

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 621.384.3

**ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗДІЛЕННЯ
ТЕПЛОВІЗОРІВ**

Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Тимчик Г. С., Колобродов М. С., Сокол Б. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
E-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

Тепловізійні методи спостереження навколишнього середовища досить часто супроводжуються необхідністю кількісного визначення температурного розподілу на поверхнях об'єктів. У таких випадках суттєве значення має точність моделювання процесів перетворення інформації, які відбуваються в тепловізійних системах. Важливими є всі питання, що стосуються визначення температурного розділення тепловізорів. Експериментальні методи визначення температурного розділення в цьому сенсі є досить однозначними і добре відпрацьовані на практиці, а розрахункові методи досі доопрацьовуються і викликають зацікавленість наукової спільноти.

Стаття присвячена розробці практичних методів розрахунку температурного розділення тепловізорів. Такі методи мають бути з одного боку достатньо точними, з іншого – досить простими для можливості використання в проєктних організаціях. Також розглянуто визначення похибки цих розрахунків. В основу розрахункової моделі покладено поняття еквівалентної шуму різниці температур NETD як найбільш загальної характеристики енергетичних перетворень у тепловізійних спостереженнях. Визначення NETD базується на використанні функції передачі сигналу тепловізора. Наведено спрощений варіант розрахункової методики і приклад визначення температурного розділення для тепловізора з мікроболометричним матричним приймачем випромінювання. Такі тепловізори наразі займають значну частину ринку і обчислення характеристик приладу з типовою специфікацією може зацікавити профільних фахівців. Показано вплив окремих елементів математичної моделі перетворень інформації на температурне розділення. Наприклад, із збільшенням температури фону температурне розділення зменшується. Аналіз запропонованої розрахункової моделі дозволив окреслити шляхи покращення (зменшення) температурного розділення. Особливістю розроблених методів є можливість їх використання для різних тепловізійних систем, наприклад, для поляризаційних тепловізорів.

Ключові слова: *тепловізор; температурне розділення; еквівалентна шуму різниця температур; математична модель.*

Вступ. Постановка задачі

Теплобачення – це високотехнологічна галузь, що дуже швидко розвивається в науці, промисловості та особливо у військовій справі завдяки величезному прогресу, досягнутого за останні три десятиліття в мікросистемних технологіях інфрачервоних (ІЧ) матричних приймачів випромінювання (МПВ), електроніки та інформатики. Теплобачення застосовується у дослідженнях і розробках новітніх приладів і систем, а також у різних галузях промисловості, таких як неруйнівний контроль, моніторинг стану обладнання та прогнозування його технічного обслуговування, зниження енергетичних витрат в різноманітних процесах і будівельних конструкціях та в багатьох інших сферах [1-4].

Тепловізори широко використовуються для виявлення і розпізнавання цілей на основі реєстрації теплового радіаційного контрасту яскравості (інтенсивності) між об'єктом і фоном [5, 6]. За низького контрасту фоно-цільової обстановки виявити ціль, а тим паче її розпізнати, достатньо складно. Для підвищення ймовірності виявлення і розпізнавання цілі, а також для зменшення ймовірності хибної тривоги, останніми роками активно проводяться дослідження і розробки тепловізорів, в яких носієм інформації є поляризаційні властивості випромінювання цілі і фону [7, 8]. Такі поляризаційні тепловізори вимірюють поляризаційні характеристики випромінювання від об'єкта і фону, а саме: інтенсивність, ступінь поляризації та азимут і еліптичність поляризації [9, 10].

Значна частина теплотабачення присвячена не просто візуалізації температурних полів, але й кількісному вимірюванню температури поверхні об'єктів. У цьому випадку розробники значну увагу приділяють питанням точності інтерпретації тепловізійної інформації та особливостям метрологічного забезпечення. Водночас, суттєве значення мають розрахункові та експериментальні методи визначення характеристик тепловізорів.

Основними характеристиками тепловізорів є енергетичне (температурне) та просторове розділення, які визначають їх можливості у вирішенні задач виявлення та розпізнавання цілей, вимірюванні температури поверхні об'єктів спостереження, контролю і керування різноманітними технологічними процесами. Дослідженню температурного розділення тепловізорів присвячено велику кількість монографій і наукових статей [1, 2, 5, 11–15], в яких розглянуті наукові основи вимірювання температури поверхні різноманітних об'єктів спостереження і дослідження. В той же час, в цих дослідженнях не повною мірою розглянуті питання обґрунтування методів і алгоритмів розрахунку температурного розділення різних тепловізорів, а також похибки, які виникають при цьому.

