

УДК 621.384.326.2:621.397.13

Влияние окружающей среды на предельные параметры наблюдательного тепловизора

А. И. Дирочка, А. Н. Свиридов
ГНЦ ФГУП «НПО «ОРИОН»», Москва, Россия

Проанализировано влияние окружающей среды на предельные параметры наблюдательных тепловизоров. Предложено в дополнение к потенциалам оптического изображения $NETD^$ и Dr^* , введенным авторами работ [1–9], ввести два новых потенциала $NERD^*$ и SN^* , характеризующих возможности визуального обнаружения на экране наблюдательного тепловизора объектов, т. е. локальных участков, у которых температура и (или) коэффициент отражения отличаются от средних значений этих величин для всей мгновенной области наблюдения — сцены.*

В последние годы тепловидение получило широкое распространение в военном деле, промышленности, экологии, медицине и т. д.

Получение тепловизионного изображения можно разделить на несколько этапов: получение оптического изображения на матрице фоточувствительных элементов в фокальной плоскости; формирование электрического сигнала, адекватного распределению интенсивности излучения в фокальной плоскости; перенос этого сигнала к системе отображения и формирование изображения на мониторе ТПВ.

В работах [1–9] проведены расчеты предельных параметров тепловизоров (оптико-электронных преобразователей) с учетом первых двух стадий тепловизионного процесса: получение изображения объекта в плоскости фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и формирование электрического сигнала в канале ФЧЭ. Предполагалось,

что шумы в оптико-электронном преобразователе определяются только дробовым шумом потока фотонов, облучающих ФЧЭ в угле его поля зрения. Подобный подход позволил рассчитать (применительно к протяженным объектам) предельные величины эквивалентной радиационному шуму разности температур — $NETD$ и динамического диапазона — Dr . Было показано, что эти параметры могут быть выражены в канонической форме через соответствующие потенциалы оптического изображения и обобщенную эффективность приемного тракта оптико-электронного преобразователя изображения. Разработанная авторами теория предельной чувствительности и информационной емкости тепловизоров позволяет оценивать перспективы совершенствования практического тепловидения и других оптико-электронных систем технического зрения. В работах [10–12] эта теория была развита и на точечные объекты.

В настоящей работе анализируется в рамках разработанной нами математической модели влияние характеристик окружающей среды на предельные параметры наблюдательных тепловизоров. В работе проведены расчеты зависимостей потенциалов оптического изображения от характеристик сцены: средних значений температур и средних значений коэффициентов отражения. Предложено для определения возможности обнаружения на сцене конкретного локального участка (ЛУ) характеризовать этот участок обобщенным параметром — численным индексом γ_i , зависящим как от температуры и коэффициента отражения этого ЛУ, так и от средних значений температуры и коэффициента отражения (излучения) сцены.

Построим математическую модель, пригодную для анализа предельных возможностей обнаружения объектов (ЛУ), учитывающую противоизлучение окружающей среды и наличие сцены. Потoki излучения, учитываемые в модели, показаны на рис. 1.

Будем считать, что в спектральной полосе пропускания охлаждаемого фильтра тепловизора объекты непрозрачны, излучают как серые тела и диффузно отражают падающее на них излучение (при этом излучение и отражение подчиняются закону Ламберта).

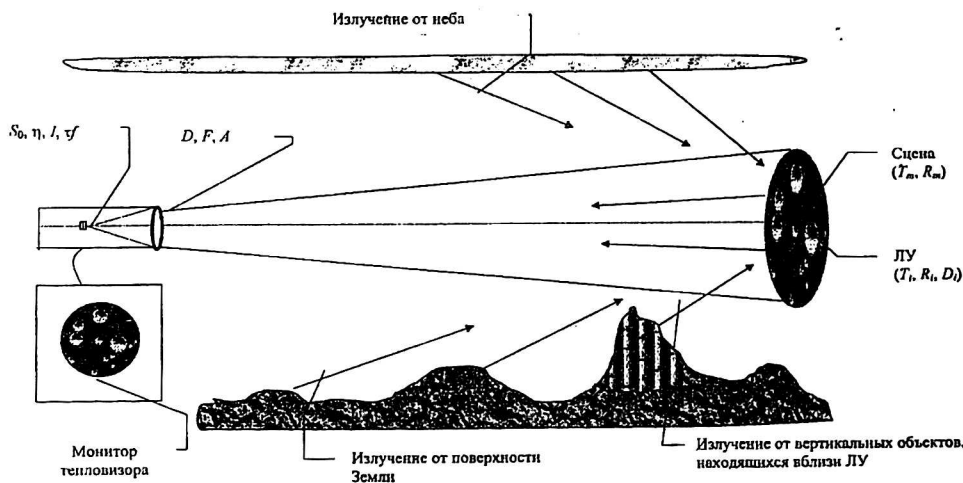


Рис. 1. Потoki излучения, учитываемые в модели наблюдательного тепловизора

Пусть:

