

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ОБЪЕКТОВ ЧЕРЕЗ АЭРОЗОЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ

© 2012 г. В. А. Овсянников, доктор техн. наук; В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: progipo@tnpko.ru

Предложена уточненная методика расчета вероятности обнаружения и распознавания посредством современных высокочувствительных тепловизионных приборов (ТВП) объектов местности, находящихся за аэрозольными образованиями, учитывающая специфические особенности ТВП, а также прозрачность и излучение этих образований и атмосферы и использующая усовершенствованную модель зрительного анализатора оператора-дешифровщика. Сформулирован соответствующий критерий обнаружения или распознавания таких объектов посредством ТВП.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, эффективность, аэрозольное образование, критерий обнаружения/распознавания.

Коды OCIS: 110.3000.

Поступила в редакцию 18.05.2011.

Введение и постановка задачи

Одним из действенных способов защиты объектов от оптико-электронных систем (ОЭС) наблюдения является использование различных помех, в частности аэрозольных образований (АО), снижающих эффективность даже наиболее помехозащищенных ОЭС – тепловизионных приборов (ТВП), работающих в дальнем ИК диапазоне спектра. При этом традиционный, используемый в инженерной практике критерий возможности вскрытия (обнаружения или распознавания) объектов, наблюдаемых через АО, определяется соотношением

$$\tau_{\Pi} > \tau_{\text{пор}}(L_{\Pi} < L_{\text{пор}}), \quad (1)$$

где τ_{Π} и $\tau_{\text{пор}}$ – соответственно фактический и пороговый (маскирующий) коэффициенты пропускания помехи (АО) в спектральном рабочем диапазоне ТВП $\Delta\lambda$; $L_{\Pi} = -\ln\tau_{\Pi}$ и $L_{\text{пор}} = -\ln\tau_{\text{пор}}$ – соответственно фактическая и пороговая (маскирующая) оптические толщины помехи в том же диапазоне.

Пороговые значения $L_{\text{пор}}$ (или $\tau_{\text{пор}}$) на практике, как правило, определяются исходя лишь из значений теплового контраста объектов, пороговой чувствительности ТВП и прозрачности атмосферы на трассе.

Однако для реализации потенциально высокой температурной чувствительности совре-

менных, в частности несканирующих, ТВП их передаточная функция сигнала – зависимость перепада выходной яркости изображения от входной разности радиационных температур протяженного объекта и фона – должна быть достаточно крутой, что при ограниченном в общем случае диапазоне яркостей индикатора (монитора) ТВП обеспечивается лишь для узкого диапазона регистрируемых разностей температур [1]. Это означает, что полупрозрачные АО ограниченных размеров с температурой, отличной от температуры фона, вообще говоря, играют для наблюдаемого объекта роль “пьедестала”, который может не только понизить локальный контраст изображения объекта, определяемый по отношению к яркости изображения пьедестала, но и привести к полному исчезновению этого контраста, а следовательно, к исключению возможности обнаружения объекта. С другой стороны, с увеличением яркости изображения локального фона объекта – пьедестала – контрастная чувствительность зрительного анализатора оператора-дешифровщика повышается (и наоборот), причем эти два фактора являются конкурирующими.

Отметим, что контраст изображения объектов может снизиться до нуля и в отсутствие АО, если расстояние от ТВП до фона значительно больше, чем до объекта, а для температуры атмосферы T_a и радиационных температур

объекта T_o и фона T_ϕ выполняется одно из соотношений: $T_\phi < T_o < T_a$ или $T_a < T_o < T_\phi$. В этих случаях излучение слоя атмосферы между объектом и фоном может частично или даже полностью скомпенсировать соответственно положительный или отрицательный тепловой контраст $\Delta T_R = T_o - T_\phi$ с фоном такого объекта. Напротив, при выполнении любого из соотношений $T_a < T_\phi < T_o$ или $T_o < T_\phi < T_a$ абсолютное значение теплового контраста объекта, приведенное к входу ТВП, ΔT_R^* может даже повыситься. При этом в обоих случаях соотношение значений ΔT_R^* в спектральных рабочих диапазонах ТВП $\Delta\lambda_1 = 3-5$ мкм и $\Delta\lambda_2 = 8-12$ мкм зависит от расстояния до фона (при фиксированном расстоянии до объекта) [2].

