

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 621.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ С МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

¹⁾Добровольская Е. В., ²⁾Колобродов В. Г., ¹⁾Лихолит Н. И., ¹⁾Тягур В. М.

¹⁾Казенное предприятие специального приборостроения «Арсенал», г. Киев, Украина;

²⁾Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина
doekaterin@gmail.com

Тепловизионные приборы наблюдения используются для решения широкого круга задач военного назначения, поэтому при их разработке оценка характеристик играет важную роль. Целью статьи является разработка математической модели процесса формирования сигнала на выходе микроболометрической матрицы тепловизионного прибора наблюдения, учитывающая параметры объекта, фона, атмосферы, оптической системы и приемника излучения. На основе полученной модели необходимо рассчитать основные обобщенные характеристики прибора: эквивалентной шуму разности температур, минимальной разрешаемой разности температур и минимальной обнаруживаемой разности температур.

Анализ результатов исследований показал, что улучшить характеристики тепловизионного прибора наблюдения можно за счет использования чувствительной микроболометрической матрицы и уменьшения частоты кадров. Также для улучшения пространственного и энергетического разрешения тепловизионного прибора наблюдения целесообразно уменьшать размер пикселя микроболометрической матрицы.

Ключевые слова: минимальная разрешаемая разность температур, минимальная обнаруживаемая разность температур, микроболометрическая матрица.

Введение

Тепловизионным приборам наблюдения уделяется особое внимание, поскольку они играют одну из самых важных ролей в системах наведения и защиты военной техники [1].

Неохлаждаемые микроболометрические матрицы широко используются в приборах наблюдения, работающих в ИК спектре излучения. Они позволяют значительно упростить конструкцию систем наблюдения и обеспечивают их эффективную работу [2]. Расчет основных параметров и характеристик тепловизионного прибора наблюдения (ТПН), является основанием для разработки рекомендаций относительно повышения эффективности его работы и выбора элементной базы.

Для эффективного моделирования процесса формирования видеосигнала на выходе микроболометрической матрицы необходимо учитывать параметры объекта и фона, атмосферы, оптической системы и приемника излучения [3].

Постановка задачи

Целью статьи является разработка общей математической модели теплови-

зионного прибора наблюдения с микроболометрической матрицей, на основе которой осуществляется расчет основных обобщенных параметров и характеристик, таких как эквивалентная шуму разность температур и минимальная разрешаемая разность температур.

Математическая модель системы «объект – атмосфера – ТПН»

Математическая модель позволяет оценить влияние оптической системы, микроболометрической матрицы и режимов ее работы на характеристики прибора наблюдения.

Формирование сигналов в ТПН удобно рассмотреть на обобщенной схеме системы «объект – атмосфера – ТПН» (рис. 1). Собственное излучение от объекта наблюдения и фона проходит через атмосферу и поступает во входной зрачок оптической системы (ОС). Оптическая система формирует инфракрасное изображение объекта и фона в плоскости приемника излучения (ПИ). Приемник излучения преобразует поток излучения в электрический видеосигнал. Считывание видеосигнала с пикселей матрицы создает одномерный электрический сигнал, который поступает в радиокомандную линию спутника.

Рассмотрим математические модели отдельных составляющих системы «объект – атмосфера – ТПН».

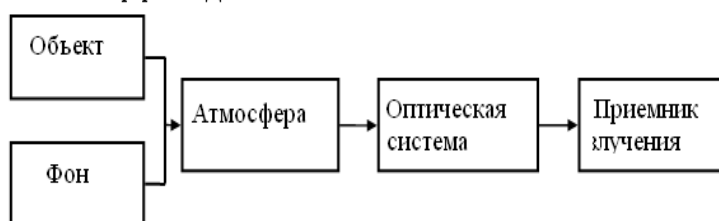


Рис. 1. Обобщенная схема системы «объект – атмосфера – ТПН»

Все тела определенной температуры являются источниками собственного теплового излучения. Объекты и фоны характеризуются пространственными (геометрические размеры), энергетическими (яркость) и временными (положение в пространстве) параметрами. Причем для объектов эти параметры описываются, как правило, детерминированными функциями, а для фонов – случайными.

