

УДК 621.384.3

Расчет тепловых контрастов и потенциалов инфракрасных изображений в спектральных диапазонах 3—5 и 8—14 мкм при наличии и отсутствии противоизлучения окружающей среды

А. Н. Свиридов

Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

*Проведены расчеты (для двух используемых в тепловидении спектральных диапазонов 3—5 и 8—14 мкм) тепловых контрастов и потенциалов инфракрасных изображений объектов наблюдения (ОН) как при наличии противоизлучения окружающей среды, так и при его отсутствии. (При этом так же, как и в [1], противоизлучением называлось попадающее на ОН излучение от неба, от поверхности Земли и от окружающих его предметов. Предполагалось, что температура ОН существенно не отличается от температуры поверхности Земли). Показано, что в инфракрасном изображении в рассматриваемых спектральных диапазонах (в отличие от изображений этих ОН в видимой области спектра) всегда (как при наличии противоизлучения, так и при его отсутствии) имеет место исчезновение некоторых локальных участков (ЛУ) — участков ОН, у которых температуры или (*и*) коэффициенты отражения отличаются от средних. Предложено характеризовать каждый из ЛУ ОН численным индексом γ , величина которого определяется его температурой, коэффициентом отражения и средними для ОН значениями этих величин. Проведены расчеты численных величин индексов исчезающих ЛУ от температуры окружающей среды. Показано, что наличие противоизлучения, наряду с уменьшением контраста изображения, может (при определенных условиях) приводить к инверсии, т. е. к тому, что ЛУ с меньшими коэффициентами излучения приобретают большую яркость, чем ЛУ с большими коэффициентами излучения. Потенциал постоянной составляющей оптического изображения ОН в области 8—14 мкм примерно в 10 раз больше, чем в области 3—5 мкм.*

Рассмотрим влияние противоизлучения на возможность получения информации об ОН в двух использующихся в тепловидении спектральных диапазонах 3—5 и 8—14 мкм. Будем считать, что в этих спектральных диапазонах участки объекта наблюдения непрозрачны, имеют температуры T_i , излучают как серые тела с коэффициентами излучения ϵ_i и диффузно отражают падающее на них противоизлучение с коэффициентами отражения R_i (при этом излучение и отражение подчиняются закону Ламберта).

Запишем следующее выражение для суммарного теплового потока W_i от i -го ЛУ ОН, обусловленного собственным тепловым излучением объекта и противоизлучением окружающей среды:

$$\begin{aligned} W_i &= \epsilon_i G(T_i) \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) W_o = (1 - R_i) G(T_i) \sigma T_i^4 + R_i W_o = \\ &= G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \left[(1 - R_i) G(T_i) / G(T_{cp}) T_i^4 / T_{cp}^4 + R_i W_o / G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \right] \approx \\ &\approx G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \left[(1 - R_i) G(T_i) / G(T_{cp}) (1 + 4 \Delta T_i / T_{cp}) + R_i W_o / G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \right] = \\ &= G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \left\{ G(T_i) / G(T_{cp}) - R_i \left[G(T_i) / G(T_{cp}) - W_o / G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \right] + 4 (\Delta T_i / T_{cp}) (1 - R_i) \right\} = \\ &= G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \left[G(T_i) / G(T_{cp}) - R_i \beta + 4 (\Delta T_i / T_{cp}) (1 - R_i) \right], \end{aligned}$$

где

$$T_i = T_{cp} + \Delta T_i; \quad (T_i / T_{cp})^4 \approx 1 + 4 \Delta T_i / T_{cp}; \quad \beta = G(T_i) / G(T_{cp}) - W_o / G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4;$$

T_{cp} — средняя температура ОН;

W_o — тепловой поток противоизлучения от окружающей среды (в рассматриваемом спектральном диапазоне), падающий на ОН;

σ — постоянная Стефана-Больцмана;

β — коэффициент контраста, представляет собой долю мощности теплового излучения от объекта, не восполненную противоизлучением. (Ранее это понятие было использовано в работе [1]).

$$G(T_{cp}) = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_2} \psi(\lambda, T_{cp}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \psi(\lambda, T_{cp}) d\lambda},$$

где

$$\psi(\lambda, T_{cp}) = \frac{2 \pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{\lambda k T_{cp}} - 1},$$

λ_1 и λ_2 — начальные и конечные длины волн в каждом из рассматриваемых спектральных диапазонов, соответственно, $\lambda_0 = 3$ мкм, $\lambda_n = 150$ мкм;

h , k , c — постоянные Планка, Больцмана и скорость света, соответственно.

Пусть $R_i = R_{cp} + \Delta R_i$ и $\Delta T_i \ll T_{cp}$, тогда $G(T_i) / G(T_{cp}) \approx 1$.

Для постоянной составляющей суммарного теплового потока от ОН получим

$$W_{cp} = G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \left[1 - R_{cp} \left(1 - W_o / G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 \right) \right].$$

Для разности суммарных тепловых потоков от i -го ЛУ ОН (с $\Delta T_i \neq 0$ и (или) $\Delta R_i \neq 0$) и постоянной составляющей суммарного теплового потока от ОН получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta W_i &= W_i - W_{\text{ср}}, \\ \Delta W_i &= G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 \left[-\Delta R_i \left(1 - W_o / G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 \right) + 4(\Delta T_i / T_{\text{ср}}) (1 - R_{\text{ср}}) \right] = \\ &= -\Delta R_i \left(G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 - W_o \right) + 4\Delta T_i G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^3 (1 - R_{\text{ср}} - \Delta R_i). \end{aligned}$$

Рассмотрим различные случаи, когда $\Delta W_i = 0$. После преобразования соотношения, приведенного выше, получим:

$$1 - W_o / G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 = 4\Delta T_i (1 - R_{\text{ср}} - \Delta R_i) / (\Delta R_i T_{\text{ср}}),$$

где $4\Delta T_i (1 - R_{\text{ср}} - \Delta R_i) / (\Delta R_i T_{\text{ср}})$ — численная величина выражения в правой части равенства определяется только параметрами i -го ЛУ, рассматриваемого ОН. Назовем эту численную величину γ_i — численным индексом i -го ЛУ, рассматриваемого ОН.

Тогда $\gamma_i = 4\Delta T_i (1 - R_{\text{ср}} - \Delta R_i) / (\Delta R_i T_{\text{ср}})$ и $\gamma_i = \beta$, где $\beta = 1 - W_o / G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4$.