Различное влияние излучения атмосферы в тепловых диапазонах спектра $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ на контраст изображения объекта проявляется и тогда, когда расстояния до объекта и фона одинаковы, но используется ТВП с большим полем зрения, дающий одновременно изображение как близких, так и удаленных объектов. В этом случае оператор, настроив яркость и контраст изображения на наблюдение, например, близлежащих объектов, может не увидеть более далекие объекты из-за снижения контраста их изображений, вызванного возрастанием энергетической яркости столба атмосферы. Как свидетельствуют результаты [2] (например в случае, если контраст изображения оптимизирован для наблюдения близлежащих объектов), в ситуации, когда атмосфера холоднее, чем объекты и фон, снижение контраста изображения объектов с возрастанием дистанции до них еще невелико. Однако с повышением температуры атмосферы контраст изображения удаленных объектов значительно уменьшается. При этом в сухой атмосфере снижение этого контраста происходит в большей степени в диапазоне спектра 3–5 мкм, а во влажной – в диапазоне 8–12 мкм. Отмеченные выше обстоятельства, в частности, обуславливают целесообразность построения ТВП с перестраиваемым спектральным рабочим диапазоном или двухспектрального ТВП.

Таким образом, поскольку доминирующее влияние на эффективность ТВП в зависимости от конкретной ситуации может оказать любой из вышеупомянутых факторов, в общем случае критерий (1) возможности вскрытия объекта при пороговом значении $L_{пор}$ (или $\tau_{пор}$), рассчитанном традиционным методом, не учитываю-

щим изложенных обстоятельств, не является ни необходимым, ни достаточным. В связи с этим в настоящей работе с учетом всех обозначенных выше факторов и усовершенствованной модели зрительного анализатора оператора уточняется методика оценки вероятности вскрытия посредством ТВП объектов, наблюдаемых на приземных горизонтальных трассах через АО, и формулируется более адекватный критерий возможности этого вскрытия. Предлагаемая методика учитывает не только прозрачность АО и атмосферы, но и их излучение.

Обоснование и результаты

Локальный контраст K_o изображения объекта, находящегося за АО, определим как

$$K_o = \frac{L'_{\max} - L'_{\min}}{L'_{\max} + L'_{\min}} = \frac{\Delta L'}{2L'_\Pi + \Delta L'}, \quad (2)$$

где $\Delta L'$ – разность яркостей изображения объекта и его локального фона – пьедестала, L'_Π – яркость изображения пьедестала.

Для расчета значений $\Delta L'$ и L'_Π найдем вначале приведенные разности радиационных температур объекта и его локального фона – пьедестала (АО) ΔT_R^* и пьедестала и общего фона ΔT_Π^* . Согласно экспериментальным измерениям радиационных характеристик АО [3], их энергетическая яркость в тепловых диапазонах спектра в большинстве ситуаций совпадает с таковой для серого тела с температурой, равной температуре АО, и коэффициентом излучения, равным $1 - \tau_\Pi$. Тогда (согласно [4]) энергетические яркости объекта L_o^* , пьедестала L_Π^* и фона L_ϕ^* в спектральном рабочем диапазоне ТВП $\Delta\lambda$, приведенные к его входу, в данном случае можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} L_o^* &= L_o \tau_{ao} \tau_\Pi + L_a (1 - \tau_{ao}) \tau_\Pi \tau_{a\Pi} + \\ &\quad + L_a (1 - \tau_{a\Pi}) + L_\Pi (1 - \tau_\Pi) \tau_{a\Pi}, \\ L_\Pi^* &= L_\phi \tau_{a\phi} \tau_\Pi + L_a (1 - \tau_{a\phi}) \tau_\Pi \tau_{a\Pi} + \\ &\quad + L_a (1 - \tau_{a\Pi}) + L_\Pi (1 - \tau_\Pi) \tau_{a\Pi}, \\ L_\phi^* &= L_\phi \tau_{a\phi} + L_a (1 - \tau_{a\phi}), \end{aligned}$$

где L_o и L_ϕ – энергетические яркости объекта и фона соответственно,

L_Π и L_a – энергетические яркости черного тела с температурой АО T_Π и атмосферы T_a соответственно,

$\tau_{ao}, \tau_{af}, \tau_{ap}, \tau_{apo}, \tau_{apf}, \tau_{п}$ – коэффициенты пропускания атмосферы на трассе от ТВП до объекта, от ТВП до фона, от ТВП до АО, от АО до объекта, от АО до фона и самого АО соответственно в спектральном рабочем диапазоне ТВП.

