

УДК 621.384.3

Расчет предельных параметров активной системы видения на основе несканирующего тепловизора

А. Н. Свиридов

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

Предложена активная система видения (АСВ) на основе несканирующего тепловизора (ТВП), CO_2 -квантового усилителя изображения и CO_2 -лазера. Разработана математическая модель АСВ, в рамках которой проведено исследование предельных величин отношения сигнал/шум и других параметров системы в зависимости от расстояний до сцены — области наблюдения (ОН), энергии импульса подсветки (W), коэффициента усиления (K) квантового усилителя, характеристик объектива, ширины спектральной полосы пропускания охлаждаемого фильтра ТВП, а также характеристик объекта и сцены. Расчеты проводились для следующих возможных режимов работы рассматриваемой системы видения: активные режимы — ТВП с охлаждаемым широкополосным фильтром, ТВП с охлаждаемым узкополосным фильтром; пассивный режим ($W = 0$; $K = 1$ — ТВП с охлаждаемым широкополосным фильтром). В результате проведенных исследований показаны возможность и целесообразность построения АСВ, содержащей несканирующий тепловизор, импульсный CO_2 -квантовый усилитель изображения и импульсный CO_2 -лазер подсветки. Показано, что АСВ имеют преимущества перед тепловидением при наблюдении объектов, температуры и коэффициенты отражения которых мало отличаются от аналогичных параметров сцены. АСВ в зависимости от произведения $W \cdot K$ могут обнаруживать на расстояниях до 3000—5000 м практически любые, представляющие интерес локальные изменения коэффициента отражения. АСВ, не заменяя тепловидение, позволяют получать дополнительную информацию об ОН. Изображения, полученные с помощью АСВ, более естественны и легче распознаются, чем тепловые изображения, получаемые за счет собственного излучения ОН. Для количественного определения предельных значений чувствительности АСВ предлагается ввести новый параметр $NERD$ — эквивалентную радиационному шуму разность коэффициентов отражения.

Активные системы ИК-видения, как и человеческое зрение и системы видения в ближнем ИК-диапазоне на основе электронно-оптических преобразователей, обеспечивают получение изображения сцены, облученной источником подсветки, только за счет локальных различий в отражательных свойствах. Такие изображения более естественны и легче распознаются, чем тепловые изображения, получаемые за счет собственного излучения сцены.

Рассмотрим возможный вариант построения АСВ. В качестве источника подсветки выберем импульсный CO_2 -лазер. Этот выбор оправдан, так как эти лазеры имеют высокий КПД (порядка 10 %), хорошие массогабаритные характеристики, большой срок службы, их излучение безопасно для глаз и попадает в окно прозрачности атмосферы 8—14 мкм, в котором работают тепловизоры.

В качестве приемного устройства выберем несканирующий матричный ТВП с фоточувстви-

тельными элементами (ФЧЭ) квантового типа с максимальной обнаружительной способностью в районе 10,6 мкм.

Перед ТВП установим импульсный CO_2 -квантовый усилитель (КУ), прообраз которого описан в [1]. Принципиальная схема подобной АСВ показана на рис. 1. (Отметим, что оптическая система КУ позволяет работать АСВ и при отсутствии телескопа, который используется для изменения угла поля зрения системы α_0).

Построим математическую модель подобной АСВ, пригодную для расчета предельных значений параметров системы.

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

Пусть:

R_{cp} — средний коэффициент отражения сцены;

T_{cp} — средняя температура сцены;
 $R_i = R_{cp} + \Delta R_i$ — коэффициент отражения i -го локального участка области наблюдения (ЛУ ОН);
 $T_i = T_{cp} + \Delta T_i$ — температура i -го ЛУ ОН;
 D_i — диаметр i -го ЛУ ОН.

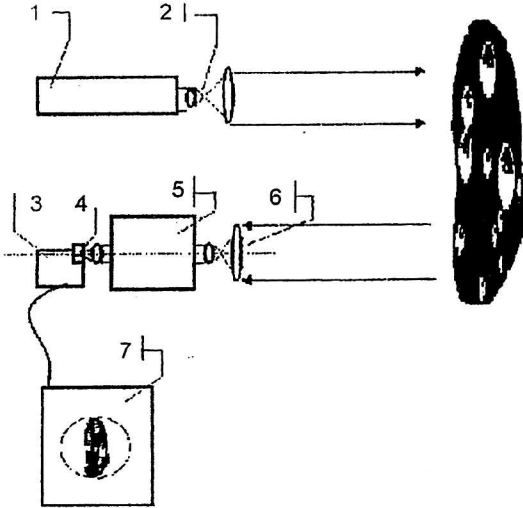


Рис. 1. Принципиальная схема АСВ:

1 — CO₂-лазер; 2 — телескоп; 3 — приемная камера тепловизора; 4 — матричный ИК-приемник с охлаждаемым фильтром и объектив тепловизора; 5 — CO₂-квантовый усилитель; 6 — телескоп; 7 — монитор тепловизора

Будем считать, что:

шумы в оптико-электронном преобразователе определяются только флуктуациями потока фотонов, облучающих ФЧЭ;

в рассматриваемом спектральном диапазоне фактор вырождения флуктуации потока фотонов близок к единице.

Пусть α_t, Ω_t — соответственно, плоский и телесный углы поля зрения ТВП;

α_a, Ω_a — соответственно, плоский и телесный углы поля зрения КУ;

α, Ω — соответственно, плоский и телесный углы расходимости лазерного источника подсветки (устройство, включающее лазер и телескоп).

Пусть $\alpha_t = \alpha_a = \alpha$.

Введем следующие обозначения:

λ — длина волны лазерного излучения;

τ_f — коэффициент пропускания охлаждаемого фильтра;

λ_1 и λ_2 — соответственно, коротковолновая и длинноволновая границы пропускания охлаждаемого фильтра;

$\Delta\lambda_f$ — 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;

$D_{аб}$ — эффективный (по уровню e) диаметр абберационного пятна объектива;

$D_{аб} = \Gamma\lambda$, где $3 \leq \Gamma \leq 5$; Γ — численный коэффициент, зависящий от качества объектива;

F — фокусное расстояние объектива ТВП;

A — относительное отверстие объектива ТВП;

η — квантовая эффективность ФЧЭ;

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

b — расстояние между соседними ФЧЭ;

S_0 — площадь ФЧЭ;

n — число ФЧЭ в матричном приемнике излучения;

α_0 — плоский угол поля зрения ФЧЭ тепловизора;

$$\alpha_0 \approx h/F;$$

D_a — диаметр входного и выходного апертурных отверстий КУ;

K — коэффициент усиления КУ;

τ_a — длительность импульса усиления КУ;

$\Delta\nu_q$ — эффективная ширина полосы усиления КУ;

$\Delta\nu$ — расстояние между соседними частотами излучения CO₂-лазера;

ξ — эффективный коэффициент пропускания оптической системы КУ;