R_m — средний коэффициент отражения сцены;

T_m — средняя температура сцены;

$R_i = R_m + \Delta R_i$ — коэффициент отражения i -го локального участка сцены;

$T_i = T_m + \Delta T_i$ — температура i -го локального участка;

D_i — диаметр i -го локального участка.

Положим, что:

шумы в оптико-электронном преобразователе определяются дробовым шумом потока фотонов, облучающих ФЧЭ;

в рассматриваемых спектральных диапазонах (3—5) и (8—14) мкм фактор вырождения флуктуации потока фотонов близок к единице.

Введем следующие обозначения:

τ_f — коэффициент пропускания охлаждаемого фильтра с коротковолновой λ_1 и длинноволновой λ_2 границами пропускания;

$\Delta\lambda_f$ — спектральная полоса пропускания охлаждаемого фильтра, $\Delta\lambda_f = \lambda_2 - \lambda_1$;

τ — время накопления заряда в единичном канале преобразователя изображения;

D — диаметр апертурного отверстия объектива ТВП;

D_{ab} — эффективный (по уровню e^{-1}) диаметр абберационного пятна объектива; $D_{ab} = \Gamma\lambda$, где $3 < \Gamma < 5$; Γ — численный коэффициент, зависящий от качества объектива;

F — фокусное расстояние объектива ТВП;

A — относительное отверстие объектива ТВП;

η — квантовая эффективность ФЧЭ;

l — линейный размер ФЧЭ; $l = \Gamma\lambda$;

S_0 — площадь ФЧЭ;

α_0 — плоский угол поля зрения ФЧЭ тепловизора; $\alpha_0 \approx l/F$;

L — расстояние между тепловизором и сценой;

α_z — плоский угол, под которым виден i -й ЛУ на расстоянии L от тепловизора, $\alpha_z \approx D_i/L$;

χ — относительный угловой размер ЛУ; $\chi = \alpha_z/\alpha_0$; $\chi = (D_i F)/(L \Gamma \lambda) = (D_i D)/(A L \Gamma \lambda)$;

$\beta(\lambda)$ — коэффициент поглощения излучения на длине волны λ ;

ξ — эффективные потери в оптической системе;

σ — постоянная Стефана-Больцмана;

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

Запишем выражение для числа электронов $\Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)$, накопленных за время кадра в единичном канале преобразователя изображения от ФЧЭ, оптически сопряженного с i -м локальным участком сцены

$$\Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \Sigma H_{ii}(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) + \Sigma H_{ni}(T_m, R_i, R_m, \chi),$$

где $\Sigma H_{ii}(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)$, $\Sigma H_{ni}(T_m, R_i, R_m, \chi)$ — соответственно, суммарные количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженным с ЛУ) от собственного теплового излучения ЛУ и сцены, и от противоизлучения окружающей среды, отраженного ЛУ и сценой

$$\Sigma H_{ii}(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = H_{ii}(T_i, R_i, \chi) + H_{if}(T_m, R_m, \chi),$$

где

$$H_{ii}(T_i, R_i, \chi) = \tau \Phi U_i(T_i) (1 - R_i) \chi^2;$$

$$H_{if}(T_m, R_m, \chi) = \tau \Phi U(T_m) (1 - R_m) (1 - \chi^2);$$

$$\Phi = \frac{1}{4} \eta \xi \tau_f S_0 A^2;$$

$H_{ii}(T_i, R_i, \chi)$, $H_{if}(T_m, R_m, \chi)$ — соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженном с ЛУ): от собственного теплового излучения ЛУ; от теплового излучения сцены (при $\chi < 1$).

$$U_i(T_i) = 10^6 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Psi_i(\lambda, T_i)}{\pi \left(\frac{hc}{\lambda} \right)} \exp(-\beta L) d\lambda;$$

$$\Psi_i(\lambda, T_i) = 10^{-6} \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_i}\right) - 1};$$

$$U(T_m) = 10^6 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Psi(\lambda, T_m)}{\pi \left(\frac{hc}{\lambda} \right)} \exp(-\beta L) d\lambda;$$

$$\Psi(\lambda, T_m) = 10^{-6} \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_m}\right) - 1}.$$

Пусть $H_{ni}(T_m, R_i, R_m, \chi)$, $H_{nf}(T_m, R_i, R_m, \chi)$, соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженном с ЛУ): от противоизлучения окружающей среды, отраженного этим ЛУ, от противоизлучения, отраженного сценой (при $\chi < 1$). Для учета влияния противоизлучения можно воспользоваться сведениями, содержащимися в работах [5, 7, 13—15].