Очевидно, что в случаях, когда для i -го ЛУ $\Delta W_i = 0$, этот ЛУ становится неразличимым в ИК-изображении ОН, т. е. имеет место исчезновение (в ИК-изображении ОН) ЛУ с численным индексом γ_i (равным коэффициенту контраста β).

Первый случай. $\Delta W_i = 0$ при $\Delta T_i = 0$ и $G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 = W_o$, т. е. при $\gamma_i = 0$. Последнее условие означает равенство среднего теплового потока, излучаемого объектом (в рассматриваемой спектральной полосе), и теплового потока (в этой же спектральной полосе) противоизлучения атмосферы. В этом случае ЛУ (с $\gamma_i = 0$) становятся неразличимыми в изображении объекта при любых величинах ΔR_i .

Второй случай. $\Delta W_i = 0$, при $1 - R_{\text{ср}} - \Delta R_i = 0$ и $\Delta R_i = 0$ при $G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 - W_o \neq 0$ и $\Delta T_i \neq 0$. Этот случай соответствует зеркальному объекту, у которого ЛУ в изображении будут неразличимы при любых значениях $\gamma_i \leq 1$.

Третий случай. $\Delta W_i = 0$ при $G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 - W_o \neq 0$, $\Delta T_i \neq 0$, $1 - R_{\text{ср}} - \Delta R_i \neq 0$, $\Delta R_i \neq 0$. В этом случае исчезновение ЛУ может иметь место при $\gamma_i \neq 0$ (в том числе при $\gamma_i = 1$, что соответствует $W_o = 0$, т. е. условию, когда противоизлучение вообще отсутствует). Следовательно, в тепловизионном изображении и при отсутствии противоизлучения будет иметь место исчезновение тех ЛУ, для которых

$$T_{\text{ср}} / \Delta T_i = 4(1 - R_i) / \Delta R_i.$$

Таким образом, если $W_o < G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4$, то в тепловизионном изображении исчезают ЛУ, соответствующие значениям $0 < \gamma_i < 1$.

При $W_o > G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4$ исчезают ЛУ с $\gamma_i < 0$.

При $W_o = G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4$ исчезают ЛУ с $\gamma_i = 0$.

При $W_o = 0$ (т. е. при отсутствии противоизлучения) исчезают ЛУ с $\gamma_i = 1$.

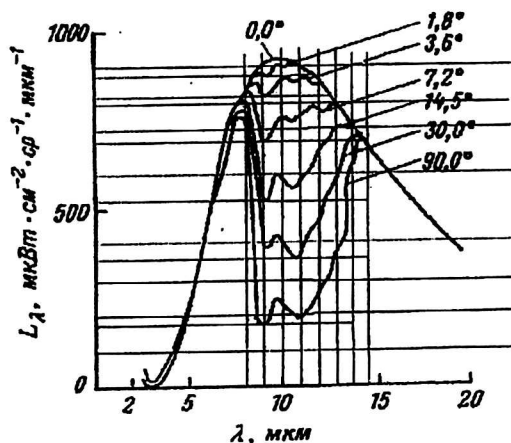
Для наиболее вероятных случаев тепловизионного наблюдения объектов (наблюдаем объекты, находящиеся в открытом пространстве на поверхности

Земли или вблизи поверхности), как правило, основным источником противоизлучения для горизонтально расположенных поверхностей является небо, а для вертикальных поверхностей — земля, небо, окружающие предметы.

Оценку облученностей горизонтальных $E_{\text{гор}}$ и вертикальных $E_{\text{верт}}$ поверхностей можно сделать, воспользовавшись результатами измерений спектральных энергетических яркостей ночного неба при различных высотах над горизонтом [2].

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости спектральных энергетических яркостей (ясного неба в ночное время) $L(\lambda)$ от длины волны, измеренные (при нескольких углах возвышения над горизонтом) в Кокоа-Бич, шт. Флорида, июнь, температура 27 °С, высота на уровне моря.

Рис. 1. Спектральная энергетическая яркость ясного неба в ночное время (Кокоа-Бич, шт. Флорида [2])



Из приведенных зависимостей можно получить следующее выражение, описывающее зависимость яркости (в спектральном диапазоне 8—14 мкм) ночного неба $L_H(x)$ от угла возвышения над горизонтом x :

$$L_H(x) = 0,01 a / \{1 + b \exp(-cx)\},$$

где x — угол возвышения над горизонтом, рад;

$L_H(x)$ — яркость (в спектральном диапазоне 8—14 мкм) ночного неба ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср}$);

$a = 785,65$, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср}$; $b = -0,8535$; $c = 0,24995$, $1/\text{рад}$; $a_1 = 834,62$, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср}$;
 $b_1 = -0,7905$; $c_1 = 2,8615$, $1/\text{рад}$.

Тогда

$$E_{\text{гор}} = \int_0^{\Omega_1} \int_0^{x_1} L_H(x) \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) dx d\Omega,$$

$$E_{\text{верт}} = \int_0^{\frac{\Omega_1}{2}} \int_0^{x_1} L_H(x) \cos(x) dx d\Omega,$$

$$E_{\text{зверт}} = \int_0^{\frac{\Omega_1}{2}} \int_0^{x_1} L_z \cos(x) \sin(x) dx d\Omega.$$

$$E_{\text{верт}} = E_{\text{вверт}} + E_{\text{зверт}},$$

где $E_{\text{гор}}$ — облученность (в спектральном диапазоне 8—14 мкм) горизонтальных поверхностей от неба;

- $E_{\text{вверт}}$ — облученность (в спектральном диапазоне 8—14 мкм) вертикальных поверхностей от неба;
- $E_{\text{зверт}}$ — облученность (в спектральном диапазоне 8—14 мкм) вертикальных поверхностей от поверхности Земли;
- $E_{\text{верт}}$ — облученность (в спектральном диапазоне 8—14 мкм) вертикальных поверхностей от неба и от поверхности Земли.

$$\Omega_1 = \pi \text{ (ср)}, \quad x_1 = \pi/2 \text{ (рад)};$$

$$L_3(T) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T)}{\pi} d\lambda,$$

- где T — температура поверхности Земли;
- L_3 — яркость поверхности Земли в спектральном диапазоне 8—14 мкм;
- ε — средний коэффициент излучения поверхности Земли в спектральном диапазоне 8—14 мкм; $\varepsilon = 0,95$; $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м.