W_p — энергия импульсного излучения лазерного источника подсветки;

L — расстояние между АСВ 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;

$$\chi = \alpha_z/\alpha_0; \chi = (D_i F)/(L \Gamma \lambda) = (D_i D)/(A L \Gamma \lambda);$$

β — коэффициент поглощения лазерного излучения в приземном слое атмосферы;

σ — постоянная Стефана-Больцмана;

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

Запишем выражение для числа электронов $\Sigma H_i(L)$, накопленных за время кадра в единичном канале преобразователя изображения от ФЧЭ, оптически сопряженного с i -м ЛУ ОН

$$\Sigma H_i(L) = \Sigma H_{wi}(L) + H_s(L) + \Sigma H_{ii}(L) + \Sigma H_{ik}(L) + \Sigma H_{ni}(L) + \Sigma H_{пкi}(L),$$

где $H_{wi}(L), H_{wij}(L)$ — соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженного с ЛУ) от импульсного излучения источника подсветки: отраженного этим ЛУ и отраженного от сцены (при $\chi < 1$); $\Sigma H_{wi}(L)$ — суммарное количество фотоэлектронов, накопленное в канале этого ФЧЭ от импульсного излучения источника подсветки, отраженного ЛУ и сценой.

$$H_{wi}(L) = \frac{4}{\pi^2} \Phi K \frac{\lambda}{hc} \frac{F^2}{L^2} W \frac{e^{(-2\beta L)}}{(\Gamma^2 \lambda^2)} R_i \chi(L)^2;$$

$$H_{wif}(L) = \frac{4}{\pi^2} \Phi K \frac{\lambda}{hc} \frac{F^2}{L^2} W \frac{e^{(-2\beta L)}}{(\Gamma^2 \lambda^2)} R_{cp} (1 - \chi(L)^2);$$

$$\Sigma H_{wi}(L) := H_{wi}(L) + H_{wif}(L),$$

где $W = W_p h^2 / n (h + b)^2$,

$$\Phi = \frac{1}{4} \eta \xi \tau f S_0 A^2, \chi(L) := \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{D_i F}{\Gamma \lambda L} \geq 1 \\ \frac{D_i F}{d \Gamma \lambda L}, & \text{если } \frac{D_i F}{\Gamma \lambda L} < 1 \end{cases}$$

Пусть H_s — число фотоэлектронов, накопленное в канале любого ФЧЭ матричного фотоприемника от спонтанного излучения КУ за время τ_a .

$$H_s(L) := \tau_a \Phi B (K - 1) \frac{Q \Delta \nu q}{\lambda^2}, \quad B := \frac{N_2}{N_2 - N_1 \left(\frac{g_2}{g_1} \right)},$$

где N_2 и N_1 , g_2 и g_1 — соответственно, населенности и статистические веса верхнего и нижнего рабочих уровней КУ. (Можно показать, что при $\Delta \nu f / \Delta \nu v < 30$, т. е. при использовании охлаждаемого фильтра тепловизора с узкой полосой $Q \approx \Delta \nu f / \Delta \nu v$. При $\Delta \nu f / \Delta \nu v \gg 30$, т. е. при использовании охлаждаемого фильтра тепловизора с широкой полосой $Q \approx 30 - 34$).

$H_{ii}(L)$, $H_{ij}(L)$, $\Sigma H_{ii}(L)$ — соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженного с ЛУ): от собственного теплового излучения (не попадающего в полосу усиления КУ) этого ЛУ, от теплового излучения (не попадающего в полосу усиления КУ) сцены (при $\lambda < 1$), и суммарное количество фотоэлектронов, накопленное в канале этого ФЧЭ от собственного теплового излучения ЛУ и сцены.

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

$$H_{ijf}(L) = \tau \Phi (1 - \phi) e^{-\beta L} U(T_{cp}) (1 - R_{cp}) (1 - \chi(L))^2,$$

$$\Sigma H_{ii}(L) = H_{ii}(L) + H_{ijf}(L),$$

где $\phi = \frac{Q \Delta \nu q}{\Delta \nu f}$,

$$U(T_{cp}) := 10^6 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Psi(\lambda, T_{cp})}{\left[\pi \left(\frac{hc}{\lambda} \right) \right]} d\lambda,$$

$$U_i(T_i) := 10^6 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Psi_i(\lambda, T_i)}{\left[\pi \left(\frac{hc}{\lambda} \right) \right]} d\lambda,$$

$$\Psi_i(\lambda, T_i) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{hc} \frac{1}{e^{\lambda k T_i} - 1},$$

$$\Psi_c(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{hc} \frac{1}{e^{\lambda k T} - 1}.$$

Пусть $H_{iki}(L)$, $H_{ikf}(L)$, $\Sigma H_{iki}(L)$ — соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженного ЛУ): от собственного теплового излучения (попадающего в полосу усиления КУ) этого ЛУ, от теплового излучения (попадающего в полосу усиления КУ) сцены (при $\chi < 1$) и суммарное количество фотоэлектронов, накопленное в канале этого ФЧЭ от собственного теплового излучения (попадающего в полосу усиления КУ) ЛУ и сцены.

$$\Sigma H_{iki}(L) = H_{iki}(L) + H_{ikf}(L),$$

$$H_{iki}(L) = \tau_a \Phi (K - 1) \phi e^{-\beta L} U_i(T_i) (1 - R_i) \chi(L)^2,$$

$$H_{ikf}(L) = \tau_a \Phi (K - 1) \phi e^{-\beta L} U(T_{cp}) (1 - R_{cp}) (1 - \chi(L))^2.$$

Пусть $H_{iii}(L)$, $H_{iif}(L)$, $\Sigma H_{iii}(L)$ — соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженного с ЛУ): от противоизлучения (не попадающего в полосу усиления КУ) окружающей среды, отраженного этим ЛУ; от противоизлучения сцены (при $\chi < 1$) и суммарное количество фотоэлектронов, накопленное в канале этого ФЧЭ, от противоизлучения (не попадающего в полосу усиления КУ) ЛУ и сцены. Для учета влияния противоизлучения можно воспользоваться сведениями, содержащимися в [2-5].

Для определенности (чтобы описать зависимость противоизлучения от температуры окружающей среды) рассчитаем облученность (в полосе пропускания охлаждаемого фильтра ТВП) вертикальных поверхностей ОН от поверхности Земли — $E_3(T)$ и облученность $E_B(T)$ вертикальных поверхностей ОН от вертикальных объектов, находящихся вблизи ОН.

