

УДК 621.384.32

EDN: NGEBUL



PACS: 06.20 – fb, 07.57 – c.

## Развитие методологии стендовой оценки дальности действия несканирующих тепловизионных приборов

В. А. Овсянников, Я. В. Овсянников

*Предложена инженерная методика экспериментальной оценки в стендовых условиях основного тактико-технического параметра – дальности действия – современных несканирующих тепловизионных приборов (ТВП) при обнаружении и распознавании объектов местности. Методика основана на разрешении группой операторов-экспертов эквивалентных тепловых мир с фиксированным тепловым контрастом по их изображению, не требующая измерения температурно-частотной характеристики ТВП. Описана процедура оценки достоверности результатов стендовых испытаний ТВП на дальность действия, обеспечивающая получение нижней границы доверительного интервала для этой дальности при заданной доверительной вероятности. Дан пример практического использования представленных результатов.*

*Ключевые слова:* несканирующий тепловизионный прибор, дальность действия, стендовые испытания.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-262-272

### Введение

Важнейшим тактико-техническим параметром наблюдательных тепловизионных приборов (ТВП) в статическом режиме работы, когда прибор и объект неподвижны относительно друг друга, а время наблюдения не ограничено, является дальность действия – дальность вскрытия (обнаружения, классификации и/или идентификации) зачетного объекта. Однако экспериментальные оценки дальности действия ТВП в натуральных условиях

весьма сложны, времязатратны и сопряжены с существенными погрешностями, поскольку эта дальность зависит от множества факторов, не связанных с самим ТВП, которые невозможно либо точно учесть, либо, формально учтя, точно определить: алфавит вскрываемых объектов; текущее состояние и стратификация атмосферы; квалификация, психофизическое состояние задействованных операторов-дешифровщиков, а также используемые ими критерии вскрытия объекта; характер и степень тепловой неоднородности фона; условия дешифрирования полученного изображения (яркость, контрастность, зашумленность, видимое увеличение, ресурс времени) и возможность их оптимизации и др. [1]. Поэтому любой ТВП прежде всего аттестуется в стендовых условиях по отношению к специальным тест-объектам – периодическим прямоугольным тепловым мирам, причем в качестве основной рабочей характеристики ТВП используется температурно-частотная характеристика (ТЧХ)  $\Delta T_{\text{раз}} = f(\nu)$  – зависи-

---

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

Овсянников Ярослав Владимирович, инженер-программист 1 кат.

E-mail: jar\_ovs@mail.ru

АО «НПО Государственный институт прикладной оптики».

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

E-mail: gipo@telebit.ru

Статья поступила в редакцию 18.04.2023

Принята к публикации 2.05.2023

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

мость минимальной разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$ , К, от угловой частоты стандартной тепловой миры  $\nu$ , мрад<sup>-1</sup>, разрешаемой по ее изображению с вероятностью 0,5, – которая и определяет посредством соответствующей операциональной модели ТВП – расчетной методики, связывающей показатели эффективности прибора с его основными техническими параметрами, базирующейся на концепции эквивалентных мир, – дальность действия ТВП [2].

Как показано в [1], вероятность вскрытия  $P$  объекта по тепловизионному изображению можно оценить по приближенной формуле:

$$P = 1 - \exp\left[-0,7\left(\frac{\gamma h}{2CA}\right)^2\right]; \quad A = D/2\nu, \quad (1)$$

где  $h$  – критический размер объекта (корень квадратный из его видимой площади), м;  $\nu$  – угловая частота разрешаемой эквивалентной миры, мрад<sup>-1</sup>;  $C$  – критерий Джонсона – число периодов этой миры, укладываемых в критический размер объекта, необходимое для его вскрытия с вероятностью 0,5, в среднем равное 1 – при обнаружении, 3 – при классификации и 6 – при идентификации объекта;  $A$  – разрешение на местности – полупериод (ширина полос) эквивалентной миры, разрешаемой с вероятностью 0,5, м;  $\gamma = 0,65-1,5$  – показатель квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно);  $D$  – дистанция до объекта – дальность действия ТВП, км.

Тогда дальность действия ТВП составляет  $D = 2Av$ , где  $\nu$  – решение уравнения

$$|\Delta T_R|_{\tau_a} = \Delta T_{\text{раз}}(\nu);$$

$\Delta T_R$  – тепловой контраст объекта – средняя разность радиационных температур объекта и фона, К;  $\tau_a = f(D)$  – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ТВП  $\Delta\lambda$  на дистанции  $D$  (оценивается, например, по методике работы [1]), а требуемое разрешение на местности  $A$ , по (1), для заданной вероятности вскрытия  $P$  объекта равно

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

Обратим внимание на то, что для оценки эффективности ТВП следует пользоваться по-

нятием разрешения на местности, определенным для вероятности разрешения миры 0,5 (а не 0,8–0,9, как нередко полагают), ибо:

– именно для такого толкования данного понятия и разработаны существующие сегодня операциональные модели ТВП. Этому же понятию соответствуют и накопленные в мире базы данных по требуемому разрешению на местности;

