

УДК 621.397

ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ. Ч. I. МЕТОДИКА РАСЧЁТА

В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, Ю. А. Фесько, А. Н. Поликанин

*Сибирская государственная геодезическая академия,
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханового, 10
E-mail: y.a.fesko@gmail.com*

Рассматривается методика расчёта дальности действия тепловизионных систем при обнаружении, классификации, распознавании и идентификации объектов. Методика основана на установлении функциональной связи искомых величин с пороговой температурной чувствительностью и температурно-частотной характеристикой тепловизоров при наблюдении объектов на однородном и неоднородном полях теплового излучения.

Ключевые слова: дальность действия тепловизора, обнаружение, классификация, распознавание, идентификация объектов.

Введение и постановка задачи. В настоящее время наиболее широкое развитие получили такие оптико-электронные приборы и системы, как тепловизоры. Они применяются в науке, технике, строительстве, теплоэнергетике, медицине и оборонных системах и комплексах. В работах [1, 2] обобщены теоретические основы и методы расчёта функционального параметра тепловизионных систем — разности температур $\Delta T_{\text{пор}}$, эквивалентной шуму. Этот параметр является пороговой температурной чувствительностью тепловизора и функционально связан с параметрами оптической системы тепловизора, приёмника оптического излучения (ПОИ), наблюдаемого объекта, слоя атмосферы между объектом и прибором, электронного тракта обработки информации и видеоконтрольного устройства. Кроме того, следует отметить, что в [2] параметр $\Delta T_{\text{пор}}$ назван одним из обобщённых критериев проектирования и синтеза систем тепловидения и указано, что впервые вывод формул для этого критерия проведён в [3–5]. Таким образом, в практике проектирования тепловизоров различного назначения и ИК-систем «смотрящего» типа функциональная связь $\Delta T_{\text{пор}}$ как критерия проектирования с параметрами составных звеньев приборов фактически является методикой выбора и оптимизации параметров указанных приборных звеньев для тех или иных условий объектно-атмосферной обстановки.

В работе [6] на основании [1, 2] представлена методика расчёта пороговой чувствительности тепловизионных систем $\Delta T_{\text{пор}}^{(н)}$ при наблюдении неоднородного поля теплового излучения и рассмотрена модель космического тепловизионного эксперимента. Обобщая материалы по методам расчёта параметров тепловизора (разности температур $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{пор}}^{(н)}$, эквивалентной шумам, а также температурного разрешения $\Delta T_{\text{раз}}$), в [7] рассмотрена аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров, работающих как с однородным, так и неоднородным полями теплового излучения.

Анализ литературы по методам расчёта функциональных параметров и характеристик тепловизоров, а также методам оптимизации и повышения их эффективности [8, 9] показал, что основное внимание разработчиков и специалистов по теории и практике тепловизионных систем обращено на улучшение (минимизацию) значений $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ как главных функциональных параметров таких систем наблюдения. Вопросам расчёта и оценки дальности действия тепловизоров уделялось недостаточно внимания, выявлено

небольшое число публикаций [10–13]. Интерес к вопросам расчёта и анализа дальности действия тепловизоров возрос после издания монографии [14], в которой рассматриваются экспериментальные исследования дальности действия, всепогодность и всеуточность работы такого класса приборов.

Цель предлагаемой работы — создание методики расчёта дальности действия тепловизионных систем при обнаружении, классификации, распознавании и идентификации объектов с позиции взаимосвязи с параметрами $\Delta T_{\text{пор}}$, $\Delta T_{\text{пор}}^{(\text{н})}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ как основными функциональными параметрами этих систем. Кроме того, будут сформулированы и выявлены закономерности функциональных зависимостей искомых дальностей обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов от ряда параметров как оптической системы тепловизора (например, мгновенного поля зрения, диафрагменного числа объектива и заднего фокусного расстояния), так и параметров и характеристик фотоприёмного устройства, электронной схемы обработки сигналов, видеоконтрольного устройства и поля температур объектно-фоновой обстановки. Следует отметить, что формирование отмеченных функциональных зависимостей особенно актуально для инженерно-технических работников, занимающихся расчётом и проектированием оптических и электронных схем тепловизоров, их конструированием и исследованием.

