

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОГО КОНТРАСТА НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Е.М. Афанасьева, В.Г. Керков

Приводятся математические соотношения, а также полученные с их использованием количественные оценки радиационных контрастов наземного объекта на различных фонах наблюдения в диапазонах длин волн 3-5 мкм и 8-14 мкм, типовых для тепловизионных средств обнаружения

Ключевые слова: тепловое излучение, радиационная температура, энергетическая светимость, коэффициент излучения, коэффициент яркости

Известно [1], что тепловизионная аппаратура в качестве входного сигнала воспринимает разность радиационных температур объекта и фона в соответствующем спектральном диапазоне $\Delta\lambda_1$ (3-5 мкм) или λ_2 (8-14 мкм). Поэтому для определения возможности обнаружения и распознавания объектов ВВТ[2] практически важно выполнить количественную оценку этой разности. С целью решения такой задачи разработана аналитическая методика, содержание которой приводится ниже.

Общее выражение для разности радиационных температур (ΔT_R) может быть найдено путем приравнивания разности энергетической светимости (собственной и отраженной) объекта и фона в диапазоне $\Delta\lambda_j$ ($j=1,2$), обусловленной разностью температур и коэффициентов излучения объекта и фона, к разности энергетической светимости абсолютно черных тел (АЧТ) с соответствующей разностью радиационных температур объекта и фона.

При этом светимости объекта и фона определяются как [3,4]

$$M_{o\Sigma}(T_o) = \varepsilon_o M(T_o) + (1 - \varepsilon_o) E \quad (1)$$

$$M_{f\Sigma}(T_f) = \varepsilon_f M(T_f) + (1 - \varepsilon_f) E \quad (2)$$

где T_o , T_f , ε_o , ε_f - абсолютные температуры и коэффициенты излучения объекта и фона соответственно, M - энергетическая

светимость АЧТ при температурах T_o и T_f , E - облученность поверхности излучением окружающей среды.

$$\text{Обозначив } \Delta T = T_o - T_f \text{ и } \Delta \varepsilon = \varepsilon_o - \varepsilon_f$$

разность энергетической светимости объекта и фона можно записать в виде

$$\Delta M = \varepsilon_o M(\Delta T) + \Delta \varepsilon M(T_f) - \Delta \varepsilon E \quad (3)$$

Разность энергетической светимости черных тел с разностью радиационных температур ΔT_R имеет вид [5]

$$\Delta M(\Delta T_R) = \Delta T_R \frac{\partial M}{\partial T} \quad (4)$$

Приравнявая (3) и (4) и учитывая, что $\frac{\partial M}{\partial T} = \frac{C_2 M(T)}{\lambda T^2}$, где C_2 - постоянная, равная $1,44 \cdot 10^4$ мкм К, окончательно получаем выражение для разности радиационных температур объекта и фона

$$\Delta T_R = \varepsilon_o \Delta T + \frac{\Delta \varepsilon [M(T_f) - E] \lambda T_f^2}{C_2 M(T_f)} \quad (5)$$

Для определения светимости АЧТ в диапазонах 3-5 и 8-14 мкм можно воспользоваться аппроксимацией, предложенной в [6]

$$M_1(T) = m \exp(-a_1 T + b_1 T^{0,5} - K_1) \quad (6)$$

$$M_2(T) = a_2 T^2 - b_2 T + K_2,$$

где $m = 10$ Вт/м²; $a_1 = 0,1036$; $b_1 = 4,853 \text{ К}^{-0,5}$;

$K_1 = 53,5644$; $a_2 = 1,165 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^2$; $b_2 = 4,34 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$; $K_2 = 426 \text{ Вт/м}^2$. Здесь индекс 1 относится к диапазону 3-5 мкм, индекс 2 - к диапазону 8-14 мкм. Погрешность определения светимостей с использованием выражений (6), как показано в [6], при изменении температуры в диапазоне 230...370 °К не превышает 3 %.

Наибольшую трудность представляет определение облученности поверхности излучением окружающей среды (нисходящего и восходящего потоков излучения атмосферы) в рассматриваемых диапазонах. В интервале длин волн 3-5 мкм нисходящее и восходящее излучения представляют собой суперпозицию двух составляющих, одна из которых обусловлена прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиацией, а другая - собственным излучением атмосферы и подстилающей поверхности.