– экспериментально получаемые оценки разрешения на местности  $A$  также отвечают значению 0,5. Действительно, уверенное разрешение миры любым конкретным оператором отнюдь не означает, что вероятность ее разрешения близка к 1: оно может быть обусловлено лишь высокой контрастной чувствительностью органа зрения именно этого оператора, а также особенностями используемого лично им критерия разрешения. Поэтому рутинная процедура измерения  $A$  предусматривает усреднение получаемых оценок  $A$  по целой группе  $n_o$  операторов-экспертов, для чего необходимо найти среднее геометрическое  $\Delta T_{\text{раз}}$  соответствующих значений разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}j}$ , составляющее

$$\Delta T_{\text{раз}} = \left( \prod_{j=1}^{n_o} \Delta T_{\text{раз}j} \right)^{1/n_o},$$

и установить значение  $A$ , отвечающее полученной величине  $\Delta T_{\text{раз}}$  (например, [3]). Тогда, поскольку данные оценки  $\Delta T_{\text{раз}j}$  подчинены логарифмически нормальному закону распределения, вероятность разрешения миры – она определяется как предел отношения числа операторов, разрешивших миру, к общему их числу, – равная 0,5 (т. к. миру, которой отвечает средняя оценка  $\Delta T_{\text{раз}}$ , разрешает как раз половина операторов), реализуется автоматически;

– для достаточно достоверного подтверждения выполнения требований к разрешению на местности ТВП при этом требуется минимальное число операторов.

При оценке и аттестации ТВП во многих зарубежных странах, согласно стандарту НАТО STANAG 4347 «Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems» [2], под дальностью обнаружения

(выделения из фоновых неоднородностей), классификации (распознавания класса) и идентификации (распознавания типа) объекта понимается дистанция  $D$ , на которой в критический размер зачетного объекта-танка  $h_0 = 2,3$  м с тепловым контрастом  $\Delta T_{R0} = 2$  К, наблюдаемого в лобовой проекции в благоприятных погодных условиях, характеризующимся показателем ослабления излучения в атмосфере  $\beta_0 = 0,2 \text{ км}^{-1}$ , и находящегося на фоне с температурой  $T_0 = 288$  К, укладывается  $C_0 = 1$ ,  $C_0 = 3$  и  $C_0 = 6$  периодов разрешаемой эквивалентной тепловой миры соответственно. Это отвечает вероятности вскрытия объекта оператором средней квалификации ( $\gamma = 1$ ) с вероятностью  $P_0 = 0,5$ , при классификации и идентификации – по критерию «правильное решение оператора», т. е. с учетом возможности угадывания обнаруженного объекта в группе из трех и восьми разных объектов соответственно, имеющих близкие размеры и тепловой контраст. Именно для данных нормированных условий определяются по изложенной выше методике стендовые оценки дальности действия зарубежных ТВП при обнаружении, классификации и идентификации указанного объекта, которые и приводятся в соответствующих рекламных и справочных материалах (например, [4]).

Однако измерение ТЧХ, весьма трудоемкое само по себе, требуемое для оценки дальности действия, для несканирующих ТВП еще более осложняется из-за наличия у них выборки (дискретизации сигналов) в обоих направлениях, превращающей цифровой ТВП в пространственно-неинвариантную систему. Это вызывает необходимость соответствующей модификации ТЧХ, ибо она становится неоднозначной, немонотонной и ограниченной частотой Найквиста (половиной частоты выборки), т. к. за ее пределом изображение стандартной миры любого контраста содержит не более трех разрешаемых полос, и, следовательно, классический критерий разрешения миры, подразумевающий различение на изображении всех ее четырех полос, здесь не реализуется [1, 5].

В связи с изложенным, нашей задачей является разработка упрощенной, не связанной с измерением ТЧХ, методики стендовой оценки дальности действия современных несканирующих ТВП и анализ достоверности этой

оценки, в том числе – с целью контроля конкурентоспособности отечественных ТВП по дальности действия. Поэтому данная статья будет полезным дополнением работы [6], посвященной оценке конкурентоспособности ТВП в натуральных условиях.

### Методика решения задачи

Для правильной организации стендовой оценки дальности действия ТВП необходимо учесть следующие обстоятельства, связанные с измерением ТЧХ ТВП  $\Delta T_{\text{раз}} = f(v)$  и имеющие прямое отношение к решаемой задаче.

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. При этом за счет инерции зрительного аппарата фазовые эффекты усредняются и оператор может с равным успехом разрешить на изображении все четыре полосы миры [1, 5].

Использование динамической ТЧХ, которое при анализе и синтезе современных цифровых ТВП считается весьма продуктивным, 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. Поэтому допустимо применять, с последующей корректировкой, упрощенную статическую ТЧХ, измерение которой основано на обнаружении провала в изображении двух смежных полос тепловой миры, расположенной в оптимальной фазе относительно структуры матричного фотоприемника, когда глубина данного провала максимальна, и подобная процедура оценки ТЧХ практически апробирована [7]. Иначе говоря, в данном случае критерием разрешения миры является раздельное обнаружение любых двух ее смежных полос, что, по сути, эквивалентно установлению по изображению числа полос миры – наиболее обоснованно.

