектов, визируемого в облической (с курсовым углом  $45^\circ$ ) или бортовой проекциях, критический размер которых близок к 3,1 м [9], используется критерий распознавания «правильное решение оператора» (например, [8]), основанный не только на анализе дешифровочных признаков изображения объекта, но и, возможно неосознанно, на простом угадывании с последующей, при необходимости, корректировкой результатов аттестации для учета влияния этого угадывания.

Несмотря на значимое различие отмеченных сложившихся исторически условий и методик оценки дальности действия ТВП российского и иностранного производства, прямое сопоставление их дальности действия реально, как правило, производится без какого-либо научного обоснования и может оказаться ошибочным. В связи с изложенным, актуальным является анализ степени соответствия друг другу оценок дальности действия ТВП, полученных по данным методикам, и достоверности принимаемого решения о конкурентоспособности и, как следствие, о целесообразности производства или модернизации отечественных ТВП. Этот анализ и является предметом настоящей статьи.

### Методика решения задачи

Одним из основных технических параметров любого ТВП, отражаемых в его спецификации, является разность температур, эквивалентная шуму  $\Delta T_0$ , К. Существенная особенность современных цифровых ТВП, использующих квантовые матричные фотоприемники, заключается в том, что в них достигаются весьма малые значения  $\Delta T_0$ , поэтому, в отличие от сканирующих ТВП пер-

вых поколений, пороговый, обнаруживаемый глазом оператора тепловой контраст объектов ограничивается не шумом прибора, а предельной контрастной чувствительностью зрительного анализатора. Как показано в [10], современные высокочувствительные несканирующие ТВП при вскрытии объектов на естественном неоднородном фоне функционируют именно в соответствующем контрастно-ограниченном режиме, в котором эффективность, в частности дальность действия, ТВП от конкретного значения  $\Delta T_0$ , обычно составляющего [1] 0,015–0,05 К, уже не зависит, ибо тепловизионное изображение здесь, по сути, визуально не зашумлено.

Для решения поставленной задачи необходимо вначале рассмотреть методику прогнозирования дальности действия контрастно-ограниченных ТВП. Одной из наиболее популярных моделей, широко апробированной мировой практикой дешифрирования тепловизионных изображений реальных объектов и получившей распространение во многих странах, является модель NVTherm Центра (директората) ночного видения и электронных датчиков (США), согласно которой вероятность  $P$  вскрытия объектов посредством ТВП определяется эмпирической формулой [4]:

$$P = \left[ 1 + 1 / (hv / DC)^e \right]^{-1}; \quad e = 2,7 + 0,7(hv / DC),$$

$$M(v') = \frac{(1 + 0,7 / L'_0)^{0,2} \left[ 1 + 12 / (w'(1 + v'/3)^2) \right]}{540v' \exp(-0,3(1 + 100 / L'_0)^{0,15} v') \sqrt{1 + 0,06 \exp(0,3(1 + 100 / L'_0)^{0,15} v')}}; \quad (2)$$

$$L'_0 = (L'_2 + L'_1) / 2,$$

где  $L'_0, L'_1, L'_2$  – средняя, минимальная и максимальная рабочая яркость монитора соответственно, кд/м<sup>2</sup> (комфортным условиям дешифрирования изображения отвечают значения:  $L'_0 = 100$  кд/м<sup>2</sup> при дешифрировании 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 разрешаемой эквивалентной миры, град.

Связь частоты  $v'$  с соответствующей частотой миры  $v$  дается формулой:

$$v' = 17,45v / \Gamma; \quad \Gamma = \alpha \Delta \delta' Z / \delta_0; \quad \alpha = a / \Delta a; \quad (3)$$

$$\delta_0 = a / f,$$

где  $C$  – критерий Джонсона, зависящий от решаемой задачи вскрытия, – число периодов разрешаемой эквивалентной миры, укладываемых в критический размер объекта  $h$ , необходимое для его вскрытия с вероятностью 0,5, в среднем равное 1 при обнаружении (выделении из фоновых неоднородностей), 3 при классификации (установлении класса) и 6 при идентификации (установлении типа) объекта.

С учетом дополнительного фактора – квалификации оператора – эта формула хорошо аппроксимируется простым выражением [5]:

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

где  $\gamma = 0,65–1,5$  – показатель квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно).

