

УДК 621.397

## ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ. Ч. II. АЛГОРИТМ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

**В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, Е. В. Лаптев, М. П. Исаев,  
Е. А. Крапивко, Ю. А. Фесько, А. Н. Поликанин**

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

Рассматриваются результаты вычислительного эксперимента, выбор исходных данных и алгоритм расчёта дальности действия тепловизионных приборов и систем при наблюдении объекта с различными параметрами объектно-фоновой обстановки и составных звеньев регистрирующего устройства. Приводится сопоставление результатов вычислительного эксперимента и натуральных исследований на примере тепловизора "IRIS-AWS".

*Ключевые слова:* дальность действия, обнаружение, вычислительный эксперимент, тепловизор.

**Введение и постановка задачи.** В работе [1] подробно рассмотрена методика расчёта дальности действия тепловизионных систем, которая основана на анализе и установлении функциональной связи искомой величины с пороговой температурной чувствительностью  $\Delta T_{\text{пор}}$  и температурно-частотной характеристикой  $\Delta T_{\text{раз}}(\nu)$  при наблюдении объектов на однородном и неоднородном полях теплового излучения. Так, применительно к условию наблюдения изотермических объектов на излучающем тепловом фоне получено следующее выражение для дальности действия тепловизоров:

$$l = \frac{hr_{\Sigma}(\nu)\Delta T_{\text{раз}}(T_{\Gamma}f_{\kappa})^{1/2}C_2D^*(d/f')^2f' \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\varepsilon(\lambda)W(\lambda, T)\lambda^{-1}]d\lambda}{6\sqrt{2}k_3T^2\sqrt{\Delta f_R}Nm}, \quad (1)$$

где  $D^*$  и  $S(\lambda)$  — удельная обнаружительная способность и относительная спектральная чувствительность приёмника оптического излучения (ПОИ);  $\Delta f_R$  — шумовая полоса частот электрической схемы включения ПОИ;  $(\lambda_1, \lambda_2)$  — границы спектральной чувствительности ПОИ;  $k_3$  — коэффициент использования ПОИ эталонного источника;  $m$  — отношение сигнал/шум;  $W(\lambda, T)$  — спектральная светимость АЧТ с температурой  $T$ ;  $T(x, y)$  и  $T_{\text{ф}}(x, y)$  — функции распределения температуры по поверхности объекта и фона в случае наблюдения прибором неоднородных тепловых полей объектно-фоновой обстановки;  $\varepsilon(\lambda)$  — спектральный коэффициент излучения поверхности объекта;  $\tau_o(\lambda)$  и  $\tau_a(\lambda)$  — спектральные коэффициенты пропускания оптической системы тепловизора и слоя атмосферы между объектом и прибором;  $C_2$  — постоянная в формуле Планка;  $T_{\Gamma}$  и  $f_{\kappa}$  — постоянная времени глаза и частота кадров тепловизора;  $\nu$  — пространственная частота ( $\text{рад}^{-1}$ );  $r_{\Sigma}(\nu)$  — результирующий модуль передаточной функции всех звеньев тепловизора;  $d$  — диаметр

входного зрачка оптической системы тепловизора;  $N$  — критерий (число) Джонсона, имеющий смысл количества периодов эквивалентной миры, укладываемых в критический размер  $h$  объекта при решении системой задачи наблюдения (обнаружения, распознавания, классификации и идентификации).

Целью предлагаемой работы является проверка сходимости результатов расчёта дальности действия тепловизионной системы [1] с экспериментальными данными, полученными при наблюдении реального объекта в различных атмосферных условиях.