Большинство объектов и фонов излучают согласно закону Ламберта

$$M_s = \pi L_s, \quad (1)$$

где M_s и L_s – энергетическая светимость и яркость поверхности соответственно. Для таких объектов и фонов светимость удобно определять распределением температуры и спектрального коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda)$. При этом спектральная светимость определяется функцией Планка $M_\lambda(\lambda, T)$ [4]:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) M_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (2)$$

где $c_1 = 37415 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{мкм}^4$, $c_2 = 14388 \text{ мкм}\cdot\text{К}$ – постоянные коэффициенты; λ – длина волны, мкм.

Для предварительного математического моделирования будем считать, что:

1. Объект наблюдения и фон являются ламбертовскими источниками излучения.
2. Объект и фон являются «серыми» телами с коэффициентами излучения $\epsilon_{\text{т}}$ и $\epsilon_{\text{ф}}$ соответственно.
3. Поверхность объекта и фона имеют постоянную температуру $T_{\text{т}}$ и $T_{\text{ф}}$, которая мало изменяется за время формирования кадра.

Излучение от объектов и фонов, прежде чем попасть во входной зрачок ТПН, проходит атмосферу, где оно ослабевает. Для спектрального диапазона $\lambda_2 - \lambda_1 = 8 - 14 \text{ мкм}$ при обобщенном моделировании полагают, что средний коэффициент пропускания безоблачной атмосферы при наблюдении земной поверхности со спутника равен $\tau_{\text{А}} = 0,75$ [2].

Оптическая система

Оптическая система ТПН состоит из двух основных компонентов – инфракрасного объектива и набора спектральных фильтров. Объектив предназначен для формирования изображения в плоскости ПИ с необходимым пространственным разрешением (качеством изображения) и энергетическим разрешением (светосилой). Фильтры обеспечивают работу ТПН в заданном спектральном диапазоне.

Объектив имеет следующие характеристики:

- заднее фокусное расстояние $f'_o = 112,8 \text{ мм}$;
- диафрагменное число $k_{\text{эфф}} = 1$;
- интегральный коэффициент пропускания в диапазоне $\lambda_2 - \lambda_1 = 8 - 13,5 \text{ мкм}$ $\tau_o = 0,8$;
- диаметр кружка рассеяния $2r_o = 25 \text{ мкм}$.

В ТПН используется четыре сменных узкополосных интерференционных фильтра, формирующих на уровне $0,5\tau_{f,\text{max}}$ спектральные диапазоны:

$$\lambda_{11} - \lambda_{21} = 8,0 - 13,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{12} - \lambda_{22} = 10,5 - 11,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{13} - \lambda_{23} = 11,5 - 12,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{14} - \lambda_{24} = 12,5 - 13,5 \text{ мкм}.$$

Спектральный коэффициент пропускания для λ_{max} каждого поддиапазона не менее 0,8. Поэтому при моделировании фильтров будем считать, что средний коэффициент пропускания каждого фильтра $\tau_f = 0,8$.

Пространственное разрешение объектива определяется его модуляционной передаточной функцией (МПФ) $M_o(v_x, v_y)$, которая для дифракционно ограни-

ченних об'єктивів визначається формулою [3]

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} (\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{когда } 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{когда } x > 1, \end{cases} \quad (3)$$

где $x = \lambda k_{eff} v_x$.

В [3] використовується апроксимація вираження (3) лінійною функцією

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - 1,218x, & \text{когда } 0 \leq x \leq 0,821; \\ 0, & \text{когда } x > 0,821. \end{cases} \quad (4)$$

Приемник излучения

Микроболометрическая матрица представляет собой тепловой ПИ и поэтому является неселективным приемником в рабочем спектральном диапазоне, т. е. её чувствительность и удельная обнаружительная способность являются постоянными величинами.

Выберем из документации те параметры матрицы, которые будем использовать в математической модели ТПН:

- эквивалентная шуму разность температур в обоих случаях (ЭШРТ) $NETD_D = 50 \text{ мК}$;
- формат матрицы $p_D \times q_D = 384 \times 288$;
- размер пикселя $V_D \times W_D = 25 \times 25 \text{ мкм}^2$;
- частота кадров $f_f = 60 \text{ Гц}$.