Для контрастно-ограниченных ТВП температурно-частотная характеристика  $\Delta T_{\text{раз}} = f(v)$  существенно определяется функцией порогового контраста  $M(v')$  – зависимостью минимального обнаруживаемого оператором относительного контраста  $M = (L'_{\text{max}} - L'_{\text{min}}) / (L'_{\text{max}} + L'_{\text{min}})$  (где  $L'_{\text{max}}, L'_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значение яркости) эквивалентной синусоидальной миры от ее угловой частоты  $v'$ , град<sup>-1</sup>, в пространстве изображений. Эмпирическое выражение для  $M(v')$  имеет вид [4]:

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

Необходимо подчеркнуть, что входящие в формулу (1) значения критериев Джонсона  $C$

традиционно учитывают тот факт, что при распознавании объектов используется критерий вскрытия «правильное решение оператора». Для корректировки этих значений с целью получения по (1) оценок вероятности распознавания объектов только по их демаскирующим признакам учтем, что фактически достигаемая вероятность распознавания объектов  $P$  равна вероятности суммы совместных событий:

$$P = P_0 + P_y - P_0 P_y,$$

где  $P_0$  – вероятность распознавания объектов по их демаскирующим признакам;  $P_y = 1/n$  – вероятность угадывания, зависящая от числа  $n$  объектов (классов или типов) в каждом данном алфавите, известном оператору.

Тогда скорректированная вероятность распознавания  $P_0$ , уже не зависящая от алфавита объектов и, значит, более представительная, будет составлять:

$$P_0 = (P - P_y) / (1 - P_y).$$

Отсюда вытекает, что для оценки по (1) вероятности распознавания объектов только по их демаскирующим признакам указанные выше значения критериев Джонсона  $C$ , отвечающие вероятности распознавания  $P = 0,5$ , необходимо умножить на поправочный коэффициент  $\zeta \geq 1$ , равный

$$\begin{aligned} \zeta &= \sqrt{\ln(1-P)/\ln(1-P_0)} = \\ &= \left[ \sqrt{1 + 1,44 \ln(1-1/n)} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Очевидно, это выражение имеет смысл только при  $n \geq 3$ , ибо при двухальтернативном распознавании объектов значение  $P_0 = 0$  и вероятность  $P = 0,5$  достигается просто за счет угадывания.

Для экспериментов по классификации объектов в зарубежной литературе (например, [12]) рекомендуется использовать алфавит из трех категорий объектов – грузовой автомашины, бронетранспортера и танка, имеющих близкие тепловые контрасты и приблизительно в равной степени отличающихся друг от друга по форме, что при  $n = 3$  дает коэффициент  $\zeta = 1,55$ , и можно считать, что значение  $C = 3$  в (1) относится именно к этому случаю.

Очевидно, для  $n \rightarrow \infty$ , когда угадывание бесполезно, имеем  $\zeta = 1$ . При оценке вероятности обнаружения объектов также принимается  $\zeta = 1$ .

Температурно-частотная характеристика  $\Delta T_{\text{раз}} = f(\nu)$  контрастно-ограниченного ТВП может быть описана приближенной формулой [5, 10]:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{раз}} &= \pi \Delta T_m M(\nu) / 4K(\nu) K_m; \\ K(\nu) &= \exp(-2\pi^2 \rho^2 \delta^2 \nu^2); \\ K_m &= (L'_2 - L'_1) / (L'_2 + L'_1), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta T_m$  – диапазон регистрируемой разности радиационных температур,  $K$ , определяемый рабочим диапазоном яркости монитора  $\Delta L'_m = L'_2 - L'_1$ , кд/м<sup>2</sup>;  $K(\nu)$  – функция передачи модуляции ТВП и ее гауссовская аппроксимация с параметром  $\rho = 0,55$ ;  $\delta$  – эффективное значение элементарного поля зрения ТВП, зависящее от всего информационного тракта прибора, мрад;  $K_m$  – коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта, при  $L'_2 \gg L'_1$  близкий к 1.

Значение  $\delta$  в (5) определяется выражением [5]:

$$\begin{aligned} \delta &= \eta \delta_0; \\ \eta &= \sqrt{0,5 + 0,25\theta^2 + 0,52/\alpha^2 + 0,26/\kappa^2 \alpha^2 Z^2}; \\ \theta &= \sqrt{(0,84\theta_d)^2 + \theta_a^2}; \\ \theta_d &= d_d/a; \quad d_d = 2,44 \lambda_0/\omega, \end{aligned}$$

где  $\theta_d$ ,  $\theta_a$ ,  $\theta$  – отношения диаметров дифракционного, абберационного и суммарного кружков рассеяния объектива соответственно к размеру элемента фотоприемника;  $d_d$  – диаметр абберационного кружка рассеяния объектива с концентрацией энергии 85 %, мкм;  $\kappa$  – отношение числа элементов изображения монитора к числу элементов фотоприемника (по одной координате);  $\lambda_0$  – средняя длина волны спектрального рабочего диапазона ТВП  $\Delta\lambda$ , мкм;  $\omega$  – относительное отверстие объектива.

Влиянием турбулентности атмосферы, размывающей изображение и, следовательно, увеличивающей эффективное значение элементарного поля зрения ТВП, в темное время

суток можно пренебречь, особенно если ТВП находится на некотором возвышении [5]. Для типовых значений  $\lambda_0/\omega a = 1$ ,  $d_a/a = 1$ ,  $\varepsilon = 0,85$ ,  $Z = \kappa = 1$  имеем  $\eta = 1,7$ .