Для определенности (чтобы описать зависимость противоизлучения от температуры окру-

жающей среды) рассчитаем облученность (в полосе пропускания охлаждаемого фильтра тепловизора) вертикальных поверхностей ЛУ от поверхности Земли $E_E(T)$ и $E_v(T)$ — облученность вертикальных поверхностей ЛУ от вертикальных объектов, находящихся вблизи ЛУ.

Можно показать [15], что при коэффициенте излучения $\epsilon = \epsilon_v$

$$E_E(T) \approx \epsilon G_c(T) \sigma T^4 / 4; E_v(T) \approx \epsilon_v G_c(T) \sigma T^4 / 2;$$

$$E_n(T) = E_E(T) + E_v(T);$$

$$E_n(T) = \frac{3}{4} \epsilon U_c(T),$$

где T — температура окружающей среды; ϵ и ϵ_v — соответственно, коэффициенты излучения поверхности Земли и объектов, окружающих ЛУ;

$$G_c(t) = \frac{\lambda_1}{\int_0^{\lambda_2} \Psi_c(\lambda, T) d\lambda} \quad (1)$$

Предположим для простоты, что $T = T_m$, тогда

$$\Sigma H_{ni}(T_m, R_i, R_m, \chi) = H_{ni}(T_m, R_i, R_m, \chi) + H_{nf}(T_m, R_m, \chi),$$

где

$$H_{ni}(T_m, R_i, R_m, \chi) = \frac{3}{4} \epsilon \tau \Phi U_c(T_m) R_i \chi^2;$$

$$H_{nf}(T_m, R_m, \chi) = \frac{3}{4} \epsilon \tau \Phi U_c(T_m) R_m (1 - \chi^2);$$

$$U_c(T) = 10^6 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Psi(\lambda, T)}{\pi \left(\frac{hc}{\lambda} \right)} \exp(-\beta L) d\lambda.$$

Запишем выражение для числа электронов $H_m(T_m, R_m)$, накопленных за время кадра в единичном канале преобразователя изображения от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой

$$\Sigma H_i(T_m, R_m) = H_i(T_m, R_m) + H_n(T_m, R_m),$$

где $H_i(T_m, R_m)$, $H_n(T_m, R_m)$ — соответственно, числа электронов, накопленных за время кадра в единичном канале преобразователя изображения от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой: от собственного излучения сцены, от противоизлучения, отраженного сценой.

$$H_t(T_m, R_m) = \tau \Phi U(T_m)(1 - R_m),$$

$$H_n(T_m, R_m) = \frac{3}{4} \varepsilon \tau \Phi U(T_m) R_m.$$

Пусть

$$\Delta H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) - H_m(T_m, R_m).$$

Очевидно, что при $\Delta H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = 0$, i -й локальный участок станет неразличимым (невидимым) на экране наблюдательного тепловизора.

В рассматриваемом случае, когда для удобства расчетов предполагалось, что вертикальные поверхности объектов (ЛУ) и сцены облучаются от поверхности Земли и окружающих вертикальных объектов, уравнение $\Delta H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = 0$ можно представить в следующем виде [15]:

$$4(t-1) \frac{r}{r-1} \left(\frac{1-R_m}{R_m} \right) = 1 - \frac{3}{4} \varepsilon \frac{U_c(T)}{U(T_m)},$$

где $t = \frac{T_i}{T_m}$ — относительная температура;

$r = \frac{R_i}{R_m}$ — относительная величина коэффициента отражения.

Видно, что левая часть уравнения зависит только от относительной температуры, относительного коэффициента отражения ЛУ и среднего коэффициента отражения сцены. Обозначим левую часть уравнения индексом γ_i

$$\gamma_i = \gamma_i(t, r, R_m) = 4(t-1) \frac{r}{r-1} \left(\frac{1-R_m}{R_m} \right),$$

$$\mu = 1 - \frac{3}{4} \varepsilon \frac{U_c(T)}{U(T_m)}.$$

Назовем величину μ , которая является относительной долей мощности собственного излучения сцены, невосполненной противоизлучением (так же, как и в [7]), коэффициентом контраста. Небольшие численные различия с данными работы [7] связаны с рассматриваемой нами моделью расчета противоизлучения, когда вертикальные поверхности ЛУ и сцены облучаются от соседних вертикальных поверхностей и поверхности Земли [15].

