

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВИЗОРА НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАЗРЕШЕНИЯ

С.Н. Новиков¹, А.Н. Поликанин^{2*} 

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, 630102, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Новосибирск, Российская Федерация

*Адрес для переписки: polikanin.an@yandex.ru

Информация о статье

УДК 621.391

Статья поступила в редакцию 23.10.2019

Ссылка для цитирования: Новиков С.Н., Поликанин А.Н. Методика расчета дальности действия тепловизора на основе объединенных параметров температурной чувствительности и разрешения // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 6–14. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-6-14

Аннотация: В статье представлена методика расчета дальности обнаружения, распознавания и идентификации тепловизора на основе параметров пороговой температурной чувствительности и температурного разрешения, в том числе при работе по неоднородному полю температур. Предложен анализ методики расчета дальности действия тепловизоров с выбором исходных данных моделей передаточных характеристик звеньев тепловизионной системы, объекта, атмосферы и человеческого глаза, проведены расчетные исследования.

Ключевые слова: дальность действия тепловизионных систем, температурная чувствительность, температурное разрешение.

Введение

В настоящее время тепловизоры получили широкое распространение в системах безопасности в качестве средств наблюдения в ночное время и в условиях ограниченной видимости. Тепловизионное наблюдение имеет ряд преимуществ перед другими средствами ночной съемки, такими как инфракрасные камеры с подсветкой поля зрения или приборы ночного видения. В отличие от перечисленных средств, тепловизоры позволяют вести более скрытную съемку в силу того, что не требуют демаскирующих источников подсветки. Кроме того, объекты, имеющие температуру выше окружающего фона, такие как человек или автомобиль, обнаруживаются и идентифицируются на значительно большем расстоянии.

Один из главных параметров тепловизора – это дальность действия, включающая в себя также понятия дальности обнаружения, распознавания и идентификации. Обычная методика определения этих параметров, применяемая в видеонаблюдении, не может быть использована в тепловидении в связи с некоторыми проблемами и особенностями тепловизионных приборов. Так, в том, что касается

распознавания и идентификации, элемент неопределенности расчетов вносит такая особенность, как распределение яркости изображения объекта не в зависимости от рельефа его поверхности, а в зависимости от температуры (спектральной яркости) каждой точки поверхности. Поэтому традиционно для энергетического расчета тепловизоров используется широко распространенная методика, основанная на трудах М.М. Мирошникова [1] и Д. Ллойда [2], в которых обобщены теоретические основы и методы расчета функционального параметра тепловизионных систем, представляющего собой разность температур $\Delta T_{\text{пор}}$. Этот параметр называется еще пороговая температурная чувствительность. Он функционально связан со всеми элементами тепловизора, такими как объектив, приемник излучения, свойствами объекта наблюдения, атмосферы, электронных элементов и экрана. Физический смысл параметра $\Delta T_{\text{пор}}$ заключается в определении минимальной разности температур элементов наблюдаемого объекта. Она определяет способность различать слабые сигналы на фоне шумов. И при этом не находится в прямой связи с дальностью действия.

Сам Д. Ллойд дает точное определение характеристики: «величина $\Delta T_{\text{пор}}$ представляет разность температур объекта и фона, излучающих как черные тела в стандартном тест-объекте, при которой отношение пикового значения сигнала к среднеквадратичной величине шума на выходе стандартного эталонного электронного фильтра системы, рассматривающей тест-объект, равно единице» [2].

Эта методика имеет ряд недостатков, включая то, что между точкой наблюдения, для которой измеряется $\Delta T_{\text{пор}}$ и конечным изображением имеется целый ряд пространственных фильтров, как источников шумов, например, инерционность приемника, электронный тракт как RC-фильтр, экран с изображением объекта и даже глаз оператора как пространственно-частотный оптический фильтр. Кроме того, не рассматривается влияние пространственно-частотных характеристик самого объекта. То есть, если два объекта, имеющие одинаковую минимальную разность температур $\Delta T_{\text{пор}}$ относительно фона, будут иметь разные размеры относительно поля зрения, то дальность действия системы для этих объектов должна существенно отличаться.

В развитие методики энергетического расчета в работах [3, 4] описана методика расчета температурного разрешения $\Delta T_{\text{раз}}$, которая имеет физический смысл зависимости разрешения наблюдаемых элементов объекта не только как элементов разных по температуре, но и разных по размеру, приближая его к физическому смыслу разрешения в представлении пространственно-частотных характеристик наблюдаемых тел. Также $\Delta T_{\text{раз}}$ позволяет учитывать все промежуточные звенья тепловизионной системы, как пространственно-частотных фильтров.

Как показывает анализ литературы по методам энергетического расчета параметров тепловизоров, главное внимание инженеров-разработчиков тепловизионных систем направлено на минимизацию самих значений $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$, что позволяет оптимизировать все, входящие в исходные расчеты параметры тепловизора, увеличивая их эффективность. В тоже время оценка дальности действия не получает достаточного внимания.