ванному критерию разрешения. Корректировка, без которой оценка дальности действия ТВП была бы завышена, заключается в том, что для каждой разрешаемой разности температур отвечающие ей значения угловой частоты измеренной ТЧХ умножаются на поправочный коэффициент  $\sim 0,9$ , чем устраняется систематическая ошибка оценки этой дальности [8]. Необходимость указанной корректировки связана с тем, что измерение ТЧХ здесь производится при оптимальной фазе мира, в то время как использование динамической ТЧХ, по существу, учитывает факт случайного равновероятного положения изображения наблюдаемого объекта в плоскости фотоприемника ТВП.

На практике измерение ТЧХ нередко производят с работающим устройством автоматической регулировки усиления, во всяком случае при максимально высоком коэффициенте усиления видеосигналов – для достижения возможно меньших значений  $\Delta T_{\text{раз}}$ , что при наблюдении малоcontrastных мир с большой угловой частотой обуславливает появление на изображении видимого шума. Следовательно, ТВП при этом, по сути, работает в шумоограниченном режиме, в то время как в реальных условиях наблюдения объектов на естественном неоднородном фоне для современных высокочувствительных несканирующих ТВП обычно имеет место контрастно-ограниченный режим, в котором их эффективность по вскрытию объектов лимитируется не шумом прибора, а ограниченной контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора. Поэтому при измерении ТЧХ, когда мира, установленная в фокальной плоскости объектива коллиматора – имитатора бесконечности, по существу, находится на равноизлучающем фоне, следует, отключив устройство автоматической регулировки усиления, использовать коэффициент усиления видеосигналов и соответствующий ему контраст изображения мира не максимально высокие, а отвечающие наблюдению объектов на неоднородном фоне местности, соответствующие требуемому диапазону регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$  [9].

Необходимо отметить, что измеренная в стендовых условиях ТЧХ контрастно-ограниченных ТВП от разности температур,

эквивалентной шуму, не зависит, ибо тепловизионное изображение здесь практически не зашумлено, но, вместе с тем, она оказывается существенно зависящей от контрастной чувствительности зрительного анализатора оператора, определяемой в том числе средней яркостью изображения, и требуемого в каждом данном случае диапазона регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$ , выбор которого, в свою очередь, зависит от конкретной фоноцелевой обстановки. Поэтому ТЧХ таких ТВП не является уникальной, однозначной характеристикой, и, как следствие, отдельно взятая конкретная ТЧХ не определяет в достаточно полной степени их эффективности. Для прогноза дальности действия ТВП в широком диапазоне условий применения следует получить целое семейство ТЧХ, отвечающих разным значениям  $\Delta T_m$ , или же иметь расчетные ТЧХ, которые формируются на основе измеренной функции передачи модуляции прибора; при этом реализуются объективные, хотя и косвенные, оценки ТЧХ и, тем самым, разрешается противоречие между принципиальной субъективностью ТЧХ и возможностью их объективной оценки.

Для ширины полос разрешаемой эквивалентной мира  $a$ , мкм, расположенной в фокальной плоскости объектива коллиматора с фокусным расстоянием  $f_{\text{кол}}$ , мм, справедливо соотношение

$$a / A = f_{\text{кол}} / D,$$

поэтому задача оценки дальности действия ТВП  $D$  сводится к нахождению ширины полос этой мира  $a$ , разрешаемой с вероятностью 0,5, определяющей, по (1)–(2), значение  $D$ :

$$D = \gamma h f_{\text{кол}} / 2,4 a C \sqrt{-\ln(1-P)}. \quad (3)$$

Очевидно, оценка ширины полос разрешаемой стендовой мира  $a$  производится с ошибкой, обусловленной, главным образом, высокой степенью субъективности решений операторов относительно факта разрешения или неразрешения мира. Причины отмеченной субъективности заключаются в том, что при этом имеют место:

– различная контрастная чувствительность зрительного анализатора операторов,

которая, в отличие от остроты зрения, коррекции не поддается;

– вариации используемого операторами критерия разрешения миры.

В попытках придать оценке величины  $a$  точность и объективность разработчики обычно формируют небольшую группу высококвалифицированных операторов, которым и поручаются соответствующие измерения. При этом считается, что эти операторы должны обладать достаточно высокой контрастной чувствительностью органа зрения, а оценки значения  $a$ , полученные разными операторами или сделанные в разное время одним и тем же оператором, должны быть близки друг к другу. Именно высокая степень воспроизводимости измерений и является здесь признаком высокой квалификации оператора, и никакого иного смысла в это понятие вкладываться не должно. Иначе говоря, хорошо обученный, тренированный оператор может и не разрешить ту миру, которую, возможно, разрешает оператор с более низкой квалификацией, зато его показания являются более стабильными. Уместно отметить, что понятие «квалификация оператора» недопустимо трактовать расширенно: высокая в указанном смысле квалификация оператора при разрешении миры еще не означает столь же высокой его квалификации при дешифрировании реальных изображений объектов местности, и неучет этого обстоятельства может привести к необоснованному завышению прогноза достижимой эффективности ТВП.