Каждый ЛУ характеризуется численным индексом γ_i , и в тех случаях, когда это число становится равным μ , этот локальный участок становится невидимым на экране тепловизора. Таким образом, в общем виде уравнение для невидимых ЛУ можно записать следующим образом:

$$\gamma_i = \mu.$$

Рассмотрим влияние характеристик сцены (температуры и коэффициента отражения) на предельные параметры тепловизора.

Пусть L_{eLA} и L_{em} — соответственно, яркости ЛУ и сцены, измеренные в спектральном диапазоне, в котором работает система, а L_{vLA} — световая яркость изображения ЛУ на экране индикаторного устройства системы.

Пусть $L_{eLA} - L_{em} \ll L_{em}$. Будем считать, что $L_{eLA} \approx z \Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)$ и $L_{em} \approx z H_m(T_m, R_m)$, где z — коэффициент пропорциональности.

Принимая во внимание, что при преобразовании ИК-изображения, сформированного оптической системой в плоскости матричного фотоприемника, в видимое (наблюдаемое на экране тепловизора) постоянная составляющая вычитается и усиливаются только пространственные частоты, можно записать

$$\text{ПФС} \\ L_{eLA} - L_{em} \Rightarrow L_{vLA} \text{ или}$$

$$\text{ПФС} \\ z(\Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) - H_m(T_m, R_m)) \Rightarrow L_{vLA},$$

где ПФС — передаточная функция сигнала, которую можно определить как световую яркость на экране индикаторного устройства тепловизора в функции разности температур объекта и фона [16] или в функции разности числа накопленных фотоэлектронов от объекта (ЛУ) и фона (сцены). В связи с этим будем полагать, что S — полезный (определяющий контраст изображения на мониторе тепловизора) электрический сигнал пропорционален

$$\Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) - H_m(T_m, R_m).$$

Тогда в соответствии с ранее принятым предположением, что основным источником шума является дробовый шум фотонов, облучающих ФЧЭ, запишем выражение для SN -отношения сигнал/шум в следующем виде:

$$SN(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \Delta H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) / (H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi))^{1/2}.$$

Это выражение может быть использовано для определения случаев, при которых ЛУ не может быть обнаружен на сцене, т. е. при которых

$$|SN(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)| \leq 1.$$

Следует отметить, что при отсутствии сцены (например наблюдение объектов в космосе), т. е. при $H_m(T_m, R_m) = 0$, полученное выражение совпадает с выражением для DR — динамическим диапазоном идеального информационного канала, использованным для оценок предельной информативности тепловидения в [2, 7]

$$R_i, R_m, \chi) = \Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)^{1/2}.$$

В работе [7] были введены понятия: “потенциалы оптического изображения”, являющиеся удельными характеристиками излучения от объекта наблюдения и “представляющие собой отнесенные к полному углу 2π ср, площади наблюдения 1 см^2 и времени 1 с эквивалентную радиационному шуму разность температур на объекте — $NETD^*$ и динамический диапазон излучаемых объектом фотонов — DR^* ”.

Следуя этому подходу, запишем

$$DR^*(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \zeta(\tau)^{-1/2} DR(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi),$$

где $\zeta(\tau) = 10^4 \tau \left(S_0 \frac{A^2}{4} \right)$.

$$NETD(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \frac{\sqrt{\Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)}}{\frac{d}{dT_i} \Delta H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)}, \quad (2)$$

$$NETD^*(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \zeta(\tau)^{1/2} NETD(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi).$$

(Отметим, что в знаменателе (2) используется производная по температуре от ΔH в отличие от [2], где использовалась производная по температуре от H).