Поэтому актуальной является задача разработки методики расчета дальности действия тепловизоров, включая дальность распознавания и идентификации на основе взаимосвязи параметров $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$, а также $\Delta T_{\text{пор}}^{(н)}$ при работе по неоднородному полю температур. Кроме того, следует определить зависимости дальности действия при распознавании и идентификации объектов от ряда параметров тепловизионной системы – оптической части, характеристик приемника излучения, характеристик электронного тракта передачи сигнала, экрана, объекта наблюдения, фона и глаза

оператора. В результате будет получена обобщенная методика определения дальности, которую можно применять с целью быстрого и достаточно точного расчета дальности действия тепловизоров, используемых в системах безопасности при работе по живым объектам и крупным теплоизлучающим целям.

Обоснование методики расчета

Вывод рабочих соотношений методики расчета дальности действия тепловизоров основывается на выражениях (1–9), для $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ [1–3], где:

D^* и $S(\lambda)$ – удельная обнаружительная способность и относительная спектральная чувствительность приемника излучения;

(a, b) , Δf_R – линейные размеры и шумовая полоса частот электрической схемы включения приемника;

(λ_1, λ_2) – границы спектральной чувствительности приемника;

k_3 – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника;

m – отношение «сигнал/шум»;

A_0 и (α, β) – площадь входного зрачка и линейные углы мгновенного поля зрения объектива тепловизора по строке и по кадру;

$W(\lambda, T)$ – спектральная светимость абсолютно-черного тела (АЧТ) с температурой T ;

$T(x, y)$ и $T_\phi(x, y)$ – функции распределения температуры по поверхности объекта и фона в случае наблюдения прибором неоднородных тепловых полей объектно-фоновой обстановки;

$\bar{T}$ и $\bar{T}_\phi$ – среднее значение температуры поверхности объекта и фона;

$\varepsilon(\lambda)$ и $\varepsilon_\phi(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения поверхности объекта и фона;

$\tau_o(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы тепловизора и слоя атмосферы между объектом и прибором;

C_2 – постоянная в формуле Планка;

$\Delta W(\lambda, T(x, y), \bar{T})$ и $\Delta W_\phi(\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi)$ – абсолютные контрасты спектральной светимости АЧТ [6], имеющие температуры аналогичные температурам поверхности объекта и фона, соответственно;

T_e и f_k – постоянная времени глаза и частота кадров тепловизора;

ν – пространственная частота в пространстве предметов, рад⁻¹;

$K(\Phi_\phi)$ – коэффициент, учитывающий увеличение порогового сигнала приемника за счет засветки постоянной составляющей фона;

$r_{\Sigma}(\nu)$ – результирующий модуль передаточной функции всех звеньев тепловизора;

α_0, β_0 – линейные углы, которые стягивают по строке и кадру объект, находящийся на расстоянии l от прибора, при $\alpha_\phi = \alpha - \alpha_0$ и $\beta_\phi = \beta - \beta_0$;

(x_0, y_0) , (x_ϕ, y_ϕ) – декартовы координаты поверхности объекта и фона в пространстве предметов.

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f_R} K_3 T^2}{\alpha \beta A_0 C_2 D^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) W_\lambda \tau_0(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}, \quad (1)$$

$$\Delta T_{\text{раз}} = \frac{3 \Delta T_{\text{пор}} \nu \sqrt{\alpha \beta}}{r_\Sigma(\nu) \sqrt{\tau \Delta f_R T_e f_k}}, \quad (2)$$

для неоднородного поля температур [5]:

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(H)} = \frac{\pi k_3 m \sqrt{ab \Delta f_R} \cdot [1 + K^2 (\bar{\Phi}_\Phi) + K_\Phi^2 I_\Phi^2]^{1/2}}{D^* A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) [\varepsilon(\lambda) A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) + \varepsilon_\Phi(\lambda) A_\Phi(\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi)] d\lambda}, \quad (3)$$

где

$$I_\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \varepsilon_\Phi(\lambda) B_\Phi(\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi) d\lambda, \quad (4)$$

$$K_\Phi = \frac{D^* A_0}{\pi l^2 k_3 \sqrt{ab \Delta f_R}}, \quad (5)$$

$$B(\lambda, T(x, y), \bar{T}) = \iint_{(x_0, y_0)} \Delta W(\lambda, T(x, y), \bar{T}) dx dy, \quad (6)$$

$$B_\Phi(\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi) = \iint_{(x_\Phi, y_\Phi)} \Delta W(\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi) dx dy, \quad (7)$$

$$A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) = \alpha_0 \beta_0 \frac{dW(\lambda, \bar{T})}{dT} + \frac{dB(\lambda, T(x, y), \bar{T})}{l^2 dT}, \quad (8)$$

$$A_\Phi(\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi) = \alpha_\Phi \beta \frac{dW(\lambda, \bar{T}_\Phi)}{dT} + \frac{dB_\Phi(\lambda, T_\Phi(x, y), \bar{T}_\Phi)}{l^2 dT}, \quad (9)$$

Рассмотрим вывод выражения для дальности действия тепловизоров при наблюдении изотермических объектов с температурой поверхности T . Для этого необходимо подставить формулу (1) в (2) и принять во внимание следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta f_R &= 1/(2\tau); \quad \alpha = a/f'; \\ \beta &= b/f'; \quad \nu = N/(2h/l), \end{aligned} \quad (10)$$

где N – критерий Джонсона; h – критический размер объекта; f' – заднее фокусное расстояние объектива тепловизора; l – расстояние между объектом и прибором; τ – время формирования видеосигнала одного элемента разложения кадра.

