

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ СТЕНДОВОГО КОНТРОЛЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

© 2007 г. В. А. Овсянников, канд. техн. наук; В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук

НПО "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

Предложена методика расчета нижней границы доверительного интервала для вероятности разрешения миры при стендовом контроле дальности действия тепловизионного прибора, основанная на статистической оценке этой вероятности для теплового контраста миры, равного 0,8–0,9 от нормированного.

Коды OCIS: 120.4640.

Поступила в редакцию 06.09.2006.

Как известно, основным показателем эффективности тепловизионного прибора (ТВП) является дальность действия – дальность обнаружения или распознавания зачетного объекта. Однако прямой контроль реализуемости требуемой дальности действия чрезвычайно затрудняется тем, что эта дальность зависит от множества факторов, не связанных с самим ТВП. К ним относятся:

- алфавит вскрываемых объектов, в частности степень различия их тепловых портретов;
- текущее состояние и стратификация атмосферы;
- квалификация и психофизическое состояние операторов-дешифровщиков;
- характер и степень тепловой неоднородности фона;
- локализация (в том числе в поле зрения ТВП) и видимые размеры объекта, учитывающие, в частности, его возможное частичное экранирование, например, растительностью, распределение радиационной температуры по площади объекта, наличие характерных, особенно на контуре объекта, элементов, средств маскировки, ракурс наблюдения и движение объектов, наличие косвенных демаскирующих признаков объектов;
- условия дешифрирования изображения (яркость, контрастность, зашумленность, видимое увеличение, акустический шум, вибрация, ресурс времени) и возможность их оптимизации.

Поэтому любой ТВП, как правило, аттестуется и по отношению к специальным тест-объектам – периодическим мирам, т. е. производится косвенный контроль обеспечения заданной дальности действия, который удобнее проводить в стендовых условиях.

Согласно концепции эквивалентных мир вероятность вскрытия P_B (обнаружения на неоднородном фоне или распознавания) объекта вполне определяется разрешением на местности A – полупериода эквивалентной миры, m , с вероятностью 0,5. При этом имеет место следующая аппроксимационная зависимость $P_B = f(A)$ [1]:

$$P_B = 1 - \exp[-0,7(h/2CA)^2],$$

где $h = \sqrt{s}$ – критический размер объекта, m , s – видимая площадь объекта, m^2 , C – критерий Джонсона, отвечающий решаемой задаче вскрытия для объектов военной и транспортной техники, в среднем равный 0,75 при обнаружении, 3 при классификации, 6 при идентификации.

Следовательно, полупериод (ширина полос) эквивалентной миры A_m , в миллиметрах, устанавливаемой в фокальной плоскости коллиматора, должен быть равен Af_k/D , где $A = h/2, 4C\sqrt{-\ln(1 - P_B)}$, P_B – заданная вероятность вскрытия зачетного объекта (обычно 0,8), f_k – фокусное расстояние коллиматора, m , D – заданная дальность действия ТВП, km .

Длина полос миры может быть принята равной $l_m = 7A_m$ [1]. Разность радиационных температур миры и фона ΔT_m , K , при этом должна составлять $\Delta T_m = |\Delta T_R| \tau_a / \tau_k$, где ΔT_R – разность радиационных температур зачетного объекта и фона, K , τ_a – коэффициент пропускания атмосферы на дистанции D в спектральном рабочем диапазоне ТВП, τ_k – коэффициент пропускания объектива коллиматора в том же диапазоне.

Тогда если вероятность разрешения P данной миры превышает нижнюю границу P_1 , равную здесь 0,5, то можно утверждать, что аттестуемый ТВП требованиям по дальности действия вполне удовлетворяет.

Однако величина P на практике точно не известна, вместо нее определяется ее оценка $P^* = n/n_0$, где n и n_0 – число наблюдателей, разрешивших миру, и их общее число соответственно. Поскольку число n_0 , как правило, невелико, то возникает проблема оценки доверительной вероятности $R(P \geq P_1)$, являющейся мерой достоверности полученных результатов испытаний.

Согласно [2] доверительная вероятность $R(P \geq P_1)$ того, что $P \geq P_1$, 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 $P = P_1$, будет получено не более n положительных результатов. Это позволяет для расчета R воспользоваться формулой для биномиального распределения

$$R = \sum_{i=0}^n C_{n_0+1}^i P_1^i (1 - P_1)^{n_0+1-i}. \quad (1)$$

В частности, при $n = n_0$ значение R определяет соотношение

$$R = 1 - P_1^{n_0+1}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что минимальное число экспертов, необходимое для обеспечения заданной доверительной вероятности $R(P \geq P_1)$, определяется реализацией критерия вскрытия n/n_0 при $n_0 = \text{int}(\ln(1 - R)/\ln P_1)$, где $\text{int}(x)$ – целая часть x .

Расчитанные по формулам (1), (2) значения нижней границы P_1 доверительного интервала вероятности разрешения P , соответствующие типовым значениям доверительной вероятности $R(P \geq P_1) = 0,8, 0,9$ и $0,95$, приведены в таблице для ряда критериев разрешения – значений оценки вероятности разрешения P^* .

