

УДК 621.384.3

В. Г. Колобродов¹, М. І. Лихоліт², В. М. Тягур²

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

² Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ

МІНІМАЛЬНА РОЗДІЛЮВАНА РІЗНИЦЯ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОВІЗОРА АЕРОКОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ

Розроблено метод розрахунку мінімальної розділюваної різниці температур (МРРТ) тепловізійних систем спостереження, в якому вплив дисплея і спостерігача на МРРТ виключається. На основі математичної моделі тепловізора аерокосмічного базування отримано рівняння для розрахунку МРРТ. Розглянуто приклад застосування розробленого методу для розрахунку МРРТ тепловізора, який використовує мікроболометричну матрицю, для дистанційного зондування Землі.

ВСТУП

Сучасні тепловізійні системи спостереження (ТПСС) знаходять широке застосування в різних галузях діяльності людини, зокрема як космічні і авіаційні системи спостереження земної поверхні [2, 5]. Основними узагальненими характеристиками ТПСС є просторове і енергетичне (температурне) розділення, які об'єднуються функцією під назвою мінімальна розділювана різниця температур (МРРТ). Є ряд стандартів і методів, що визначають МРРТ, в яких тепловізійні зображення аналізується спостерігачем на екрані дисплея [1, 3]. Однак такий підхід неможливо застосувати до ТПСС, розташованих на супутниках або безпілотних літальних апаратах, де спостерігач і дисплей відсутні.

Метою статті є розробка нового методу розрахунку мінімальної розділюваної різниці температур тепловізійних систем спостереження, в якому вплив дисплея і спостерігача на величину мінімальної розділюваної різниці температур виключається.

РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНОЇ РОЗДІЛЮВАНОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР

Класичне визначення МРРТ формулюється таким чином. *Мінімальна розділювана різниця тем-*

ператур $MRTD(v_x)$ (Minimum Resolvable Temperature Difference) — це мінімальна різниця ефективних температур між штрихами тест-об'єкта з заданою просторовою частотою і фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея розділяти (спостерігати роздільно) штрихи тест-об'єкта. Тест-об'єкт — це 4-штрихова міра Фуко, в якій штрихи і проміжки між ними мають однакову ширину $\xi_{p,x} = \omega_p$, а їхня висота дорівнює $\xi_{p,y} = 7\omega_p$. Штрихи і проміжки міри випромінюють як абсолютно чорне тіло. Просторова частота $v_x = 1/2\omega_p$ вимірюється в кутових або лінійних величинах (частіше в мрад⁻¹ або мм⁻¹). Структура із 4 штрихів з однаковими відстанями між ними та співвідношенням висоти до ширини 7:1 забезпечує певну періодичність у напрямку x і нескінченну протяжність штрихів у напрямку y .

Для ТПСС аерокосмічного базування пропонується використовувати аналогічне визначення МРРТ, де аналізується електронне зображення міри Фуко за допомогою порогового пристрою [1]. Пороговий пристрій визначає наявність міри Фуко в електронному зображенні, якщо сигнал від штрихів міри перевищує в SNR разів шуми зображення, де SNR — відношення сигнал/шум.

Виведемо формулу для розрахунку $MRTD(v_x)$, враховуючи при цьому, що:

1) формування зображення тест-об'єкта відбувається з урахуванням просторової роздільної

здатності ТПСС, яка визначається модуляційною передавальною функцією (МПФ) системи $M_s(v_x)$;

2) ТПСС характеризується еквівалентною шуму різницею температур $NETD$ (Noise Equivalent Temperature Difference);

3) тест-об'єкт розташовується на незначній відстані від ТПСС. Тоді можна вважати, що випромінювання мало поглинається під час проходження через атмосферу, тобто в робочому спектральному діапазоні коефіцієнт пропускання атмосфери $\tau_A(\lambda) \approx 1$;

4) ефективну шумову смугу електронного блоку обробки сигналів визначають за формулою

$$\Delta f = \frac{1}{NEP_{\max}} \int_0^{\infty} NEP(f) |H_{f,sp}(f)|^2 df, \quad (1)$$

де $NEP(f)$ — спектральна щільність потужності шуму; $H_{f,sp}(f)$ — передавальна функція еталонного фільтра, яку визначають за формулою

$$H_{f,sp}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{-0.5}. \quad (2)$$

Тут $f_0 = 1/(2t_0)$, t_0 — час формування одного елемента зображення.