Існує велика кількість чинників, які можуть впливати на термографічне зображення і, отже, на будь-яку інтерпретацію таких зображень [5, 6]. Найбільш істотними факторами є: ослаблення випромінювання об'єкта за рахунок поглинання або розсіювання під час розповсюдження через атмосферу і оптичну систему тепловізора, власне випромінювання атмосфери, оптичної системи і корпусу камери, вплив нагрітих предметів в оточенні тепловізора на його температурне розділення.

Метою даної статті є дослідження практичних методів розрахунку температурного розділення тепловізорів, а також визначення похибки цього розрахунку і напрямків покращення розділення.

Класичні підходи до визначення температурного розділення тепловізорів

Під температурним розділенням тепловізора будемо розуміти його здатність розрізняти об'єкт спостереження з певною температурою T_a , який розташований на рівномірному фоні з температурою T_b . Математично температурне розділення визначається мінімальним температурним контрастом між об'єктом спостереження і фоном

$$\Delta T_{min} = \{T_a - T_b\}_{min} . \quad (1)$$

Інколи температурне розділення називають температурною чутливістю, пороговою температурою [13 – 15]. Для визначення та вимірювання параметра ΔT_{min} необхідно чітко означити умови, за яких визначається цей параметр. Найбільш живим і узагальненим параметром температурного

розділення є еквівалентна шуму різниця температур (NETD) [11, 13, 14].

Еквівалентна шуму різниця температур (Noise Equivalent Temperature Difference) NETD – це різниця температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, що випромінюють абсолютно чорні тіла (АЧТ), за якої відношення пікового значення сигналу на виході стандартного еталонного фільтра тепловізора, до шуму дорівнює одиниці [11, 13, 16].

Тест-об'єкт повинен мати кутові розміри, які у декілька разів перевищують кутовий розмір пікселя МПВ, щоб нівелювати вплив просторового розділення тепловізора на результати вимірювань. З метою ідентифікації результатів вимірювання (для нівелювання впливу електронної системи) використовують стандартний еталонний фільтр з передатною функцією [11–13]

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

де $f_o = 1/2t_o$; t_o – час сканування (розкладу) одного елемента зображення.

Вимірювання NETD базуються на використанні формули

$$NETD = \Delta T \frac{u_n}{u_s}, \quad (3)$$

де ΔT – різниця ефективних температур між об'єктом і фоном, що створює сигнал u_s .

Середнє квадратичне значення шуму u_n і величину сигналу від тест-об'єкта u_s можна виміряти за допомогою осцилографа або комп'ютеризованого вимірювального стенду [11].

Щоб отримати формули для розрахунку NETD, визначимо спочатку функцію передачі сигналу тепловізора як залежність сигналу u_s на виході еталонного фільтра від температури тест-об'єкта T_p .

Для отримання функціональної залежності $u_s(T_p)$ розглянемо рис. 1. Нехай тест-об'єкт спостереження має рівномірну по площі температуру T_p , а його кутові розміри значно перевищують миттєве поле зору тепловізора, який розміщений на відстані R від об'єкта спостереження. Вважати мемо, що поверхня тест-об'єкта випромінює за законом Ламберта.

Тоді спектральну енергетичну яскравість поверхні тест-об'єкта визначають як [13]

$$L_p(\lambda) = \frac{1}{\pi} \epsilon_p(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_p), \quad (4)$$

де $\epsilon_p(\lambda) = 1$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні тест-об'єкта у вигляді АЧТ; $M_\lambda(\lambda, T_p)$ – функція Планка.