При этом ЭШРТ, как параметр ПИ, рассчитывается по формуле [3]

$$NETD_D = \frac{4}{\sqrt{2A_D} t_i D_{th}^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_0)}{\partial T} d\lambda}, \quad (5)$$

где A_D – площадь пикселя; $T_0 = 300\text{К}$ – референтна температура; t_i – время интегрирования, которое можно изменять в пределах от 0 до $t_f = \frac{1}{f_f} = 0,02 \text{ с}$, где t_f – период кадровой развертки.

При моделировании ПИ часто используется его пространственная МПФ, которая определяется размером пикселя. Для пикселя прямоугольной формы $V_D \times W_D$ при постоянном распределении чувствительности в пределах пикселя МПФ определяется функцией [3]

$$M_D(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x} \frac{\sin(\pi W_D v_y)}{\pi W_D v_y}. \quad (6)$$

На практике наибольшая пространственная частота, которая может передаваться ПИ с дискретной структурой, согласно теореме Найквиста, равняется половине частоты следования пикселей.

Электронные устройства аналоговой и цифровой обработки

В большинстве случаев при математическом моделировании электронный тракт рассматривают как линейную систему с МПФ $M_{EL}(f)$, которую можно

определить как

$$M_{El}(f) = \frac{C_{El}(f)}{C_{El,max}}, \quad (7)$$

где $C_{El}(f)$ – коэффициент усиления на частоте f ; $C_{El,max}$ – максимальное значение коэффициента усиления. Максимальная частота функции $M_{El}(f)$ определяется временем считывания одного пикселя t_0 , т.е.

$$f_{max} = \frac{1}{2t_0}. \quad (8)$$

Для аппроксимации МПФ $M_{El}(f)$, которая описывает низкочастотный фильтр, используют фильтры Баттерворда [5]:

$$M_{El}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_{3db}} \right)^{2n} \right]^{-0.5}, \quad (9)$$

где f_{3db} – частота, на которой амплитуда выходного сигнала уменьшается на 3 db или в $\sqrt{2}$ раз; n – порядок фильтра.

Предположим, что электронный тракт незначительно искажает видеосигнал, т.е. его МПФ $M_{El}(f) \cong 1$.

Определение основных характеристик ТПН

Обобщенные характеристики ТПН или критерии качества – это мера успешного выполнения задач, которые стоят перед прибором. Такими характеристиками являются:

- эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ) **NETD** – Noise Equivalent Temperature Difference;
- минимальная обнаруживаемая разность температур (МОРТ) **MDTD** – Minimum Detectable Temperature Difference;
- минимальная разрешаемая разность температур (МРРТ) – **MRTD** – Minimum Resolution Temperature Difference.

ЭШРТ – это разность температур между стандартным тест-объектом и фоном, которые излучают как абсолютно черное тело (АЧТ), при которой отношение пикового значения сигнала на выходе стандартного эталонного фильтра к шуму равняется единице.

Тест-объект должен иметь угловые размеры, которые в несколько раз превышают угловые размеры пикселя матрицы $\alpha_D \times \beta_D$, чтобы исключить влияние пространственного разрешения ТПН на ЭШРТ.

Для расчета ЭШРТ будем использовать формулу [3]

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda)\tau_O(\lambda)\tau_f(\lambda)D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda,T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (10)$$

где k_{eff} – эффективное диафрагменное число; $\tau_A(\lambda)$, $\tau_O(\lambda)$, $\tau_f(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания атмосферы, оптической системы, фильтра соответственно; $D^*(\lambda)$ – спектральная удельная обнаружительная способность

приемника излучения (ПИ); $M_\lambda(\lambda, T)$ – функция Планка; Δf – эффективная шумовая полоса пропускания; A_D – площадь пикселя матричного ПИ; $\lambda_1 - \lambda_2$ – рабочий спектральный диапазон работы СДИК.

МОРТ – это минимальная разность температур между тест-объектом и фоном, которые излучают как АЧТ, необходимая для обнаружения изображения тест-объекта при неограниченном времени наблюдения и заранее известному его положению на экране. При расчете МОРТ используют тест-объект, аналогичный тест-объекту при расчете ЭШРТ.