При распознавании, как правило в узком поле зрения, уже обнаруженного объекта оператор может отрегулировать контраст его изображения так, чтобы он оставался постоянным независимо от энергетического состояния объекта и прозрачности атмосферы. Для этого необходимо, чтобы диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$  удовлетворял условию [4, 5]:

$$\Delta T_m = |\Delta T_R| \tau_a q; \quad q = 6. \quad (6)$$

Тогда 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  $L'_{об}$ ,  $L'$  – яркость изображения объекта и фона соответственно, принимает оптимальное значение, модуль которого  $|K'| = 1/q = 1/6$  [13].

Угловой размер изображения эквивалентной миры  $w'$  в формуле (2) с учетом (3) составляет:

$$w' = \Gamma h / 17,45D = \varepsilon \Delta \delta' h Z / 17,45D \delta_0 = \varepsilon \Delta \delta' h Z \eta / 17,45D \delta. \quad (7)$$

В рабочем интервале угловых частот  $\nu' = 3-15 \text{ град}^{-1}$ , отвечающем оптимальному видимому увеличению ТВП, функция порогового контраста  $M(\nu')$  для типовых значений углового размера изображения эквивалентной миры  $w'$  достаточно хорошо аппроксимируется гораздо более простой формулой  $M(\nu') = \mu \exp(\xi \nu'^2)$  с параметрами  $\mu$  и  $\xi$ , зависящими от значения  $w'$  и средней яркости изображения  $L'_0$ . Зависимости  $\mu = f(w')$  и  $\xi = f(w')$  для некоторых значений  $L'_0$  приведены в табл. 1. При этом значения  $w'$  в среднем равны  $0,15^\circ$ ,  $0,5^\circ$  и  $1^\circ$  при обнаружении, классификации и идентификации объекта соответственно.

Таблица 1

**Зависимости параметров  $\mu$  и  $\xi$  аппроксимационной формулы для функции порогового контраста от углового размера изображения миры  $w'$  для ряда значений средней яркости изображения  $L'_0$**

$w'$ , град	$L'_0 = 0,6 \text{ кд/м}^2$		$L'_0 = 10 \text{ кд/м}^2$		$L'_0 = 100 \text{ кд/м}^2$	
	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$
0,1	0,091	0,0048	0,036	0,0015	0,022	0,0006
0,2	0,047	0,0056	0,019	0,0021	0,012	0,0011
0,3	0,032	0,0062	0,014	0,0026	0,0082	0,0015
0,4	0,025	0,0067	0,011	0,0029	0,0066	0,0018
0,5	0,021	0,0071	0,0091	0,0033	0,0056	0,0021
0,6	0,018	0,0074	0,0080	0,0035	0,0050	0,0023
0,7	0,016	0,0077	0,0072	0,0038	0,0044	0,0025
0,8	0,015	0,0080	0,0066	0,0040	0,0041	0,0027
0,9	0,014	0,0082	0,0061	0,0042	0,0038	0,0029
1,0	0,013	0,0084	0,0057	0,0044	0,0036	0,0030
1,1	0,012	0,0086	0,0054	0,0046	0,0034	0,0032
1,2	0,012	0,0088	0,0051	0,0047	0,0033	0,0033
1,3	0,011	0,0089	0,0049	0,0049	0,0031	0,0034
1,4	0,011	0,0090	0,0047	0,0050	0,0030	0,0035
1,5	0,010	0,0092	0,0046	0,0051	0,0029	0,0036

Из изложенного с учетом формул (3), (5) вытекает, что относительная температурно-частотная характеристика ТВП, сформированная применительно к эквивалентной мире, может быть записана следующим образом:

$$\frac{\Delta T_{\text{раз}} K_m}{\Delta T_m} = \frac{\pi \mu \exp\left[\xi(17,45\nu/\Gamma)^2\right]}{4 \exp\left[-2\pi^2(0,55\delta)^2 \nu^2\right]} = 0,79\mu \exp\left[\left(304\xi/(\Gamma\delta)^2 + 5,97\right)x^2\right]; \quad x = \nu\delta,$$

где  $x$  – относительная частота мира.

Отсюда, поскольку, в соответствии с концепцией эквивалентных мир [4, 5], выполняется соотношение

$$\Delta T_{\text{раз}} = |\Delta T_R| \tau_a,$$

дальность распознавания  $D$  объекта на основании формул (1), (5), с учетом угадывания в алфавите из  $n \geq 3$  категорий объектов, будет составлять:

$$D = \frac{h\gamma x}{1,2C\delta\sqrt{-\ln(1-P)}}; \quad (8)$$

$$x = \sqrt{\frac{\ln(1,27K_m/q\mu)}{304\xi/(\delta\Delta\delta'Z\eta)^2 + 5,97}},$$

а без учета угадывания равна:

$$D = \frac{h\gamma x}{1,2C\delta\zeta\sqrt{-\ln(1-P_0)}}, \quad (9)$$

где коэффициент  $\zeta$  определяется по (4).