Основные затруднения при обучении операторов кроются в необходимости установления критерия заметности различия между изображением полос миры и промежутка между ними. Инструкции и объяснения здесь мало помогают. Обучение проходит значительно успешнее, если операторам в течение некоторого времени предъявляют большое количество изображений мир с указанием миры, считающейся разрешенной, предлагая тем самым выработать критерий разрешения самостоятельно. Изложенный подход к обучению операторов связан с тем, что, как показал многолетний опыт, практически невозможно дать четкое формальное описание признаков разрешения миры [10].

Наиболее обоснованным критерием разрешения миры при аттестации видовой аппа-

ратуры в настоящее время считается возможность определения по изображению числа полос тест-объекта и их ориентации. Так, ГОСТ 2819-84 устанавливает, что в качестве предельно разрешенной принимают «ту наивысшую по частоте группу штрихов миры в фотографическом изображении, в которой можно отчетливо сосчитать полное число штрихов». Аналогичный критерий разрешения миры используется и в стандарте НАТО STANAG 4349 «Measurement of minimum resolvable thermal difference of thermal cameras», регламентирующем процедуру измерения ТЧХ ТВП [2].

Приведенная выше формулировка критерия разрешения – возможность сосчитать число полос миры – оказалась достаточно широкой, чтобы вместить все существующие различия признаков ее разрешения, и в то же время достаточно четкой, чтобы получать сопоставимые результаты при проведении испытаний различной видовой аппаратуры. Попытки ужесточить формулировку, как это ни парадоксально, приводят к ухудшению воспроизводимости. Неоднократно предлагалось уточнить требования к качеству воспроизведения полос миры, например считать недопустимыми перемишки между изображениями полос или же нормировать их число. Так, в некоторых методиках считается допустимым наличие одной перемишки при принятии решения о различимости полос миры. В результате вместо уточнения критерия разрешения появляются лишь новые возможности для расхождений в оценках. Еще больше возможностей для различных толкований критерия разрешения дают формулировки типа «четкое воспроизведение полос», «раздельное воспроизведение полос» и т. д. [10].

Для измерения ТЧХ ТВП обычно используется набор мир, смонтированных на общей плате, в котором ширина полос каждой последующей миры в  $2^{1/6} = 1,12$  раза меньше ширины полос предыдущей миры. Такой шаг ширины полос последовательности мир соответствует погрешности оценки углового разрешения видового прибора опытным оператором, который выполняет ее в считанные секунды и редко ошибается более чем на одну миру [10]. Это хорошо согласуется с тем фактом, что даже для хорошо отработанных, стандартизованных процедур оценки рабочего

разрешения телевизионных кинескопов и электронно-оптических преобразователей (например, ГОСТ 21815.9-86) относительная погрешность при доверительной вероятности  $R = 0,95$  в среднем составляет  $\Delta = 16\% = 0,16$ , чему соответствует относительное средне-квадратическое отклонение  $\sigma$  оценки ширины полос разрешаемой стендовой миры, определяемое уравнением

$$R = \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right) = 0,95;$$

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp(-t^2/2) dt \approx \sqrt{1 - \exp(-0,63z^2)},$$

где  $\Phi(z)$  – интеграл вероятности и его аппроксимация (для  $z \geq 0$ ), и равное  $\sigma = \Delta/2 = 0,08$ .

Поэтому если стендовая мира с шириной полос  $a$ , мкм, разрешается с вероятностью  $0,5$ , соответствующей самому определению разрешения на местности, то мира с некоторой шириной полос  $a_m$ , большей или меньшей  $a$ , должна разрешаться с вероятностью  $P_m$ , составляющей

$$P_m = \frac{1}{2} [1 + \Phi(r)]; \quad r = \frac{a_m - a}{a\sigma} = \frac{a_m/a - 1}{0,08},$$

откуда получаем:

$$\begin{aligned} a &= a_m / (1 + 0,08r); \\ r &= \Phi^{-1}(2P_m - 1) \approx \\ &\approx \begin{cases} 1,26\sqrt{-\ln[1 - (2P_m - 1)^2]} & (P_m \geq 0,5); \\ -1,26\sqrt{-\ln[1 - (2P_m - 1)^2]} & (P_m < 0,5). \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Очевидно, при  $P_m = 0,5$  имеем  $r = 0$  и  $a = a_m$ .

Для аттестуемого образца ТВП обычно известна ожидаемая дальность действия  $D_{ож}$ , км, которой, согласно (3), соответствует ширина полос стендовой миры  $a_{ож}$ , мкм, равная

$$a_{ож} = \gamma h f_{кол} / 2, 4CD_{ож} \sqrt{-\ln(1-P)}. \quad (5)$$

Поэтому с использованием набора стендовых мир с последовательно уменьшающимися в  $2^{1/6} = 1,12$  раза, близкими к величине  $a_{ож}$ , значениями ширины полос  $a_i$  следует получить изображения этих мир и с привлече-

нием группы операторов-экспертов оценить вероятности  $P^*$  их разрешения, определяемые как  $P^* = n/n_o$ , где  $n$  – число операторов, разрешивших миру;  $n_o$  – общее число операторов.