Заметим, что изменение потока излучения от ЛУ зависит не только от температуры, но и от коэффициента отражения. В этой связи представляется целесообразным ввести в качестве дополнительного потенциала характеризующего возможность обнаружения изображения ЛУ на экране тепловизора при наличии сцены и противоизлучения окружающей среды — SN^* -потенциал, представляющий собой предельное отношение сигнала к шуму, нормированное к единичной площади ЛУ, единичному времени наблюдения, полусферическому углу поля зрения 2π

$$SN^*(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \zeta(\tau)^{-1/2} SN(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi).$$

Для нахождения предельных возможностей устройств видения в ИК-области спектра за счет локальных различий в отражательных (излучательных) свойствах, представляется также целесообразным ввести параметр $NERD$ — эквивалентную радиационному шуму разность коэффициентов отражения и $NERD^*$ — отнесенную к полному углу 2π ср, площади наблюдения 1 см^2 и времени 1 с эквивалентную радиационному шуму разность коэффициентов отражения

$$NERD(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \frac{\sqrt{\Sigma H_i(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)}}{\frac{d}{dR_i} \Delta H(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi)},$$

$$NERD^*(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi) = \zeta(\tau)^{1/2} NERD(T_i, T_m, R_i, R_m, \chi).$$

В рамках построенной математической модели исследовалось влияние характеристик сцены: средней температуры сцены и среднего коэффициента отражения (излучения) на DR , SN , $NETD$, $NERD$. Расчеты проводились для двух спектральных диапазонов: 8–14 и 3–5 мкм. Предполагалось, что $T_m = T_i$; $\beta(\lambda)L = 0$; $\eta = 0,8$; $\tau_f = 0,9$; $\xi = 0,9$; $\Gamma = 5$; $\chi = 1$. Пределы интегрирования в (1) были от 1 до 150 мкм.

На рис. 2 приведены зависимости DR^* , DR_1^* , $|SN^*|$, $|SN_1^*|$ от ΔT_i и ΔR_i , рассчитанные (с учетом противоизлучения), соответственно, для спектрального диапазона 8–14 мкм и спектрального диапазона 3–5 мкм (с индексом 1). Абсолютные величины использовались для того, чтобы отобразить в логарифмическом масштабе левые ветви зависимостей $SN^*(\Delta T_i)$, $SN_1^*(\Delta T_i)$ и $SN^*(\Delta R_i)$, которые при отрицательных ΔT_i и $\Delta R_i < R_i$ (когда разность лучистых потоков, отраженных и излучаемых ЛУ, и лучистых потоков, отраженных и излучаемых сценой, становится отрицательной) имеют отрицательные значения. При положительных значениях SN^* и SN_1^* изображение ЛУ на экране тепловизора имеет большую яркость, чем среднее. Назовем это изображение позитивным.

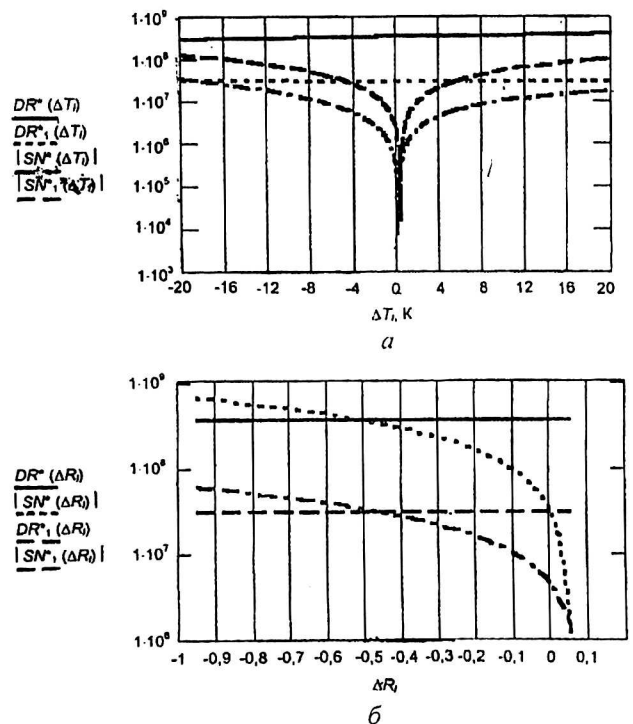


Рис. 2. Зависимости DR^* , DR_1^* , $|SN^*|$, $|SN_1^*|$ от ΔT_i (а) и ΔR_i (б), рассчитанные для спектрального диапазона 8–14 мкм (DR^* , $|SN^*|$) и спектрального диапазона 3–5 мкм (DR_1^* , $|SN_1^*|$) при следующих исходных данных: $T_i = 273 \text{ K}$, $R_i = 0,07$, $R_m = 0,05$

При отрицательных значениях SN^* и SN_1^* изображение ЛУ на экране тепловизора имеет меньшую яркость, чем среднее. Назовем это изображение негативным. При $0 \leq |SN^*| \leq 1$ изображение ЛУ становится невидимым на экране индикаторного устройства тепловизора. Именно такое исчезновение изображения ЛУ (вызванное малой величиной разности лучистых потоков от ЛУ и сцены) наблюдается на зависимостях $SN^*(\Delta T_i)$, $SN_1^*(\Delta T_i)$ и $SN^*(\Delta R_i)$, $SN_1^*(\Delta R_i)$.