Известно, что вклад рассеянной солнечной радиации в диапазоне 3-5 мкм можно оценить в приближении однократного рассеяния, для

Афанасьева Елена Михайловна - ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8(903) 859-95-13

Керков Владимир Георгиевич - ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, доцент, тел. 8(908) 136-05-42

которого интенсивности рассеянного нисходящего и восходящего излучений имеют вид [6]

$$J \downarrow (\tau_0, \theta, \varphi) = S \sigma (\theta, \varphi, i) \cos i \quad (7)$$

$$J \uparrow (\tau_0, -\theta, \varphi) = S \rho (\theta, \varphi, i) \cos i \quad (8)$$

где S - солнечная постоянная в диапазоне 3-5 мкм, равная $0,34 \text{ Вт/м}^2$ [7], σ , ρ - коэффициенты яркости для нисходящего и восходящего рассеянного излучения соответственно, θ, φ - зенитный и азимутальный углы распространения рассеянного излучения (для нисходящего излучения $\theta < \pi/2$, для восходящего - $\theta > \pi/2$), i - зенитное расстояние солнца.

Применительно к сферической индикатрисе рассеяния значения коэффициентов яркости имеют вид [7]

$$\sigma = \frac{1}{4} \frac{\exp(-\tau_0 \cos \theta) - \exp(-\tau_0 \cos i)}{\cos \theta - \cos i} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{1}{4} \frac{1 - \exp[-\tau_0 (\cos \theta + \cos i)]}{\cos \theta + \cos i} \quad (10)$$

Здесь τ_0 - оптическая толщина аэрозольного слоя атмосферы, которая может быть определена, как произведение коэффициента ослабления, усредненного в диапазоне 3-5 мкм, на приведенную высоту аэрозольного столба атмосферы, равного, как следует из [8], 1,25 км.

Коэффициент аэрозольного ослабления определяется как [9]

$$\alpha = \alpha_0 (n_0 + n_1 \lambda^{-n_2}), \quad \alpha_0 = \frac{3,912}{S_m} \quad (11)$$

Здесь S_m - метеорологическая дальность видимости, $n_0 = 0,06$; $n_1 = 0,36$; $n_2 = 1,88$.

Исходя из (11), следует, что для средней прозрачности атмосферы (метеорологическая дальность видимости в приземном слое равна 10 км) коэффициент аэрозольного ослабления в диапазоне 3-5 мкм составляет 0,034, а в диапазоне 8-14 мкм - 0,025. Следовательно, аэрозольные оптические толщины в этих диапазонах составят соответственно 0,042 и 0,032.

Прямая и отраженная от земли солнечная радиация определяются в виде

$$J_{np}(\tau_0, i) = S \cos(i) \exp(-\tau_0 \cos i) \quad (12)$$

$$J_{omp}(\tau_0, i) = A S \cos i \exp[-\tau_0 (\cos i + \cos \theta)] \quad (13)$$

Здесь A - альbedo подстилающей поверхности.

Полное нисходящее и восходящее солнечное излучения определяются суммой выражений (7), (12) и (8), (13).

Расчет собственного теплового излучения в атмосфере проводится на основе уравнения переноса лучистой энергии, методы решения которого применительно к инфракрасному диапазону длин волн изложены в [9]. Основываясь на этих результатах нисходящее тепловое

излучение (светимость небосвода) можно определить как

$$J \downarrow (T_g, \theta) = M(T_g) T_a(\theta) \quad (14)$$

где $M(T_g)$ - функция излучения Планка при температуре воздуха T_g ; $T_a(\theta)$ - функция пропускания атмосферы на трассе между верхней границей атмосферы и подстилающей поверхностью, определяемая как

$$T_a(\theta) = \exp\left(-1/\cos \theta \int_{z=0}^{\infty} k(z) dz\right)$$

где z - вертикальная координата;

k - коэффициент поглощения излучения, усредненный в рассматриваемом диапазоне длин волн; под символом ∞ подразумевается верхняя граница атмосферы.