Поскольку параметры  $\mu$  и  $\xi$  являются функциями углового размера изображения мира  $w'$  и, значит, по (7), искомой дальности действия  $D$ , ее приходится устанавливать методом последовательных приближений. Так как значение  $x$  зависит от дальности довольно слабо, то обычно достаточно одной итерации. При этом в качестве первоначальной величины  $w'$  можно использовать указанные выше значения.

Видно, что дальность распознавания объекта посредством высокочувствительных ТВП не зависит от его энергетического состояния и погоды, – разумеется, до тех пор, пока ТВП работают в контрастно-ограниченном режиме,

в котором повышение коэффициента усиления видеосигналов, необходимое для компенсации снижения относительного контраста изображения объектов, вызванного уменьшением значений  $|\Delta T_R|$  и/или  $\tau_a$ , в частности, из-за ухудшения метеоусловий, еще не приводит к чрезмерному зашумлению изображения. Из результатов работ [5, 10] и формулы (6) следует, что это реализуется, если произведение  $|\Delta T_R|\tau_a$  удовлетворяет соотношению

$$|\Delta T_R|\tau_a \geq \frac{5,6\Delta TK_m}{q\beta r};$$

$$\beta = \left(\frac{0,13 + 0,18L_0'^{-0,42}}{Z\Delta\delta'}\right)^{1,5} + 0,02; \quad (10)$$

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

$$T_{\text{гл}} = 0,019 + 0,051/L_0'^{0,17},$$

где  $\Delta T$  – разность температур, эквивалентная шуму, для конкретных условий применения ТВП,  $K$ ;  $r$  – коэффициент, учитывающий визуальное накопление видеосигналов в смежных кадрах ТВП;  $F$  – частота кадров, Гц;  $T_{\text{гл}}$  – постоянная времени глаза, с.

В противном случае, когда соотношение (10) не выполняется, а коэффициент усиления видеосигналов достаточно высок и уже обеспечивает предельно допустимый уровень видности шума на мониторе, модуль относительного контраста изображения объекта не достигнет оптимального значения  $|K'| = 1/6$  и прибор будет работать в «шумо-ограниченном» режиме, свойственном сравнительно малочувствительным сканирующим ТВП первых поколений, в котором их пороговая чувствительность определяется разностью температур, эквивалентной шуму, а дальность действия зависит, в том числе, от теплового контраста объекта и степени прозрачности атмосферы.

Из формул (8), (9) также вытекает, что единственной существенной характеристикой современных высокочувствительных ТВП, непосредственно связанной с дальностью распознавания ими объектов, является функция передачи модуляции  $K(\nu)$ , определяющая эффективное значение элементарного поля зрения  $\delta$ , и это обуславливают особую важность разработки достаточно точных и простых методов измерения функции передачи модуля-

ции несканирующих ТВП [14], а значение  $\delta$ , таким образом, может считаться основным критерием качества ТВП.

Отметим, что принятые в анализе допущения и приближения не оказывают решающего влияния на точность оценки дальности действия ТВП, поскольку методическая погрешность этой оценки, присущая используемой в операциональной модели ТВП (1) самой концепции эквивалентных мир, может достигать до  $\pm 20\%$  [4].

Рассмотрим в качестве примера оценку дальности классификации (с учетом угадывания в алфавите из трех объектов) с вероятностью  $P = 0,8$  танка в бортовой проекции с критическим размером  $h = 3,1$  м посредством ТВП с эффективным значением элементарного поля зрения  $\delta = 0,2$  мрад и частотой кадров  $F = 25$  Гц и установим условия работы ТВП на этой дальности в контрастно-ограниченном режиме в предположении, что изображение дешифрируется высококвалифицированным оператором в полутьме:

- приняв первоначальное значение углового размера изображения эквивалентной миры  $w' = 0,5^\circ$  и среднюю яркость изображения  $L'_0 = 10$  кд/м<sup>2</sup>, находим по табл. 1 значения параметров  $\mu = 0,0091$  и  $\xi = 0,0033$ ;

- приняв типовые значения  $K_m = 0,9$ ,  $\alpha = 0,85$ ,  $Z = 1$ ,  $\Delta\delta' = 0,95$  мрад и  $\eta = 1,7$ , рассчитываем по формуле (8) относительную частоту разрешаемой эквивалентной миры  $x = 0,685$ ;

- для значений  $\gamma = 1,5$  и  $C = 3$  вычисляем по формуле (8) дальность классификации танка  $D = 3,5$  км;

- для полученного значения дальности уточняем по формуле (7) угловой размер изображения миры  $w' = 0,35^\circ$  и по табл. 1 соответствующие уточненные значения параметров  $\mu = 0,0125$  и  $\xi = 0,00275$ ;