Відношення сигнал/шум на виході електронного блоку визначається як

$$SNR = \frac{\Delta T \cdot M_p(v_x)}{NETD}, \quad (3)$$

де ΔT — температурний контраст міри. Параметр $NETD$ визначає шуми на виході еталонного фільтра з ефективною шумовою смугою Δf , а $\Delta T \cdot M_p(v_x)$ — сигнал з урахуванням роздільної здатності ТПСС. Для розрахунку відношення сигнал/шум потрібно врахувати відмінність ефективної шумової смуги ТПСС, що враховує спектр потужності шумів ПВ $NPS(f)$ та МПФ електронного тракту $M_{El}(f)$, від ефективної шумової смуги еталонного фільтра Δf . Тоді відношення сигнал/шум на виході електронного блоку буде дорівнювати

$$SNR = \frac{\Delta T \cdot M_p(v_x)}{NETD} \times \sqrt{\frac{\Delta f}{\int_0^{\infty} NPS(f) |H_{f,sp}(f)|^2 M_{El}^2(f) df}}. \quad (4)$$

Оскільки величину $M_s(v_x)$ визначено для синусоїдальної міри, а тест-об'єкт для визначення $MRTD$ є прямокутною мірою, то потрібно внести поправку на розклад Фур'є просторової функції випромінювання прямокутної міри. Відомо, що амплітуда першої гармоніки прямокутного сигналу в $4/\pi$ раза більша за амплітуду синусоїдального сигналу того ж періоду й амплітуди [1]. Звідси випливає, що

$$M_p(v_x) = \frac{4}{\pi} M_s(v_x). \quad (5)$$

З урахуванням цих зауважень відношення сигнал/шум, що надходить до порогового пристрою для розпізнавання штрихової міри в електронному зображенні, матиме такий вигляд:

$$SNR_r = \frac{\Delta T}{NETD} \frac{4}{\pi} M_s(v_x) \sqrt{\frac{\Delta f}{\int_0^{\infty} NPS(f) M_{El}^2(f) df}}. \quad (6)$$

Потрібне число SNR_r для розпізнавання (виявлення) штрихової міри відоме. Наприклад, якщо ймовірність розпізнавання 0.9, необхідно, щоб $SNR_r = 4.5$ [1]. Якщо підставити це числове значення в (6), то ΔT буде шуканою функцією $MRTD$ просторової частоти v_x .

Під час практичного застосування функції $MRTD(v_x)$ допускають, що у робочій смузі пропускання ТПСС шум «білий», а електронний блок має достатньо широку ефективну шумову смугу пропускання порівняно із смугою еталонного фільтра, тобто $M_{El}(f) \approx 1$. За цих умов справедливе співвідношення

$$\frac{\Delta f}{\int_0^{\infty} NPS(f) |H_{f,sp}(f)|^2 M_{El}^2(f) df} = 1. \quad (7)$$

З урахуванням цього отримуємо формулу для розрахунку мінімальної розділюваної різниці температур:

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{\pi}{4} SNR_r \frac{NETD}{M_s(v_x)}. \quad (8)$$

Важливість функції $MRTD(v_x)$ як узагальненої характеристики ТПСС у тому, що вона визначає температурну чутливість на низькій просторовій частоті (для об'єктів великих розмірів) і просторове розділення на високих частотах. Функ-

ція $MRTD(v_x)$ дозволяє ефективно порівнювати ТПСС, тому що враховує всю систему в цілому і її шуми.

Оскільки МРРТ — це функція просторової частоти v_x і параметрів ТПСС, а також $NETD$, то, використовуючи залежність $MRTD(v_x)$, можна знайти просторову роздільну здатність системи v_{res} . Для багатьох реальних систем роздільну здатність знаходять із рівняння $MRTD(v_x) = (0.3...0.7)NETD$ [4]. Функцію $MRTD(v_x)$, а також параметр $NETD$ визначають для температури фону $T_b = 300$ К.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНОЇ РОЗДІЛЮВАНОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР

Як приклад застосування запропонованого методу розрахунку МРРТ розглянемо тепловізор для дистанційного зондування поверхні Землі. Оптична система тепловізора формує зображення ділянки поверхні Землі розміром 95×71 км² у площині чутливих елементів мікроболометричної матриці Bird 640 з числом елементів 640×480 (розмір пікселя 25×25 мкм). МПВ має еквівалентну шуму різницю температур $NETD = 50$ мК і постійну часу $t_D = 10$ мс. Оптична система складається із інфрачервоного об'єктива і оптичного фільтра із смугою пропускання $\lambda\lambda = 7.9...13.5$ мкм. Об'єктив має фокусну відстань $f' = 112.8$ мм, діафрагмове число $k_{эф} = 1$, інтегральний коефіцієнт пропускання в спектральному діапазоні $7.9—13.5$ мкм дорівнює $\tau_0 = 0.8$, діаметр абераційного кружка розсіювання $D_{ab} = 25$ мкм. Частота кадрів $f_f = 30$ Гц.