**Выбор исходных данных, моделей составных звеньев тепловизора и параметров атмосферы.** Если рассматривать тепловизор как линейную систему с последовательно расположенными звеньями в виде оптической системы, приёмника оптического излучения, электронного тракта, видеоконтрольного устройства и глаза оператора, то с учётом работы [2] суммарный модуль  $r_{\Sigma}(\nu)$  передаточной характеристики тепловизора можно представить формулой

$$r_{\Sigma}(\nu) = r_o(\nu)r_{\text{пр}}(\nu)r_{\text{ин}}(\nu)r_{\text{син}}(\nu)r_{\text{в}}(\nu)r_{\text{ус}}(\nu)r_{\text{ВКУ}}(\nu)r_{\text{Г}}(\nu)r_{\text{см}}(\nu), \quad (2)$$

где  $r_o(\nu)$  — функция передачи модуляции (ФПМ) оптической системы тепловизора;  $r_{\text{пр}}(\nu)$  — ФПМ приёмной площадки ПОИ;  $r_{\text{ин}}(\nu)$  — ФПМ инерционности элементов ПОИ;  $r_{\text{син}}(\nu)$  — ФПМ синхронизации элементов изображения тепловизора;  $r_{\text{в}}(\nu)$  — ФПМ выборки по строке и кадру;  $r_{\text{ус}}(\nu)$  — ФПМ усилителя сигналов ПОИ;  $r_{\text{ВКУ}}(\nu)$  — ФПМ видеоконтрольного устройства;  $r_{\text{Г}}(\nu)$  — ФПМ глаза оператора;  $r_{\text{см}}(\nu)$  — ФПМ смазов изображения по строке и кадру.

Подробный системный анализ передаточных характеристик всех звеньев тепловизора рассмотрен в [2, 3]. Согласно этим работам входящие в формулу (2) модули передаточной функции звеньев аппроксимируются аналитическими соотношениями, которые нами используются в программе MATLAB.

При этом следует отметить, что пространственная частота  $\nu$  связана с дальностью  $l$  следующим образом:

$$\nu = lN/(2h \cdot 1000), \text{ мрад}^{-1}. \quad (3)$$

Для анализа влияния слоя атмосферы между объектом и прибором на дальность действия тепловизора, а также оценки роли метеорологической дальности видимости ( $S_M$ ), абсолютной ( $\omega$ ) и относительной ( $f_{\text{отн}}$ ) влажности воздуха и его температуры ( $t_{\text{в}}$ ) входящий в формулу (1) интегральный коэффициент пропускания атмосферы определяется по методике, предложенной в работе [2].

**Исходные данные тепловизоров для расчёта дальности действия.** Для подтверждения расчётных исследований дальности обнаружения использовались исходные данные — технические параметры и характеристики тепловизора "IRIS-AWS" (Франция) с рабочим диапазоном спектра  $\Delta\lambda = 8\text{--}12$  мкм. Как указывается в [3], в нём применяется матричный ПОИ на основе соединения КРТ формата  $320 \times 240$  элементов с размером элемента  $30 \times 30$  мкм (аналог "MARS LV" фирмы "Sofradir").

Выбор этого тепловизора в качестве объекта исследований обусловлен тем, что в работе [3] приведены результаты натуральных экспериментов по определению его дальности обнаружения, которые будут использованы для сравнения с данными расчётов.

В целом технические параметры и характеристики тепловизора, а также исходные данные по объектно-атмосферной обстановке следующие:  $h = 2,7$  м (танк);  $d = 160$  мм;  $f' = 280$  мм;  $D^* = 1,2 \cdot 10^{11}$  см · Гц<sup>1/2</sup>/Вт;  $\Delta T_{\text{раз}} = 0,02$  К;  $\lambda_1 = 8$  мкм;  $\lambda_2 = 12$  мкм;  $\lambda_0 = 10$  мкм;  $T = 293$  К (лето);  $T = 263$  К (зима);  $a = b = 30$  мкм (линейные размеры

чувствительной площадки ПОИ);  $f_k = 25$  Гц;  $\tau_o = 0,9$ ;  $T_r = 0,2$  с;  $N = 2$  (обнаружение объекта на фоне с сильной неоднородностью [4]);  $f_{отн} = 50-70$  %;  $t_b = 20$  °C;  $t_b = -10$  °C;  $S_M = 0,25-20$  км.