Спектральний потік випромінення, що надходить до вхідної зіниці об'єктива, визначають з урахуванням формули (4) як

$$\Phi_{\lambda}(\lambda) = \frac{1}{\pi} M_{\lambda}(\lambda, T_p) A_p \tau_A(\lambda) \Omega_o, \quad (5)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; A_p – площа об'єкта, що перебуває у

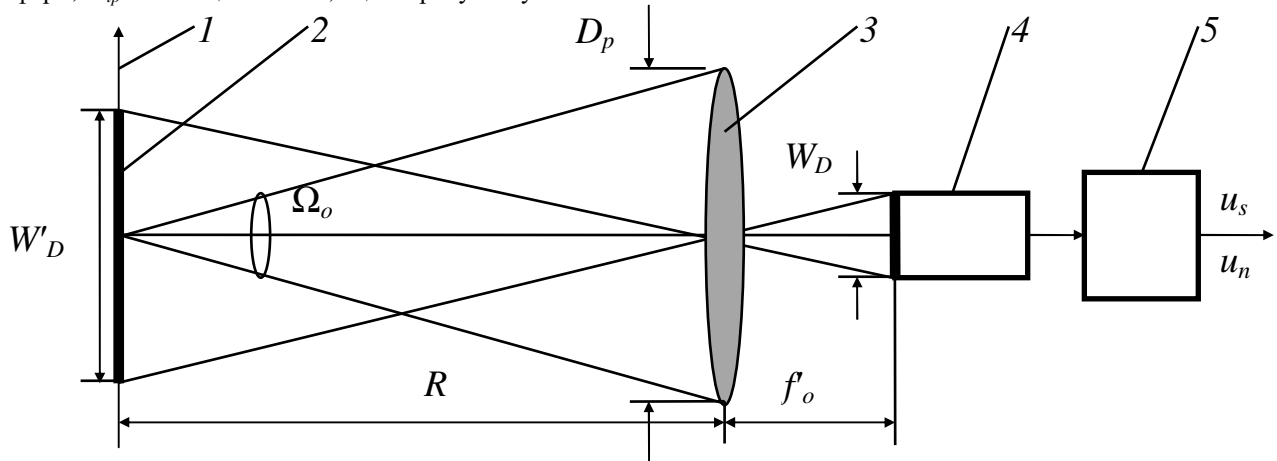


Рис. 1. До розрахунку функції передачі сигналу тепловізора $u_s(T_p)$: 1 – площа тест-об'єкта; 2 – миттєве лінійне поле зору; 3 – об'єктив; 4 – МПВ; 5 – еталонний фільтр

Сигнал на виході МПВ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ дорівнюватиме

$$u_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_p \frac{A_o}{\pi R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) M_{\lambda}(T_{th}) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Під час вимірювання функції $u_s(T_p)$ вважають, що тест-об'єкт розміщений на невеликій відстані від тепловізора, тобто $\tau_A(\lambda) \approx 1$, а спектральний коефіцієнт пропускання об'єктива у межах робочого спектрального діапазону має середнє значення τ_o . Тоді функція (6) з урахуванням співвідношень $A_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$ і $A_p / R^2 = A_D / f_o'^2$, які випливають із рис. 1, набуває вигляду

$$u_s(T_{th}) = \frac{1}{4} A_D \left(\frac{D_o}{f_o'} \right)^2 \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T_{th}) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Функція $u_s(T_p)$ має складний вигляд, який залежить, перш за все, від робочого спектрального діапазону та спектральної чутливості МПВ, що ускладнює вимірювання істинної температури поверхні об'єкта.

Для отримання формули для розрахунку NETD зробимо такі припущення:

1. Якщо об'єкт дослідження знаходиться на відстані R від тепловізора, то коефіцієнт пропускання атмосфери визначається законом Бугера-Ламберта [13]

$$\tau_A(\lambda, R) = \exp(k_A R), \quad (8)$$

де k_A – показник ослаблення атмосфери.

межах миттєвого поля зору тепловізора; $\Omega_o = \frac{A_o}{R^2}$ – тілесний кут, у межах якого випромінення від об'єкта надходить до вхідної зіниці об'єктива площею A_o .

2. Електронна система тепловізора має ефективну шумову смугу пропускання Δf .

3. Тест-об'єкт великих розмірів розміщений на рівномірному фоні і має температурний контраст ΔT . Тест-об'єкт і фон випромінюють як АЧТ.

Враховуючи той факт, що об'єкт завжди знаходиться на певному фоні, то корисний сигнал виникає за наявності температурного контрасту між об'єктом і фоном, тобто

$$u_s = u_{st} - u_{sb}, \quad (9)$$

де u_{st} і u_{sb} – сигнали, утворені об'єктом і фоном відповідно.