Для розрахунку МРРТ використаємо формулу (8) з деяким уточненням:

еквівалентна шуму різниця температур $NETD$ МПВ визначається за умови, коли $\tau_0 = 1$, тобто у формулі (8) необхідно врахувати реальний коефіцієнт пропускання об'єктива $\tau_0 = 0.8$.

З урахуванням цього уточнення функція (8) матиме вигляд

$$MRTD(v_x) = \frac{\pi}{4} SNR_r \frac{NETD}{\tau_0 M_s(v_x)}, \quad (9)$$

де невідомими є відношення сигнал/шум SNR_r і МПФ тепловізора $M_s(v_x)$.

Для ймовірності 90 % виявлення штрихів міри Фуко $SNR_r = 4.5$ [1].

При математичному моделюванні ТПСС її модуляційну передавальну функцію M_s визначають добутком МПФ її окремих елементів: об'єктива M_o , приймача випромінювання M_D та електронного блоку M_{El} [1, 3, 5]. Для одновимірного випадку уздовж осі x , яка збігається з напрямом сканування, МПФ ТПСС визначають як

$$M_s(v_x) = M_o(v_x)M_{Ds}(v_x)M_{Dt}(f)M_{El}(f), \quad (10)$$

де M_{Ds} і M_{Dt} — просторова і часова МПФ приймача випромінювання відповідно.

Для вихідних параметрів конкретної ТПСС об'єктив має радіус кружка розсіювання $r_{ab} = 12.5$ мкм, який наближається до радіуса кружка Ері для довжини хвилі $\lambda = 10$ мкм ($r_E = 1.22\lambda k_{эф} = 12.2$ мкм). МПФ такого об'єктива визначається функцією [1]

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi}(\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } x > 1, \end{cases} \quad (11)$$

де $x = 1.22\lambda k_{эф} v_x$.

Для практичного застосування МПФ (11) її апроксимують функцією

$$M_{o,ap}(v_x) = \begin{cases} 1-x, & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } x > 1. \end{cases} \quad (12)$$

Для більш точного моделювання можливо застосовувати реальну МПФ об'єктива, яка знаходиться шляхом вимірювання.

МПФ мікроболометричної матриці M_D визначається розмірами прямокутного пікселя $V_D \times W_D$ і постійною часу t_D . Просторова МПФ має вигляд

$$M_{Ds}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (13)$$

Часова МПФ апроксимується функцією

$$M_{Dt}(f) = \frac{1}{\sqrt{1+4\pi^2 t_D^2 v_x^2}}. \quad (14)$$

Зв'язок між просторовою (v_x) і часовою (f) частотами визначають співвідношенням [1]

$$f = \frac{V_D}{t_D} v_x, \quad (15)$$

де t_D — час формування одного елемента зображення, який для мікроболометричної матриці

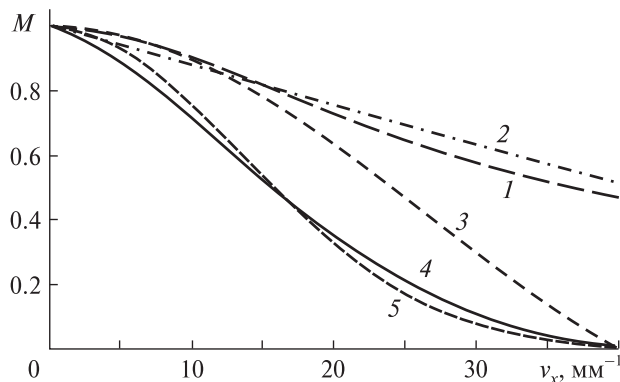


Рис. 1. Модуляційні передавальні функції тепловізійної камери та окремих її складових: 1 — часова МПФ МПВ, 2 — МПФ об’єктива, 3 — просторова МПФ МПВ, 4 — МПФ тепловізора, 5 — апроксимована МПФ тепловізора

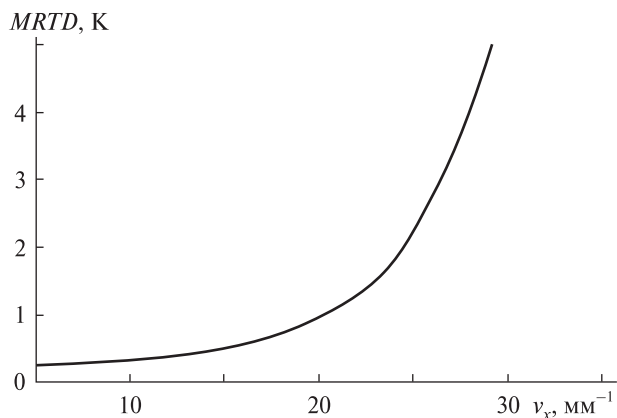


Рис. 2. Мінімальна розділювана різниця температур аерокосмічної тепловізійної камери