Тогда, после несложных преобразований, выражение для дальности действия тепловизора получается в виде:

$$l = \frac{hr_\Sigma(\nu) \Delta T_{\text{раз}} (T_e \cdot f_k)^{1/2} C_2 D^* (d/f')^2 f' \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \times \varepsilon(\lambda) W(\lambda, T) \lambda^{-1}] d\lambda}{6\sqrt{2} k_3 T^2 \sqrt{\Delta f_R} N \cdot m}, \quad (11)$$

где d – диаметр входного зрачка оптической системы тепловизора.

В работе [7] отмечается, что процессы обнаружения, распознавания, классификации и идентификации объектов являются вероятностными. Поэтому, обычно результат решения той или иной задачи наблюдения представляют в виде зависимости вероятности их выполнения от пространственной частоты. При этом, в качестве этой частоты берут число полупериодов N' пространственной структуры (миры), приходящихся на критический размер объекта. Существует множество математических моделей для зависимости вероятности $P = f(N')$. Как отмечается в работе [8], наиболее достоверной из

них, получившей в настоящее время широкое распространение во многих странах мира, является модель Центра ночного видения и электронных датчиков (США), согласно которой эта зависимость определяется эмпирическими формулами:

$$P = [1 + 1/(N'/2N)^e]^{-1}, \quad (12)$$

$$e = 2,7 + 0,7 (N'/2N), \quad N' = h/K_\Sigma, \quad (13)$$

$$K_\Sigma = \gamma K, \quad K = L/2\Phi, \quad (14)$$

где K – разрешение прибора на местности, м; γ – коэффициент, учитывающий увеличение значения K из-за влияния выборки на дешифрируемость изображения; Ψ – угловая частота эквивалентной миры, рад⁻¹; N – критерий Джонсона – показатель уровня решаемой задачи наблюдения объекта (число периодов разрешаемой эквивалентной миры, укладываемых в критический размер объекта, необходимое для решения задачи наблюдения с вероятностью 0,5).

Не вдаваясь в анализ оценок интерпретации изображений, тщательно проведенный в США [8], отметим, что, согласно модели тепловизионных приборов *NVTherm* [9], применительно к типовым объектам техники в таблице 1 указаны следующие значения критерия Джонсона (N) для основных задач наблюдения, которые решаются этим классом приборов с вероятностью 0,5.

ТАБЛИЦА 1. Значения критерия Джонсона (N) в зависимости от условий наблюдения объектов

Решаемая задача	N	Условия наблюдения
Выделение	0,75	Фон со слабой неоднородностью (снежное поле, любой фон в дождь)
	3	Фон с сильной неоднородностью (город, горы)
Классификация	1-2	Сцена, содержащая сильно различающиеся классы объектов (человек, автомобиль)
	4-5	Сцена, содержащая близкие классы объектов (легковой или грузовой автомобиль, автобус и др.)
Идентификация	6	Сцена, содержащая сильно различающиеся типы объектов (автомобиль седан, автомобиль хэтчбек)
	9	Сцена, содержащая похожие типы объектов (различные марки автомобилей)

Применительно к типовым задачам наблюдения человека рекомендованы следующие значения критерия Джонсона, как количество точек изобра-

жения по наименьшему размеру пропорции объекта [7]: обнаружение $N = 1 - 2$, распознавание $N = 4 - 6$, идентификация $N = 8 - 2$.

Перечень решаемых задач наблюдения содержит режимы обнаружения, распознавания и идентификации объекта. Получаемое при этом изображение человека представлено на рисунке 1.



Рис. 1. Критерий Джонсона при обнаружении человека

Дальность обнаружения объектов при работе тепловизионных систем по неоднородному полю теплового излучения

В случае решения задачи обнаружения объектов тепловизионными системами на неоднородном объектно-фоновом поле теплового излучения, когда мгновенным полем зрения прибора охватываются поверхности объекта с полем температур $T(x, y)$ и фона с полем температур $T_f(x, y)$, схема формирования рабочих формул методики расчета дальности обнаружения $I_0^{(H)}$ следующая [5]:

1) в формулу (2) подставляют выражение (3) для $\Delta T^{(H)}_{пор}$;

2) при использовании в полученной формуле соотношений (10), значение критерия Джонсона в режиме обнаружения необходимо брать согласно таблице для решаемой задачи «выделение» при наблюдении объектов на фоне с сильной неоднородностью;

3) после определенных преобразований, выражение для дальности обнаружения объекта на неоднородном поле теплового излучения фона получается в виде:

$$I_0^{(H)} = \frac{[\Delta T_{раз} f' r_{\Sigma}(v) (T_{efk})^{1/2} \times (d/f')^2 h D^*] \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) [\varepsilon(\lambda) A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) + \varepsilon_f(\lambda) A_f(\lambda, T_f(x, y), \bar{T}_f)] d\lambda}{6\sqrt{2}\alpha\beta\sqrt{\Delta f_R N} \cdot m k_{\gamma} [1 + K^2(\bar{\Phi}_f) + K_{\Phi}^2 I_{\Phi}^2]^{1/2}}. \quad (15)$$