**Анализ результатов расчёта дальности обнаружения и сопоставление с данными натурных исследований.** С использованием приведённой методики расчёта дальности действия тепловизоров, основанной на соотношениях (1), (2) с учётом моделей передаточных функций всех звеньев тепловизора и методики расчёта коэффициента пропускания атмосферы между объектом и прибором, разработан соответствующий алгоритм расчёта дальности обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов.

С помощью этого алгоритма была составлена компьютерная программа в среде MATLAB для расчёта и моделирования указанных дальностей применительно к тепловизионным системам с рабочими диапазонами спектра  $\Delta\lambda = 8-12$  и  $\Delta\lambda = 3-5$  мкм.

Перед сопоставлением расчётных данных с результатами имеющихся экспериментов рассмотрено следующее обстоятельство. В работах [3, 5] установлено, что в ходе натурных экспериментов при любых тепловых контрастах (от 2 до 9°) и любых сочетаниях температур и относительных влажностей воздуха дальность обнаружения тепловизора "IRIS-AWS" (область спектра 8–12 мкм) в атмосферной дымке в 5 раз больше, чем метеорологическая дальность видимости при  $S_M \geq 1$  км. Эти экспериментальные данные и послужили узловым моментом для оценки наших расчётных исследований.

В итоге в предлагаемой работе получены:

- 1) расчётные данные по зависимости дальности обнаружения объекта в виде танка и автомобиля ЗИЛ-131 для тепловизора "IRIS-AWS" от метеорологической дальности видимости  $S_M$  в диапазоне 0,5–20 км;
- 2) результаты расчётов для условий наблюдения объекта летом ( $t_b = 20$  °C) и зимой ( $t_b = -10$  °C) при относительной влажности  $f_{отн} = 50-100$  %;
- 3) сопоставительный анализ расчётных данных и результатов экспериментов из работ [3, 5].

На рис. 1 приведены результаты расчётных исследований отношения дальности обнаружения  $l$  тепловизора "IRIS-AWS" к метеорологической дальности видимости  $S_M$  в зависимости от величины  $S_M$ . При этом условия наблюдения объекта в виде автомобиля следующие: кривая 1 —  $T = 263$  К (зима),  $f_{отн} = 75$  %,  $t_b = -10$  °C; кривая 2 —  $T = 293$  К (лето),  $f_{отн} = 75$  %,  $t_b = 20$  °C; кривая 3 —  $T = 293$  К (лето),  $f_{отн} = 100$  %,  $t_b = 20$  °C.

Для анализа результатов расчёта и сопоставления с данными экспериментов на рис. 2 и 3 приведены термограммы наблюдаемой сцены при обнаружении автомобиля на мест-