Можно показать [5], что при $\epsilon = \epsilon_B$:

$$E_3(T) \approx \epsilon G_c(T) \sigma T^4 / 4; \quad E_B(T) \approx \epsilon_B G_c(T) \sigma T^4 / 2;$$

$$E_{ii}(T) = E_3(T) + E_B(T);$$

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

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

$$G_c(\bar{T}) = \frac{10^6 \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Psi_c - (\lambda, T) d\lambda}{10^6 \varepsilon \int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \Psi_c - (\lambda, T) d\lambda}; U_c(T) = 10^6 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Psi_c(\lambda, T)}{\left[\pi \left(\frac{h c}{\lambda} \right) \right]} d\lambda.$$

Тогда

$$H_{pi}(L) = \frac{3}{4} \varepsilon \tau \Phi (1 - \phi) e^{-\beta L} U_c(T) R_i \chi(L)^2;$$

$$H_{pf}(L) = \frac{3}{4} \varepsilon \tau \Phi (1 - \phi) e^{-\beta L} U_c(T) R_{cp} (1 - \chi(L)^2);$$

$$\Sigma H_{pi}(L) = H_{pi}(L) + H_{pf}(L).$$

Пусть $H_{nki}(L)$, $H_{nkf}(L)$, $\Sigma H_{nki}(L)$ — соответственно, количества фотоэлектронов, накопленных за время τ (в канале ФЧЭ, оптически сопряженного с ЛУ): от противоизлучения (попадающего в полосу усиления КУ) окружающей среды, отраженного этим ЛУ, от противоизлучения сцены (при $\chi < 1$) и суммарное количество фотоэлектронов, накопленное в канале этого ФЧЭ, от противоизлучения (попадающего в полосу усиления КУ) ЛУ и сцены.

$$H_{nki}(L) = \frac{3}{4} \varepsilon \tau_a \Phi (K - 1) e^{-\beta L} \phi U_c(T) R_i \chi(L)^2;$$

$$H_{nkf}(L) = \frac{3}{4} \varepsilon \tau_a \Phi (K - 1) e^{-\beta L} \phi U_c(T) R_{cp} (1 - \chi(L)^2);$$

$$\Sigma H_{nki}(L) = H_{nki}(L) + H_{nkf}(L).$$

Запишем выражение для числа электронов $H_{cp}(L)$, накопленных за время кадра в единичном канале преобразователя изображения от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой

$$H_{cp}(L) = H_{wcp}(L) + H_s + H_{tcp}(L) + H_{tkcp}(L) + H_{ncp}(L) + H_{nkc}(L),$$

где $H_{wcp}(L)$ — число фотоэлектронов, накопленное за время τ (от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой) от импульсного излучения источника подсветки, отраженного сценой;

$H_{tcp}(L)$ — число фотоэлектронов, накопленное за время τ (от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой) от собственного теплового излучения сцены неусиленного КУ;

$H_{tkcp}(L)$ — число фотоэлектронов, накопленное за время τ_a (от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой) от доли собственного теплового излучения сцены усиленного КУ;

$H_{ncp}(L)$ — число фотоэлектронов, накопленное за время τ (от ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой) от противоизлучения окружающей среды, отраженного сценой и неусиленного КУ;

$H_{nkc}(L)$ — число фотоэлектронов, накопленное за время τ_a (от ФЧЭ, оптически сопряжен-

ного со сценой) от доли противоизлучения окружающей среды, отраженного сценой и усиленного КУ.

Выражения для каждого из слагаемых $H_{cp}(L)$ могут быть получены (при $\chi \geq 1$) путем замены R_i на R_{cp} и T_i или T на T_{cp} в аналогичных отношениях, приведенных выше.

Пусть $\Delta H(L) = \Sigma H_i(L) - H_{cp}(L)$. Очевидно, что при $\Delta H(L) = 0$ i -й ЛУ станет неразличимым (невидимым) на экране тепловизора. Ниже приведено решение уравнения: $\Delta H(L) = 0$. (Предполагалось, что $\chi \geq 1$. Учитывалось противоизлучение окружающей среды.)

$$\gamma_i(L) = \frac{4 \frac{K}{(\lambda(hc))} W \frac{\exp(-\beta L)}{(\pi^2 D^2)} \frac{F^2}{L^2} + (\tau(1 - \phi) + \tau_a \phi (K - 1))}{(-\tau(1 - \phi) - \tau_a \phi (K - 1)) U(T_{cp})} \times \frac{\left(\frac{3}{4} \varepsilon U_c(T) - U(T_{cp}) \right)}{(-\tau(1 - \phi) - \tau_a \phi (K - 1)) U(T_{cp})},$$

где

$$\gamma_i = \frac{4 \Delta T_i (1 - R_{cp} - \Delta R_i)}{T_{cp} \Delta R_i} = \frac{4(T_i - T_{cp})(1 - R_i)}{T_{cp}(R_i - R_{cp})} = 4(t - 1) \frac{r}{r - 1} \cdot \frac{\varepsilon_{cp}}{1 - \varepsilon_{cp}},$$

здесь

$$t = \frac{T_i}{T_{cp}}; r = \frac{R_i}{R_{cp}}; \varepsilon_{cp} = 1 - R_{cp}.$$

На рис. 2 приведены типичные расчетные зависимости абсолютных величин $\gamma_i(L)$. Это сделано для того, чтобы отобразить в логарифмическом масштабе на одном графике зависимости $\gamma_{ib}(L)$ и $\gamma_{ic}(L)$, имеющие отрицательные значения, и $\gamma_{ia}(L)$, имеющую положительные значения. Расчеты выполнялись (при $\chi \geq 1$) для трех возможных режимов работы рассматриваемой системы видения:

пассивный ($W = 0$; $K = 1$) — ТВП с охлаждаемым широкополосным ($\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м) фильтром;

активный ($W = 0,001$ Дж; $K = 10^5$) — ТВП с охлаждаемым широкополосным ($\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м) фильтром;

активный ($W = 0,001$ Дж; $K = 10^5$) — ТВП с охлаждаемым узкополосным ($\lambda_1 = 1,045 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 1,075 \cdot 10^{-6}$ м).

Из графиков видно, что в пассивном режиме (при любых значениях L) в изображении ОН на экране нельзя обнаружить (при выбранных исходных условиях) ЛУ с численным значением

$\gamma_i \approx 0,2875$. В активном режиме каждому расстоянию соответствует своя определенная величина γ_i . При небольших расстояниях до ОН, на экране исчезают ЛУ с большими отрицательными числами γ_i . По мере увеличения расстояния абсолютная величина отрицательных значений γ_i уменьшается.