Определение данных расчета звеньев тепловизора и характеристик среды

Имеет смысл рассмотреть тепловизор как сумму отдельных элементов, пропускающих оптический и электронный сигнал. Последовательно это такие элементы как объектив, приемник тепловизионного излучения, электронный тракт, экран и глаза наблюдателя. Тогда суммарный модуль $r_{\Sigma}(v)$ передаточной характеристики тепловизора представляется в виде:

$$r_{\Sigma}(v) = r_o(v) r_{пр}(v) r_{ин}(v) r_{син}(v) \times r_v(v) r_{ус}(v) r_{вкy}(v) r_{гл}(v) r_{см}(v), \quad (16)$$

где функции передачи модуляции (ФПМ) $r_o(v)$ – оптической системы тепловизора; $r_{пр}(v)$ – приемной площадки приемника; $r_{ин}(v)$ – инерционности элементов приемника; $r_{син}(v)$ – синхронизации элементов изображения тепловизора; $r_v(v)$ – выборки по строке и кадру; $r_{ус}(v)$ – усилителя сигналов приемника; $r_{вкy}(v)$ – экрана; $r_{гл}(v)$ – глаза оператора; $r_{см}(v)$ – смаза изображения по строке и кадру.

Описание и анализ передаточных характеристик элементов тепловизора был представлен в работах [10, 11]. Входящие в формулу (16) ФПМ звеньев аппроксимируются следующими соотношениями:

$$r_o(\nu) = 0,64e^{-1,33\left(\frac{d_a\nu}{f'}\right)^2} \arccos\left(\frac{\lambda_0\nu}{d}\right) - \frac{\lambda_0\nu}{d} - \left[1 - \left(\frac{\lambda_0\nu}{d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

$$r_{\text{прс}}(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi\delta_c\nu)}{\pi\delta_c\nu} \right|; \quad (18)$$

$$r_{\text{прк}}(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi\delta_k\nu)}{\pi\delta_k\nu} \right|,$$

где d_a – поперечный размер пятна рассеяния объекта; λ_0 – рабочая длина волны; $\delta_c = (a/f') \cdot 1000$, $\delta_k = (b/f') \cdot 1000$ – соответственно, угловой размер элементарного поля зрения по строке и кадру (мрад); $\alpha_{\text{ус}} = 1,25$; $r_{\text{ин}}(\nu) = r_{\text{син}}(\nu) = 1$ – для тепловизоров с матричными приемниками;

$$r_{\text{yc}}(\nu) = \left(1 + \frac{2\nu\delta_c}{\alpha_{\text{ус}}}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (19)$$

Значения ФПМ для звеньев по строке:

$$r_{\text{вс}}(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi\nu\delta_c/\alpha_c\chi_c)}{(\pi\nu\delta_c/\alpha_c\chi_c)} \right|, \quad (20)$$

$$r_{\text{вк}}(\nu) = e^{-(1,33\nu^2\delta_c^2/z^2\alpha_c^2\chi_c^2)}, \quad (21)$$

$$r_{\text{гк}}(\nu) = e^{-(1,23\nu^2\delta_c^2/\delta_m^2z^2\alpha_c^2\chi_c^2)}, \quad (22)$$

$$r_{\text{смс}}(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi\nu\delta_c/\alpha_c\chi_c)}{(\pi\nu\delta_c/\alpha_c\chi_c)} \right|. \quad (23)$$

Значения ФПМ по кадру:

$$r_{\text{вк}}(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi\nu\delta_k/\alpha_k\chi_k)}{(\pi\nu\delta_k/\alpha_k\chi_k)} \right|, \quad (24)$$

$$r_{\text{вк}}(\nu) = e^{-(1,33\nu^2\delta_k^2/z^2\alpha_k^2\chi_k^2)}, \quad (25)$$

$$r_{\text{гк}}(\nu) = e^{-(1,23\nu^2\delta_k^2/\delta_m^2z^2\alpha_k^2\chi_k^2)}, \quad (26)$$

$$r_{\text{смк}}(\nu) = \left| \frac{\sin(\pi\nu\delta_k/\alpha_k\chi_k)}{(\pi\nu\delta_k/\alpha_k\chi_k)} \right|, \quad (27)$$

где $\alpha_c = n_c/R_c$, $\alpha_k = n_k/R_k$ – коэффициенты переналаживания (число отсчетов на элемент) по строке и кадру; $\chi_c = \alpha_c/\Delta\alpha_c$, $\chi_k = \alpha_k/\Delta\alpha_k$ – коэффициенты заполнения элементов приемника по строке и кадру; $\Delta\alpha_c$, $\Delta\alpha_k$ – шаг элементов приемника оптического излучения по строке и кадру; $z = H_3/(bN_c)$ – электронное увеличение тепловизора, если H_3 – высота экрана монитора ВКУ и b , N_c – число элементов и размер матричного приемника по высоте кадра; $\delta_m = (d_m/D') \cdot 1000$ – угловой размер элемента изображения на экране монитора, мрад, если d_m – диаметр светового пятна на экране монитора и D' – расстояние от глаза оператора до экрана монитора.

Пространственная частота ν имеет смысл как величина, обратная размеру объекта, и в формулах (16–27) связана с дальностью l :

$$\nu = \frac{lN}{2h \cdot 1000}, \text{ мрад}^{-1}. \quad (28)$$

Введение в расчеты понятия пространственной частоты позволяет нам перейти от чисто энергетических представлений о дальности действия прибора к пониманию влияния размеров элементов объекта и фона на значение сигналов, проходящих через все узлы тепловизионной системы и человеческого глаза.