Используя зависимости $L(\lambda)$, приведенные на рис. 1, можно также определить эффективную яркость ночного неба $L_1(x)$ в спектральном диапазоне 3—8 мкм и эффективную яркость ночного неба $L_2(x)$ в спектральном диапазоне 14—30 мкм (в последнем случае применялась экстраполяция на участке 20—30 мкм).

Далее можно оценить (по соотношениям, аналогичным приведенным выше) облученности горизонтальных поверхностей E_1 и E_2 в этих спектральных диапазонах и определить Q — отношение облученности горизонтальных поверхностей в спектральном диапазоне 8—14 мкм к суммарной облученности этих поверхностей в спектральном диапазоне 3—30 мкм.

$$Q = E_{\text{гор}} / (E_{\text{гор}} + E_1 + E_2).$$

Тогда, проведя (по приведенным выше выражениям) расчеты по данным экспериментальных зависимостей, показанных на рис. 1, получим для спектрального диапазона 8—14 мкм и температуры окружающей среды 300 К:

$$E_{\text{гор}} = 77,7 \text{ Вт/м}^2; \quad E_{\text{вверт}} = 51,7 \text{ Вт/м}^2; \quad E_{\text{верт}} = 96 \text{ Вт/м}^2; \quad E_1 = 55,9 \text{ Вт/м}^2; \\ E_2 = 147,2 \text{ Вт/м}^2; \quad Q = 0,277; \quad Z_0 = E_{\text{вверт}}/E_{\text{гор}} = 0,666; \quad Z = E_{\text{верт}}/E_{\text{гор}} = 1,24.$$

Аналогичным образом по экспериментальным кривым, приведенным на рис. 1, были сделаны оценки (при температуре окружающей среды 300 К) облученностей горизонтальных и вертикальных поверхностей ОН в спектральном диапазоне 3—5 мкм

$$E_{\text{гор}} = 5,06 \text{ Вт/м}^2; \quad E_{\text{вверт}} = 2,53 \text{ Вт/м}^2; \quad E_{\text{верт}} = 3,94 \text{ Вт/м}^2; \quad Q = 0,018; \\ Z_0 = E_{\text{вверт}}/E_{\text{гор}} = 0,5; \quad Z = E_{\text{верт}}/E_{\text{гор}} = 0,78,$$

где Q — отношение облученности горизонтальных поверхностей в спектральном диапазоне 3—5 мкм к суммарной облученности этих поверхностей в спектральном диапазоне 3—30 мкм.

Общую облученность $E(T_B)$ в тепловой области спектра от ясного неба для горизонтальных поверхностей можно также оценить с помощью эмпирического соотношения Идсо-Джексона, используя абсолютную метеорологическую температуру воздуха T_B на уровне Земли [3].

$$E_T(T_B) = \varepsilon_B(T_B) \sigma T_B^4,$$

$$\text{где } \varepsilon_B(T_B) = \left\{ 1 - 0,261 \cdot \exp \left[-7,77 \cdot 10^{-4} (273 - T_B) \right] \right\},$$

$$\varepsilon_{\text{ср}} = 0,01 \int_{223}^{323} \left[1 - 0,261 e^{-7,77 \cdot 10^{-4} (273 - T_B)^2} \right] dT_B = 0,842.$$

Тогда облученность горизонтальных и вертикальных поверхностей $E_{1\text{гор}}(T)$ и $E_{1\text{верт}}(T)$ можно оценить (для рассматриваемых примеров) следующим образом:

$$E_{1\text{гор}}(T_B) \approx Q E_{\Gamma}(T_B);$$

$$E_{1\text{верт}}(T, \Delta T_0) \approx Z_0 Q E_{\Gamma}(T_B) + E_{\text{зверт}}(T).$$

Для оценки эффективности использования тепловидения в условиях сильного противоизлучения от окружающих ОН вертикальных объектов (деревья в лесу, дома на улицах ночного города, горы) проведем также расчет облученности вертикальных поверхностей ОН от окружающих вертикальных объектов.

Пусть $E_{\Pi}(T)$ — полная облученность вертикальной поверхности от поверхности Земли и вертикальных объектов; $E_{\text{пверт}}(T)$ — облученность вертикальной поверхности от вертикальных объектов; $E_{\text{зверт}}(T)$ — облученность вертикальной поверхности от поверхности Земли.

$$E_{\text{пверт}}(T) = \varepsilon \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \cos(x) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T)}{\pi} dx d\Omega,$$

тогда $E_{\Pi}(T) = E_{\text{пверт}}(T) + E_{\text{зверт}}(T)$.

На рис. 2, а приведены зависимости облученностей (в спектральной полосе 8—14 мкм) горизонтальных и вертикальных поверхностей от температуры окружающей среды: $E_{\text{гор}}(T)$ и $E_{\text{верт}}(T)$ облученности, рассчитанные по экспериментальным зависимостям, приведенным на рис. 1. $E_{1\text{гор}}(T)$ и $E_{1\text{верт}}(T)$ облученности, рассчитанные по данным рис. 1 и соотношению Идсо-Джексона. $E_{\Pi}(T)$ — облученность вертикальной поверхности ОН от поверхности Земли и вертикальных объектов, окружающих ОН. $R_3(T)$ — энергетическая светимость (в спектральной полосе 8—14 мкм) серого тела с $\varepsilon = 0,95$.

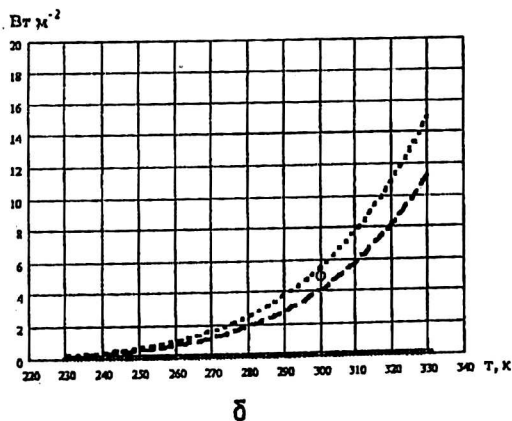
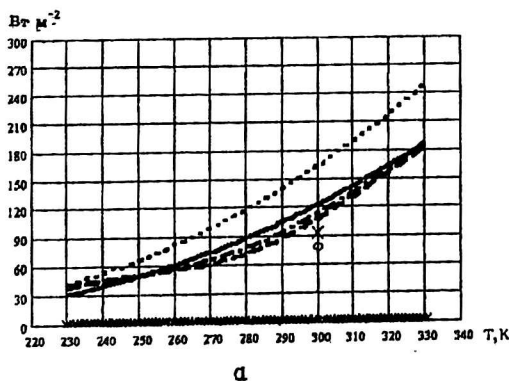