Підставимо сигнали (7), що сформовані об'єктом і фоном, до формули (9):

$$u_s = \frac{A_p A_o}{\pi R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) [M_{\lambda}(\lambda, T_b + \Delta T) - M_{\lambda}(\lambda, T_b)] d\lambda, \quad (10)$$

де τ_o – середній коефіцієнт пропускання об'єктива; $M_{\lambda}(\lambda, T)$ – функція Планка.

Подано функцію $M_{\lambda}(\lambda, T_b + \Delta T)$ у вигляді трьох членів степеневого ряду

$$M_{\lambda}(\lambda, T_b + \Delta T) \approx M_{\lambda}(\lambda, T_b) + \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T_b)}{\partial T_b} \Delta T + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 M_{\lambda}(\lambda, T_b)}{\partial T_b^2} \Delta T^2. \quad (11)$$

Підставимо співвідношення (11) з двома членами розкладу до формули (10)

$$u_s = \frac{A_p A_o}{\pi R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T_b} \Delta T d\lambda. \quad (12)$$

Спектральну чутливість $R_D(\lambda)$ МПВ виразимо через питому виявлювальну здатність $D^*(\lambda)$ згідно формули [13]

$$R_D(\lambda) = D^*(\lambda) \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (13)$$

де A_D і u_n – площа і шумовий сигнал пікселя МПВ відповідно.

Тоді відношення сигнал/шум на виході електронної системи тепловізора визначається як

$$SNR = \frac{u_s}{u_n} = \frac{\Delta T}{\sqrt{A_D \Delta f}} \frac{A_p A_o}{\pi R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T_b} d\lambda \quad (14)$$

Рівняння (14) дозволяє визначити NETD тепловізора за умови, що $SNR=1$. Із рис. 1 також знаходимо, що $A_o = \pi D_o^2 / 4$ і $A_p / R^2 = A_D / f_o'^2$. Тоді

$$NETD = \frac{4k_o^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_p)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (15)$$

де $k_o = D_o / f_o'$ – діафрагмове число.

Отримана формула (15) дозволяє визначити напрямки зменшення температурного розділення тепловізора:

1. Використання світлосильних об'єктивів з малим діафрагмовим числом k_o і високим коефіцієнтом пропускання τ_o . Це найефективніший спосіб, тому що $NETD \sim k_o^2 / \tau_o$.
2. Використання МПВ з великою питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$.
3. Зменшення ефективної шумової смуги Δf електронної системи. Однак для отримання високого просторового розділення цю смугу потрібно збільшувати. Тому Δf обирають з компромісу між просторовим та температурним розділеннями тепловізора.
4. З огляду на те, що $NETD \sim A_D^{-0,5}$, збільшення площі чутливої площадки пікселя має призвести до зменшення NETD. Однак просторове розділення тепловізора $\delta\omega_s \sim V_D \sim A_D^{0,5}$. Тому площу пікселя МПВ, яка головним чином визначає просторове розділення, обирають мінімальною. Як правило, вона обмежена дифракційними аберраціями об'єктива, і для спектральної області (8 - 14) мкм становить близько 20×20 мкм².

Спрощений метод розрахунку температурного розділення тепловізора

Розглянемо метод розрахунку еквівалентної

шуму різниці температур NETD_s тепловізора, який має такі параметри:

1. Об'єктив:
 - робочий спектральний діапазон $(\lambda_1 - \lambda_2) = (8 - 14)$ мкм;
 - фокусна відстань $f_o' = 50$ мм;
 - діаметр входної зіниці $D_o = 50$ мм;
 - інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,9$.

2. Приймач випромінювання – мікроболометрична матриця (МБМ):

- розмір пікселя $V_D \times W_D = 17 \times 17$ мкм²;
- еквівалентна шуму різниця температур NETD_D = 40 мК.

В основі методу лежить формула (15), в якій відомими є: діафрагмове число $k_o = f_o' / D_p = 1$ і коефіцієнт пропускання об'єктива $\tau_o = 0,9$.

В основі методу лежить формула (15), в якій відомими є: діафрагмове число $k_o = f_o' / D_p = 1$ і коефіцієнт пропускання об'єктива $\tau_o = 0,9$.