При этом температура АО спустя 1–3 с после его возникновения практически сравнивается с температурой окружающего воздуха [3].

Тогда, учитывая, что $\tau_{apo} = \tau_{ao}/\tau_{ap}$, $\tau_{apf} = \tau_{af}/\tau_{ap}$, а значения приведенных разностей энергетических яркостей объекта и АО ($\Delta L_R^* = L_o^* - L_{п}^*$) и АО и фона ($\Delta L_{п}^* = L_{п}^* - L_{ф}^*$) приблизительно пропорциональны соответствующим разностям их радиационных температур ΔT_R^* и $\Delta T_{п}^*$, также приведенным к входу ТВП, для близких друг к другу значений радиационных температур объекта T_o и фона $T_{ф}$ и температур АО $T_{п}$ и атмосферы T_a находим

$$\begin{aligned} \Delta T_R^* &= [(T_o - T_a)\tau_{ao} + (T_a - T_{ф})\tau_{af}]\tau_{п}, \\ \Delta T_{п}^* &= [(T_a - T_{ф})\tau_{af} + (T_{п} - T_a)\tau_{ap}](1 - \tau_{п}). \end{aligned} \quad (3)$$

Если дистанции от ТВП до объекта, фона и АО равны, то в (3) $\tau_{ao} = \tau_{af} = \tau_{ap} = \tau_a$ и тогда получаем

$$\begin{aligned} \Delta T_R^* &= \Delta T_R \tau_a \tau_{п}, \\ \Delta T_{п}^* &= (T_{п} - T_{ф})\tau_a (1 - \tau_{п}). \end{aligned}$$

Если, кроме того, АО отсутствуют ($\tau_{п} = 1$), то $\Delta L_{п}^* = \Delta T_{п}^* = 0$ и излучение атмосферы на яркостный контраст изображения объекта не влияет.

В случае, когда объект визируется на фоне пригоризонтного неба, в (3) следует принять $\tau_{af} = 0$ и тогда

$$\begin{aligned} \Delta T_R^* &= (T_o - T_a)\tau_{ao}\tau_{п}, \\ \Delta T_{п}^* &= (T_{п} - T_a)\tau_{ap}(1 - \tau_{п}). \end{aligned}$$

Следовательно, поскольку температурный контраст $T_{п} - T_a$ АО, наблюдаемого на фоне пригоризонтного неба, вскоре после его возникновения становится весьма близким к нулю, то это АО может быть обнаружено ТВП только за счет отраженной составляющей излучения, существенной лишь безоблачным днем в диапазоне спектра 3–5 мкм; ночью, особенно в спектральном диапазоне 8–12 мкм, эта составляющая излучения пренебрежимо мала [3].

При оценке контраста изображения объекта по формуле (2), необходимо учесть, что значения $\Delta L'$ и $L'_{п}$ в общем случае зависят от диапазона регистрируемой разности температур ΔT_m и яркости монитора ТВП $\Delta L'_m$ и, как можно показать, определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \Delta L' &= \gamma \Delta T_{R\Sigma}, \\ L'_{п} &= \max(\min(L'_o + \Delta L'_{п}, L'_2), L'_1), \\ \Delta T_{R\Sigma} &= \max(\min(\Delta T_R^* + \Delta T_{п}^*, \Delta T_m/2), -\Delta T_m/2) - \\ &\quad - \max(\min(\Delta T_{п}^*, \Delta T_m/2), -\Delta T_m/2), \\ \Delta L'_{п} &= \gamma \Delta T_{п}^*, \quad \gamma = \Delta L'_m / \Delta T_m; \quad \Delta L'_m = L'_2 - L'_1, \end{aligned}$$

где $\Delta T_{R\Sigma}$ – эффективный локальный тепловой контраст объекта,

L'_1 и L'_2 – соответственно минимальное и максимальное значения яркости изображения, обеспечиваемые монитором;

L'_o – яркость изображения фона, находящаяся в пределах $L'_1 - L'_2$;

γ – крутизна передаточной функции сигнала (считаем, что в диапазоне ΔT_m она линейна).