Рис. 2. Зависимости облученностей в спектральной полосе:

а — 8—14 мкм; б — 3—5 мкм

○ — $E_{\text{гор}}(T)$; × — $E_{\text{верт}}(T)$; — — — $E_{1\text{гор}}(T)$; ····· — $E_{1\text{верт}}(T)$;
—— — $E_{\Pi}(T)$; - - - — $R_3(T)$

На рис. 2, б приведены зависимости облученностей (в спектральной полосе 3—5 мкм) горизонтальных и вертикальных поверхностей от температуры окружающей среды: $E_{гор}(T)$ рассчитана по экспериментальным зависимостям, приведенным на рис. 1. $E_{п}(T)$ — облученность вертикальной поверхности ОН от поверхности Земли и вертикальных объектов, окружающих ОН. $R_3(T)$ — энергетическая светимость (в спектральной полосе 3—5 мкм) серого тела с $\epsilon = 0,95$.

Приведенные выше данные по облученностям вертикальных и горизонтальных поверхностей ОН от воздуха, поверхности Земли и окружающих объектов были использованы:

• при численных решениях уравнения:

$1 - W_0 / G(T_{cp}) \sigma T_{cp}^4 = 4 \Delta T_i (1 - R_{cp} - \Delta R_i) / (\Delta R_i T_{cp})$ для исчезающих (при $\Delta W_i = 0$) ЛУ в ИК-изображении ОН. (Использовались зависимости облученностей вертикальной поверхности ОН от поверхности Земли и вертикальных объектов, окружающих ОН).

На рис. 3, а, б приведены решения уравнения для исчезающих (при $\Delta W_i = 0$) ЛУ, соответственно, для диапазонов 8—14 и 3—5 мкм.

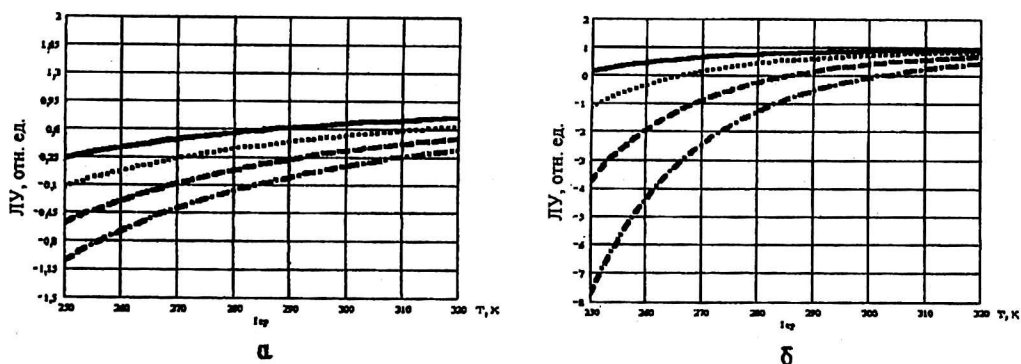


Рис. 3. Зависимости индексов исчезающих (при $\Delta W_i = 0$) ЛУ от средней температуры ОН, рассчитанные при температуре окружающей среды $T = 253 \text{ К}$ ($\gamma_1(T_{cp})$); $T = 273 \text{ К}$ ($\gamma_2(T_{cp})$);

$T = 293 \text{ К}$ ($\gamma_3(T_{cp})$); $T = 310 \text{ К}$ ($\gamma_4(T_{cp})$) для спектрального диапазона:

а — 8—14 мкм; б — 3—5 мкм;

— $\gamma_1(T_{cp})$; - - - $\gamma_2(T_{cp})$; - · - · $\gamma_3(T_{cp})$; · · · $\gamma_4(T_{cp})$

Приведенные графики показывают величины индексов исчезающих ЛУ — γ_i (численно равные соответствующим им коэффициентам контраста β) при различных значениях средней температуры ОН и температуры вертикальных предметов, окружающих ОН. Видно, что если средняя температура ОН больше температуры вертикальных предметов, окружающих ОН, то исчезают ЛУ с положительными величинами γ_i . При средних температурах ОН, меньших температуры вертикальных предметов, окружающих ОН, исчезают ЛУ с отрицательными величинами γ_i . Причем для диапазона 3—5 мкм наблюдается существенно более сильная зависимость γ_i от средней температуры ОН и от температуры вертикальных предметов, окружающих ОН, что свидетельствует

о большей зависимости ИК-изображений ОН в области 3—5 мкм от температуры ОН и температуры окружающей среды. Следовательно, в спектральном диапазоне 3—5 мкм колебания температуры ОН и температуры окружающей среды должны сказываться больше на ИК-изображения ОН, чем в диапазоне 8—14 мкм;

• для оценки влияния противоизлучения на контраст изображения.

Оценка производилась для:

единичной (площадью $S_0 = 1 \text{ м}^2$) вертикальной площадки ЛУ, находящейся вблизи вертикальных объектов (деревья в лесу, дома на улицах ночного города, горы), т. е. в условиях противоизлучения от окружающих вертикальных объектов:

$$W_0 = S_0 E_{\text{п}}(T);$$

единичной вертикальной площадки ЛУ, находящейся на открытом участке на поверхности Земли,

$$W_0 = S_0 [Z_0 Q E_r(T, \Delta T_0) + E_{\text{зверг}}(T)];$$

единичной горизонтальной площадки ЛУ, находящейся на открытом участке на поверхности Земли:

$$W_0 = S_0 Q E_r(T, \Delta T_0).$$

Пусть $W_{\text{ср}}$ — тепловой поток от единичной вертикальной площадки ОН с ($\Delta R_i = 0$ и $\Delta T_i = 0$), обусловленный только собственным излучением;

W — тепловой поток от единичной вертикальной площадки ОН (с $\Delta R_i \neq 0$ и $\Delta T_i \neq 0$) или (с $\Delta R_i \neq 0$ или $\Delta T_i \neq 0$) обусловленный только собственным излучением;

$W_{\text{пср}}$ — суммарный (обусловленный собственным излучением и отраженным противоизлучением) тепловой поток от единичной вертикальной площадки ОН (с $\Delta R_i = 0$ и $\Delta T_i = 0$);

$W_{\text{п}}$ — суммарный (обусловленный собственным излучением и отраженным противоизлучением) тепловой поток от единичной вертикальной площадки ОН с $\Delta R_i \neq 0$ и $\Delta T_i \neq 0$ или с $\Delta R_i \neq 0$ и $\Delta T_i = 0$.