В деяких випадках для оцінки температурної чутливості і порівняння ІЧ матриць використовують параметр NETD_D, який розраховується за формулою (14), в якій: ефективне діафрагмове число $k_o = 1$; коефіцієнт пропускання об'єктива $\tau_o = 1$; ефективна шумова смуга $\Delta f = 1 / (2t_i)$, де t_i – час інтегрування матриці, який може дорівнювати постійній часу пікселя, або періоду кадрової розгортки t_f .

За таких допущень параметр теплового МПВ NETD_D розраховується за формулою [15]

$$NETD_D = \frac{4}{\sqrt{2A_D t_i} \cdot D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_D)}{\partial T} d\lambda} \quad (16)$$

D_{th}^* – питома виявлювальна здатність МБМ; T_D – температура тест-об'єкта при вимірюванні параметра МБМ NETD_D.

Визначимо інтеграл у рівнянні (15), використовуючи параметр NETD_D. Із формули (16) маємо:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_p)}{\partial T} d\lambda = \frac{4}{NETD_D D_{th}^* \sqrt{2A_D t_i}} \quad (17)$$

Підставимо інтеграл (17) до рівняння (15)

$$NETD_s = NETD_D k_o^2 \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_p)}{\partial T} d\lambda}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{2t_i \Delta f} \quad (18)$$

де T_p – температура тест-об'єкта при вимірюванні параметра МБМ NETD_D; T_b – температура фону, на якому знаходиться об'єкт спостереження.

При моделюванні тепловізійних систем вважається, що ефективна шумова смуга $\Delta f = \frac{1}{2t_i}$, де

t_i – час інтегрування матриці, який може дорівнювати періоду кадрової розгортки.

Тоді рівняння для розрахунку еквівалентної шуму різниці температур $NETD_S$ матиме вигляд

$$NETD_S = NETD_D \frac{k_o^2}{\tau_o} K_D, \quad (19)$$

де K_D – коефіцієнт використання МБМ за реальним джерелом випромінювання і еталонним джерелом

$$K_D = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_p)}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} = \frac{I_p}{I_b}. \quad (20)$$

Для тепловізора, що розглядається, маємо: $k_o = 1$; $\tau_o = 1$. Коефіцієнт K_D розраховуємо за формулою (20), в якій відомими є: $T_b = 288$ К; $T_p = 300$ К; $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14$ мкм. Із таблиці 3.3 [2] маємо: $I_b = 14,2$ мВт/м² і $I_p = 17,3$ мВт/м². Тоді $K_D = 1,22$. Після підстановки вихідних параметрів до формули (19) отримаємо температурне розділення тепловізора $NETD_S = 40 \frac{1}{0,9} 1,22 \approx 54$ мК.

Напрямки зменшення температурного розділення тепловізора

Використовуючи отриману формулу (19) для температурного розділення тепловізора, проведемо дослідження впливу на це розділення таких факторів як: температура фону T_b , діафрагмове число об'єктива k_o , відстань R до об'єкта вимірювання.

Із формули (19) маємо, що температура фону T_b впливає на коефіцієнт K_D , який визначається формулою (20). Будемо вважати, що температура тест-об'єкта T_p , за якої був вимірний параметр $NETD_D$, дорівнює 300. Використовуючи дані із табл. 3.3 [2], визначаємо залежність $K_D(T_b)$, яка наведена на рис. 2.

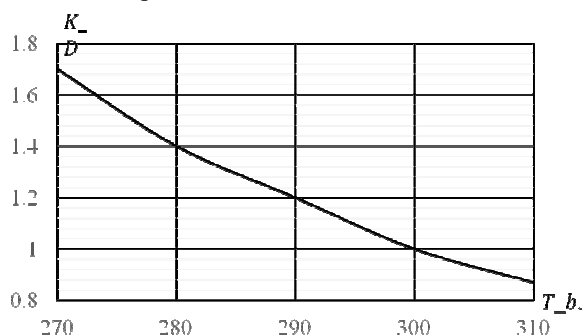


Рис. 2. Залежність коефіцієнта використання МБМ K_D за реальним джерелом випромінювання і еталонним джерелом від температури фону T_b

Цю залежність використаємо для розрахунку функції $NETD_S(T_b)$ тепловізора, який розглядався раніше.

Графік функції $NETD_S(T_b)$ наведено на рис. 3. Аналіз наведених графіків на рис. 2 і 3 свідчить про таке:

1. Із збільшенням температури фону температурне розділення тепловізора зменшується.