Тепловой контраст всех этих мир  $\Delta t_R$ , К, фиксирован и должен составлять

$$\Delta t_R = \Delta T_R \tau_{а\,ож} / \tau_{кол}, \quad (6)$$

где  $\tau_{а\,ож}$  – коэффициент пропускания атмосферы в диапазоне  $\Delta\lambda$  на дистанции  $D_{ож}$ ;  $\tau_{кол}$  – коэффициент пропускания (или отражения) объектива коллиматора в диапазоне  $\Delta\lambda$ , а выставленный на ТВП диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$  – быть максимально близким к оптимальному значению [9, 11]

$$\Delta T_m = q |\Delta t_R|; \quad q = 6 - 10. \quad (7)$$

Меньший коэффициент  $q$  в (7) отвечает узкопольным ТВП, а больший – широкопольным. Довольно большое значение  $q$  здесь учитывает целесообразность регистрации в реальных условиях распределения радиационной температуры по площади объекта, возможно содержащего высокотемпературные детали, что важно для его распознавания, а также близлежащих фоновых неоднородностей, облегчающей привязку обнаруженного объекта к местности.

Как видно, возможная ошибка выбора ожидаемого значения  $D_{ож}$  вполне компенсируется некоторым произволом назначения диапазона регистрируемой разности температур  $\Delta T_m$  согласно (7).

Тогда, с учетом (3) и ранее обоснованного поправочного коэффициента  $0,9$ , установив ширину полос миры  $a_m$ , разрешаемой с оценкой вероятности  $P^*$ , по возможности близкой к  $0,5$ , можно рассчитать для соответствующего значения  $r$ , определяемого по (4) для  $P_m = P^*$ , наиболее вероятную оценку дальности действия ТВП  $D$ , отвечающую ширине полос стендовой миры  $a$ , разрешаемой с вероятностью  $0,5$ :

$$\begin{aligned} D &= \frac{0,9\gamma h f_{кол}}{2,4Ca\sqrt{-\ln(1-P)}} = \\ &= \frac{0,9\gamma h f_{кол} (1 + 0,08r)}{2,4Ca_m\sqrt{-\ln(1-P)}} = \frac{0,9a_{ож} D_{ож} (1 + 0,08r)}{a_m}. \end{aligned} \quad (8)$$

Корректирующий коэффициент  $1 + 0,08r$  в (8) нивелирует влияние того обстоятельства, что значение  $a_m$  определяется для вероятности разрешения мира, не обязательно равной 0,5, чем исключается необходимость варьирования теплового контраста стендовых мир, которое было бы необходимо при измерении традиционной ТЧХ.

Важно подчеркнуть, что для получения сопоставимых оценок дальности действия стендовые испытания ТВП должны проходить в нормированных условиях, определяемых стандартом STANAG 4347, в том числе при температуре фона, близкой к  $T_0 = 288$  К, а соответствующие параметры формул (5) и (6) составлять:

$$\begin{aligned} h &= h_0 = 2,3 \text{ м}; \quad P = P_0 = 0,5; \\ C &= C_0 = 1, 3 \text{ или } 6; \\ \Delta T_R &= \Delta T_{R0} = 2 \text{ К}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\tau_{\text{а.ож}} = \exp(-\beta_0 D_{\text{ож}}) = \exp(-0,2 D_{\text{ож}}).$$

При испытаниях следует иметь в виду, что, поскольку суждения любого оператора о разрешении мира по ее изображению в одинаковых условиях в высокой степени коррелированы, для обеспечения независимости попыток ее разрешения, при которой только и имеют смысл оценки вероятности разрешения  $P^*$ , нужно в первую очередь увеличивать не число предъявляемых изображений мира, а состав операторов. Это является основным способом повышения достоверности отмеченных оценок, ибо дешифровочные возможности операторов даже одинаково высокой квалификации индивидуальны и случайны: они зависят от психофизического состояния оператора, его опыта, внимания, степени мотивации, усталости и эмоционального настроения на момент дешифрирования. Поэтому предполагается, что количество независимых испытаний равно числу операторов  $n_0$ .

Однако существенное расширение состава экспертной группы труднореализуемо и резко удлиняет процедуру измерения. Так как число задействованных операторов на практике, как правило, невелико, то возникает проблема оценки доверительной вероятности  $R(P_{\text{раз}} \geq P_n)$  того, что вероятность разрешения мира  $P_{\text{раз}}$  действительно не меньше нижней границы  $P_n = 0,5$ . Данная доверительная вероятность, в

общем случае, и является мерой достоверности полученных результатов испытаний.