Тогда можно записать следующие выражения для теплового (энергетического) контраста между этими площадками ЛУ:

$$C_0(\gamma_i) = \frac{W - W_{\text{ср}}}{W + W_{\text{ср}}} = \frac{\Delta R_i(\gamma_i - 1)}{2(1 - R_{\text{ср}}) + \Delta R_i(\gamma_i - 1)},$$

$$C_{\text{п}}(\gamma_i) = \frac{W_{\text{п}} - W_{\text{пср}}}{W_{\text{п}} + W_{\text{пср}}} = \frac{\Delta R_i(\gamma_i + Y - 1)}{2(1 - R_{\text{ср}} + R_{\text{ср}}Y) + \Delta R_i(\gamma_i + Y - 1)},$$

где C_0 — тепловой контраст без учета противоизлучения; $C_{\text{п}}$ — тепловой контраст с учетом противоизлучения.

$$W_{\text{ср}} = G(T_{\text{ср}})\sigma T_{\text{ср}}^4(1 - R_{\text{ср}}),$$

$$W = G(T_{\text{ср}})\sigma T_{\text{ср}}^4 \left[(1 - (\Delta R_i + R_{\text{ср}})) \left(1 + 4 \frac{\Delta T_i}{T_{\text{ср}}} \right) \right],$$

$$W_{\text{п}} = G(T_{\text{ср}})\sigma T_{\text{ср}}^4 \left[(1 - R_i) \left(1 + 4 \frac{\Delta T_i}{T_{\text{ср}}} \right) + R_i \frac{W_0}{G(T_{\text{ср}})\sigma T_{\text{ср}}^4} \right],$$

$$W_{\text{пср}} = G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4 \left[(1 - R_{\text{ср}}) + R_{\text{ср}} \frac{W_o}{G(T_{\text{ср}}) T_{\text{ср}}^4} \right],$$

$$Y = \frac{W_o}{G(T_{\text{ср}}) \sigma T_{\text{ср}}^4}.$$

На рис. 4 приведены зависимости контраста оптического изображения вертикальной поверхности (находящейся вблизи вертикальных объектов) от индекса γ_i , рассчитанные (для спектрального диапазона 8–14 мкм с учетом противоизлучения) при $T = T_{\text{ср}} = 300$ К. $R_{\text{ср}} = 0,05$, $\Delta R_i = 0,05$ и $R_{\text{ср}} = 0,05$, $\Delta R_i = 0,01$, а также зависимости теплового контраста этой поверхности, рассчитанные при тех же условиях, но без учета противоизлучения.

ОН, отн. ед.

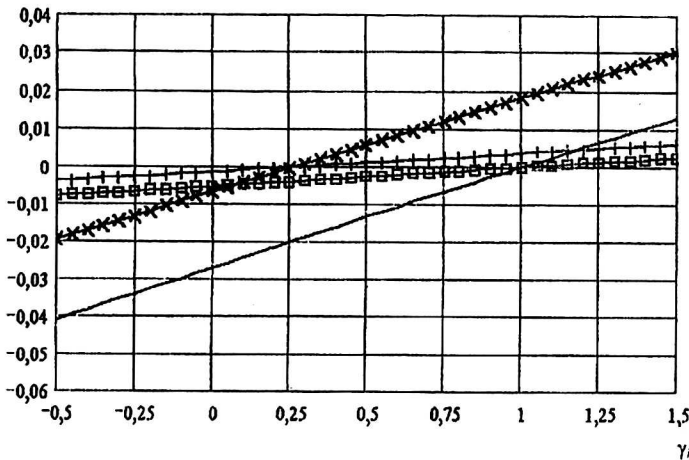


Рис. 4. Зависимости контраста оптического изображения вертикальных поверхностей ОН от индекса γ_i для спектральной полосы 8–14 мкм при $T = T_{\text{ср}} = 300$ К, рассчитанные: с учетом противоизлучения от окружающих вертикальных объектов при $R_{\text{ср}} = 0,05$; $\Delta R_i = 0,05 - C(\gamma_i)$; с учетом противоизлучения от окружающих вертикальных объектов при $R_{\text{ср}} = 0,05$; $\Delta R_i = 0,01 - C_1(\gamma_i)$; без учета противоизлучения при $R_{\text{ср}} = 0,05$; $\Delta R_i = 0,05 - C_0(\gamma_i)$; без учета противоизлучения при $R_{\text{ср}} = 0,05$; $\Delta R_i = 0,01 - C_{01}(\gamma_i)$. *-*-* - $C(\gamma_i)$; +++++ - $C_1(\gamma_i)$; ——— - $C_0(\gamma_i)$; □□□□ - $C_{01}(\gamma_i)$

На зависимостях контрастов наблюдаются точки с “нулевым” контрастом $\gamma_i = \gamma_{ip}$ (где γ_{ip} — численное значение индекса γ_i , при котором $C(\gamma_i) = 0$), соответствующие ЛУ, неразличимым в ИК-изображении ОН. При отсутствии противоизлучения (как было показано выше) исчезновение в тепловизионном изображении ЛУ имеет место при $\gamma_i = 1$. Слева от точек с “нулевым” контрастом контраст отрицательный, т. е. суммарная мощность излучения от участков поверхности ОН, у которых $\Delta R_i \neq 0$ и (или) $\Delta T_i \neq 0$ меньше, чем суммарная мощность излучения от участков с $R_i = R_{\text{ср}}$ и $T_i = T_{\text{ср}}$. Следовательно, ЛУ с индексами $\gamma_i < \gamma_{ip}$ будут иметь на экране меньшую яркость, чем средняя, поэтому их изображение можно назвать “негативным” изображением. Соответственно, справа от точек с нулевым контрастом контраст положительный, ЛУ будут иметь яркость выше, чем средняя и их изображение можно назвать “позитивным”.