2. Якщо вимірювання відбувається при температурі фону $T_b = 300$ К, температурне розділення становить 44 К.

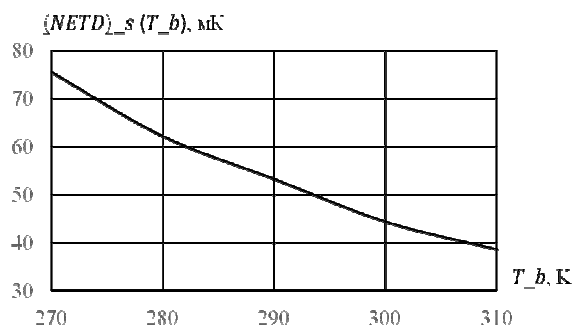


Рис. 3. Залежність температурного розділення $NETD_S$ тепловізора від температури фону T_b

3. Похибку вимірювання температурного розділення для даного тепловізора визначимо за формулою

$$\delta T = NETD_S(T_p) - NETD_S(T_{bi}), \quad (20)$$

де T_{bi} – температура фону при вимірюванні температури об'єкта. Наприклад, якщо $T_{bi} = 290$ К, то похибка вимірювання становить $\delta T = 10$ мк.

Із формули (19) також маємо, що діафрагмове число об'єктива k_o найбільше впливає на температурне розділення, оскільки $NETD_S \sim k_o^2$. Наприклад, якщо діафрагмове число об'єктива збільшити від 1 до 2, то температурне розділення збільшиться з 54 мК до 216 мК (рис. 4). Тому враховуючи компроміс між вартістю ІЧ об'єктивів і їх мінімальними абераціями для тепловізорів з малочутливими тепловими МБМ, як правило, використовують об'єктиви з діафрагмовим числом що дорівнює одиниці.

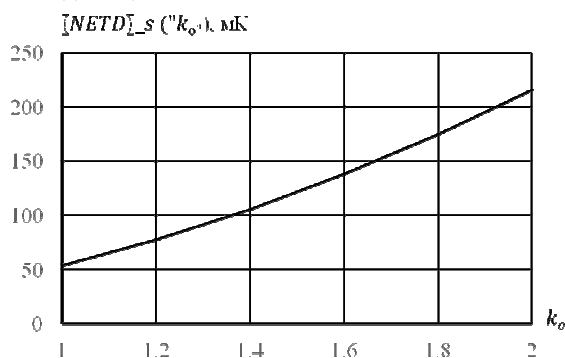


Рис. 4. Залежність температурного розділення $NETD_S$ тепловізора від діафрагмового числа об'єктива k_o

Якщо об'єкт дослідження знаходиться на відстані R від тепловізора, то коефіцієнт пропускання атмосфери визначається законом Бугера-Ламберта (8). Тоді температурне розділення розраховується за уточненою формулою (19), яка матиме вигляд

$$NETD_s(R) = \exp(\kappa_A R) NETD_D \frac{k_o^2}{\tau_o} K_D, \quad (21)$$

де κ_A – показник ослаблення атмосфери, який згідно стандарту НАТО дорівнює $0,2 \text{ км}^{-1}$ для сприятливих умов пропускання атмосфери; $\kappa_A = 1,0 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для обмежених умов пропускання атмосфери [16]. Графік функції $NETD_s(R)$ наведено на рис. 5.

При цьому слід мати на увазі, що функція $NETD_s(R)$ визначається для ймовірності виявлення $P_d=50\%$ при відношенні сигнал/шум на виході МБМ рівному одиниці. Для збільшення цієї ймовірності необхідно підвищувати відношення сигнал/шум.

Аналіз функції (21) свідчить про таке:

1. Із збільшенням відстані R температурне розділення тепловізора збільшується.
2. Для сприятливих умов пропускання атмосфери для відстані $R = 1 \text{ км}$ температурне розділення збільшується на 20 %.