Проанализируем влияние атмосферного слоя между объектом наблюдения и тепловизором на дальность действия прибора, учитывая оценку метеорологической дальности видимости S_m . Также необходимо учесть абсолютную ω , относительную $f_{\text{отн}}$ влажность воздуха, температуру t_b . Таким образом, используемый в формуле (15) интегральный коэффициент пропускания атмосферы может быть определен по методике, описанной в [10]:

$$\tau_a = \exp[-(L_p + L_n)], \quad (29)$$

где

$$L_p = \sigma_p l; L_n = \sigma_n l, \quad (30)$$

$$\sigma_p = (1,66 - 0,35 \ln S_m)/S_m, \quad (31)$$

$$\sigma_n = 0,05 + 0,015\omega, \quad (32)$$

$$\omega = \frac{2,168 \cdot 10^{-2} f_{\text{отн}} l_0}{273 + t_b}, \quad (33)$$

$$l_0 = \exp[-(3,11 \cdot 10^{-4} t_b^2) + 0,0738 t_b + 6,41]. \quad (34)$$

Выражения (31 и 32) соответствуют значениям σ_p и σ_n для области спектра $\Delta\lambda = 8 - 12$ мкм.

Введение параметров и алгоритм расчета

Для проверки методики расчета были взяты параметры и характеристики тепловизора IRIS-AWS (Франция), работающего в области спектра $\Delta\lambda = 8 - 12$ мкм. В качестве приемника излучения в тепловизоре используется матрица кадмий-ртуть-теллур с числом чувствительных элементов 320×240 , размер элемента 30×30 мкм (аналог MARS LV фирмы Sofradir) [11].

В работе [11] можно найти результаты экспериментов, которые проводились для определения дальности его действия. По этой причине был выбран данный тепловизор, поскольку существует возможность сравнить результаты эксперимента и расчеты по методике.

Используя эти параметры и характеристики можно ввести в расчетные формулы следующие числа: $h = 2,7$ м (грузовой автомобиль); $d = 160$ мм; $f' = 280$ мм; $D^* = 1,2 \cdot 10^{11}$ см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт; $\Delta T_{\text{раз}} = 0,02$ °K; $T = 293$ °K (лето); $T = 263$ °K (зима); $\lambda_0 = 10$ мкм; $\lambda_1 = 8$ мкм; $\lambda_2 = 12$ мкм; $a = b = 30$ мкм; $f_k = 25$ Гц; $\tau_0 = 0,9$;

$T_e = 0,2$ с; $N = 2$ (обнаружение объекта на фоне с сильной неоднородностью [10]); $f_{отн} = (50-70) \%$; $t_b = 20$ °C (лето); $t_b = -10$ °C (зима); $S_m = (0,25-20)$ км.

Значения многочисленных параметров, входящих в правые части соотношений (17-34) получались на основе указанных технических параметров тепловизора и исходных данных объектно-атмосферной обстановки по методике, приведенной в работе [10].

Блок-схема алгоритма расчетов для получения итоговых значений дальности действия, в том числе дальности действия в условиях неоднородного поля температур приведена на рисунке 2.

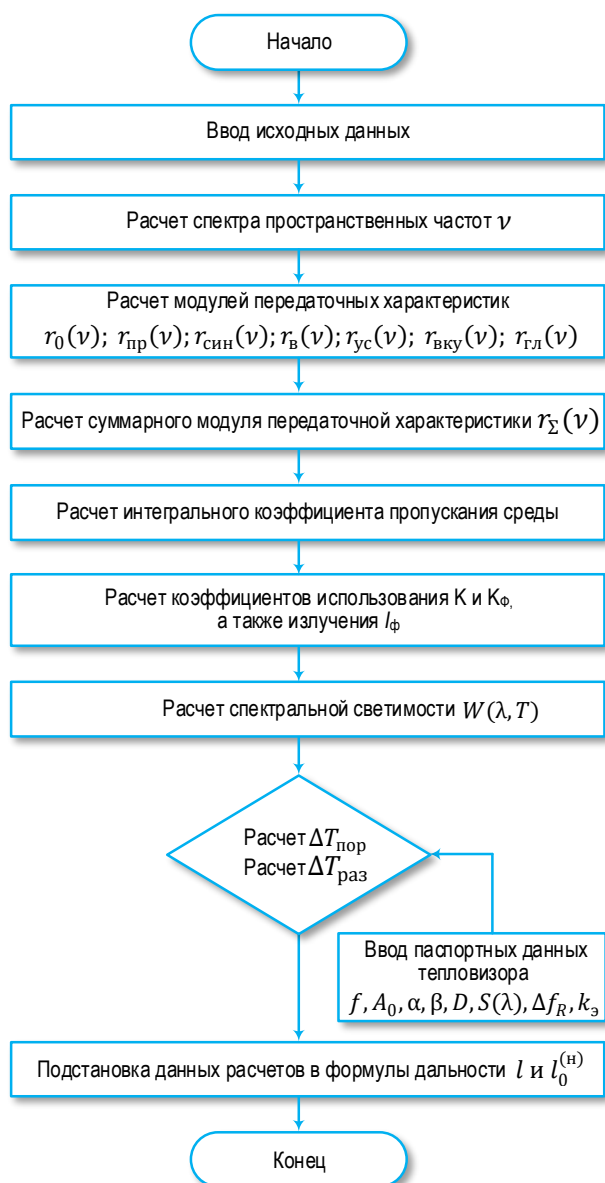


Рис. 2. Схема алгоритма расчетов

При вводе исходных данных значение удельной обнаружительной способности необходимо взять из паспортных данных приемника излучения тепловизора. В случае отсутствия в нем такого пара-