Следует отметить, что наличие противоизлучения приводит (в условиях теплового баланса Земли) к уменьшению числа ЛУ с “позитивным” изображением и к уменьшению их контраста и увеличению числа ЛУ с “негативным” изображением и увеличением их контраста.

Полученные выше соотношения позволяют промоделировать изменение контраста ЛУ условного ОН в зависимости от численных величин индексов γ_i ЛУ.

Предположим, что ОН представляет плоскую вертикальную поверхность (со средней температурой T_{cp}), расположенную на поверхности Земли и окруженную вертикальными объектами с температурой T . Пусть координатные оси y и x расположены в плоскости ОН.

В качестве примера предположим, что температуры и коэффициенты отражения ЛУ ОН изменяются только при изменении координаты x по следующим законам:

$$\Delta T_{i(x)} = \Delta T_{i0} \sin\left(2\pi \frac{x}{5}\right); \quad \Delta R_{i(x)} = \Delta R_{i0} \sin\left(2\pi \frac{x}{0,5}\right).$$

Тогда

$$\gamma_i(x) = \frac{4 \left[1 - R_{cp} - \Delta R_{i0} \sin\left(2\pi \frac{x}{0,5}\right) \right] \Delta T_{i0} \sin\left(2\pi \frac{x}{5}\right)}{\Delta R_{i0} \sin\left(2\pi \frac{x}{0,5}\right) T_{cp}}.$$

После подстановки этого выражения в полученные ранее выражения для теплового (энергетического) контраста между ЛУ с $\Delta R_i \neq 0$ и (или) $\Delta T_i \neq 0$ и ЛУ с $\Delta R_i = 0$ и $\Delta T_i = 0$ при наличии ($C_n(\gamma_i)$) и отсутствии ($C_o(\gamma_i)$) противоизлучения были проведены расчеты зависимостей $C_o(x)$ и $C_n(x)$ при различных величинах ΔR_{i0} , ΔT_{i0} , R_{cp} , T_{cp} и T .

Некоторые из этих зависимостей приведены на рис. 5, а, б, в.

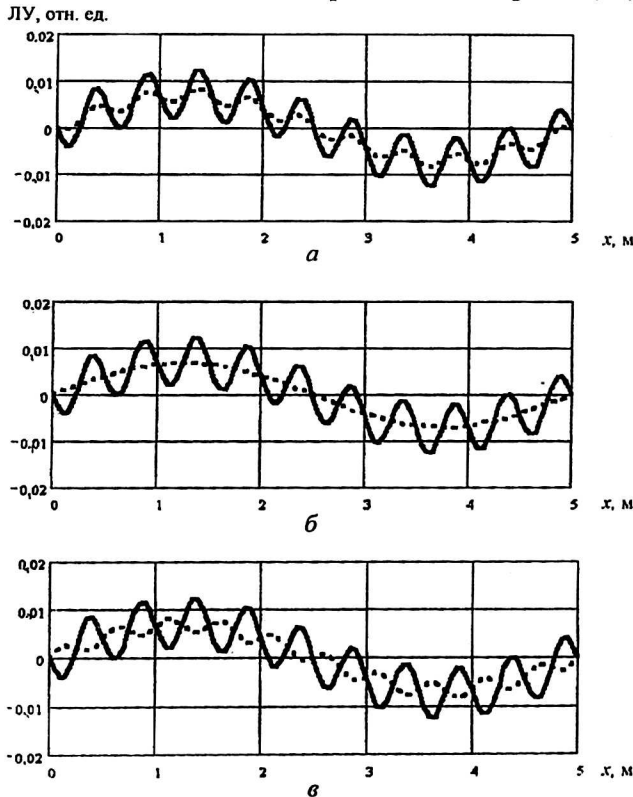


Рис. 5. Зависимости теплового контраста ЛУ от координаты x при наличии $C(x)$ и отсутствии $C_o(x)$ противоизлучения ($\Delta R_{i0} = 0,01$; $\Delta T_{i0} = 1$ К; $R_{cp} = 0,05$; $T_{cp} = 273$ К), рассчитанные при: а — $T = 273$ К; б — $T = 300$ К; в — $T = 310$ К

Так, видно, что при $T_{cp} = 273$ К и $T = 273$ К наличие противоизлучения приводит к уменьшению абсолютной величины контраста для всех ЛУ, т. е. уменьшает возможность получения информации об излучательных (отражательных) свойствах поверхности ОН. Однако в рассматриваемом примере противоизлучение не приводит к инверсии яркости: ЛУ с большими коэффициентами излучения (меньшими коэффициентами отражения) имеют большую яркость, чем ЛУ с меньшими коэффициентами излучения (большими коэффициентами отражения) (см. рис. 5, а).

Противоизлучение при $T_{cp} = 273$ К и $T = 300$ К приводит к исчезновению в ИК-изображении всех ЛУ с любыми величинами ΔR_i , т. е. в рассматриваемом случае пропадает всякая возможность получения информации об излучательных (отражательных) свойствах поверхности ОН (см. рис. 5, б).

Противоизлучение при $T_{cp} = 273$ К и $T = 310$ К приводит к уменьшению абсолютной величины контраста для ЛУ с высокими абсолютными значениями контраста и к увеличению абсолютной величины контраста для ЛУ с минимальными величинами контраста (см. рис. 5, в). Таким образом, у ЛУ, которые имели более высокую яркость при отсутствии противоизлучения, при наличии противоизлучения яркость уменьшится, а у ЛУ, которые имели низкую яркость при отсутствии противоизлучения, при наличии противоизлучения яркость увеличится. В этом случае наличие противоизлучения приводит к инверсии: т. е. к тому, что ЛУ с меньшими коэффициентами излучения приобретают большую яркость, чем ЛУ с большими коэффициентами излучения.