Количество операторов, которым предъявляются для разрешения изображения мир, зависит от вероятности разрешения (априори неизвестной), доверительного интервала для этой вероятности и самой доверительной вероятности. Согласно [12], доверительная вероятность  $R = R(P_{\text{раз}} \geq P_n)$  того, что  $P_{\text{раз}} \geq P_n$ , если в  $n_0$  независимых испытаниях получено  $n$  положительных результатов, равна вероятности того, что в  $n_0 + 1$  испытаниях при вероятности положительного исхода единичного испытания  $P_{\text{раз}} = P_n$  будет получено не более  $n$  положительных результатов. Это позволяет для расчета  $R$  воспользоваться формулой для биномиального распределения:

$$R = \sum_{i=0}^n C_{n_0+1}^i P_n^i (1 - P_n)^{n_0+1-i}. \quad (10)$$

Если все попытки разрешения оказались успешными ( $n = n_0$ ), то формула (10) упрощается [12]:

$$R = 1 - P_n^{n_0+1}.$$

При нижней границе доверительного интервала  $P_n$ , близкой к 0,5, и  $n_0 \geq 4-5$  для оценки доверительной вероятности  $R$  применима гауссовская аппроксимация [13]:

$$R = \frac{1}{2} [1 + \Phi(z)]; \quad z = \frac{n + 0,5 - P_n(1 + n_0)}{\sqrt{P_n(1 + n_0)(1 - P_n)}}. \quad (11)$$

Очевидно, при неограниченном увеличении числа испытаний ( $n_0 \rightarrow \infty$ ) доверительная вероятность  $R$  принимает значения:

$$R = \begin{cases} 1 & \text{при } P^* \geq P_n; \\ 0 & \text{при } P^* < P_n. \end{cases}$$

Следовательно, если при этом оценка вероятности разрешения мир превышает требуемый уровень, то теоретически абсолютно достоверно, что сама вероятность разрешения также выше этого уровня.

Рассчитанные по (10) зависимости доверительной вероятности  $R = f(n_0 - n)$  от числа  $n_0 - n$  безуспешных попыток разрешения мира при  $P_n = 0,5$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимости  $R = f(n_0 - n)$  при  $P_H = 0,5$**

$n_0 - n$	$R(P_{раз} \geq 0,5)$					
	$n_0 = 2$	$n_0 = 3$	$n_0 = 4$	$n_0 = 5$	$n_0 = 6$	$n_0 = 7$
0	0,87	0,94	0,97	0,98	0,99	1
1	0,50	0,69	0,81	0,89	0,94	0,96
2	–	–	0,50	0,65	0,77	0,86
3	–	–	–	–	0,50	0,63

Отсюда видно, что если, например, двое из трех операторов разрешили миру, то с доверительной вероятностью, равной лишь  $R = 0,69$ , можно утверждать, что фактическая вероятность ее разрешения  $P_{раз} \geq 0,5$ , т. е. в этом случае вывод о разрешении данной миры будет недостаточно достоверен. Для обеспечения приемлемого уровня  $R \geq 0,8$  необходимо, чтобы мира разрешалась всеми тремя операторами или, например, тремя операторами из четырех.

При назначении норм (допустимых значений)  $R_{min}$  на доверительную вероятность  $R$  следует помнить, что во всех подобных задачах норма доверительной вероятности не может быть определена из каких-либо правил математической статистики [13]. Она выбирается исключительно из эвристических соображений – имеющегося опыта, здравого смысла и интуиции – и обычно находится в пределах  $R_{min} = 0,8-0,95$ .

Тогда, задавшись доверительной вероятностью  $R_{min} = R(P_{раз} \geq P_H)$  того, что вероятность разрешения миры не меньше некоторой нижней границы  $P_H$  доверительного интервала для указанной вероятности, для любых значе-

ний  $n$  и  $n_0$  можно рассчитать по формуле, вытекающей из квадратного уравнения (11), эту нижнюю границу:

$$\begin{aligned}
 P_H &= (b - \sqrt{b^2 - 4ec}) / 2e; \\
 e &= (1 + n_0)^2 + d^2(1 + n_0); \\
 b &= (1 + n_0)(2n + 1 + d^2); \quad c = (n + 0,5)^2; \\
 d &= 1,26 \sqrt{-\ln(1 - (2R_{min} - 1)^2)}.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Из (12), в частности, вытекает, что при неограниченном числе испытаний значение  $P_H$  равно оценке вероятности разрешения  $P^* = n/n_0$  для любой доверительной вероятности  $R$ , а поскольку при этом доверительный интервал для вероятности разрешения сужается до нуля, оно совпадает с самой вероятностью разрешения.

Необходимые для расчета значения  $P_H$ , соответствующие типовым доверительным вероятностям  $R_{min} = 0,8, 0,9$  и  $0,95$ , при  $n_0 \leq 10$  можно также найти из табл. 2, полученной путем решения точного уравнения (10) для ряда оценок вероятности разрешения миры  $P^*$ .