Таким образом, расчетные зависимости потенциалов $SN^*(\Delta T_i)$, $SN_1^*(\Delta T_i)$ и $SN^*(\Delta R_i)$, $SN_1^*(\Delta R_i)$ от ΔT_i и ΔR_i позволяют анализировать возможность обнаружения объектов (ЛУ) на экране тепловизора и определять температуры и коэффициенты отражения сцены и ЛУ, при которых имеет место уменьшение отношения полезного сигнала к шуму и, следовательно, уменьшение вероятности обнаружения объекта. Выше было отмечено, что при отсутствии сцены (наблюдение объектов в космосе), т. е. при $H_m(T_m, R_m) = 0$, выражение для SN^* совпадает с выражением для DR^* — динамическим диапазоном идеального информационного канала, использованным для оценок предельной информативности тепловидения в [2].

Видно, что наличие сцены приводит при небольших различиях температур ($|\Delta T_i| < 3-5^\circ$) и (или) коэффициентов отражения ($|\Delta R_i| < 0,01-0,03$) между ЛУ и сценой к существенному уменьшению отношения сигнал/шум и, следовательно, к уменьшению информативности изображения ЛУ на сцене по сравнению с предельной информативностью DR^* , рассчитанной для изображения ЛУ при отсутствии сцены и противоизлучения.

Следует также отметить, что в спектральном диапазоне 8—14 мкм численные значения DR^* и SN^* почти на порядок превосходят соответствующие значения DR_1^* и SN_1^* , рассчитанные для диапазона 5—8 мкм, а вблизи $\Delta T_i \cong 0$ происходит изменение знака контраста.

На рис. 3 приведены зависимости $|NETD^*|$, $|NERD^*|$, $|NETD_1^*|$, $|NERD_1^*|$ от ΔT_i и ΔR_i , соответственно, рассчитанные (с учетом противоизлучения) для спектрального диапазона 8—14 и 3—5 мкм. (Абсолютные величины на этом и последующих рисунках использовались для того, чтобы отобразить в логарифмическом масштабе не только положительные, но и отрицательные ветви зависимостей).

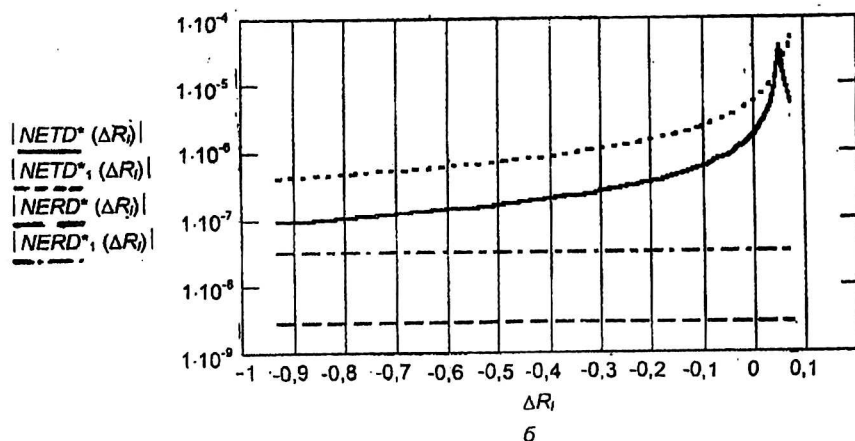
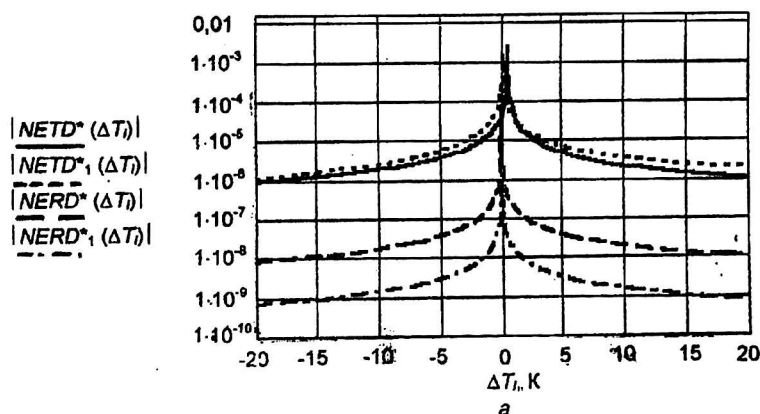