Из формулы (1) вытекает, что если, например, двое из трех операторов разрешают соответствующую эквивалентную миру ($P^* = 2/3 = 0,67$), то с доверительной вероятностью лишь $R = 0,69$ можно утверждать, что фактическая вероятность разрешения мира $P_1 \geq 0,5$. Для обеспечения хотя бы минимально приемлемого уровня $R = 0,8$ необходимо, как следует из таблицы, чтобы эту миру разрешали все три оператора или, например, три оператора из четырех.

Для повышения доверительной вероятности $R(P \geq P_1)$, или уменьшения требуемого числа опе-

Значения P_1 для ряда характерных значений P^* и $R(P \geq P_1)$

P^*	P_1		
	$R(P \geq P_1) = 0,8$	$R(P \geq P_1) = 0,9$	$R(P \geq P_1) = 0,95$
2/2	0,58	0,46	0,37
2/3	0,42	0,32	0,25
3/3	0,67	0,56	0,47
3/4	0,51	0,41	0,34
4/4	0,72	0,63	0,55
3/5	0,41	0,33	0,27
4/5	0,58	0,49	0,42
5/5	0,76	0,68	0,61
4/6	0,48	0,40	0,34
5/6	0,63	0,56	0,48
6/6	0,79	0,72	0,65

раторов при том же значении R , целесообразно снизить тепловой контраст эквивалентной миру с первоначального значения $\Delta T_{m1} = \Delta T_m$ до уровня ΔT_{m2} , такого, чтобы ему отвечала нижняя граница P_2 доверительного интервала вероятности разрешения, для которой доверительная вероятность $R(P \geq P_2)$, соответствующая оценке $P^* = n/n_0$, уже была бы достаточно высока.

Как известно из работы [3], оценки $\Delta T_{разj}$ разрешаемой разности температур мира и фона, полученные разными операторами, подчинены логарифмически нормальному закону распределения со средеквадратическим отклонением $\sigma = 1,58$. Поэтому вероятность разрешения P_i мира, имеющей тепловой контраст ΔT_{mi} , каким-либо оператором составляет

$$P_i = 0,5 \left[1 + \Phi \left(\frac{\lg \Delta T_{mi} - \lg \Delta T_{раз}}{\lg \sigma} \right) \right], \quad (3)$$

где

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

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt - \text{интеграл вероятности,}$$

$\Delta T_{раз}$ – разрешаемая разность температур – среднее геометрическое оценок $\Delta T_{разj}$, полученных n операторами.

Отметим, что, поскольку миру с тепловым контрастом, равным $\Delta T_{раз}$, разрешает половина всех операторов, соответствующее разрешение на местности A , как уже указывалось, определяется для вероятности разрешения мира, равной именно $0,5$ (а не $0,8-0,9$).

Из (3) находим соотношение между P_1 и P_2 :

$$P_1 = 0,5 \Phi \left(\alpha + \Phi^{-1} (2P_2 - 1) \right) + 0,5, \quad (4)$$

где $\alpha = \lg(\Delta T_{m1}/\Delta T_{m2})/\lg \sigma$.

Очевидно, при $\Delta T_{m2} < \Delta T_{m1}$ значение нижней границы доверительного интервала для вероятности разрешения, отвечающее полученной оценке P^* , повысится ($P_1 > P_2$). Практически ΔT_{m2} целесообразно выбирать такой, чтобы ей отвечала достаточно высокая (но не равная 1) оценка P^* вероятности разрешения (обычно $\Delta T_{m2} = (0,8-0,9)\Delta T_{m1}$).

Таким образом, оценку значения P_1 необходимо вести в следующем порядке:

для выбранного, согласно изложенному, теплового контраста мира ΔT_{m2} получить, с привлечением n_0 экспертов, оценку вероятности разрешения мира $P^* = n/n_0$;

задавшись достаточно высокой доверительной вероятностью $R(P \geq P_2) \geq 0,8$, найти по таблице

(приняв, что $P_1 = P_2$) нижнюю границу доверительного интервала P_2 вероятности разрешения;

вычислить по формуле (4) искомую нижнюю границу P_1 доверительного интервала вероятности разрешения, отвечающую первоначальному тепловому контрасту миры $\Delta T_{m1} = \Delta T_m$.

Именно по значению P_1 и следует оценивать возможности аттестуемого ТВП, т. е. считать прибор удовлетворяющим требованиям по дальности действия, если значение $P_1 \geq 0,5$.

Пусть, например, после снижения теплового контраста эквивалентной миры до уровня $\Delta T_{m2} = 0,9\Delta T_{m1}$ эту миру разрешают те же два оператора из трех, что и ранее миру с первоначальным контрастом $\Delta T_{m1} = \Delta T_m$. Тогда в таблице для достаточно высокого значения $R(P \geq P_2) = 0,8$ находим нижнюю границу $P_2 = 0,42$ и далее, по (4), значения

$\alpha = 0,23$ и $P_1 = 0,51$. Следовательно, с доверительной вероятностью $R = 0,8$ можно утверждать, что данный ТВП имеет дальность действия не ниже требуемой.

Можно полагать, что полученные результаты будут полезны при стендовой аттестации ТВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Несканирующие тепловизионные приборы. Казань: Изд. Каз. ун-та, 2004.
2. Шукин А.Н. Теория вероятностей и ее применение в инженерно-технических расчетах. М.: Сов. радио, 1974.
3. Holst G. Testing and evaluation of IR imaging systems // SPIE press, 1998.