Яркость изображения общего фона L'_o выбирается исходя из яркости окружающей среды, а также (для широкопольного ТВП) от дистанции до наблюдаемого объекта и обычно составляет [1]

$$L'_o = \begin{cases} 0,3 - 1 \text{ кд/м}^2 \text{ (ночь)} \\ 3 - 30 \text{ кд/м}^2 \text{ (сумерки)} \\ 100 \text{ кд/м}^2 \text{ (день)} \end{cases}$$

Следовательно, в зависимости от величины и знака теплового контраста объекта ($\Delta T_R = T_o - T_{ф}$) и АО ($\Delta T_{п} = T_{п} - T_{ф}$), а также значений L'_o , L'_1 , L'_2 и ΔT_m локальный контраст K_o изображения объектов может принимать разные значения вплоть до нулевого. Например, при $\Delta T_R^* > 0$ и $\Delta T_{п}^* > 0$ с ростом $\Delta T_{п}^*$, а значит, и яркости $L'_{п}$ изображения пьедестала объекта этот контраст, согласно (2), снижается и в конце концов нивелируется (рис. 1).

При уточненной оценке эффективности современных высокочувствительных ТВП следует принять во внимание, что их температурно-частотная характеристика (ТЧХ) определяется не только шумом ТВП, но и контрастной чувствительностью зрительного анализатора. Последняя описывается функцией передачи контраста (ФПК) $M(v')$ – зависимостью мини-

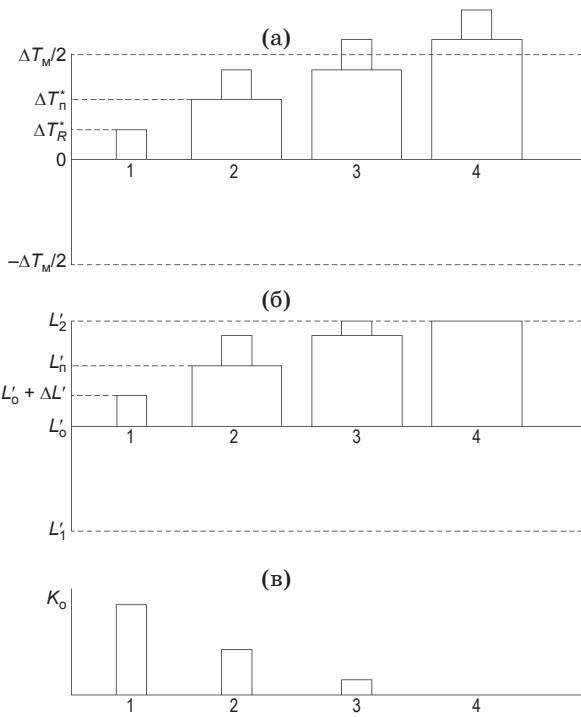


Схема формирования локальных контрастов изображения объекта, находящегося за АО с различным тепловым контрастом (1 – АО отсутствует; 2–4 – АО имеются). а – тепловые контрасты объекта и АО, приведенные ко входу ТВП; б – яркости изображения объекта и АО; в – локальные контрасты изображения объекта.

мального контраста изображения разрешаемой миры от ее угловой частоты. Эта зависимость аппроксимируется формулой [1]

$$M(v') = \frac{a}{bv' \exp(-cv') \sqrt{1 + 0,06 \exp(cv')}} ,$$

где

$$\begin{aligned} a &= 1 + 12 / (w'(1 + v'/3)^2), \\ b &= 540 / (1 + 0,7/L')^{0,2}, \\ c &= 0,3(1 + 100/L')^{0,15}. \end{aligned}$$

Здесь v' – угловая частота в пространстве изображений,

L' – яркость изображения локального фона объекта (здесь – пьедестала $L' = L'_n$),

w' – угловой размер изображения миры, слабо влияющий на ФПК.