Воспользуемся результатами, полученными выше, для оценки влияния противоизлучения на динамический (информационный) диапазон идеального преобразователя изображения (или на максимальное за время кадра отношение сигнала к шуму) при регистрации ЛУ в ИК-изображении ОН. Динамический (информационный) диапазон — $DR_{cc}(T_{cp})$ при регистрации постоянной (средней) составляющей ИК-изображения ОН (определяемый его средней температурой T_{cp}), представляющий отношение числа фотоэлектронов сигнала, накопленных за время кадра τ , к дробовому шуму (среднеквадратичному числу шумовых носителей заряда) выразим (так же, как и в работе [1]) следующим образом:

$$DR_{cc}(T_{cp}) = \frac{H_{cp}}{\Theta},$$

где $H_{cp} = \tau \eta (N_{cp})$; $\Theta = \sqrt{H_{cp}}$;

$$N_{cp}(T_{cp}) = \frac{1}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{cp})}{\pi \left(h \frac{c}{\lambda} \right)} d\lambda (1 - R_{cp}),$$

где S_0 — площадь пикселя;

A — относительное отверстие объектива;

τ — время накопления заряда;

η — квантовая эффективность;

ξ — коэффициент, учитывающий потери в оптике;

N_{cp} — число фотонов, попадающих на пиксель от участка ОН с $\Delta R_i = 0$ и $\Delta T_i = 0$;

H_{cp} — число фотоэлектронов, накопленных от пикселя, оптически сопряженного с участком ОН с $\Delta R_i = 0$ и $\Delta T_i = 0$.

Кроме того, нам представляется целесообразным ввести понятие динамического (информационного) диапазона для ЛУ (локальных участков с $\Delta R_i \neq 0$ и (или) $\Delta T_i \neq 0$) как при отсутствии ($DR_{\text{пч}}$), так и при наличии ($DR_{\text{ппч}}$) противоизлучения.

Под динамическим (информационным) диапазоном при регистрации ЛУ в ИК-изображении ОН будем понимать отношение разности между числом фотоэлектронов, накопленных от излучения с участков с $\Delta R_i \neq 0$ и (или) $\Delta T_i \neq 0$ и числом фотоэлектронов, накопленных от излучения с участков с $\Delta R_i = 0$ и $\Delta T_i = 0$, к дробовому шуму (среднеквадратичному числу шумовых носителей заряда)

$$DR_{\text{пч}} = \frac{|\Delta H|}{\Theta},$$

где $\Delta H = \tau \eta (N(\gamma_i) - N_{\text{ср}})$;

$$N(\gamma_i) = \frac{1}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda (\Delta R_i \lambda_i + 1 - \Delta R_i - R_{\text{ср}});$$

$$N_{\text{ср}} = \frac{1}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda (1 - R_{\text{ср}});$$

$$\Theta = \sqrt{H_{\text{ср}}}; \quad H_{\text{ср}} = \tau \eta N_{\text{ср}},$$

где $N(\gamma_i)$ — число фотонов, попадающих на пиксель от участка ЛУ ОН с $\Delta R_i \neq 0$ и (или) $\Delta T_i \neq 0$.

$$\Delta H(\gamma_i) = \frac{\tau \eta}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda \Delta R_i (\gamma_i - 1).$$

Аналогичным образом определим и $DR_{\text{ппч}}$,

$$\text{где } N(\gamma_i) = \frac{1}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda (1 + (\Delta R_i + R_{\text{ср}})(Y(T) - 1) + \Delta R_i \gamma_i);$$

$$\Delta H(\gamma_i) = \frac{\tau \eta}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda (\gamma_i - 1 + Y(T)) \Delta R_i;$$

$$N_{\text{ср}}(T) = \frac{1}{4} S_0 \pi A^2 \xi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda ((1 - R_{\text{ср}}) + R_{\text{ср}} Y(T)),$$

$$\text{где } Y(T) = \frac{N_{\text{п}}(T)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T_{\text{ср}})}{\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right)} d\lambda},$$

$$N_{\text{п}}(T) = N_{\text{зверт}}(T) + N_{\text{пверт}}(T),$$

где
$$N_{\text{зверт}}(T) = \varepsilon \int_0^{\Omega_1} \int_0^{x_1} \cos(x) \sin(x) dx d\Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T)}{\pi \left(h \frac{c}{\lambda_{1i}} \right)} d\lambda,$$

$$N_{\text{пверт}}(T) = \varepsilon \int_0^{\Omega_2} \int_0^{x_1} \cos(x) dx d\Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\psi(\lambda, T)}{\pi \left(h \frac{c}{\lambda} \right)} d\lambda.$$

Далее введем (так же, как и в [1]) потенциалы оптического изображения (нормированные к единичной площади — 1 см², единичному времени — 1 с и полусферическому углу поля зрения), соответственно, для каждого из определенных выше информационных диапазонов:

$$DR_o = \zeta(\tau)^{-1/2} DR; \quad \zeta(\tau) = \tau \left(S_o \frac{\pi A^2}{4} \right).$$

Приведенные выше выражения были использованы для расчетов потенциалов оптического изображения.

На рис. 6, а, б приведены зависимости информационных потенциалов оптического изображения ЛУ (здесь и далее ПОИ ЛУ) от индекса γ_i . Видно, что в спектральном диапазоне 8—14 мкм потенциалы оптических изображений почти на порядок больше, чем в диапазоне 3—5 мкм. Информационный потенциал ЛУ (без учета противоизлучения) почти на полтора порядка меньше, чем информационный потенциал постоянной составляющей оптического изображения ОН.

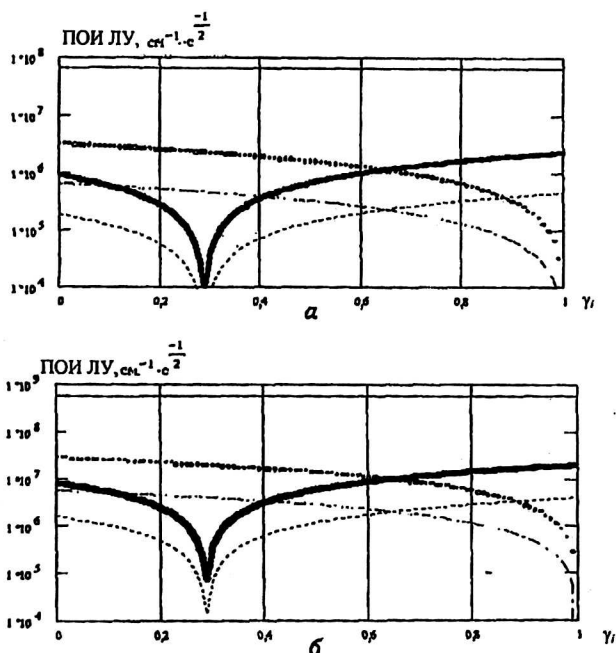


Рис. 6. Зависимости информационных потенциалов оптического изображения ЛУ от индекса γ_i (с учетом противоизлучения при $\Delta R_i = 0,05 - DR_o(\gamma_i)$ и $\Delta R_i = 0,01 - DR_{oi}(\gamma_i)$; без учета при $\Delta R_i = 0,05 - DR_{oc}(\gamma_i)$ и $\Delta R_i = 0,01 - DR_{oci}(\gamma_i)$; постоянной (средней) составляющей оптического изображения ОН — $DR_{occ}(T_{cp})$) при $T = T_{cp} = 300$ К, рассчитанные для спектральных полос:
 а — 3—5 мкм; б — 8—14 мкм:
 — — $DR_o(\gamma_i)$; - - - - $DR_{oi}(\gamma_i)$; ···· — $DR_{oc}(\gamma_i)$; - · - · — $DR_{oci}(\gamma_i)$; — — — — $DR_{occ}(T_{cp})$