Рис. 3. Зависимости $|NETD^*|$, $|NERD^*|$, $|NETD_1^*|$, $|NERD_1^*|$ от ΔT_i (а) и ΔR_i (б), рассчитанные для спектрального диапазона 8—14 мкм ($|NETD^*|$ и $|NERD^*|$) и спектрального диапазона 3—5 мкм ($|NETD_1^*|$ и $|NERD_1^*|$) при следующих исходных данных:
 $T_i = 273 K$, $R_i = 0,07$, $R_m = 0,05$

Видно, что при малых $|\Delta T_i|$ имеет место резкое увеличение $NETD$, $NETD^*$, $NERD$, $NERD^*$. Интересно отметить, что в спектральном диапазоне 3–5 мкм тепловизор имеет несколько большую чувствительность к локальным изменениям отражательных свойств объектов, но меньшую температурную чувствительность, чем в спектральном диапазоне 8–12 мкм. При $|\Delta R_i|$, близких к R_m , наблюдается резкое уменьшение температурной чувствительности тепловизора. Чувствительность тепловизора к локальным изменениям отражательных свойств объектов не зависит от ΔR_i .

На рис. 4 приведены зависимости SN , SN^* , $NETD$, $NETD^*$, $NERD$, $NERD^*$ от относительного углового размера ЛУ, рассчитанные для спектрального диапазона 8–14 мкм. Видно, что при уменьшении относительного углового размера ЛУ — χ , SN и SN^* уменьшаются как χ^2 , а $NETD$, $NETD^*$ и $NERD$, $NERD^*$ увеличиваются как χ^2 .

(ЛУ), параметры объектива, потери в оптических элементах приемной системы (объективе, охлаждаемом фильтре), температуры и коэффициенты отражения (излучения) сцены и ЛУ, противоизлучение окружающей среды.

В рамках построенной математической модели исследовано влияние характеристик сцены (средней температуры сцены и среднего коэффициента отражения) на основные параметры тепловизора (DR , SN , $NETD$, $NERD$), определяющие его чувствительность к локальным неоднородностям температуры и коэффициента отражения. Расчеты проводились для двух используемых в тепловидении спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм.

Показано, что для определения возможности обнаружения на сцене конкретного ЛУ, целесообразно характеризовать этот участок обобщенным параметром — численным индексом γ_i , зависящим как от температуры и коэффициента

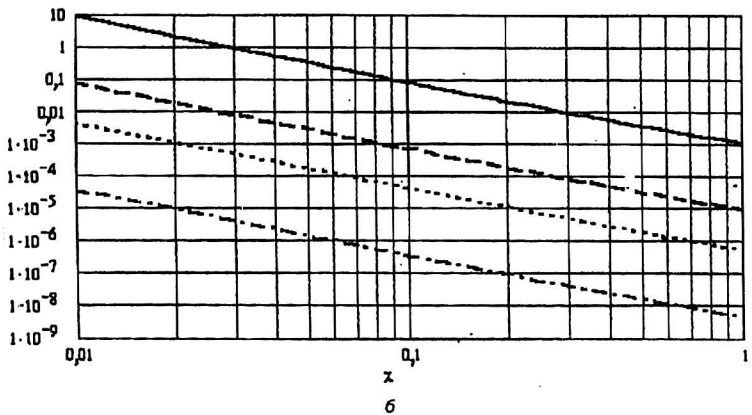
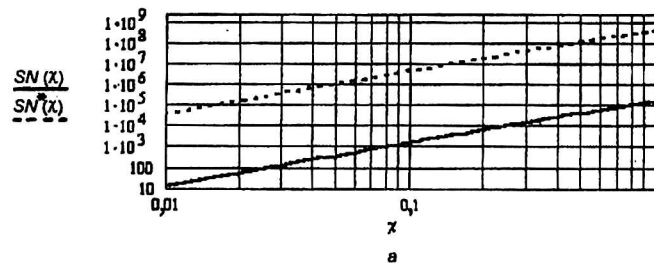


Рис. 4. Зависимости SN , SN^* , $NETD$, $NETD^*$, $NERD$, $NERD^*$ от χ — относительного углового размера ЛУ, рассчитанные для спектрального диапазона 8–14 мкм при следующих исходных данных: $T_i = 310$ К, $T_{mid} = 273$ К, $R_i = 0,07$, $R_m = 0,05$

Заключение

Отметим основные результаты работы.