метра можно воспользоваться значением порогового потока, приведенного к площади приемника излучения и полосы пропускания по следующей формуле:

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f_R}}{\Phi_n}, \quad (35)$$

где Φ_n – пороговый поток приемника излучения тепловизора.

Пороговый поток приемника в ряде случаев может быть указан в паспортных данных уже приведенным к полосе пропускания или к полосе пропускания и площади приемника излучения, в этом случае они будут связаны следующими соотношениями:

$$\Phi'_n = \frac{\Phi_n}{\sqrt{\Delta f_R}}, \quad (36)$$

$$\Phi''_n = \frac{\Phi_n}{\sqrt{A \cdot \Delta f_R}}, \quad (37)$$

где Φ'_n – пороговый поток приемника излучения, приведенный к полосе пропускания; Φ''_n – пороговый поток, приведенный к полосе пропускания и площади приемника; A – площадь поверхности приемника оптического излучения.

Полоса пропускания приемника излучения всегда может быть рассчитана, исходя из данных о постоянной времени приемника или времени накопления заряда:

$$\Delta f_R = \frac{1}{2 \cdot \tau_d}, \quad (38)$$

где τ_d – постоянная времени приемника излучения, сек.

Также в паспортных данных может отсутствовать такой параметр, как относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)$, заменяемая числовыми значениями абсолютной спектральной чувствительности S_λ и общим интегральным значением S . В этом случае можно воспользоваться формулой связи этих значений:

$$S(\lambda) = \frac{S_\lambda \cdot k_3}{S}, \quad (39)$$

Значение k_3 – коэффициента использования приемником излучения эталонного источника – в случае его отсутствия можно вычислить эмпирическим методом, фиксируя спектральный поток от объекта в отношении к общему интегральному потоку:

$$k_3 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \cdot \Phi_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda}, \quad (40)$$

где λ_1 и λ_2 – границы спектрального диапазона исследования, мкм; Φ_λ – измеряемый поток излучения.

При проведении расчетов по формулам (22) и (26) нужно понимать, что расчет модуля передаточной функции глаза человека относится к слабо формализуемой области исследований в силу возможных различий характеристик глазного аппарата разных операторов. А также наличие некоторых особенностей физиологического восприятия информации, например параметры α_c , α_k , $\Delta\alpha$ и другие, используемые в расчете передаточной характеристики $r_{gl}(v)$ имеют отношение к параметрам именно приемных элементов глаза, то есть рецептивных клеток сетчатки.

Однако, как известно, человек воспринимает объекты наблюдения не только отдельными клеточными элементами, но и обширными рецептивными полями, имеющими наложения друг на друга, фазы торможения и активности в зависимости от направления движения объекта, яркости и т. д.

В работе Мирошникова М.М. [1] приведен график частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) глаза человека, который может быть использован в качестве основы для оценки влияния передаточной характеристики глаза на конечный результат расчетов. Интересно, что в этом графике можно увидеть результат влияния слепого пятна на сетчатке в виде провала ЧКХ в области низких частот в самом начале графика. Этот момент также нужно учитывать при расчете модуля передаточной характеристики глаза.

В случае решения задачи обнаружения объектов тепловизионными системами на неоднородном объектно-фоновом поле теплового излучения, когда мгновенным полем зрения прибора охватываются поверхности объекта с полем температур $T(x, y)$ и фона с полем температур $T_f(x, y)$, то схема формирования рабочих формул методики расчета дальности обнаружения $l_0^{(H)}$ следующая:

- в формулу (2) подставляют выражение (3) для $\Delta T^{(H)}_{пор}$;

- при использовании в полученной формуле соотношений (10), значение числа Джонсона N в режиме обнаружения необходимо брать согласно рекомендованным выше, а именно: обнаружение $N = 1 - 2$, распознавание $N = 4 - 6$, идентификация $N = 8 - 2$.

- после определенных преобразований, выражение для дальности обнаружения объекта на неоднородном поле теплового излучения фона рассчитывается по формуле (15).

Проведение анализа расчета по методике определения дальности и сравнение с данными экспериментов

Алгоритм расчета дальности действия тепловизора при обнаружении, распознавании и идентификации разработан на основе описанной методики расчета с использованием (15 и 16) и при учете

передаточных функций его элементов в соотношениях (17–28) и расчета пропускания воздушного слоя атмосферы между тепловизором и объектом (формулы (29–34)).

На основе алгоритма с использованием программной среды MATLAB был проведен расчет и математическое моделирование дальности действия тепловизионных систем для областей спектра $\Delta\lambda = 8 - 12$ мкм.