Обоснование методики расчёта. Вывод рабочих соотношений методики расчёта дальности действия тепловизоров основывается на следующих выражениях для $\Delta T_{\text{пор}}$, $\Delta T_{\text{пор}}^{(\text{н})}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ [1, 2, 6, 7]:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi k_3 T^2 m \sqrt{ab \Delta f_R}}{D^* \alpha \beta C_2 A_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) W(\lambda, T) \lambda^{-1} d\lambda}, \quad (1)$$

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

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

где

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

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

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

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

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

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

D^* и $S(\lambda)$ — удельная обнаружительная способность и относительная спектральная чувствительность ПОИ; (a, b) и Δf_R — линейные размеры и шумовая полоса частот электрической схемы включения ПОИ; (λ_1, λ_2) — границы спектральной чувствительности ПОИ; k_s — коэффициент использования ПОИ эталонного источника; m — отношение сигнал/шум; A_o 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 чёрного 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}_{Φ} — средние значения температуры поверхности объекта и фона; $\varepsilon(\lambda)$ и $\varepsilon_{\Phi}(\lambda)$ — спектральные коэффициенты излучения поверхности объекта и фона; $\tau_o(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ — спектральные коэффициенты 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 [15], имеющие температуры, аналогичные температурам поверхности объекта и фона соответственно; T_r и f_k — постоянная времени глаза и частота кадров тепловизора; ν — пространственная частота предмета (рад^{-1}); $K(\Phi_{\Phi})$ — коэффициент, учитывающий увеличение порогового сигнала ПОИ за счёт засветки постоянной составляющей фона; $r_{\Sigma}(\nu)$ — результирующий модуль передаточной функции всех звеньев тепловизора; α_o, β_o — линейные углы объекта по строке и кадру, находящегося на расстоянии l от прибора; $\alpha_{\Phi} = \alpha - \alpha_o$; $\beta_{\Phi} = \beta - \beta_o$; (x_o, y_o) , (x_{Φ}, y_{Φ}) — декартовы координаты поверхности объекта и фона в пространстве предметов.

Рассмотрим вначале 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:

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

где N — критерий Джонсона (показатель уровня решаемой задачи наблюдения объекта, т. е. число периодов разрешаемой эквивалентной миры (пространственной структуры), укладывающихся в критический размер объекта, необходимое для решения задачи наблюдения с вероятностью 0,5); h — критический размер объекта; f' — заднее фокусное расстояние объектива тепловизора; τ — время формирования видеосигнала одного элемента разложения кадра.

Тогда после несложных преобразований выражение для дальности действия тепловизора имеет вид

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

где d — диаметр входного зрачка оптической системы тепловизора.

В работе [16] отмечается, что процессы обнаружения, распознавания, классификации и идентификации объектов являются вероятностными. Обычно результат решения той или иной задачи наблюдения представляют в виде зависимости вероятности их выполнения от пространственной частоты. При этом в качестве частоты берут число полупериодов N' миры, приходящихся на критический размер объекта. Существует множество математических моделей для зависимости вероятности $P = f(N')$. Как отмечается в работе [17], наиболее достоверной из них, получившей в настоящее время широкое распространение во многих странах мира, является модель, созданная в Центре ночного видения и электронных датчиков (США), согласно которой эта зависимость определяется эмпирической формулой [18]

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

$$e = 2,7 + 0,7(N'/2N), \quad N' = h/K_{\Sigma}, \quad K_{\Sigma} = \gamma K, \quad K = L/2\Psi,$$

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}).

Не вдаваясь в анализ оценок интерпретации изображений, тщательно проведённый в [18], отметим, что согласно модели тепловизионных приборов "NVTherm" [19] применительно к типовым объектам военной техники предусмотрены значения критерия Джонсона N для основных задач наблюдения, которые решаются этим классом приборов с вероятностью 0,5 (см. таблицу).

Для типовых задач наблюдения объектов сухопутной военной техники в работе [19] рекомендованы ещё более детализированные значения критерия Джонсона. При этом перечень решаемых задач наблюдения содержит отдельно режимы обнаружения, выделения, определения вида, различения, классификации, опознавания, идентификации, селекции и описания объекта.

Значения числа 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 (танк, самолёт)
	4–5	Сцена, содержащая близкие классы объектов (танк, БТР, БМП и др.)
Идентификация	6	Сцена, содержащая сильно различающиеся типы объектов (танки Т-72, А1 и др.)
	9	Сцена, содержащая похожие типы объектов (танки Т-72, Т-62 и др.)