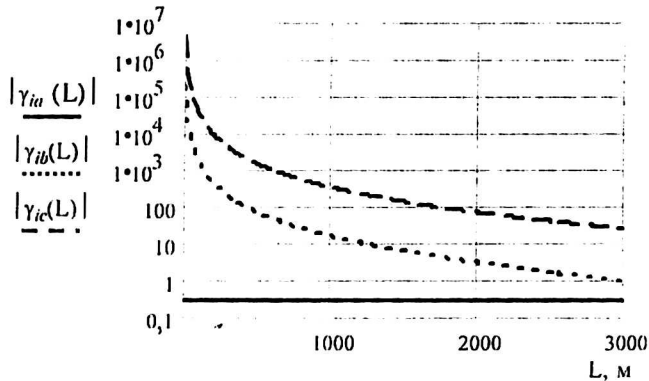


Рис. 2. Зависимости $\gamma(L)$, рассчитанные при следующих исходных условиях:

- $T_{cp} = T = 275 \text{ К}; \beta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}; A = 1; F = 0,05 \text{ м};$
 $\tau = 1/25 \text{ с}; \tau_a = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \eta = 0,8.$
- $|\gamma_{ib}(L)|$ — при $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6} \text{ м}; W = 0; K = 1;$
 $\xi = 0,9; \tau_f = 0,9.$
- $|\gamma_{ib}(L)|$ — при $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6} \text{ м}; W = 0,001 \text{ Дж};$
 $K = 10^{-5}; \xi = 0,3; \tau_f = 0,9; \phi = 12 \cdot 10^{-4}; Q = 32.$
- $|\gamma_{ic}(L)|$ — при $\lambda_1 = 1,045 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \lambda_2 = 1,075 \cdot 10^{-6} \text{ м};$
 $W = 0,001 \text{ Дж}; K = 10^{-5}; \xi = 0,3; \tau_f = 0,9; \phi = 12 \cdot 10^{-4};$
 $\xi = 0,3; \tau_f = 0,7; Q = 16$

Из вышеизложенного можно сделать следующее заключение. Каждый ЛУ (имеющий значения $R_i \neq R_{cp}$ и $T_i \neq T_{cp}$) может быть характеризован конкретным численным значением γ_i . Предлагается назвать γ_i численным индексом ЛУ. Для каждой конкретной системы ИК-видения (в том числе для пассивного видения — тепловидения [5]) могут быть рассчитаны величины γ_i -численных индексов тех ЛУ, изображения которых (при заданном наборе исходных параметров) нельзя увидеть на экране тепловизора.

Полученные выше выражения, позволяющие рассчитывать количества накопленных зарядов в канале ФЧЭ, оптически сопряженного с ЛУ — $\sum H_i(L)$ и в канале ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой — $H_{cp}(L)$, могут быть использованы для расчета предельных параметров рассматриваемой системы видения.

Пусть $Y_{лу}$ и Y_{cp} — соответственно, яркости ЛУ и сцены, измеренные в спектральном диапазоне, в котором работает система, а $YI_{лу}$ — световая яркость изображения ЛУ на экране индикаторного устройства системы.

Пусть $Y_{лу} - Y_{cp} \ll Y_{cp}$. Будем считать, что $Y_{лу} \approx z \sum H_i(L)$ и $Y_{cp} \approx z \sum H_{cp}(L)$, где z — коэффициент пропорциональности. Принимая во

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

$$Y_{лу} - Y_{cp} \Rightarrow YI_{лу} \text{ или } z(\sum H_i(L) - H_{cp}(L)) \Rightarrow YI_{лу},$$

где ПФС — передаточная функция сигнала, которую можно определить как световую яркость на экране индикаторного устройства тепловизора в функции разности температур объекта и фона [6] или в функции разности числа накопленных фотоэлектронов от объекта и фона.

Поэтому будем полагать, что существует однозначное соответствие между предельным контрастом S изображения i -го ЛУ на экране тепловизора и разностью между электрическим зарядом $q \sum H_i(L)$, накопленным в канале ФЧЭ, оптически сопряженного с i -м ЛУ и электрическим зарядом $q \sum H_{cp}(L)$, накопленным в канале ФЧЭ, оптически сопряженного со сценой, т. е. будем считать, что $S \approx y(q(\sum H_i(L) - H_{cp}(L)))$, где y — функция, устанавливающая однозначное соответствие между S и разностью соответствующих зарядов. В связи с этим будем полагать, что полезный (определяющий контраст изображения на мониторе тепловизора) электрический сигнал S пропорционален $\sum H_i(L) - H_{cp}(L)$.

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:

$$SN(L) = (\sum H_i(L) - H_{cp}(L)) / (H_i(L))^{1/2}.$$

Это выражение может быть использовано для расчета предельной дальности обнаружения ЛУ на сцене, т. е. дальности, при которой $SN(L) = 1$.

Следует отметить, что при отсутствии сцены (наблюдение объектов в космосе), т. е. при $H_{cp}(L) = 0$, полученное выражение совпадает с выражением для DR -динамическим диапазоном идеального информационного канала, использованным для оценок предельной информативности тепловидения [2].

$$DR(L) = \frac{\sum H_i(L)}{\sqrt{\sum H(L)}}.$$

В работе [2] были предложены также понятия: “потенциалы оптического изображения”, являющиеся удельными характеристиками излучения от объекта наблюдения и “представ-

ляющие собой отнесенные к полному углу $2\pi_{\text{ср}}$, 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, получим:

$$DR_0(L) = \zeta(\tau)^{-\frac{1}{2}} DR(L),$$

где

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

Представляется целесообразным (по аналогии с [2]) ввести в качестве дополнительного потенциала (характеризующего вероятность обнаружения изображения ЛУ на экране тепловизора при наличии сцены, противоизлучения окружающей среды и подсветки) SN_0 -потенциал, представляющий собой предельное отношение сигнала к шуму, нормированное к единичной площади ЛУ, единичному времени наблюдения, полусферическому углу поля зрения 2π .

$$SN_0(L) = \zeta(\tau)^{-\frac{1}{2}} SN(L).$$

Для определения предельных возможностей устройств видения в ИК-области спектра за счет локальных различий в отражательных свойствах представляется также целесообразным ввести параметр $NERD$ — эквивалентную радиационному шуму разность коэффициентов отражения и $NERD_0$ — отнесенную к полному углу $2\pi_{\text{ср}}$, площади наблюдения 1 см^2 и времени 1 с , эквивалентную радиационному шуму разность коэффициентов отражения.

$$NERD(L) = \frac{\sqrt{\sum H_i(L)}}{d \sum H_i(L)}, \quad NERD_0(L) = \zeta(\tau)^{-\frac{1}{2}} NERD(L).$$

В рамках построенной математической модели были проведены расчеты $SN(L)$, $DR(L)$, $NERD(L)$ для трех указанных выше режимов работы рассматриваемой системы видения, причем для сравнения при расчетах зависимостей $SN_{\text{ам}}(L)$, $SN_{\text{бн}}(L)$, $DR_{\text{ам}}(L)$, $DR_{\text{бн}}(L)$, $NERD_{\text{ам}}(L)$, $NERD_{\text{бн}}(L)$ противоизлучение окружающей среды не учитывалось.