Связь частоты v' с соответствующей угловой частотой v в пространстве предметов устанавливается соотношением

$$v = \frac{\Gamma v'}{17,45},$$

где Γ – угловое увеличение ТВП.

В соответствии с подходом, развитым в модели ТВП NVTherm [1], разрешаемая разность температур $\Delta T_{\text{раз}}(v)$ для угловой частоты миры v является квадратичной суммой соответствующих величин $\Delta T_{\text{раз1}}$ и $\Delta T_{\text{раз2}}$, определяемых шумом ТВП и значением ФПК глаза соответственно:

$$\Delta T_{\text{раз}}(v) = \sqrt{\Delta T_{\text{раз1}}^2 + \Delta T_{\text{раз2}}^2}. \quad (4)$$

Для расчета $\Delta T_{\text{раз1}}$ воспользуемся ранее полученной для несканирующих ТВП формулой [5, 6]

$$\Delta T_{\text{раз1}} = \max \left\{ \frac{0,3\Delta T}{r}, \frac{558\Delta T M(v) \sqrt{v\delta_o} \sqrt{1 + \frac{10}{(7\alpha\kappa/2v\delta_o)^{1,2}}}}{r\sqrt{\alpha\kappa} K_{\Sigma}(v)} \right\}, \quad (5)$$

где

$$\kappa = a/\Delta a, \quad r = \sqrt{\frac{1 + \exp(-1/FT_{\text{гл}})}{1 - \exp(-1/FT_{\text{гл}})}},$$

$$K_{\Sigma}(v) = \exp(-2\pi^2\sigma_{\Sigma}^2v^2), \quad \sigma_{\Sigma} = 0,55\delta_{\Sigma},$$

ΔT – разность температур, эквивалентная шуму, для данной температуры фона T ;

r – коэффициент, учитывающий временное накопление визуальных сигналов в смежных кадрах;

F – частота кадров,

$T_{\text{гл}}$ – постоянная времени глаза,

a и Δa – размер и шаг элементов матричного ФПУ,

δ_o – элементарное поле зрения,

δ_{Σ} – эквивалентное элементарное поле зрения ТВП, определяемое с учетом влияния турбулентности атмосферы, мрад;

$K_{\Sigma}(v)$ – результирующая функция передачи модуляции (ФПМ) ТВП,

σ_{Σ} – параметр гауссовой аппроксимации ФПМ,

α – коэффициент, равный $\alpha = 1$ в отсутствие в ТВП микросканирования, $\alpha = 2$ – при его наличии.

Выражение (5), в отличие от известных формул для ТЧХ [1], учитывает реальное, посте-

пенное, исчезновение интегрирующих свойств глаза при увеличении периода мира и времени ее наблюдения.

Для постоянной времени глаза в (5) можно использовать формулу [1]

$$T_{\text{гл}} = 0,019 + 0,062(0,31/L')^{0,17}.$$

При нахождении выражения для $\Delta T_{\text{раз}2}$ учтем, что между этой разностью и соответствующей разрешаемой разностью яркостей изображения $\Delta L'_{\text{раз}}$ существует очевидное соотношение

$$\Delta L'_{\text{раз}} = \Delta T_{\text{раз}2} \gamma K_{\Sigma}(v) = \Delta T_{\text{раз}2} \Delta L'_M K_{\Sigma}(v) / \Delta T_M. \quad (6)$$

С другой стороны, согласно определению ФПК, ее значение в данном случае составляет

$$M(v) = \Delta L'_{\text{раз}} / 2L'_\Pi,$$

что, с учетом (6), дает искомое выражение для $\Delta T_{\text{раз}2}$

$$\Delta T_{\text{раз}2} = \frac{2L'_\Pi \Delta T_M M(v)}{\Delta L'_M K_{\Sigma}(v)}. \quad (7)$$

В частности, при $L'_\Pi = L'_o + \Delta L'_\Pi$ и $L'_o = (L'_2 + L'_1)/2$ (диапазон яркости монитора не ограничивает контраст изображения, а яркость изображения фона равна средней яркости монитора) вместо (7) имеем

$$\Delta T_{\text{раз}2} = \left(\frac{\Delta T_M}{K_M} + 2\Delta T_{\Pi}^* \right) \frac{M(v)}{K_{\Sigma}(v)},$$

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

где K_M – коэффициент сохранения контраста, при $L'_2 \gg L'_1$ близкий к 1.