Для расчета МОРТ будем использовать формулу [3]

$$MDTD(\xi_t) = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{s,n}} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{2 \xi_t^2 \Delta f \cdot t_{off} t_E}}, \quad (11)$$

где $NETD$ – эквивалентная шуму разность температур; SNR_d – отношение сигнал/шум в изображении объекта на экране дисплея, которое позволяет обнаружить изображение объекта с заданной вероятностью P_d ; $\bar{L}_{s,n}$ – нормированное распределение яркости изображения тест-объекта на экране дисплея; ξ_t – угловой размер объекта наблюдения; f_f – частота кадров; $t_E = 0,2$ с – постоянная времени глаза.

МРРТ – это минимальная разность эффективных температур между штрихами тест-объекта с заданной пространственной частотой и фоном, которая позволяет визуально на экране дисплея разрешать штрихи объекта. Тест-объект – это четырехштриховая мира Фуко, в которой штрихи и промежутки между ними имеют одинаковую ширину $\xi_{tp,x} = \omega_{tp}$, а их высота равняется $7\omega_{tp}$. Полосы и промежутки излучают как АЧТ. Для расчета МРРТ будем использовать формулу [3]

$$MRTD(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_{off} t_E}}, \quad (12)$$

где SNR_r – отношение сигнал/шум в изображении штриховой миры, которое обеспечивает обнаружение штрихов с заданной вероятностью P_d ; $NETD$ – эквивалентная шуму разность температур СДИК; v_x – пространственная частота в мрад⁻¹; $M_s(v_x)$ – модуляционная передаточная функция ТПН; α_D, β_D – угловые размеры пикселя ПИ в мрад.

Расчет основных характеристик ТПН

Расчет ЭШРТ выполним по формуле (10), представив её в упрощенном виде с учетом интегральных коэффициентов атмосферы τ_A , ОС τ_o , фильтра τ_f и постоянного значения обнаружительной способности теплового приемника:

$$D^*(\lambda) = D_{th}^* = const. \quad (13)$$

Тогда формула (10) имеет вид

$$NETD_i = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_A \tau_o \tau_{fl} D_{th}^* \int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\Delta f}, \quad (14)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номер фильтра.

Поскольку в паспортных данных на микроболометрические матрицы вместо удельной обнаружительной способности D_{th}^* приводится ЭШРТ $NETD_D$, определяем параметр D_{th}^* из формулы (5) и подставляем его в формулу (14):

$$NETD_i = NETD_D \frac{k_{eff}^2 \sqrt{2t_i \Delta f}}{\tau_A \tau_o \tau_{fl} k_{\Delta\lambda, i}}, \quad (15)$$

где

$$k_{\Delta\lambda, i} = \frac{\int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_{10}}^{\lambda_{20}} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T_0)}{\partial T} d\lambda} \quad (16)$$

– коэффициент использования спектрального диапазона.

Если время интегрирование равно периоду кадровой развертки, т. е. $t_i = 1/f_f$, то $2t_i \Delta f = 1$. После подстановки исходных параметров в формулу (15) имеем

$$NETD_i = 0,05 \frac{1}{0,75 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot k_{\Delta\lambda, i}} = \frac{0,1042}{k_{\Delta\lambda, i}}.$$

Результаты расчетов ЭШРТ СДИК для различных спектральных диапазонов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Эквивалентная шуму разность температур СДИК, К

Температ. фона, К	Спектральный диапазон, мкм				
	8 – 13,5	8 – 10,5	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5	12,5 – 13,5
300	0,083	0,205	0,619	0,717	0,841
288	0,093	0,236	0,688	0,786	0,910

Расчет МОРТ выполним по формуле (11). Известными являются $NETD_i$ (табл. 1), частота кадров $f_f = 60$ Гц и постоянная времени зрительного анализатора $t_E = 0,2$ с. Определим значения остальных параметров, входящих в формулу (11).