На рис. 3, а и б приведены зависимости абсолютных величин $SN_b(L)$, $SN_{\text{бн}}(L)$ и $SN_{0b}(L)$, $SN_{0\text{бн}}(L)$, рассчитанные для каждого из режимов (при $D_i \geq 5 \text{ м}$). Абсолютные величины использовались для того, чтобы отобразить в логарифмическом масштабе правые ветви зависимостей $SN_b(L)$, $SN_{\text{бн}}(L)$ и $SN_{0b}(L)$, $SN_{0\text{бн}}(L)$, которые при

больших дистанциях (когда разность лучистых потоков, отраженных и излучаемых ЛУ и лучистых потоков, отраженных и излучаемых сценой, становится отрицательной) меняют положительные значения на отрицательные. При положительных значениях $SN(L)$ изображение ЛУ на экране тепловизора имеет большую яркость, чем среднее. Назовем это изображение позитивным изображением. При отрицательных значениях $SN(L)$ изображение ЛУ на экране тепловизора имеет меньшую яркость, чем среднее. Назовем это изображение негативным изображением. При $0 \leq |SN(L)| \leq 1$ 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 $SN_b(L)$, $SN_{\text{бн}}(L)$ и $SN_{0b}(L)$, $SN_{0\text{бн}}(L)$. При расчете всех зависимостей, приведенных на рис. 3, а и б, численный индекс наблюдаемого ЛУ — γ_i (определяемый T_i , R_i , $T_{\text{ср}}$, $R_{\text{ср}}$) оставался неизменным и равным -1 . Отметим, что исчезновение ЛУ с $\gamma_i = -1$ в зависимости $SN_b(L)$ и $SN_{0b}(L)$ можно было ранее "предсказать" из рассмотрения зависимости $\gamma_{ib}(L)$ (см. рис. 2).

Отметим также, что в приведенном примере исходные температуры сцены и ЛУ были выбраны, соответственно, равными 275 и 273 К для того, чтобы показать принципиальную возможность исчезновения на экране активной тепловизионной системы изображения льдины (ЛУ), плавающей на поверхности воды, при наблюдении льдины под небольшим углом к горизонту.

Из сравнения $SN_a(L)$ и $SN_{\text{ам}}(L)$, а также $SN_b(L)$ и $SN_{\text{бн}}(L)$ видно, что наличие противоизлучения приводит (при использовании широкополосного фильтра) к уменьшению SN в пассивном режиме. В активном режиме (с узкополосным фильтром) противоизлучение практически не влияет на $SN(L)$, а в активном режиме с широкополосным фильтром при отсутствии противоизлучения исчезновение ЛУ с $\gamma_i = -1$, происходит на меньшей дистанции, чем при учете противоизлучения.

Приведенные зависимости показывают, что (при выбранных исходных данных) на дистанциях до 2800 м активный режим видения обеспечивает существенно большие значения SN , чем пассивный режим.

На рис. 3, а, б приведены зависимости абсолютных величин $SN_b(L)$, $SN_{\text{бн}}(L)$ и $SN_{0b}(L)$, $SN_{0\text{бн}}(L)$, рассчитанные для каждого из режимов (при $D_i = 1,5 \text{ м}$). Абсолютные величины использовались для того, чтобы отобразить в логарифмическом масштабе правые ветви зависимостей $SN_b(L)$, $SN_{\text{бн}}(L)$ и $SN_{0b}(L)$, $SN_{0\text{бн}}(L)$,

которые при больших дистанциях (когда разность лучистых потоков, отраженных и излучаемых ЛУ и лучистых потоков, отраженных и из-

лучаемых сценой, становится отрицательной) меняют положительные значения на отрицательные.

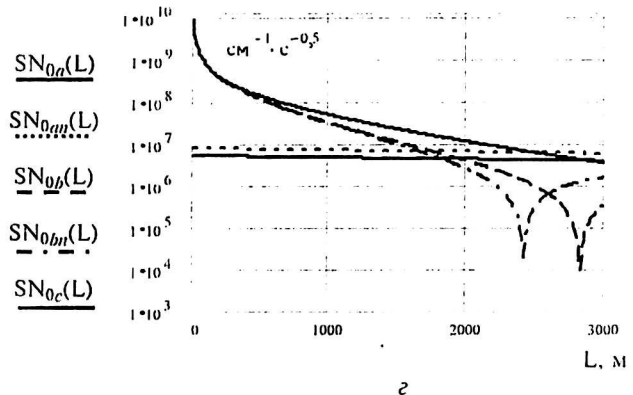
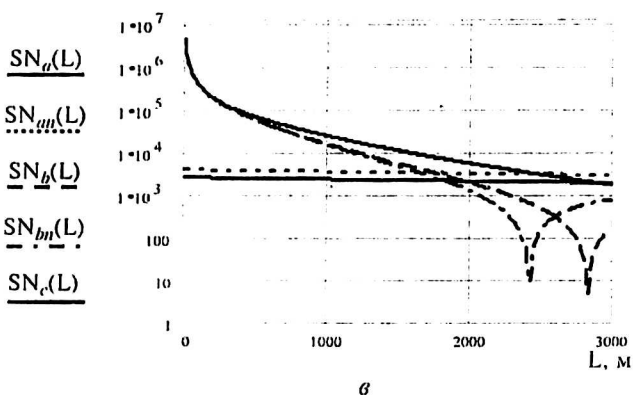
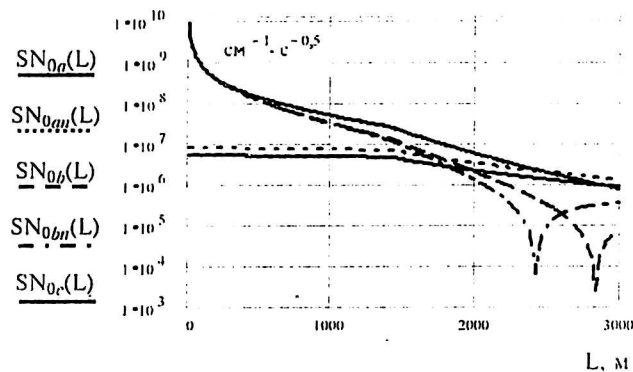
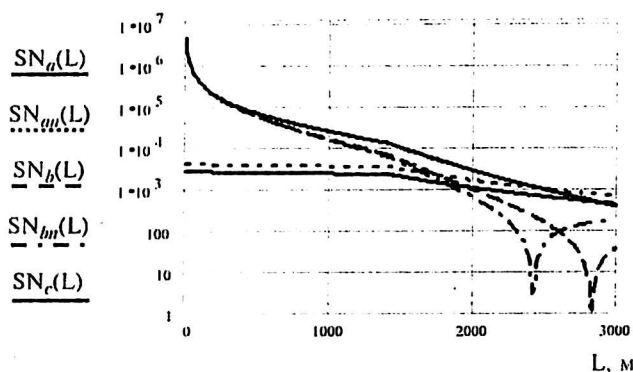


Рис. 3. Зависимости $SN(L)$ и $SN_0(L)$, рассчитанные при следующих исходных данных:

$T_{cp} = T = 275$ К, $\Delta T_i = -2$ К, $R_{cp} = 0,05$, $\Delta R_i = 0,027$, $\gamma_i = -1$. $SN_a(L)$, $SN_{0a}(L)$ и $SN_m(L)$, $SN_{0m}(L)$ (противоизлучение не учитывалось) рассчитывались при: $W = 0$, $K = 1$, $Q = 32$, $\phi = 12 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,9$, $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м; $SN_b(L)$, $SN_{0b}(L)$ и $SN_{bm}(L)$, $SN_{0bm}(L)$ (противоизлучение не учитывалось) рассчитывались при: $W = 0,001$ Дж, $K = 10^5$, $Q = 32$, $\phi = 12 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,9$, $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м; $SN_c(L)$ рассчитывалось при: $W = 0,001$ Дж, $K = 10^5$, $Q = 16$, $\phi = 6 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,7$, $\lambda_1 = 1,045 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 1,075 \cdot 10^{-6}$ м; а, б — $D_i \geq 5$ м; в, з — $D_i = 1,5$ м

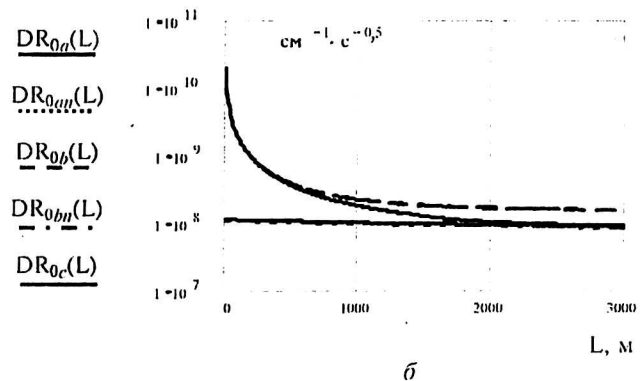
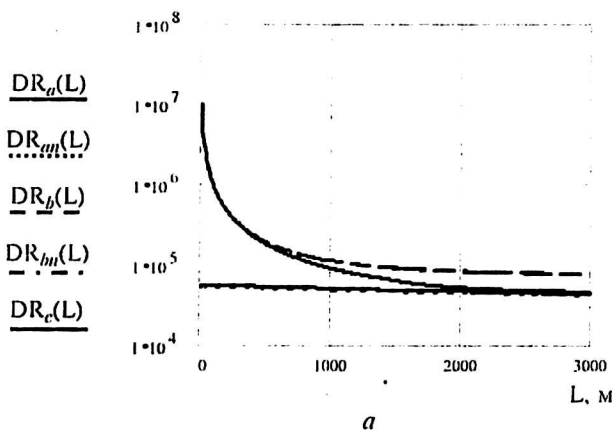


Рис. 4. Зависимости $DR(L)$ — а и $DR_0(L)$ — б, рассчитанные при следующих исходных данных:

$T_{cp} = T = 275$ К, $\Delta T_i = -2$ К, $R_{cp} = 0,05$, $\Delta R_i = 0,027$, $\gamma_i = -1$, $D_i = 1,5$ м. $DR_a(L)$, $DR_{0a}(L)$ и $DR_m(L)$, $DR_{0m}(L)$ (противоизлучение не учитывалось) рассчитывались при: $W = 0$, $K = 1$, $Q = 32$, $\phi = 12 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,9$, $\tau_f = 0,9$, $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м. $DR_b(L)$, $DR_{0b}(L)$ и $DR_{bm}(L)$, $DR_{0bm}(L)$ (противоизлучение не учитывалось) рассчитывались при: $W = 0,001$ Дж, $K = 10^5$, $Q = 32$, $\phi = 12 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,9$, $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м. $DR_c(L)$ рассчитывалось при: $W = 0,001$ Дж, $K = 10^5$, $Q = 16$, $\phi = 6 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,7$, $\lambda_1 = 1,045 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 1,075 \cdot 10^{-6}$ м

Из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 3, а, б и рис. 3, в, г видно, что когда угловые размеры ЛУ становятся меньше элементарного поля зрения тепловизионного прибора (при $L > 1300$ м $\chi < 1$), дальнейшее увеличение расстояния приводит к быстрому уменьшению $SN(L)$, причем не только для активного, но для пассивного режимов работы.

На рис. 4, а, б приведены зависимости динамического диапазона идеального информационного канала $DR(L)$, рассчитанные для каждого из трех возможных режимов наблюдения рассматриваемой системы видения.

В активных режимах на дистанциях меньших 2000 м (с узкополосным фильтром) и 3000 м (с широкополосным фильтром) достигаются существенно большие значения $DR(L)$, чем в пассивном режиме. Следует отметить, что $DR(L)$, представляющие собой отношения сигнала к дробовому шуму в отдельном канале, почти на порядок превосходят $SN(L)$.

На рис. 5 а, б приведены зависимости $NERD(L)$ и $NERD_0(L)$. Видно, что (при заданных параметрах систем видения) на дистанциях до 3000 м активный режим обеспечивает значительно большие чувствительности к локальным неоднородностям коэффициентов отражения. Например, на дистанции 1500 м активный режим имеет почти на два порядка большую чувствительность, чем пассивный режим. На коротких дистанциях разница в чувствительностях достигает трех и более порядков. Наличие противоизлучения ухудшает чувствительность, т. е. увеличивает эквивалентную радиационному шуму разности коэффициентов отражения для пассивного (в несколько раз) и активного режимов видения с широкополосным фильтром и практически не сказывается на параметрах активной системы с узкополосным фильтром.

Следует отметить, что "при эквивалентной шуму разности температур 0,1—0,2 К коммерческие тепловизоры различают локальные изменения коэффициентов отражения порядка 7,5 %.

При среднем значении коэффициента отражения в длинноволновой области около 5 % коммерческие тепловизоры в усредненных условиях теплового баланса Земли оказываются практически нечувствительными к локальным изменениям коэффициентов отражения и реагируют только на изменения температуры объектов" [2].

Таким образом, основным преимуществом видения в активном режиме перед пассивным, является большая (на два-три порядка) чувствительность к локальным неоднородностям коэффициентов отражения, которая возрастает с увеличением мощности подсветки и уменьшением дистанции. Это преимущество особенно важно в условиях, когда температуры ЛУ и сцены отличаются менее чем на десятые доли градусов, т. е. когда резко уменьшается информативность пассивного тепловидения. В этих условиях режим активного видения не имеет альтернативы.

На рис. 6 приведены зависимости $DR_{oc}(L)$, $SN_{oc}(L)$, $NERD_{oc}(L)$, рассчитанные при: $WK = 1$ Дж (где $W = 1$ Дж, $K = 1$, $NERD_{oc}(L) = 10^{10} NERD_{oc}(L)$).