Таблица 2

**Значения нижней границы  $P_H$  доверительного интервала для ряда оценок вероятности разрешения миры  $P^*$  и значений доверительной вероятности  $R_{min} = R(P_{раз} \geq P_H)$**

$P^*$	$P_H$			$P^*$	$P_H$			$P^*$	$P_H$		
	$R_{min} = 0,8$	$R_{min} = 0,9$	$R_{min} = 0,95$		$R_{min} = 0,8$	$R_{min} = 0,9$	$R_{min} = 0,95$		$R_{min} = 0,8$	$R_{min} = 0,9$	$R_{min} = 0,95$
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



Из изложенного следует, что для снижения числа испытаний  $n_0$  (или повышения доверительной вероятности  $R$  при том же  $n_0$ ) целесообразно найти ширину полос мира  $a_n$ , которой отвечает по табл. 2 нижняя граница доверительного интервала  $P_n$ , максимально близкая к 0,5. Тогда нижняя граница  $D_n$ , км, доверительного интервала для дальности действия ТВП будет определяться формулой, полученной аналогично (8):

$$D_n = \frac{0,9\gamma h f_{\text{кол}}(1+0,08p)}{2,4Ca_n\sqrt{-\ln(1-P)}} = \frac{0,9a_{\text{ож}}D_{\text{ож}}(1+0,08p)}{a_n},$$

$$p = \Phi^{-1}(2P_n - 1) \approx \begin{cases} 1,26\sqrt{-\ln[1-(2P_n - 1)^2]} & (P_n \geq 0,5); \\ -1,26\sqrt{-\ln[1-(2P_n - 1)^2]} & (P_n < 0,5). \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, задавшись приемлемой доверительной вероятностью  $R_{\min}$  и установив по табл. 2 для ширины полос мира  $a_n$  и оценки вероятности разрешения мира  $P^*$  нижнюю границу  $P_n$  доверительного интервала для вероятности разрешения стендовой миры, определяющую по (13) соответствующую нижнюю границу  $D_n$ , можно утверждать, что дальность действия аттестуемого ТВП  $D$  вполне достоверно удовлетворяет соотношению  $D \geq D_n$ . Если при этом значение  $D_n$ , найденное для нормированных условий согласно STANAG 4347, превышает дальность действия сравниваемого зарубежного образца ТВП, то делается вывод о статистически подтвержденной конкурентоспособности аттестуемого ТВП по дальности действия.

**Пример.** Оценим с использованием коллиматора с фокусным расстоянием линзового объектива  $f_{\text{кол}} = 6000$  мм и его коэффициентом пропускания  $\tau_{\text{кол}} = 0,8$  дальность классификации в нормированных условиях посредством узкопольного ТВП зачетного объекта-танка:

– для ожидаемой дальности действия ТВП  $D_{\text{ож}} = 3$  км рассчитываем по (5) с учетом (9) для показателя квалификации оператора  $\gamma = 1$  и критерия Джонсона  $C = 3$  соответствующую ширину полос стендовой миры

$$a_{\text{ож}} = 1 \times 2,3 \times 6000 / 2,4 \times 3 \times 3 [-\ln(1 - 0,5)]^{1/2} = 770 \text{ мкм};$$

– рассчитываем по (6) с учетом (9) для коэффициента пропускания атмосферы  $\tau_a = \exp(-0,2 \times 3) = 0,55$  требуемый тепловой контраст стендовых мир  $\Delta t_R = 2 \times 0,55 / 0,8 = 1,4$  К и по (7) для  $q = 6$  соответствующий диапазон регистрируемой разности температур  $\Delta T_m = 6 \times 1,4 = 8,4$  К;

– получаем тепловые изображения набора стендовых мир с рядом значений ширины полос  $a_i$ , близких к  $a_{\text{ож}}$ , и для каждой миры оцениваем с привлечением, например, трех операторов-экспертов вероятности их разрешения  $P^*$ ;

– задавшись, например, доверительной вероятностью  $R_{\min} = R(P_{\text{раз}} \geq P_n) = 0,9$ , для каждого значения  $a_i$  определяем по табл. 2 нижние границы доверительного интервала  $P_n$  и выбираем ширину полос мира, например,  $a_n = 840$  мкм, которой отвечает нижняя граница доверительного интервала  $P_n = 0,56$ , близкая к 0,5, реализуемая при оценке вероятности разрешения  $P^* = 3/3 = 1$ ;

– находим ширину полос мира, например,  $a_m = 750$  мкм, которой соответствует оценка вероятности разрешения  $P^* = 2/3 = 0,67$ , близкая к 0,5;

– рассчитываем по (4) для  $P_m = P^* = 0,67$  коэффициент  $r = 0,44$ , далее по (8) наиболее вероятную оценку дальности классификации танка  $D = 0,9 \times 770 \times 3(1 + 0,08 \times 0,44) / 750 = 2,9$  км и по (13) для  $P_n = 0,56$  коэффициент  $p = 0,15$  и нижнюю границу доверительного интервала для этой дальности  $D_n = 0,9 \times 770 \times 3(1 + 0,08 \times 0,15) / 840 = 2,5$  км.

Таким образом, с доверительной вероятностью 0,9 можно утверждать, что дальность классификации танка данным ТВП составляет не менее 2,5 км при наиболее вероятном ее значении 2,9 км.