Типовое отношение сигнал/шум $SNR_d = 4,3$ выбираем из табл. 3.22 [1] для порогового отношения $SNR_{th} = 3$ и вероятности обнаружения $P_d = 0,9$. Угловые размеры пикселя микроболометрической матрицы равны

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o'} = \frac{25}{112,8} = 0,222 \text{ мрад},$$

Угловой размер объекта наблюдения ξ_t определяется линейными размерами объекта V_t (200 м и 500 м) и высотой полета спутника $h_f = 668$ км:

$$\xi_{t1} = \frac{V_t}{h_f} = \frac{200}{668} = 0,299 \text{ мрад};$$

$$\xi_{t2} = \frac{v_t}{h_f} = \frac{500}{668} = 0,749 \text{ мрад.}$$

Нормированное значение яркости изображения объекта определяем из табл. 4.1 [3]. Для этого необходимо определить радиус кружка рассеяния r_s СДИК.

Определим радиус r_s из аппроксимации модуляционной передаточной функции ТПН гауссовой функцией [3]

$$M_{s,a}(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_x^2). \quad (17)$$

МПФ ТПН определяется, в основном, МПФ объектива $M_o(v_x)$ и МПФ ПИ $M_D(v_x)$. МПФ дифракционно ограниченного объектива описывается функцией (4), которую представим в виде

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - 1,218 \frac{v_x}{v_m}, & \text{когда } 0 \leq v_x \leq 0,821 v_m; \\ 0, & \text{когда } x > 0,821 v_m. \end{cases} \quad (18)$$

где $v_m = \frac{D_F}{\lambda} = \frac{112,8}{11} = 10,25 \text{ мрад}^{-1}$ – предельная угловая пространственная частота. Модуляционная передаточная функция ПИ определяется угловым размером пикселя $\alpha_D = 0,222 \text{ мрад}$ и согласно (6) имеет вид

$$M_D(v_x) = \frac{\sin(\pi \alpha_D v_x)}{\pi \alpha_D v_x}. \quad (19)$$

Если рассматривать ТПН как линейную инвариантную систему, то её МПФ определяется произведением МПФ объектива и ПИ

$$M_s(v_x) = M_o(v_x) M_D(v_x) = \left(1 - 1,218 \frac{v_x}{v_m}\right) \frac{\sin(\pi \alpha_D v_x)}{\pi \alpha_D v_x}. \quad (20)$$

Аппроксимация функции (20) функцией (17) производится исходя из условия

$$M_s(v_{x0}) = M_{s,a}(v_x) = 0,5. \quad (21)$$

Решим систему трансцендентных уравнений (21) с использованием программного пакета Mathcad и получим значение пространственной частоты при размере пикселя 25 мкм $v_{x0} = 2,14 \text{ мрад}^{-1}$. Из уравнения $M_{s,a}(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_{x0}^2) = 0,5$ имеем $2\pi^2 r_s^2 v_{x0}^2 = \ln 2$. Откуда

$$r_s = \sqrt{\frac{\ln 2}{2} \frac{1}{\pi v_{x0}}} = 0,088 \text{ мрад.}$$

Определяем относительные угловые размеры объектов наблюдения

$$\frac{\xi_{t1}}{r_s} = \frac{0,299}{0,088} = 3,4; \quad \frac{\xi_{t2}}{r_s} = \frac{0,75}{0,088} = 8,5.$$

Из табл. 4.1 [3] находим $\bar{L}_{s,n1}(3,4) = 0,29$ и $\bar{L}_{s,n2}(8,5) = 0,54$.

В большинстве случаев эффективная шумовая полоса определяется временем считывания сигнала одного пикселя из условия $2\Delta f \cdot t_o = 1$.

Подставляем все найденные параметры в формулу (11)

$$MDTD_i(\xi_{t1}) = NETD_i \frac{4,3}{0,29} \sqrt{\frac{0,222 \cdot 0,222}{0,3^2 \cdot 60 \cdot 0,2}} = 3,2 \cdot NETD_i;$$

$$MDTD_i(\xi_{t2}) = NETD_i \frac{4,3}{0,54} \sqrt{\frac{0,222 \cdot 0,222}{0,75^2 \cdot 60 \cdot 0,2}} = 0,7 \cdot NETD_i.$$

Используя значения ЭШРТ ТПН из табл. 1, рассчитываем значения МОРТ при значениях температуры фона $T_b = 300$ К и $T_b = 288$ К для различных спектральных диапазонов. Результаты расчета МОРТ СДИК представлены в табл. 2.