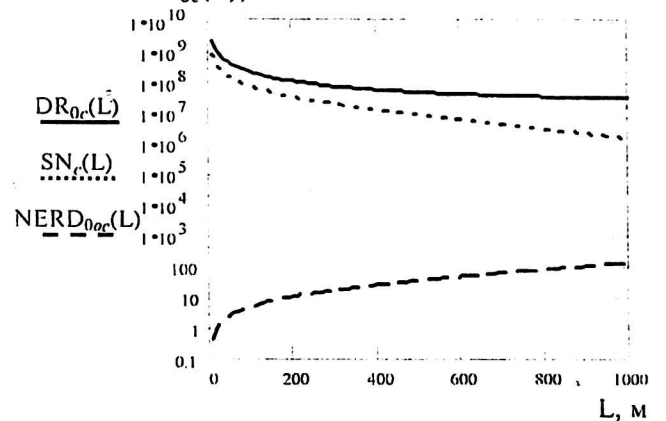


Рис. 6. Зависимости $DR_{oc}(L)$, $SN_{oc}(L)$, $NERD_{oc}(L)$, рассчитанные для активной системы с узкополосным фильтром при следующих исходных данных: $T_{cp} = T = 275$ К, $\Delta T_i = -2$ К, $R_{cp} = 0,05$, $\Delta R_i = 0,027$, $\gamma_i = -1$, $WK = 1$ Дж (где $W = 1$ Дж, $K = 1$, $NERD_{oc}(L) = 10^{10} NERD_{oc}(L)$)

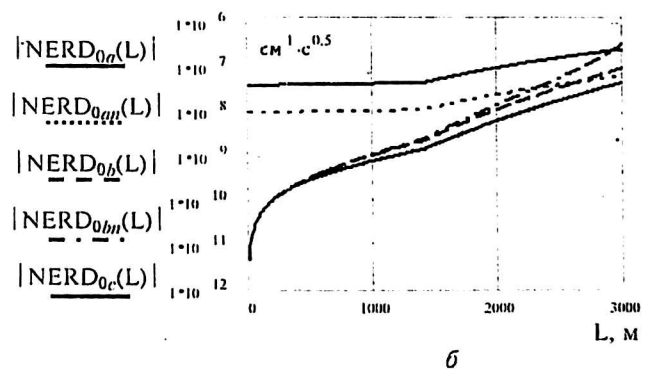
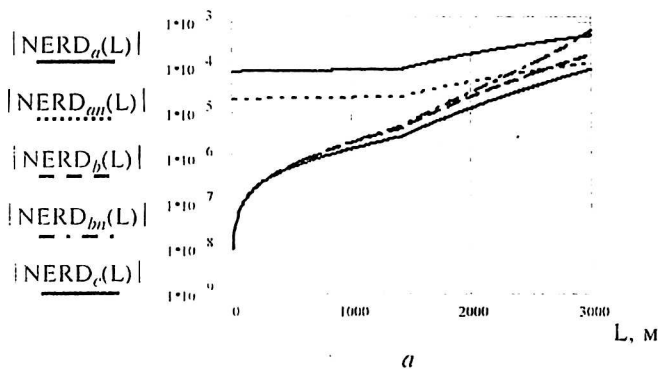


Рис. 5. Зависимости $NERD(L)$ — а, $NERD_0(L)$ — б, рассчитанные при следующих исходных данных:

$T_{cp} = T = 275$ К, $\Delta T_i = -2$ К, $R_{cp} = 0,05$, $\Delta R_i = 0,027$, $\gamma_i = -1$, $D_i = 1,5$ м. $NERD_n(L)$, $NERD_{0n}(L)$ и $NERD_{nn}(L)$, $NERD_{0nn}(L)$ (противоизлучение не учитывалось) рассчитывались при: $W = 0$, $K = 1$, $Q = 32$, $\phi = 12 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,9$, $\tau_f = 0,9$, $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м; $NERD_b(L)$, $NERD_{0b}(L)$ и $NERD_{bm}(L)$, $NERD_{0bm}(L)$ (противоизлучение не учитывалось) рассчитывались при: $W = 0,001$ Дж, $K = 10^5$, $Q = 32$, $\phi = 12 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,9$, $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 14 \cdot 10^{-6}$ м; $NERD_c(L)$ рассчитывалось при: $W = 0,001$ Дж, $K = 10^5$, $Q = 16$, $\phi = 6 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0,3$, $\tau_f = 0,7$, $\lambda_1 = 1,045 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 1,075 \cdot 10^{-6}$ м

Эти зависимости показывают предельные значения основных характеристик активной системы с узкополосным фильтром, соответствующие эффективной энергии подсветки: $WK = 1$ Дж в элементарном поле зрения тепловизионного прибора. Видно, что при увеличении дистанции до 1000 м информационный потенциал идеального канала уменьшается почти на два порядка и оценивается величиной $DR_0(1000) \approx 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-0.5}$, $SN_0(L)$ — уменьшается почти на три порядка и оценивается величиной $SN_0(1000) \approx 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-0.5}$, чувствительность к обнаружению локальных неоднородностей коэффициентов отражения ухудшается более чем на два порядка и оценивается величиной $NERD_{0c}(1000) \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ см} \cdot \text{с}^{0.5}$. Из этих данных можно сделать следующие выводы.

Для получения (в единичном канале ФЧЭ) 1 бита информации в 1 с от ЛУ, находящегося на дистанции 1000 м, активной системе с узкополосным фильтром требуется эффективная энергия подсветки не меньшая, чем $1/DR_0(1000) \approx 0,2$ эрг. Причем, эта оценка справедлива только при отсутствии сцены (в космическом пространстве или при коэффициенте отражения сцены, равном нулю). При наличии сцены (в рассматриваемом примере $R_{cp} = 0,05$ и $\Delta R_i = 0,027$) потребуется эффективная энергия подсветки не меньшая, чем $1/SN_0(1000) \approx 5$ эрг (т. е. в 25 раз больше, чем при отсутствии сцены).

Учитывать роль сцены при оценках предельной информационной емкости ИК-изображения также необходимо и при использовании пассивной тепловизионной системы, так как при наблюдениях на поверхности Земли или в нижних слоях атмосферы температура сцены в подавляющем большинстве случаев не сильно отличается от температуры ЛУ. Влиянием сцены можно пренебречь только при существенной разнице температур между ЛУ и сценой (в 30–40 °С и более) или при работе в космическом пространстве.

Поэтому для оценки информационного потенциала ИК-изображения пассивной тепловизионной системы в условиях теплового баланса Земли предлагается использовать (вместо потенциала DR_0) введенный в данной работе потенциал SN_0 , который становится равным потенциалу DR_0 только при отсутствии сцены или при разнице температур между ЛУ и сценой более чем в 30–40 °С. Величины потенциалов (в пассивном

режиме), соответственно, равны (см. рис 4, б и рис 3, з): $DR_0 \approx 1,18 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-0.5}$ и $SN_0 \approx 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-0.5}$ (при учете противоизлучения). В рассматриваемом примере потенциал ИК-изображения (из-за наличия сцены и противоизлучения) в $DR_0/SN_0 \approx 26,3$ раза меньше, чем при отсутствии сцены и противоизлучения. Если учитывать наличие сцены, но не учитывать противоизлучение, то $DR_0/SN_0 \approx 14,7$.