## Заключение

Для упрощения стендовой оценки дальности действия современных несканирующих ТВП целесообразно отказаться от традиционной, весьма трудоемкой процедуры измерения их ТЧХ и использовать набор стандартных

тепловых мир с фиксированным тепловым контрастом, соответствующим требуемому диапазону регистрируемой разности температур, и последовательно уменьшающейся шириной полос, расположенных в фокальной плоскости объектива коллиматора в оптимальной фазе относительно структуры матричного фотоприемника ТВП, когда глубина провалов между изображением двух смежных полос мира максимальна. При этом ширина полос мира, экспертная оценка вероятности разрешения которой равна или близка к 0,5, определяет по изложенной методике наиболее вероятную оценку дальности действия ТВП, а ширина полос мира, которой отвечает значение нижней границы доверительного интервала для вероятности разрешения также локализованное вблизи 0,5, характеризует максимально возможную для ограниченного состава операторов нижнюю границу доверительного интервала для искомой дальности действия.

Предложенная в настоящей работе инженерная методика измерения в стендовых условиях дальности действия высокочувствительных несканирующих ТВП, функционирующих в обычном для них контрастно-ограниченном режиме, пригодна для достаточно широкого диапазона условий применения, в том числе для сравнительной оценки конкурентоспособности отечественных образцов ТВП по дальности действия и, следовательно, для обеспечения принятия обоснованного реше-

ния о целесообразности их производства или модернизации.

#### 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. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. – Poland, Warsaw: Military university of technology, 2010.
3. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. ИК системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004.
4. Белозеров А. Ф., Иванов В. М. Зарубежные тепловизионные приборы. – М.: НТЦ «Информтехника», 2004.
5. Webb C., Halford C. / Optical Engineering. 1999. Vol. 38. № 5. P. 845.
6. Овсянников В. А., Овсянников Я. В. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 5. С. 447–458.
7. Штоколов Э. А., Шлычков В. И., Золотарев А. И. / Контенант. 2012. Т. 11. № 1. С. 13.
8. Овсянников В. А., Овсянников Я. В. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 1. С. 61–70. DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-61-70
9. Овсянников В. А., Овсянников Я. В. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 53–62.
10. Молчанов А. С. Теория построения иконических систем воздушной разведки. – Волгоград: Панорама, 2017.
11. Holst G. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003.
12. Щукин А. Н. Теория вероятностей и ее применение в инженерно-технических расчетах. – М.: Сов. радио, 1974.
13. Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970.

PACS: 06.20 – fb, 07.57 – c.

## Development of a methodology for bench evaluation of the range of staring thermal imaging devices

*V. A. Ovsyannikov and Y. V. Ovsyannikov*

JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”  
2 Lipatova st., Kazan, 420075, Russia  
E-mail: jar\_ovs@mail.ru; gipo@telebit.ru

*Received 18.04.2023; accepted 2.05.2023*

***In this paper we propose an engineering method for experimental assessment in bench conditions of the main tactical and technical parameter – the range – of modern staring thermal imaging devices (TID) in the detection and recognition of terrain objects, based on the***

***resolution by a group of expert operators of an equivalent thermal test-objects with a fixed thermal contrast in their images, which does not require measurement of the temperature-frequency characteristic of TID. A procedure for evaluating the reliability of the TID bench tests results for a range is described, which ensures obtaining the lower bound of the confidence interval for this range with a given confidence probability. An example of the presented results practical use is also given.***

*Keywords:* staring thermal imager, range, bench testing.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-262-272

#### REFERENCES

1. Baloev V. A., Il'in G. I., Ovsyannikov V. A. and Filippov V. L., Efficiency, clutter-protection and clutter-stability of electro-optical imaging systems, Kazan, KGTU izdatel'stvo, 2015 [in Russian].
2. Chrzanowski K., Testing thermal imagers, Poland, Warsaw, Military university of technology, 2010.
3. Tarasov V. V. and Yakushenkov Yu. G., Infrared staring systems, Moscow, «Logos» Publishing House, 2004 [in Russian].
4. Belozеров A. F. and Ivanov V. M., Foreign thermal imagers, Moscow, «Informtehnika» Publishing House, 2004 [in Russian].
5. Webb C. and Halford C., Optical Engineering **38** (5), 845 (1999).
6. Ovsyannikov V. A. and Ovsyannikov Y. V., Usp. Prikl. Fiz. **10** (5), 447–458 (2022) [in Russian].
7. Shtokolov E. A., Shlychkov V. I. and Zolotarev A. I., Kontenant **11** (1), 13 (2012) [in Russian].
8. Ovsyannikov V. A. and Ovsyannikov Y. V., Usp. Prikl. Fiz. **11** (1), 61–70 (2023) [in Russian].
9. Ovsyannikov V. A. and Ovsyannikov Y. V., Usp. Prikl. Fiz. **10** (1), 53–62 (2022) [in Russian].
10. Molchanov A. S., The theory of iconic systems construction in aerial reconnaissance, Volgograd, «Panorama» Publishing House, 2017 [in Russian].
11. Holst G., Electro-optical imaging system performance. 3 ed., US, SPIE press, 2003).
12. Shchukin A. N., Probability theory and its application in engineering calculations, Moscow, «Soviet radio» Publishing House, 1974 [in Russian].
13. Abezgauz G. G., Tron A. P., Kopenkin Yu. N. and Korovina I. A., Probability theory handbook, Moscow, «Voenizdat» Publishing House, 1970 [in Russian].