- рассчитываем по формуле (8) новое значение  $x = 0,65$  и соответствующую уточненную дальность классификации  $D = 3,3$  км; ее дальнейшее уточнение смысла уже не имеет;

- вычисляем по формуле (10) постоянную времени глаза  $T_{\text{гл}} = 0,053$  с, коэффициент, учитывающий визуальное накопление видеосигналов в смежных кадрах,  $r = 1,67$  и параметр  $\beta = 0,115$ ;

- устанавливаем по формуле (10) условие работы ТВП в контрастно-ограниченном ре-

жиме  $|\Delta T_R| \tau_a / \Delta T \geq 4,35$ ; в частности, в благоприятных метеоусловиях при показателе ослабления излучения  $\sigma = 0,2$  км<sup>-1</sup>, когда коэффициент пропускания атмосферы на горизонтальных приземных трассах составляет  $\tau_a = \exp(-\sigma D) = 0,52$ , имеем  $|\Delta T_R| / \Delta T \geq 8,4$  К.

Выполняя для сравнения аналогичный расчет для случая дешифрирования тепловизионного изображения в темноте ( $L'_0 = 0,6$  кд/м<sup>2</sup>) при прочих равных условиях находим соответствующее значение дальности классификации  $D = 2,8$  км.

При экспертной оценке вероятности распознавания важно исключить возможность получения операторами априорной информации об объекте, что достигается за счет очередного предъявления операторам изображений объектов из определенного, известного им набора (алфавита) объектов различных категорий, в числе которых находится и зачетный объект. Порядок предъявления объектов и их ракурсы наблюдения операторам заранее неизвестны. Следует отметить, что нередкие рекомендации по предъявлению операторам изображений сразу всей группы объектов, одновременно попадающих в поле зрения ТВП, приводят к завышению оценки вероятности распознавания, поскольку решения операторов по зачетному объекту будут зависеть от их решений по остальным объектам, если они легче распознаются. Поэтому классическая процедура оценки вероятности многоальтернативного распознавания предусматривает, что каждому из задействованных в испытаниях операторов-дешифровщиков последовательно в случайном порядке предъявляются изображения тест-объектов нескольких различных категорий. Условия дешифрирования изображений (контраст, яркость, увеличение) выбираются операторами по своему усмотрению, а время дешифрирования в статическом режиме работы ТВП, для которого, как правило, оценивается дальность действия, не ограничивается. Операторы могут использовать любой, наиболее продуктивный в каждом данном случае критерий распознавания, основывающийся на анализе прямых демаскирующих признаков объекта (например, выявление общей формы, контура объекта или наличия его отдельных характерных элементов – тем самым исключаются возможные разногласия по выбору этого критерия), причем опера-

торы всегда должны давать тот или иной ответ, даже если они в нем не уверены. Для облегчения технической реализации данной процедуры изображения объектов, соответствующие различным дистанциям до них, могут быть получены и зафиксированы заранее, и в этом случае их дешифрирование может происходить в камеральных условиях. Тогда если число правильных результатов распознавания зачетного объекта составляет  $m$  при общем числе независимых попыток дешифрирования  $m_{\Sigma}$ , то экспертная оценка вероятности его распознавания, определяемая формулой  $P^* = m/m_{\Sigma}$ , будет являться наиболее вероятной оценкой вполне определенной, объективно существующей, но принципиально неизвестной результирующей вероятности  $P$  распознавания объекта.

Поскольку оценка вероятности распознавания объектов, как правило, отличается от ее истинного значения, для повышения точности и достоверности полученных оценок данной вероятности идут по пути увеличения как числа операторов, так и числа изображений объектов. Увеличение числа операторов является основным способом достижения этой цели, ибо суждения операторов по каждому предъявляемому им изображению, определяемые их квалификацией, психофизическим состоянием, вниманием, мотивацией, усталостью и эмоциональным настроением на момент дешифрирования, индивидуальны и случайны и являются независимыми (при исключении возможности взаимных консультаций операторов). Однако решения каждого оператора по различным изображениям одного и того же объекта, принятые, например, в разное время и при разных состояниях объекта и условиях его наблюдения, в той или иной степени коррелированы, поэтому вариации данных решений обычно меньше, и отмеченное обстоятельство создает ложное впечатление о высокой достоверности получаемой при этом оценки вероятности вскрытия объекта. Так, путем статистического моделирования визуального дешифрирования изображений найдено, что, например, погрешность оценки вероятности вскрытия объекта, полученная по результатам дешифрирования тридцатью операторами десяти его различных изображений в  $\sim 2$  раза больше, чем погрешность, соответствующая дешифрированию десяти опе-

раторами тридцати изображений этого объекта, поэтому количество изображений объекта и число операторов отнюдь не взаимозаменяемы и желательно, чтобы состав последних был не менее 6–8 [15]. Другие методические аспекты экспериментальной оценки дальности действия ТВП рассмотрены в работах [7, 8].