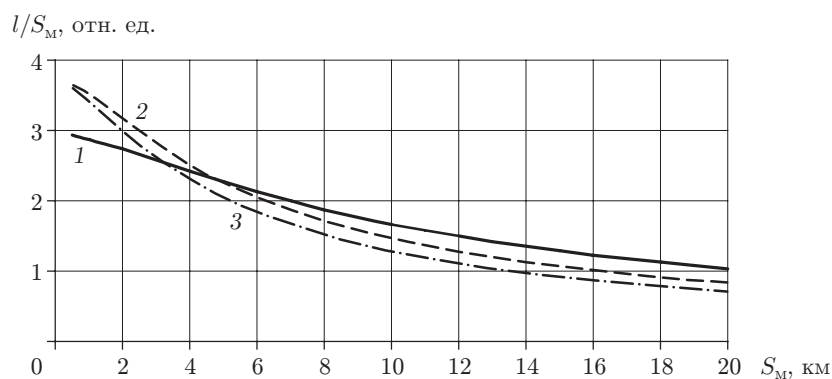


Рис. 1

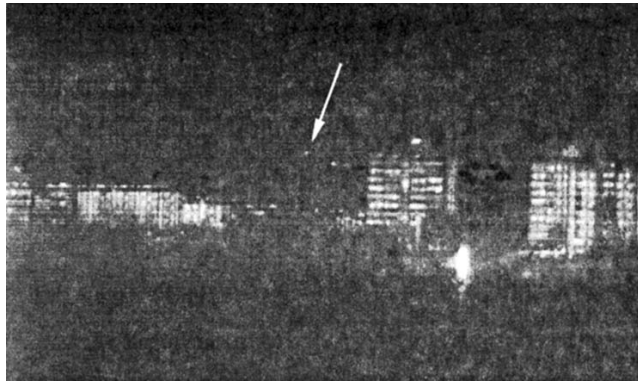


Рис. 2



Рис. 3

ности, заимствованные из работы [5]. Рис. 2 соответствует пригоризонтному наблюдению объекта при  $S_M = 3$  км и  $l = 15$  км, а рис. 3 получен при  $S_M = 8$  км и  $l = 15$  км.

**Заключение.** Анализ и сопоставление результатов расчётов и имеющихся экспериментов приводят к следующим выводам.

По данным расчётов зависимость  $l/S_M$  от  $S_M$  в диапазоне 0,5–20 км с ростом  $S_M$  спадает. Диапазон значений  $l/S_M$  соответствует величинам от 3,64 до 0,84. Физически это объясняется тем, что: а) спектральный показатель аэрозольного рассеяния земной атмосферы  $\sigma_\lambda$  с ростом длины волны уменьшается, поэтому при наличии атмосферной дымки и формировании значений  $S_M$  от 0,5 до 6 км величины  $\sigma_\lambda$  в видимом диапазоне больше, чем в ИК-области спектра 8–14 мкм; б) исходя из этого «прозрачность» атмосферы в ИК-области спектра выше, чем в видимой части, поэтому  $l$  в замутнённой атмосфере может быть больше  $S_M$  в несколько раз; в) в области  $S_M$  от 6 до 20 км динамика спада зависимости  $l/S_M$  от  $S_M$  более плавная, что объясняется практически линейным характером соотношения  $\sigma(\Delta\lambda_1)/\sigma(\Delta\lambda_2)$ , где  $\Delta\lambda_1 = 8\text{--}14$  мкм,  $\Delta\lambda_2 = 0,4\text{--}0,8$  мкм.

По данным экспериментов (см. рис. 2 и 3) дальность обнаружения тепловизора "IRIS-AWS" в некоторых случаях (при  $S_M = 3$  км) достигала значения  $l = 5S_M$ , но, на наш взгляд, устойчивое обнаружение объекта реализуется при  $l/S_M = 2$ , что практически подтверждается термограммой, полученной при  $S_M = 8$  км и  $l = 15$  км (см. рис. 3).

Сопоставление результатов расчёта дальности действия тепловизионной системы с натурными исследованиями 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 показывает, что предложенная в [1] методика может быть использована как в теории, так и в инженерной практике проектирования, расчёта и моделирования работы тепловизионных систем и ИК-систем наблюдения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Фесько Ю. А., Поликанин А. Н.** Дальность действия тепловизионных систем. Ч. I. Методика расчёта // Автометрия. 2014. **50**, № 4. С. 96–101.
2. **Иванов В. П., Курт В. И., Овсянников В. А., Филлипов В. Л.** Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 594 с.
3. **Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н.** Дальность действия, всепогодность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. М.: Машиностроение, 2011. 216 с.
4. **Holst G. C.** Electro-Optical Imaging System Performance. USA: SPIE Press, 2003. 455 p.
5. **Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н., Черноусов А. А. и др.** Экспериментальные исследования дальности действия и всепогодности телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения // Оптический журнал. 2007. **74**, № 9. С. 61–65.

*Поступила в редакцию 24 мая 2013 г.*

---