визначається частотою кадрів f_f :

$$t_o = \frac{1}{f_f}. \quad (16)$$

На рис. 1 приведено МПФ окремих складових компонентів ТПСС та їхня загальна дія. При цьому МПФ усієї ТПСС добре апроксимується гаусовою функцією [1, 3]

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

де r_s — радіус зображення точкового джерела випромінювання, величину якого можна знайти з умови $M_{s,ap}(v_x) = M_s(v_x) = 0.5$. Розв’язком цієї системи рівнянь значення $r_s = 0.012$ мм.

Аналіз наведених графіків свідчить про те, що МПФ тепловізора визначається, перш за все,

просторовою МПФ мікроболометричної матриці. Для «розширення» МПФ тепловізора необхідно використовувати матрицю з розміром пікселя не більше 20 мкм.

Після підстановки функції (17) до рівняння (9) маємо

$$MRTD(v_x) = 0.049 \exp(0.00255 v_x^2). \quad (18)$$

На рис. 2 наведено МРРТ для аерокосмічної тепловізійної камери.

На завершення зазначимо, що МРРТ не враховує деякі істотні фактори, які впливають на її значення [4, 6]:

1. період і просторова частота міри Фуко не відповідають періоду і частоті просторової вибірки у матричному приймачеві випромінювання (МПВ). У багатьох випадках не враховується випадкове взаємне положення зображення міри і періодичної структури МПВ;

2. під час утворення зображення, яке має просторові частоти, більші за частоту Найквіста МПВ, виникає низка проблем з обробкою відеосигналу, наприклад використання мікросканування.

ВИСНОВКИ

1. Отримано нове рівняння для визначення мінімальної розділюваної різниці температур тепловізійної камери аерокосмічного базування, яке дозволяє прогнозувати просторове і температурне розділення камери.

2. Розглянуто метод розрахунку МРРТ тепловізійної камери, яка використовує мікроболометричну матрицю. Особливістю цього методу є використання апроксимації МПФ камери, яка враховує дифракційно обмежений об’єктив, формат матриці та її інерційні властивості. Для розглянутої тепловізійної камери просторове розділення обмежене, перш за все, просторовою МПФ мікроболометричної матриці.

3. Подальші дослідження тепловізійної камери слід спрямувати на визначення просторового і енергетичного розділення об’єктів спостереження, що перебувають на поверхні Землі.

1. Колобродов В. Г., Лихоліт М. І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. — К.: НТУУ «КПІ», 2007. — 364 с.

2. Колобродов В. Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник для вузів. — К.: Тираж, 1999. — 340 с.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 416 с.
4. Тарасов М. М., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. — М.: Логос, 2004. — 444 с.
5. Kaplan H. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment. — Washington: SPIE — Optical Engineering Press, 1999. — 164 p.
6. Karim M. A., Ming L. Gao, Song H. Xheng. Minimum resolvable temperature difference model: a critical evolution // Opt. Eng. — 1991. — 30, N 11. — P. 1788—1796.

Стаття надійшла до редакції 18.12.13

В. Г. Колобродов, Н. И. Лихолит, В. М. Тягур

МИНИМАЛЬНАЯ РАЗРЕШАЕМАЯ РАЗНОСТЬ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОВИЗОРА АЭРОКОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Разработан метод расчета минимальной разрешаемой разности температур (МРРТ) тепловизионных систем

наблюдения, в которых влияние дисплея и наблюдателя на МРРТ исключается. На основе математической модели тепловизора аэрокосмического базирования получено уравнение для расчета МРРТ. Рассмотрен пример применения разработанного метода для расчета МРРТ тепловизора на микроболومترической матрице для дистанционного зондирования Земли.

V. G. Kolobrodov, N. I. Lykholit, V. M. Tiagur

MINIMUM RESOLVABLE TEMPERATURE DIFFERENCE FOR THERMAL IMAGER OF SPACE BASING

We developed a method for the calculation of the minimum resolvable temperature difference (MRTD) for thermovision supervision systems in which the influence of the display and observer on MRTD is excluded. On the basis of the mathematical model of the thermal imager of space basing an equation for the calculation of MRTD is deduced. We consider an example of the application of the developed method to calculate MRTD of the thermal imager with a microbolometer matrix for remote sensing of the Earth.