Описанная процедура гарантирует минимальную субъективность получаемых результатов аттестации, обусловленную сугубо индивидуальными особенностями восприятия операторами формы и других демаскирующих признаков объекта при его распознавании, и, следовательно, в отличие от случая безальтернативного распознавания зачетного объекта, снижает или вообще исключает возможность расхождения выводов представителей разработчика и заказчика ТВП по этим результатам, нередко являющимся предметом острых разногласий.

Придадим в формуле (8) индекс «1» параметрам, связанным с оценкой эффективности зарубежных ТВП, а индекс «2» – отечественных. Тогда соотношение дальностей действия этих ТВП при классификации объектов с учетом угадывания при допущении одинаковой, обычно высокой, квалификации операторов и сходных условий дешифрирования изображений составляет:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{h_2 x_2 \sqrt{-\ln(1-P_1)}}{h_1 x_1 \sqrt{-\ln(1-P_2)}}, \quad (11)$$

где, согласно изложенному,  $h_1 = 2,3$  м,  $h_2 = 3,1$  м,  $P_1 = 0,5$ ,  $P_2 = 0,8$ .

Учитывая, что, как показывает анализ, в типовых ситуациях  $x_1 \approx x_2$ , по (11) находим соотношение  $D_2/D_1 = 0,88$ , и, значит, в отсутствие корректировки результатов аттестации, будет иметь место некоторая недооценка реальной конкурентоспособности отечественных ТВП по дальности действия.

В соответствии с изложенным, эти ТВП могут считаться конкурентоспособными, т. е. имеющими дальность действия не меньшую, чем у сравниваемого зарубежного аналога, если для оцениваемой по (8) их дальности действия  $D_2$  выполняется соотношение  $D_2 \geq 0,88D_1$ .

При полевых испытаниях решение о конкурентоспособности отечественных ТВП принимается, если на любой дистанции





Отсюда видно, что если на дальности  $D_2$  зачетный объект был правильно распознан, например, в девяти случаях из десяти (что отвечает оценке вероятности распознавания  $P^* = 0,9$ ), то с доверительной вероятностью, равной лишь  $R(P \geq P_2) = 0,65$ , можно утверждать, что результирующая вероятность  $P$  его распознавания действительно не ниже  $P_2 = 0,8$ . Для обеспечения минимально приемлемого уровня доверительной вероятности  $R = 0,8$  (выбор этого уровня строго обоснован быть не может, он определяется исключительно из эвристических соображений – имеющегося опыта, здравого смысла и интуиции [17]) требуется, чтобы данный объект был распознан, например, в семи попытках из семи, т. е. при оценке  $P^* = 1$ , или в четырнадцати попытках из пятнадцати, что, по (13) и табл. 2, в обоих случаях дает доверительную вероятность  $R(P \geq 0,8) = 0,83$ .

Таким образом, при  $P_2 = 0,8$  для достижения достаточно высокой доверительной вероятности необходимо весьма большое число независимых испытаний, что удлиняет и усложняет процедуру контроля, поскольку требуется, в первую очередь, увеличение состава экспертной группы операторов-дешифровщиков. Для снижения числа испы-

таний  $m_\Sigma$  (или повышения доверительной вероятности  $R$  при том же  $m_\Sigma$ ) целесообразно, по возможности, изменить дистанцию  $D_2$  до объекта до некоторой величины  $D_2^*$ , такой, чтобы ей отвечала меньшая нижняя граница доверительного интервала  $P_2^*$ , составляющая, как это следует из (9),

$$P_2^* = 1 - \exp \left[ \ln(1 - P_2) \left( D_2 / D_2^* \right)^2 \right] = 1 - \exp \left[ -1,6 \left( D_2 / D_2^* \right)^2 \right]. \tag{14}$$

Тогда, получив для этой новой дистанции  $D_2^*$  достаточно большую доверительную вероятность  $R(P \geq P_2^*)$ , можно утверждать, что доверительная вероятность  $R(P \geq P_2)$  для первоначальной дистанции контроля  $D_2$  также высока.