Таблица 2. Минимальная обнаруживаемая разность температур СДИК, К

Размер объекта, м	Спектральный диапазон, мкм				
	8 – 13,5	8 – 13,5	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5	12,5 – 13,5
25 мкм, $T_b = 300$ К					
200	0,267	0,656	1,982	2,295	2,691
500	0,058	0,144	0,434	0,502	0,589
25 мкм, $T_b = 288$ К					
200	0,299	0,754	2,200	2,514	2,913
500	0,065	0,165	0,481	0,550	0,637

Расчет МРРТ выполним по формуле (12). Известными параметрами в уравнении (12) являются: $NETD$; $\alpha_D = \beta_D = 0,222$ мрад; $t_E = 0,2$ с; $\Delta f \cdot t_o = 0,5$; $f_f = 60$ Гц; $SNR_r = 4,3$ для вероятности обнаружения штрихов $P_d = 90$ %.

МПФ ТПН моделируется аппроксимацией (17). Подставляем все указанные параметры и функцию (17) в формулу (12)

$$MRTD(v_x) = 0,66 \cdot 4,3 \cdot NETD \frac{v_x}{\exp(-2\pi^2 \cdot 0,088^2 v_x^2)} \sqrt{\frac{0,222 \cdot 0,222}{0,5 \cdot 60 \cdot 0,2}}$$

$$MRTD(v_x) == 0,257 NETD \cdot v_x \cdot \exp(0,15 v_x^2).$$

На рис. 2 представлен график функции $MRTD(v_x)$ ТПН для спектрального диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 8 - 13,5$ мкм.

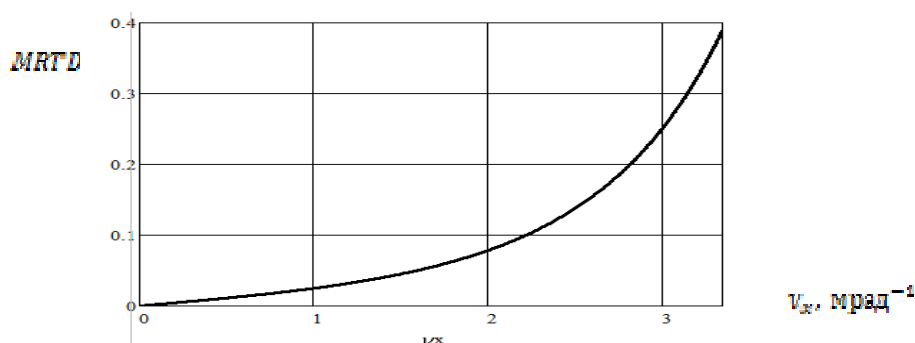


Рис. 2. МРРТ ТПН для спектрального диапазона 8 – 13,5 мкм, при температуре $T_b = 300$ К: кривая соответствует размеру пикселя приемника 25 мкм

Анализ основных характеристик ТПН и рекомендации по выбору элементной базы сканера

Температурное разрешение ТПН определяется ЭШРТ, которая рассчитывается по формуле (10). Анализ этой формулы показывает, что уменьшить параметр $NETD$ можно следующим образом:

1. Использование светосильных объективов с малым диафрагменным числом $k_{eff} = f'_o / D_p$ и высоким коэффициентом пропускания τ_o . Это наиболее эффективный способ, так как $NETD \sim k_{eff}^2$. На рис. 3 приведен график зависимости ЭШРТ от относительного отверстия объектива.

2. Использование ПИ с высокой удельной обнаружительной способностью $D^*(\lambda)$ или микроболометрической матрицы с малым значением параметра $NETD_D$. Из соотношения (15) следует, что ЭШРТ линейно зависит от $NETD_D$.