Восходящее тепловое излучение можно определить из соотношения

$$J \uparrow (T_3) = \epsilon_3 M(T_3) + A \int_0^{\pi/2} J \downarrow (T_g, \theta) \sin 2\theta d\theta \quad (15)$$

Здесь ϵ_3 - коэффициент излучения земной поверхности, $M(T_3)$ - светимость земной

поверхности при температуре T_3 . Второй член в выражении (15) характеризует отраженное земной поверхностью излучение верхнего полусферического слоя атмосферы.

Учитывая, что для большинства земных поверхностей в рассматриваемых диапазонах длин волн $A \approx 0$ [4], последним членом в формуле (15) можно пренебречь.

Из приведенных выражений следует, что излучение внешней среды не является изотропным. Поэтому облученность элементов поверхности объекта будет зависеть от их ориентации в пространстве.

Так, для горизонтально ориентированных поверхностей суммарная облученность (солнечным и собственным излучением) будет иметь вид

$$E_T = \pi S \cos i \frac{2(1+1,5 \cos i + (1-1,5 \cos i) \exp(-\tau_0 \sec i))}{4+(3-x_1)(1-A)\tau_0} + \pi M(T_g) T_a \quad (16)$$

Здесь x_1 - параметр индикатрисы рассеяния, равный примерно 1,5-1,7 [7]. Если поверхность не освещена солнцем, то из первого слагаемого выражения (16) следует вычесть прямую солнечную составляющую, равную

$$E_{np} = \pi S \cos(i) \exp(-\tau_0 \cos i) \quad (17)$$

Обозначив первое слагаемое в выражении (16) как E_Σ , облученность вертикально ориентированных поверхностей определим из выражения

$$E = \pi S \sin i \exp(-\tau_0 \sec i) + 0,5 (E_\Sigma - E_{np} + A E_\Sigma + \pi M(T_B) T_a + \epsilon_3 \pi M(T_3)) \quad (18)$$

Если поверхность находится в тени, то первое слагаемое в выражении (18) равно нулю.

Для произвольно ориентированных поверхностей необходимо выражения (7), (8), (14) и (15) проинтегрировать в пределах освещающего пространства.

Таким образом, как следует из приведенных соотношений, радиационный температурный контраст различно ориентированных поверхностей объекта зависит от многих факторов (температуры и коэффициентов излучения объекта и фона, температуры и состояния окружающей среды, освещенности прямым и рассеянным излучением солнца и др.), которые следует учитывать при его оценке.

Ниже в качестве примера приведены результаты расчета значений радиационного контраста температур наземного объекта в диапазонах 3-5 и 8-14 мкм на различных фонах (земля, песок, трава, асфальт), прогретого пробегом на трассе, в штатном исполнении и оборудованного комплексом средств снижения заметности.

Для проведения расчетов использовались следующие исходные данные.

Коэффициенты излучения заданных фонов в диапазонах 3-5 и 8-14 мкм [4] приведены в табл.1.

Таблица 1

Коэффициенты излучения заданных фонов в диапазонах 3-5 и 8-14 мкм

Диапазон длин волн, мкм	Фон наблюдения, ϵ_f				
	Земля	Песок (влажный)	Песок (сухой)	Трава	Ас-фальт
3-5	0,8	0,97	0,85	0,86	0,88
8-14	0,88	0,97	0,91	0,91	0,95

Коэффициент излучения штатной эмали принимался равным $\epsilon_o = 0,85$ в диапазонах 3-5 и 8-14 мкм [4].

Температура объекта, прогретого пробегом на трассе в штатном исполнении, принималась равной $T_o = 300^\circ\text{K}$, оборудованного средствами снижения заметности - $T_o = 293^\circ\text{K}$, температура фона принималась равной температуре окружающего воздуха $T_f = T_g = 290^\circ\text{K}$.

Предполагалось, что средства снижения заметности применяются в двух вариантах:

-проведены меры теплоизоляции от внутренних источников нагрева, приводящие к снижению температуры корпуса объекта;

-дополнительно к мерам теплоизоляции использованы покрытия с пониженным коэффициентом излучения, равном 0,2.