Наличие противоизлучения приводит для всех ЛУ с γ_i , близких к γ_{ip} , к существенному (по сравнению с отсутствием противоизлучения) уменьшению ПОИ ЛУ. При $\gamma_i \rightarrow \gamma_{ip}$, ПОИ ЛУ $\rightarrow 0$.

Однако для ЛУ с $\gamma_i \rightarrow 1$ наличие противоизлучения приводит к увеличению ПОИ ЛУ (по сравнению с отсутствием противоизлучения).

Для каждой из двух рассматриваемых спектральных полос наблюдается (при отсутствии противоизлучения) исчезновение (уменьшение до 0 информационного потенциала) ЛУ с индексом $\gamma_i = 1$ и существенное уменьшение ПОИ ЛУ при $1 < \gamma_i > 0,8$.

Заключение

1. Потенциал постоянной составляющей оптического изображения ОН (температура которых существенно не отличается от температуры на поверхности Земли) в области 8—14 мкм примерно в 10 раз больше, чем в области 3—5 мкм.

2. В инфракрасном изображении (в отличие от изображений в видимой области спектра) всегда (как при наличии противоизлучения, так и при его отсутствии) имеет место исчезновение ЛУ с индексами $\gamma_i = \gamma_{ip}$ и существенное уменьшение контраста и ПОИ ЛУ для ЛУ с индексами $\gamma_i \rightarrow \gamma_{ip}$.

3. Для ЛУ с $\gamma_i \rightarrow 1$ наличие противоизлучения приводит к увеличению ПОИ ЛУ (по сравнению с отсутствием противоизлучения).

4. Исчезновение части ЛУ в инфракрасном изображении и существенное изменение контраста других ЛУ может приводить к существенному различию между тепловым полем на поверхности ОН и регистрируемым инфракрасным изображением (в котором, например, участки с величиной $T_i < T_{cp}$, могут быть ярче, чем участки с $T_i > T_{cp}$). В результате происходит как бы частичное искажение (“маскировка”) ОН в регистрируемом тепловизионном изображении и затрудняются зрительное восприятие и распознавание изображения. При перемещении ОН может изменяться интенсивность противоизлучения от окружающей его среды, что приводит к изменению относительных яркостей изображения ЛУ ОН и, следовательно, к дополнительной “маскировке” изображения ОН.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать принципиальную разницу между изображением “холодного” ОН (излучающего в ИК-области, но не излучающего в видимой области спектра), полученным в ИК-области спектра, и его изображением в видимой области спектра.

Инфракрасное изображение ОН формируется под действием температурного поля $T_i(x_i, y_i)$ на поверхности ОН (где x_i, y_i — координаты точки на поверхности ОН) и поля коэффициентов излучения $\varepsilon_i(x_i, y_i)$ (или поля коэффициентов отражения $R_i(x_i, y_i) = 1 - \varepsilon_i(x_i, y_i)$).

В результате взаимного действия этих полей всегда (даже в отсутствие противоизлучения) имеют место исчезновение в инфракрасном изображении ЛУ с определенными индексами γ_i и существенное ослабление или усиление ЛУ с другими индексами γ_i .

Противоизлучение увеличивает роль поля коэффициентов отражения в формировании ИК-изображения ОН и, следовательно, уменьшает относительное влияние температурного поля. В итоге “ожидаемое” температурное изображение ОН может существенно отличаться от реально наблюдаемого на экране монитора.

Этим тепловизионные изображения принципиально отличаются от изображений в видимой области спектра “холодных” ОН, где изображение формируется под действием только одного поля — поля коэффициентов отражения $R_i(x_i, y_i)$ и где нет эффекта исчезновения ЛУ (в изображении ОН) или изменения их относительных интенсивностей.

Литература

1. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Предельная чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения//Оптический журнал, 1996. № 6. С. 18—41.
2. Ely E. Bell, Leonard Eisner, James Young and Robert A. Oetjen. Spectral Radiance of Sky and at Wavelengths between 1 and 20 Microns//11 Sky Measurements. Journal of the Optical Society of America. 1960. V. 50. №. 12. S. 177—184.
3. Волф У., Цисис Г.: Справочник по инфракрасной технике. — М.: Мир, 1995. Т. 1.

Calculation of thermal contrasts and potentials of the infrared images in 3—5 and 8—14 μm spectral ranges at the availability of counterradiation of the environment and without it

A. N. Sviridov

State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

The calculations (for two spectral ranges used in a thermal imaging: 3—5 and 8—14 μm) of thermal contrasts and potentials of infrared images of objects of observation (OO) are carried out, both at the availability of counterradiation of the environment and without it. (Thus, as well as in [1], the counterradiation is termed radiation, hitting on OO, from the sky, from the Earth surface and from objects around it. It was supposed, that OO temperature does not differ essentially from the temperature of the Earth surface). It is shown, that in the infrared image in viewed spectral ranges (unlike the images of these OO in a visual spectral range) (both at counterradiation and without it) disappearance of some local areas (LA) — OO areas which temperatures or (and) reflectivity's differ from average ones always takes place. It is offered to characterize each LA of OO by a numerical coefficient γ_i , which value is determined by its temperature, reflectivity and average for OO values of these quantities. The calculations of numerical values of coefficients of disappearing LA depending on the environment temperature are carried out. It is shown that the availability of counterradiation, alongside with diminution of the image contrast, can (under certain conditions) bring to inversion, i. e. LA with smaller coefficients of radiation becomes more bright than LA with larger coefficients of radiation. Potential of a steady component of OO optical image is shown to be ~ 10 times more in spectral range of 8—14 μm , than in 3—5 μm spectral range.