3. Уменьшение эффективной шумовой полосы Δf электронного тракта. Однако для получения высокого пространственного разрешения эту полосу необходимо увеличивать. Поэтому Δf выбирается из компромисса между пространственным и температурным разрешениями. Полосу пропускания можно уменьшить за счет уменьшения частоты кадров так как $\Delta f \propto f_f$. Используя формулу (10) легко установить зависимость

$$NETD(f_f) = NETD(f_{f0}) \sqrt{\frac{f_f}{f_{f0}}}, \quad (22)$$

где $f_{f0} = 60$ Гц – частота, при которой определялся параметр $NETD_D$ микроболометрической матрицы.

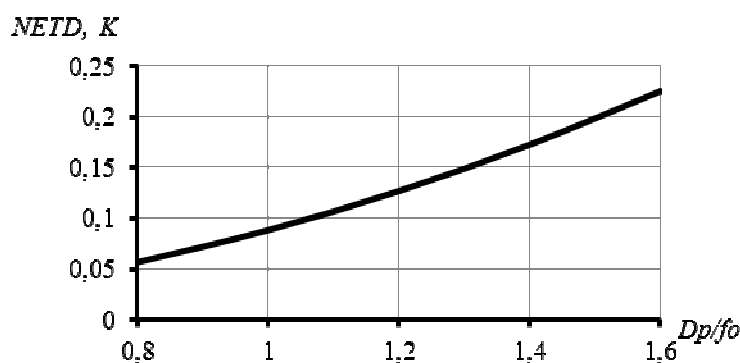


Рис. 3. Зависимость эквивалентной шуму разности температур $NETD$ от относительного отверстия объектива D_p/f'_o для спектрального диапазона $\lambda_{14} - \lambda_{24} = 8,0 - 13,5$ мкм

4. Из формулы (10) также следует, что $NETD \sim 1/\sqrt{A_D}$, т.е. увеличение площади пикселя приводит к уменьшению ЭШРТ. Однако угловое пространственное разрешение ТПН $\delta\omega_s \sim V_f \sim \sqrt{A_D}$. Поэтому площадь пикселя, которая глав-

ным образом определяет пространственное разрешение, выбирают минимальной. Как правило, она ограничена дифракцией света в объективе и для спектральной области 8 – 14 мкм составляет 25×25 мкм². Пространственное разрешение ТПН можно улучшить, если использовать микроболометрическую матрицу с размером пикселя 17×17 мкм².

Управлять ЭШРТ *NETD* можно за счет изменения времени накопления (интегрирования) t_i . Из формул (10) и (14) определим зависимость ЭШРТ от времени накопления

$$NETD(t_i) = NETD(1/f_f) \sqrt{\frac{1}{t_i f_f}}. \quad (23)$$

Минимальная обнаруживаемая разность температур *MDTD*, определяемая формулой (11), и минимальная разрешаемая разность температур *MRTD*, определяемая формулой (12), линейно зависят от ЭШРТ *NETD*. Поэтому уменьшением *NETD* можно уменьшить МОРТ и МРРТ.

Выводы

Улучшить характеристики рассматриваемого ТПН можно за счет использования микроболометрической матрицы с *NETD < 60 мК* или уменьшения частоты кадров. Однако увеличение периода кадровой развертки приводит к смазу изображения за счет движения спутника, что скажется на качестве изображения.

Также для уменьшения значений МРРТ и МОРТ целесообразно использовать микроболометрическую матрицу с размером пикселя 17 мкм, которая также обеспечивает улучшение пространственного разрешения ТПН.

Литература

1. Козинцев В. И. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учеб. пособие для вузов / В. И. Козинцев, В. М. Орлов, М. Л. Белов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.
2. Tissot J. L. IR detection with uncooled focal plane arrays. State-of-the-art and trends // Opto-electronics review. – 2004. – №12 (1). – P. 105-109.
3. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ». – 2007. – 364 с.
4. Wolf W. L. Introduction to Infrared System Design. – SPIE Optical Engineering Press. – 1996. – 132 p.
5. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance. – JCD Publishing, Winter Park, Florida USA. – 2000. – 454 p.

Надійшла до редакції
08 жовтня 2014 року

© Добровольская Е. В., Колобродов В. Г., Лихолит Н. И., Тягур В. М., 2014