Для диапазона 3-5 мкм учитывалось влияние на радиационную температуру объекта солнечного излучения. Расчеты проводились для зенитного расстояния солнца 40° , средней прозрачности атмосферы и безоблачной погоды.

Результаты оценки радиационного контраста горизонтальных поверхностей объекта для

штатного варианта и для вариантов с мерами снижения заметности приведены в табл.2 и 3. В числителе приведены значения радиационного контраста для диапазона 3-5 мкм, в знаменателе – для диапазона 8-14 мкм.

Таблица 2

Значения радиационного контраста горизонтальных поверхностей объекта в безоблачную погоду

Фон наблюдения	ΔT_R , (штатн. вар.)	ΔT_R , (теплоизоляция)	ΔT_R , (теплоизоляция и снижение ϵ_o)
Земля	8,3/8,1	2,6/2,2	2,7/-7,5, 0,05
Песок (влажный)	8,35/6,55	2,4/0,6	-0,36/-12 2,3
Песок (сухой)	8,5/7,7	2,55/1,74	1,8/-8,5 0,7
Трава	8,45/7,7	2,56/1,74	1,65/-8,9 0,7
Асфальт	8,7/10	2,6/1,0	1,3/-10 1,74

Из таблицы видно, что применение мер теплоизоляции, приводящие к снижению температуры поверхности объекта с 300°K до 293°K , приводит к снижению радиационного контраста в среднем для рассматриваемых фонов в диапазоне 3-5 мкм в 3,3 раза, а в диапазоне 8-14 мкм в 5,5 раз. Дополнительное к мерам теплоизоляции снижение коэффициента излучения в обоих диапазонах до 0,2 приводит к уменьшению радиационного контраста в диапазоне 3-5 мкм почти в 6 раз, а в диапазоне 8-14 мкм радиационный контраст увеличился почти в 1,2 раза. Это свидетельствует о том, что в зависимости от разности термодинамических температур объекта и фона существует оптимальное значение коэффициента излучения покрытия для рассматриваемых длин волн, обеспечивающее минимальный контраст с фоном. Так, если в диапазоне 3-5 мкм при коэффициенте излучения покрытия, равном 0,2, наблюдается существенное снижение контраста, то в диапазоне 8-14 мкм контраст может значительно снизиться при коэффициенте излучения равном 0,7.

Необходимо также отметить, что вероятность вскрытия объекта (обнаружения или распознавания) определяется не средним по поверхности тепловым контрастом, а так называемым, контрастом Дойла, равным [4].

$$\Delta T_D = (\overline{\Delta T_R^2} + \sigma_{\Delta T}^2)^{1/2}, (19)$$

где $\overline{\Delta T_R}$ - средний по площади объекта тепловой контраст, $\sigma_{\Delta T}$ - среднеквадратическое отклонение вариаций контраста по площади объекта.

Литература

1. Белоев В.А., Мишанин С.С. и др. Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения. //Оптический журнал. 2012. №3. С. 22-32.
2. Керков В.Г. Основные положения системной методологии оценки эффективности защиты объектов в динамике конфликта // Вестник Воронежского

государственного технического университета. 2012. Т. 7. № 2. С.92 – 98.

3. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 415 с.

4. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань: Из-во ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. 596 с.

5. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.

6. Мочалин В.Д. Прогнозирование радиационного контраста объектов в спектральных диапазонах 3-5 и 8-14 мкм // Оптический журнал. 1991. № 5. С. 24 - 26.

7. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. – М.: Гостехиздат, 1956. 390 с.

8. Иванов В.П. Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. – Казань.: Новое знание. 2000. 357 с.

9. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Тепловое излучение планет. Л.: Гидрометеиздат, 197. 263 с.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

ANALYTICAL METHODS AND CALCULATIONS OF RADIATION CONTRASTS GROUND OBJECT IN INFRARED WAVELENGTH

E.M. Afanasyeva, V.G. Kerkov

The mathematical relationships, as well as derivative thereof quantitative estimates of radiative contrasts surface object on different backgrounds observations in the wavelength ranges 3-5 mm and 8-14 mm, standard for infrared detection

Keywords: thermal radiation, the radiation temperature, energy luminosity, emissivity, luminance factor