Из (12) вытекает, что нижняя граница  $P_0$  доверительного интервала для вероятности распознавания объекта  $P$  принимает значения, которые для ряда оценок вероятности распознавания объекта  $P^*$  и типовых значений доверительной вероятности  $R = R(P \geq P_0)$  представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Значения  $P_0$  нижней границы доверительного интервала для ряда оценок вероятности распознавания объекта  $P^*$  и значений доверительной вероятности  $R = R(P \geq P_0)$**

$P^*$	$P_0$			$P^*$	$P_0$			$P^*$	$P_0$		
	$R = 0,8$	$R = 0,9$	$R = 0,95$		$R = 0,8$	$R = 0,9$	$R = 0,95$		$R = 0,8$	$R = 0,9$	$R = 0,95$
1 / 1	0,45	0,32	0,22	4 / 6	0,48	0,40	0,34	7 / 8	0,70	0,63	0,57
2 / 2	0,58	0,46	0,37	5 / 6	0,63	0,55	0,48	5 / 9	0,42	0,35	0,30
2 / 3	0,42	0,32	0,25	6 / 6	0,79	0,72	0,65	6 / 9	0,52	0,45	0,39
3 / 3	0,67	0,56	0,47	4 / 7	0,42	0,34	0,29	7 / 9	0,62	0,55	0,49
3 / 4	0,51	0,42	0,34	5 / 7	0,54	0,46	0,40	8 / 9	0,73	0,66	0,61
4 / 4	0,72	0,63	0,55	6 / 7	0,67	0,59	0,53	6 / 10	0,46	0,40	0,35
3 / 5	0,41	0,33	0,27	7 / 7	0,82	0,75	0,69	7 / 10	0,55	0,49	0,44
4 / 5	0,58	0,49	0,42	5 / 8	0,47	0,40	0,35	8 / 10	0,65	0,58	0,53
5 / 5	0,76	0,68	0,61	6 / 8	0,58	0,51	0,45	9 / 10	0,75	0,69	0,64

Следовательно, задавшись приемлемой доверительной вероятности  $R = R(P \geq P_0)$  и установив по табл. 3 для полученной оценки вероятности распознавания  $P^*$  соответствующую нижнюю границу  $P_0$ , при выполнении соотношения  $P_0 \geq P_2^*$  можно утверждать, что дальность действия ТВП  $D$  удовлетворяет соответствующему требованию:  $D_2 \geq D_1$ .

Можно показать, что при  $D_2^* = 1,5D_2$  по (14) имеем  $P_2^* = 0,5$ , и тогда необходимое число испытаний  $m_\Sigma$  будет минимальным. Если, например, зачетный объект был правильно распознан в обоих предпринятых попытках, т. е. при оценке  $P^* = 2/2 = 1$ , то с достаточно высокой доверительной вероятностью  $R(P \geq P_2^*)$ ,

не меньшей 0,8, которой отвечает, согласно табл. 3, нижняя граница доверительного интервала  $P_0 = 0,58$  (при этом соотношение  $P_0 \geq 0,5$  выполняется), можно утверждать, что результирующая вероятность  $P$  распознавания объекта с дистанции  $D_2^*$ , которой отвечает эта оценка, не меньше  $P_2^* = 0,5$  или, иначе, что вероятность его распознавания с дистанции  $D_2$  не ниже  $P_2 = 0,8$ . Действительно, прямой расчет по (12) или (13) дает доверительную вероятность  $R(P \geq P_2^*) = 0,875$ .

### Заключение

Развитая в настоящей работе инженерная методика прогнозирования дальности распознавания объектов посредством высокочувствительных, в частности несканирующих, ТВП, работающих в обычном для них контрастно-ограниченном режиме, имеющем место при расположении объектов на естественном неоднородном фоне, пригодна для оперативной оценки и сравнения эффективности ТВП как без учета, так и с учетом угадывания объектов в группе. Эта дальность распознавания определяется главным образом функцией передачи модуляции ТВП и, в меньшей степени, условиями дешифрирования изображения, и она не зависит от разности температур, эквивалентной шуму, теплового контраста объектов и коэффициента пропускания атмосферы.

Экспертные оценки дальности распознавания зачетного тест-объекта – танка в бортовой или облической проекции, полученные с учетом угадывания в алфавите из трех категорий объектов для вероятности распознавания 0,8, характеризующие эффективность современных отечественных ТВП, могут быть непосредственно сопоставлены с соответствующими данными для зарубежных аналогов, установленными согласно принятой при их аттестации методологии, уменьшенными на 12 % независимо от энергетического состояния тест-объекта и погодных условий. При использовании алфавита из двух категорий объектов корректировка этих данных для оценки конкурентоспособности ТВП не требуется.

Для снижения объема полевых испытаний и уменьшения состава экспертной группы

операторов при оценке конкурентоспособности ТВП по дальности действия целесообразно увеличивать дистанцию до распознаваемого объекта до полутора раз по сравнению с расчетной, отвечающей нормированной вероятности его распознавания 0,8.