При сравнении расчетов с экспериментальными данными необходимо учесть, что при любых тепловых контрастах, температурах объекта и фона, влажностях воздуха для тепловизора IRIS-AWS на длине волны 8–12 мкм дальность обнаружения в дымке в 5 раз больше чем метеорологическая дальность видимости при $S_m \geq 1$ км [11, 12].

В результате в работе получено следующее.

Во-первых, данные расчетов о зависимости дальности обнаружения объекта, выбранного в виде грузового автомобиля от метеорологической дальности видимости S_m для дальностей 0,5–20 км.

Во-вторых, расчеты для наблюдения выбранного объекта в летних условиях при температуре 20 °С и зимних при температуре –10 °С и влажности от 50 до 100 %.

В-третьих, проведено сравнение расчетов и результатов экспериментов, представленных в [11, 12].

На рисунке 3 представлены результаты математического моделирования расчетов зависимости дальности обнаружения объекта от значения метеорологической дальности видимости при температурах 263 °К и 293 °К.

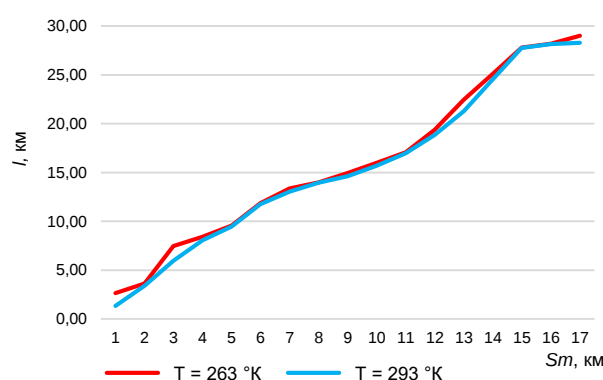


Рис. 3. Результаты расчета зависимости дальности обнаружения объекта от метеорологической дальности видимости

На рисунке 4 представлены результаты математического моделирования отношения дальности обнаружения l тепловизора к метеорологической дальности видимости S_m в зависимости от S_m . Синяя кривая показывает наблюдение объекта в зимних условиях при температуре 263 °К и относительной влажности 75 %; оранжевая – наблюдение объекта в летних условиях при температуре 293 °К и относительной влажности 75 %; серая – наблюдение

объекта в летних условиях при температуре 293 °К и относительной влажности 100 %.

Результаты расчетов также были представлены в работе [13].

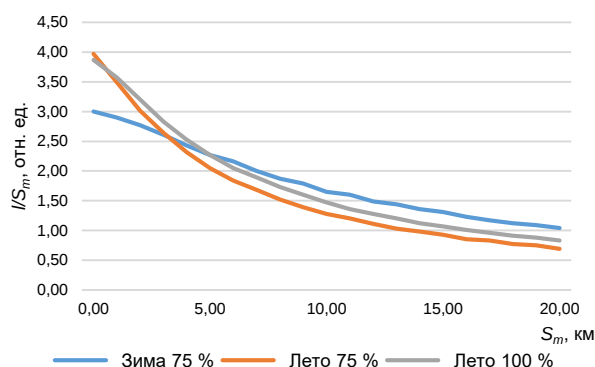


Рис. 4. Результаты расчета отношения дальности обнаружения / тепловизора IRIS-AWS к метеорологической дальности видимости S_m в зависимости от S_m

Заключение

Во-первых, на основании методики расчета по-роговой температурной чувствительности и температурно-частотной характеристики М.М. Мирошников и Д. Ллойда приведена методика дальности обнаружения, распознавания и идентификации для тепловизионных систем, позволяющая рас-

считывать эти параметры во взаимосвязи с конструктивными характеристиками оптической системы, приемника излучения, характеристиками электронного тракта, оптическими параметрами экрана и глаза человека, а также характеристиками объекта наблюдения, слоя атмосферы и фоновой обстановки.

Во-вторых, новая методика позволяет осуществлять расчет тепловизионной дальности обнаружения при неоднородных полях температур и наличии объекта на неоднородном поле теплового излучения фона.

Проведен анализ методики расчета дальности действия тепловизоров. Осуществлен выбор исходных данных и модели передаточных характеристик их звеньев. Проведены расчетные исследования, в ходе которых показано, что зависимость отношения дальности к метеорологической видимости от S_m в пределах дальностей 0,5–20 км с ростом S_m падает. Это объясняется тем, что показатель аэрозольного рассеяния уменьшается с ростом длины волны, поэтому при наличии атмосферной дымки и значений S_m от 0,5 до 6 км показатель рассеяния становится больше. При этом пропускание атмосферы в инфракрасной области выше, чем в видимой, поэтому расчетная дальность действия в замутненной атмосфере может быть больше метеорологической дальности видимости в несколько раз.