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 [6], когда мгновенным полем зрения прибора охватываются поверхности объекта с полем температур $T(x, y)$ и фона с полем температур $T_{\Phi}(x, y)$, схема формирования рабочих формул методики расчёта дальности обнаружения $l_o^{(н)}$ следующая:

- 1) в формулу (2) подставляется выражение (3) для $\Delta T_{пор}^{(н)}$;
- 2) при использовании в полученной формуле соотношений (10) значение критерия Джонсона N в режиме обнаружения необходимо брать согласно таблице для решаемой задачи выделения при наблюдении объектов на фоне с сильной неоднородностью;
- 3) после определённых преобразований выражение для дальности обнаружения объекта на неоднородном поле теплового излучения фона запишется в виде

$$l_o^{(н)} = \frac{[\Delta T_{раз} f' r_{\Sigma}(\nu)(T_r f_k)^{1/2} (d/f')^2 h D^*] \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \times}{6\sqrt{2}\alpha\beta\sqrt{\Delta f_R} N m k_3 [1 + K^2(\bar{\Phi}_{\Phi}) + K_{\Phi}^2 I_{\Phi}^2]^{1/2}} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \frac{\times [\varepsilon(\lambda) A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) + \varepsilon_{\Phi}(\lambda) A_{\Phi}(\lambda, T_{\Phi}(x, y), \bar{T}_{\Phi})] d\lambda}{6\sqrt{2}\alpha\beta\sqrt{\Delta f_R} N m k_3 [1 + K^2(\bar{\Phi}_{\Phi}) + K_{\Phi}^2 I_{\Phi}^2]^{1/2}}. \quad (13)$$

Заключение. На основе расчёта пороговой температурной чувствительности и температурно-частотной характеристики тепловизионных систем, разработанных в [1, 2], приведена методика расчёта их дальности обнаружения, выделения, классификации, распознавания и идентификации изотермических объектов.

При наблюдении тепловизионными системами объектно-фоновой сцены с неоднородными полями температур разработана методика расчёта дальности обнаружения объектов на неоднородном поле теплового излучения фона.

Полученные закономерности влияния параметров оптической системы тепловизора, приёмника оптического излучения, электронной схемы обработки информации, видеоконтрольного устройства, поля температур объектно-фоновой обстановки и слоя атмосферы на дальность действия могут быть использованы как в теории, так и в инженерной практике проектирования, расчёта и моделирования работы тепловизионных и ИК-систем наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мирошников М. М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
2. **Ллойд Дж.** Системы тепловидения: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 414 с.
3. **Weihe W. K.** Classification and analysis of image-forming systems // Proc. IRE. 1959. **47**, Is. 9. P. 1593–1604.
4. **Хадсон Р.** Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.
5. **Соболева Н. Ф.** К расчёту энергетической чувствительности ИК-сканирующей аппаратуры // Оптико-механическая промышленность. 1970. № 10. С. 9–11.
6. **Тымкул В. М., Тымкул О. В.** Методика расчета температурной чувствительности космических тепловизионных систем при работе по неоднородному полю теплового излучения // Исследование Земли из космоса. 1997. № 6. С. 20–24.

7. **Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Тымкул О. В.** Аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров // Оптический журнал. 2002. **69**, № 10. С. 73–76.
8. **Иванов В. П., Овсянников В. А., Филиппов В. Л.** Метод оптимизации несканирующих тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2012. **79**, № 3. С. 4–10.
9. **Балоев В. А., Мишанин С. С., Овсянников В. А. и др.** Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения // Оптический журнал. 2012. **79**, № 3. С. 22–32.
10. **Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Фесько Ю. А., Поликанин А. Н.** Энергетический расчет тепловизионных систем. Ч. 1. Методика расчёта дальности действия // Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013»: Сб. матер. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. С. 67–72.
11. **Габдрахманов Т. Р., Овсянников В. А., Яцык В. С.** К развитию методик оценки дальности действия несканирующих авиационных приборов оптической локации // Сб. матер. XX Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в электрических устройствах, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Казань: Отечество, 2008. Ч. 2. С. 283–284.
12. **Скобло В. С.** К оценке дальности действия тепловизионных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. **44**, № 1. С. 47–51.
13. **Иванов В. П., Курт В. И., Овсянников В. А., Филиппов В. Л.** Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 594 с.
14. **Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н.** Дальность действия, всесуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. М.: Машиностроение, 2011. 216 с.
15. **Справочник** по инфракрасной технике /Под ред. У. Волф, Г. Цисис. Т. 1. Физика ИК-излучения: Пер. с англ. М.: Мир, 1995. 606 с.
16. **Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.** Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
17. **Maurer T., Driggers R. G., Vollmerhausen R., Fridman M.** 2002 NVTherm improvements // Proc. SPIE. 2002. **4719**. P. 39–45.
18. **Holst G. C.** Electro-Optical Imaging System Performance. Bellingham, USA: JCD Publishing, 2008. 502 p.
19. **Wittenstein W.** Minimum temperature difference perceived — a new approach for assess undersampled thermal images // Opt. Eng. 1999. **38**. N 5. P. 773–781.

Поступила в редакцию 24 мая 2013 г.