Представляется, что сформулированные отнюдь не очевидные выводы послужат достаточным обоснованием правомерности изложенного подхода к оценке конкурентоспособности отечественных образцов ТВП по дальности действия и её достоверности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белозеров А. Ф., Иванов В. М. Зарубежные тепловизионные приборы. – М.: НТЦ «Информтехника», 2004.
2. Пантелеев Н. Л., Морозов А. Е. // Оборонная техника. 2010. № 6-7. С. 73.
3. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. – Poland, Warsaw: Military university of technology, 2010.
4. Holst G. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – USA: SPIE Press, 2003.
5. 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.
6. Barela J., Kastek M., Firmanty K., Trzaskawka P., Dulski R. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8355. P. 83551E-1.
7. Макаров А. С., Омелаев А. И., Филиппов В. Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. – Казань: Унипресс, 1998.
8. Бугаенко А. Г., Иванов В. П., Омелаев А. И., Филиппов В. Л. Физические основы и техника измерений в тепловидении. – Казань: Унипресс, 2003.
9. Fanning J., Teaney B. // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9071. P. 90710J-1.
10. 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.
11. Holst G. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 94520K-1.
12. Driggers R., Friedman M., Nicols J. Introduction to infrared and electro-optical systems. 2 ed. – Boston, London: Artech House, 2012.
13. Hodgkin A., Maurer T., Halford C., Vollmerhausen R. // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6543. P. 654307-1.
14. Овсянников В. А., Овсянников Я. В., Филиппов В. Л. // Контенант. 2019. № 1. С. 28.
15. Deaver D., Voyer S. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 945208-1.
16. Шукун А. Н. Теория вероятностей и ее применение в инженерно-технических расчетах. – М.: Сов. радио, 1974.
17. Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970.

## On competitiveness control of modern thermal imaging devices in terms of range

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: gipo@telebit.ru

Received September 09, 2022

*This article develops a method of predicting the main performance indicator, i.e. range of object recognition, of modern high-sensitivity thermal imagers operating in their usual contrast-limited mode where their efficiency is limited not by device noise but by the ultimate contrast sensitivity of the decoder’s human eye. It offers a comparative analysis of existing Russian and foreign conditions and methods of full-scale thermal imager tests for recognizing a standard test object (a tank). It shows that, despite significantly different methods, the experimental estimates obtained for this performance indicator can be correctly compared with the corresponding data for foreign analogs, regardless of the test object’s thermal contrast and weather conditions. The procedure of estimating the reliability of the results of thermal imager range field tests has been described; examples of implementing the obtained results have been given.*

*Keywords:* thermal imager, recognition range, full-scale testing.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-447-458

### REFERENCES

1. A. F. Belozerov and V. M. Ivanov, *Foreign thermal imagers*. («Informtehnika» Publishing House, Moscow, 2004) [in Russian].
2. N. L. Panteleev and A. E. Morozov, *Oboronnaya tekhnika*, No. 6–7, 73 (2010) [in Russian].
3. K. Chrzanowski, *Testing thermal imagers*. (Military university of technology, Poland, Warsaw, 2010).
4. G. Holst, *Electro-optical imaging system performance*. 3 ed. (SPIE press, USA, 2003).
5. V. A. Baloev, G. I. Illin, V. A. Ovsyannikov, and V. L. Filippov, *Efficiency, clutter-protection and clutter-stability of electro-optical imaging systems*. (KGTU izdatelstvo, Kazan, 2015) [in Russian].
6. J. Barela, M. Kastek, K. Firmanty, P. Trzaskawka, and R. Dulski, *Proc. SPIE* **8355**, 83551E-1 (2012).
7. A. S. Makarov, A. I. Omelaev, and V. L. Filippov, *Introduction into development and estimation technique of scanning thermal imaging systems*. («Unipress» Publishing House, Kazan, 1998) [in Russian].
8. A. G. Bugaenko, V. P. Ivanov, A. I. Omelaev, and V. L. Filippov, *Physical foundations and measurement techniques in thermal imaging*. («Unipress» Publishing House, Kazan, 2003) [in Russian].
9. J. Fanning and B. Teaney, *Proc. SPIE* **9071**, 90710J-1 (2014).
10. V. A. Ovsyannikov and Y. V. Ovsyannikov, *Usp. Prikl. Fiz.* **10** (1), 53 (2022). DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-53-62 [in Russian].
11. G. Holst, *Proc. SPIE* **9452**, 94520K-1 (2015).
12. R. Driggers, M. Friedman, and J. Nicols, *Introduction to infrared and electro-optical systems*. 2 ed. (Artech House, Boston, London, 2012).
13. A. Hodgkin, T. Maurer, C. Halford, and R. Vollmerhausen, *Proc. SPIE* **6543**, 654307-1 (2007).
14. V. A. Ovsyannikov and Y. V. Ovsyannikov, *Kontenant*, No. 1, 28 (2019) [in Russian].
15. D. Deaver and S. Voyer, *Proc. SPIE* **9452**, 945201-1 (2015).
16. A. N. Shchukin, *Probability theory and its application in engineering calculations*. («Soviet radio» Publishing House, Moscow, 1974) [in Russian].
17. G. G. Abezgauz, A. P. Tron, Y. N. Kopenkin, and I. A. Korovina, *Probability theory handbook*. («Voenizdat» Publishing House, Moscow, 1970) [in Russian].