Список используемых источников

1. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения. Пер. с англ. М.В. Васильченко. М.: Мир, 1978. 414 с.
3. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Тымкул О.В. Аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 10. С. 73–76.
4. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Фесько Ю.А., Поликанин А.Н. Энергетический расчет тепловизионных систем. Часть 1. Методика расчета дальности действия // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5. № 1. С. 67–72.
5. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Фесько Ю.А., Поликанин А.Н. Дальность действия тепловизионных систем. Часть 1. Методика расчета // Автометрия. 2014. Т. 50. № 4. С. 96–101.
6. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. У. Волф, Г. Цисис. В 4-х т. Т. 1. Физика ИК-излучения. М.: Мир, 1995. 606 с.
7. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
8. Holst G.C. Electro-Optical Imaging System Performance. Bellingham: SPIE Press, 2003.
9. Maurer T., Driggers R.G., Vollmerhausen R., Fridman M. 2002 NVTherm improvement // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2002. Vol. 4719. DOI:10.1117/12.477448
10. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 594 с.
11. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, всесуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. М.: Машиностроение, 2011. 216 с.
12. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н., Черноусов А.А., Громов А.Н., Романов А.Р., Воробьев В.В. и др. Экспериментальные исследования дальности действия и всепогодности телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 61–65.
13. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Лаптев Е.В., Исаев М.П., Крапивко Е.А., Фесько Ю.А. и др. Дальность действия тепловизионных систем. Ч. II. Алгоритм, исходные данные и результаты расчетов // Автометрия. 2015. Т. 51. № 2. С. 49–53.

* * *

CALCULATION METHOD OF THE THERMAL-IMAGING EQUIPMENT OPERATION RANGE BASED ON THE UNITED PARAMETERS: THE TEMPERATURE SENSITIVITY AND RESOLUTION

S. Novikov¹, A. Polikanin² 

¹Siberian State University of Telecommunications & Informatics,
Novosibirsk, 630102, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, 630108, Russian Federation

Article info

The article was received 23rd October 2019

For citation: Novikov S., Polikanin A. Calculation Method of the Thermal-Imaging Equipment Peration Range Based on the United Parameters: the Temperature Sensitivity and Resolution. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):6–14. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-6-14>

Abstract: *The article presents calculating methodology for the detection range, recognition and identification of a thermal-imaging equipment based on threshold temperature sensitivity and temperature resolution, including the cases when working on an inhomogeneous temperature field. The calculating methodology analysis of the action range for thermal-imaging equipment is presented with the initial data choice of the transfer characteristics links models of the thermal imaging system, object, atmosphere and human eye, computational studies are carried out.*

Keywords: *range of thermal imaging systems, temperature sensitivity, temperature resolution.*

References

1. Miroshnikov M.M. *Teoreticheskie osnovy optiko-elektronnykh priborov* [Theoretical Foundations of Optoelectronic Devices]. Leningrad: Mashinostroenie Publ.; 1983. 696 p. (in Russ.)
2. Lloyd J.M. *Thermal Imaging Systems*. Heidelberg: Springer; 1975. 456 p. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1182-7>
3. Tymkul V.M., Tymkul L.V., Tymkul O.V. Analiticheskaya model temperaturno-chastotnoi kharakteristiki teplovizorov [An analytical Model of the Temperature-Frequency Characteristic of Thermal Imagers]. *Optical Journal*. 2002;69(10):73–76. (in Russ.)
4. Tymkul V.M., Tymkul L.V., Fesko Y.A., Polikanin A.N. Energy calculations in systems. Part 1. Calculation of the range. *Inter-expo GEO-Siberia*. 2013;5(1):67–72. (in Russ.)
5. Tymkul V.M., Tymkul L.V., Fesko Y.A., Polikanin A.N. Range of operation of thermal imaging systems. Part I. Calculation technique. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2014;50(4):96–101.
6. *Spravochnik po infrakrasnoi tekhnike* [Handbook of Infrared Technology] / Ed. W. Wolf, G. Csis. Vol.1. Physics of IR Radiation. Moscow: Mir Publ.; 1995. 606 p. (in Russ.)
7. Tarasov V.V., Yakushenkov Y.G. *Infrakrasnye sistemy smotriashchego tipa* [Infrared Systems of the “Looking” Type]. Moscow: Logos Publ.; 2004. 444 p. (in Russ.)
8. Holst G.C. *Electro-Optical Imaging System Performance*. Bellingham: SPIE Press; 2003.
9. Maurer T., Driggers R.G., Vollmerhausen R., Fridman M. 2002 NVTherm improvement. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2002. vol. 4719. Available from: <https://doi.org/10.1117/12.477448>
10. Ivanov V.P., Kurt V.I., Ovsyannikov V.A., Phillipov V.L. *Modelirovanie i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov* [Modeling and Evaluation of Modern Thermal Imaging Devices]. Kazan: Otechestvo Publ.; 2006. 594 p. (in Russ.)
11. Shipunov A.G., Semashkin E.N. *Dalnost deistviia vsesutochnost i vsepogodnost televizionnykh i teplovizionnykh priborov nabludeniia* [Range, All-Weather and All-Weather Television and Thermal Imaging Monitoring Devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2011. 216 p. (in Russ.)
12. Shipunov A.G., Semashkin E.N., Chernousov A.A., Gromov A.N., Romanov A.R., Vorob'ev V.V., et al. Experimental studies of the operating range and all-weather capability of television and thermal-vision observation devices. *Journal of Optical Technology*. 2007;74(9):61–65.
13. Tymkul V.M., Tymkul L.V., Laptev E.V., Isaev M.P., Krapivko E.A., Fes'ko Y.A., et al. Range of operation of thermal imaging systems. Part II. Algorithm, initial data, and calculation results. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2015;51(2): 144–148.

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**05.12.04 – Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения**

**05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства
и их технологии**

**05.12.13 – Системы, сети
и устройства телекоммуникаций**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