При этом диапазон регистрируемой разности температур обычно принимается равным [1]

$$\Delta T_M = (6 - 10) \overline{\Delta T_R} \tau_a \tau_\Pi,$$

где $\overline{\Delta T_R}$ – средняя разность радиационных температур объекта и фона, причем бóльшие значения ΔT_M рекомендуется использовать при обнаружении объектов, а меньшие – при их распознавании.

Для пересчета ТЧХ от стандартной тепловой мира к эквивалентной отношению $7\alpha x / 2\nu\delta_o$ в (5) следует заменить на $h\alpha x / D\delta_o$, где $h = \sqrt{S_{об}}$ – критический размер объекта, $S_{об}$ – его площадь, D – дистанция до объекта [5, 6].

* * * * *

Тогда значение разрешения на местности (полупериод разрешаемой эквивалентной мира) A , найденное из уравнения

$$|\Delta T_{R\Sigma}| = \Delta T_{\text{раз}}(D/2A), \quad (8)$$

определяет вероятность вскрытия объекта P согласно формуле [5, 6] как

$$P = 1 - \exp\left[-0,7\left(\frac{h\gamma_o}{2CA}\right)^2\right], \quad (9)$$

где C – критерий Джонсона для решаемой задачи вскрытия объекта,

$\gamma_o = 0,65 - 1,5$ – коэффициент, учитывающий квалификацию оператора (от низкой до высокой соответственно).

Значения критериев Джонсона C , а также методы расчета разности температур (ΔT), эквивалентной шуму, эквивалентного элементарного поля зрения (δ_Σ) и коэффициентов пропускания атмосферы (τ_a) и АО (τ_Π) приведены, например, в [5, 6].

С другой стороны, задавшись вероятностью вскрытия объекта P , можно по формуле

$$A = \frac{h\gamma_o}{2,4C\sqrt{-\ln(1-P)}},$$

вытекающей из (9), рассчитать требуемое разрешение на местности A и найти по формуле (4) для $v = D/2A$ соответствующее значение разрешаемой разности температур $\Delta T_{\text{раз}}(v)$. Тогда, с учетом (8), более обоснованный и точный критерий видимости посредством ТВП объекта, находящегося за АО, записывается в следующем виде:

$$|\Delta T_{R\Sigma}| > \Delta T_{\text{раз}}(v).$$

Таким образом, обычно используемый на практике критерий возможности вскрытия с помощью ТВП объектов, наблюдаемых через АО, учитывающий лишь прозрачность этих образований, не является показательным. При оценке этой возможности необходимо в общем случае учитывать излучение АО и атмосферы, а также диапазон регистрируемой ТВП разности температур и условия дешифрирования изображения.

Полагаем, что представленная методика оценки вероятности вскрытия посредством ТВП объектов, расположенных за АО, учитывающая целый ряд дополнительных существенных факторов, и предложенный соответствующий усовершенствованный критерий видимости этих объектов будут полезны для уточненного прогноза эффективности современных высокочувствительных ТВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Holst G.* Electro-optical imaging system performance. 3 ed. SPIE press. US. 2003. 442 p.
 2. *Hodgkin A., Maurer T., Halford C., Vollmerhausen R.* Impact of path radiance on MWIR and LWIR imaging // Proc. SPIE. 2007. V. 6543. P. 654300-1–654300-12.
 3. *Барсуков Г.А., Могилюк И.А., Садчиков В.В., Серебряков А.В., Смирнова Т.А., Топорков Ю.Г.* Оптика пыледымовых облаков при движении объектов. М.: НТЦ “Информтехника”, 1994. 152 с.
 4. *Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н.* Оптические линии связи малогабаритных управляемых ракет. М.: НТЦ “Информтехника”. 2000. 180 с.
 5. *Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 595 с.
 6. *Иванов В.П., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Особенности расчета дальности действия несканирующих тепловизионных приборов // Оборонная техника. 2010. № 6–7. С. 54–61.
-