Предложено использовать для анализа предельных возможностей обнаружения объектов и чувствительности наблюдательных тепловизоров при наличии сцены новые потенциалы оптического изображения: SN^* и $NERD^*$, в дополнение к потенциалам DR^* и $NETD^*$ [7].

Разработана математическая модель для анализа предельных возможностей обнаружения объектов (ЛУ), учитывающая противоизлучение окружающей среды и наличие сцены. В модели учитывались: квантовая эффективность ФЧЭ, время накопления в канале ФЧЭ, геометрические размеры ФЧЭ и наблюдаемого объекта

отражения этого ЛУ, так и от средних значений температуры и коэффициента отражения (излучения) области наблюдения — сцены.

Литература

1. Таубкин И. И., Тришенков М. А. Минимальная пороговая разность температур, обнаруживаемая тепловизионным методом // Оптический журнал, 1993. № 5. С. 20–23.
2. Taubkin I. I., Trishenkov M. A., Vasilchenko N. V. Minimum temperature difference detected by the thermal radiation of objects // Infrared Phys. Technol., 1994. Vol. 35. № 5. P. 715–732.
3. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Theoretical limited temperature sensitivity of thermal detectors with restricted spectral range // Proc., SPIE, 1994. Vol. 2225. P. 97–108.

4. Таубкин И. И., Тришенков М. А. Сравнительная оценка информационной емкости зрения и тепловидения в условиях теплового баланса Земли. I. Зрение // Оптический журнал, 1995. № 4. С. 11—18.

5. Таубкин И. И., Тришенков М. А. Сравнительная оценка информационной емкости зрения и тепловидения в условиях теплового баланса Земли. II. Тепловидение // Там же. № 5. С. 41—49.

6. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Information capacitance of the electronic vision systems // Infrared Phys. Technol., 1996. Vol. 37. P. 675—693.

7. Таубкин И. И., Тришенков М. А. Предельные чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения // Оптический журнал, 1996. № 6. С. 18—41.

8. Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Ultimate sensitivity and information capacity of thermal imagers and after electronic-vision systems // Proc. SPIE, 1997. Vol. 3200. P. 157—162.

9. Trishenkov M. A., Taubkin I. I. Investigation of ultimate information characteristics of electronic-vision systems // Proc. SPIE, 1999. Vol. 3898. P. 350—356.

10. Bakumenko V. L., Sviridov A. N., Taubkin I. I. The analysis of ultimate abilities of ideal thermal imagers at observation of "point" emitters // Proceedings of SPIE, 2000. Vol. 4340. P. 284—304.

11. Bakumenko V. L., Sviridov A. N., Taubkin I. I. Peculiarities of observation by thermal imagers of radiation targets with small angular sizes // Infrared Physics & Technology, 2002. № 43. P. 77—83.

12. Бакуменко В. Л., Свиридов А. Н., Таубкин И. И. Анализ предельных возможностей идеальных тепловизоров при наблюдении точечных излучателей // Прикладная физика, 2002. № 1. С. 63—70.

13. Ely E. Bell, Leonard Eisner, James Young and Robert A. Oetjen. Spektral Radiance of Sky and at Wavelengths between 1 and 20 Microns. 11. Sky Measurements // Journal of the Optical Society of America, 1960. Vol. 50. № 12. P. 177—184.

14. Волф У., Цисис Г. // Справочник по инфракрасной технике. — М.: Мир, 1995. Т. 1.

15. Свиридов А. Н. Расчет тепловых контрастов и потенциалов инфракрасных изображений в спектральных диапазонах 3—5 и 8—14 мкм при наличии и отсутствии противозлучения окружающей среды // Прикладная физика, 2002. № 2. С. 109—123.

16. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.

17. Dirochka A. I., Sviridov A. N. "Influence of performances of environment to utmost parameters of an ideal thermal imager", Abstracts international conference on solid state crystals, 14—18.10.2002, Zakopane, Poland. P. 188.

Influence of the environment performances on utmost parameters of the observing thermal imager

A. I. Dirochka, A. N. Sviridov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The influence of a surrounding medium to utmost parameters observation thermal imager is analyzed. We are offered, introduce into practice two new potentials of the optical plotting image NERD and SN*, describing capability of visual acquisition on a screen observation thermal imager of object, i. e. local area, at which temperature and (or) reflection of coefficient the scene differ from mean values of all instantaneous field (area) of observation, in addition to potentials NETD* and Dr*, injected by the authors [1—9].*