Следует отметить, что приведенные в работе зависимости параметров системы видения в активном режиме от дистанции, рассчитывались при следующих исходных данных: $h = 50 \cdot 10^{-6}$ м, $b = 15 \cdot 10^{-6}$ м, $\alpha_a = 0,167$ рад (или $9,55^\circ$), $D = D_a = 0,05$ м, $F = 0,05$ м, и удельной (распространяющейся в телесном угле, равном элементарному полю зрения тепловизионного прибора) энергии импульса подсветки $W = 0,001$ Дж. Апертурные отверстия и угол поля зрения квантового усилителя позволяют работать с матричным приемником с числом элементов, не превышающим $n^2 = 128 \times 128$, что при выбранных величинах D и F обеспечивает поле зрения системы видения $\approx 0,022$ ср (линейный угол поля зрения $9,55^\circ$). В этом случае для работы в активном режиме с квантовым усилителем (имеющим коэффициент усиления $K = 10^5$) требуется лазер с импульсной энергией излучения $W_p = Wn^2 (h+b)^2/h^2 \approx 27,7$ Дж.

Заключение

Предложена активная система видения, на основе несканирующего тепловизора и CO_2 -квантового усилителя изображения. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать основные параметры системы ИК-видения при работе в активном и в пассивном режимах.

В математической модели учитывались: квантовая эффективность ФЧЭ, время накопления в канале ФЧЭ, геометрические размеры матрицы, ФЧЭ и наблюдаемого объекта (ЛУ), параметры объектива, потери в оптических элементах приемопередающей системы (в квантовом усилителе, объективе, охлаждаемом фильтре), энергия и длительность импульса подсветки, коэффициент усиления и длительность импульса усиления, температуры и коэффициенты отражения (излучения) сцены и ЛУ, противоизлучение окружающей среды, потери при прохождении оптического излучения в атмосфере.

В рамках разработанной математической модели проведены расчеты основных параметров предложенной системы видения для трех возможных режимов работы: пассивного — ТВП с охлаждаемым широкополосным фильтром; активного — ТВП с охлаждаемым широкополосным фильтром; активного — ТВП с охлаждаемым узкополосным фильтром.

Проведено исследование предельных величин отношения сигнал/шум и других параметров в зависимости от расстояний до объектов наблюдения, коэффициента усиления квантового усилителя и эффективной энергии импульса подсветки (W_K), характеристик объектива, ширины спектральной полосы пропускания охлаждаемого фильтра тепловизора, а также характеристик ЛУ и сцены.

Предложено характеризовать каждый ЛУ ОН численным индексом γ_i . Показано, что для каждой конкретной системы ИК-видения (в том числе и для пассивного видения — тепловидения) могут быть рассчитаны (по предложенной формуле) величины γ_i — численных индексов тех ЛУ, изображения которых (при заданном наборе исходных параметров) нельзя увидеть на экране тепловизора. Получено выражение для определения предельной дальности обнаружения ЛУ.

Предложено (в дополнение к двум потенциалам оптического изображения (ОИ): $NETD^*$ и DR^* , впервые введенных в [2] для оценки предельных параметров тепловизоров), использовать для этих целей также новые потенциалы ОИ: потенциал SN_0 (характеризующий предельную возможность обнаружения ЛУ на экране тепловизора), представляющий собой отношение разности числа накопленных фотоэлектронов от ФЧЭ, оптически сопряженных, соответственно, с ЛУ и сценой к дробовому шуму фотонов, приведенное к полному углу $2\pi sr$, площади наблюдения 1 см^2 и времени 1 с и потенциал $NERD_0$ — эквивалентную радиационному шуму разность коэффициентов отражения, приведенную к полному углу $2\pi sr$, площади наблюдения 1 см^2 и времени 1 с .

Показано, что для получения (в единичном канале ФЧЭ) 1 бита информации в 1 с от ЛУ, находящегося на дистанции 1000 м , активной системе с узкополосным фильтром требуется

эффективная энергия подсветки не меньшая, чем $1/DR_0(1000) \cong 0,2 \text{ эрг}$. Причем, эта оценка справедлива только при отсутствии сцены (в космическом пространстве или при коэффициенте отражения сцены, равном нулю). При наличии сцены (в рассматриваемом примере $R_{cp} = 0,05$ и $\Delta R_i = 0,027$) потребуются эффективная энергия подсветки не меньшая, чем $1/SN_0(1000) \cong 5 \text{ эрг}$ (т. е. в 25 раз больше, чем при отсутствии сцены).

В результате проведенных исследований показана возможность и целесообразность построения АСВ, содержащей несканирующий тепловизор, импульсный CO_2 -квантовый усилитель изображения и импульсный CO_2 -лазер подсветки.

Показано, что АСВ имеют преимущества перед тепловидением при наблюдении объектов, температуры и коэффициента отражения, которые мало отличаются от аналогичных параметров сцены. АСВ в зависимости от произведения W_K могут обнаруживать на дистанциях до $3000\text{--}5000 \text{ м}$ практически любые представляющие интерес локальные изменения коэффициента отражения.

АСВ, не заменяя тепловидение, позволяют получать дополнительную информацию об объекте (в том числе информацию о расстоянии до объекта наблюдения). Изображения, полученные с помощью АСВ, более естественны и легче распознаются, чем тепловые изображения, получаемые за счет собственного излучения ОН.

Литература

1. Свиридов А. Н., Мартынов С. Н. Фотоприемные устройства с CO_2 -квантовыми усилителями для активных ИК-систем//Оптический журнал. 1996. № 6. С. 67—70.
2. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Предельная чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения//Там же. С. 18—41.
3. 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. P. 177—184.
4. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. Том 1. — М.: Мир, 1995.
5. 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.

Calculation of utmost parameters of active vision system based on non-scanning thermal imager

A. N. Sviridov

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

An active vision system (AVS) based on a non-scanning thermal imager and CO₂-quantum image amplifier is offered. AVS mathematical model within which investigation of utmost signal/noise values and other system parameters depending on the distances to objects under observation (OO), illumination pulse energy (W), amplification factor (K) of quantum amplifier, objective lens characteristics, spectral band width of a cooled filter of a thermal imager as well as OO characteristics and a scene is developed. As a result of carried out researches the opportunity and expediency of designing AVS, having a non-scanning thermal imager, pulse CO₂-quantum image amplifier and pulse CO₂-illumination laser is shown. It is shown that AVS have advantages over thermal imaging at observation of objects, temperature and reflection factors of which differ slightly from similar parameters of the scene. Basically, AVS have no similar restrictions and depending on WK product can detect at a distance of up to 3000—5000 m practically and local changes (you are interested in) of a reflection factor. AVS not replacing thermal imaging allow to receive additional information about OO. The images received with the help of AVS are more natural and recognized more easy than thermal images received at the expense of OO own radiation. For quantitative determination of utmost values of AVS sensitivity it is offered to introduce a new parameter NERD — radiation nose equivalent reflection factors difference.

* * *