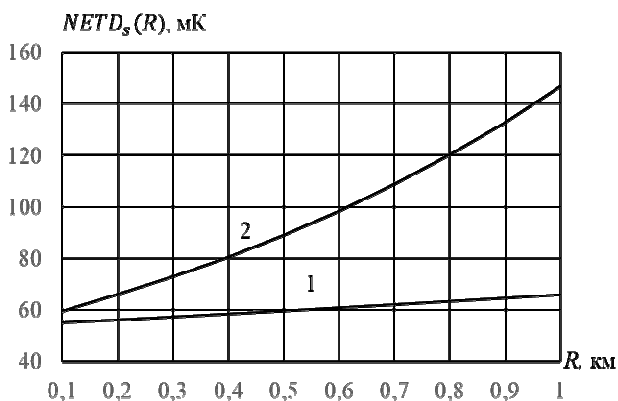


Рис. 5. Залежність температурного розділення $NETD_s$ тепловізора від відстані R до об'єкта вимірювання для атмосфери, коли показник ослаблення атмосфери: 1 – $\kappa_{A1} = 0,2 \text{ км}^{-1}$; 2 – $\kappa_{A2} = 1 \text{ км}^{-1}$

Висновки

Розроблено спрощені методи розрахунку температурного розділення тепловізорів, які засновані на класичному параметрі «еквівалентній шуму різниці температур» $NETD_s$. Дослідження цих методів дало можливість:

1. Запропонувати в якості температурного розділення тепловізора використовувати його еквівалентну шуму різницю температур.
2. Розробити математичну модель розповсюдження ІЧ випромінювання від поверхні об'єкта дослідження до приймача випромінювання, що дозволило отримати рівняння для розрахунку па-

раметра $NETD_s$, на підставі яких було визначено похибки розрахунку і шляхи зменшення температурного розділення тепловізора. Дослідження цих рівнянь показало, що:

2.1. Із збільшенням температури фону T_b температурне розділення тепловізора $NETD_s$ зменшується. За похибку визначення температурного розділення пропонується вважати різницю температурних розділень для тест-об'єкта і температури фону на момент вимірювання.

2.2. Найбільш ефективним методом зменшення розділення $NETD_s$ є використання світлосильних об'єктів з малим діафрагмовим числом k_o і високим коефіцієнтом пропускання τ_o . Це найефективніший спосіб, оскільки $NETD_s \sim k_o^2$.

2.3. Отримано формулу, яка визначає залежність температурного розділення $NETD_s$ тепловізора від відстані R до об'єкта вимірювання для довільного стану атмосфери. Наприклад, для сприятливих умов пропускання атмосфери на відстані $R = 1 \text{ км}$ температурне розділення збільшується на 20 %.

3. У подальших дослідженнях доцільно провести аналогічні розрахунки температурного розділення для поляризаційних тепловізорів.

Література

- [1] Michael Vollmer, and Klaus-Peter Mollman. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications, Second Edition. Wiley; Weinheim, 2018, 788.
- [2] Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov, *Infrarotthermographie. Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe.* WILEY-VCH, Berlin, 2004, 356.
- [3] D. H. Goldstein, *Polarized Light*, 3rd edition. CRC Press, London, New York, 2011.
- [4] Yonqiang Zhao, Chen Yi, Seong G. Kog, Quan Pan, Yongmei Cheng, *Multi-band Polarization Imaging and Applications.* National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag, 2016, 200.
- [5] Kaplan Herbert. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment, 3rd ed. SPIE Press (Washington), 2007, 236.
- [6] Bin Yang, Taixia Wu, Wei Chen, Yanfei LI, Yuri Knjazihhin, “Polarization Remote Sensing Physical Mechanism, Key Methods and Application”, in The Interntation Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Wuhan, China, vol. XLII-2/W7, pp. 956–960, 2017.
- [7] R. D. Tooley, “Man-made target detection using infrared polarization”, *Polarization considerations for optical systems II. – International Society for Optics and Photonics*, vol. 1166, pp. 52-60, 1990.
- [8] Y. Zhang, Z. G. Shi, T. W. Qiu, “Infrared small target detection method based on decomposition of

- polarization information”, *Journal of Electronic Imaging*, vol. 33004, no. 1, 2017.
- [9] Fei Liu, Xiaopeng Shao, Ying Gao, Pingli Han and Guo Li, “Polarization Characteristics of objects in long-wave infrared range”, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 33, no 2, pp. 237–243, 2016.
- [10] В. Г. Колобродов, *Основи хвильової оптики*. Київ, Україна: Політехніка, 2020.
- [11] К. Chrzanowski, *Testing thermal imagers*. Practical, Military University of Technology, Warsaw, 2010, 164 p.
- [12] Ж. Госсорг, *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение*; пер. с франц, Москва: Мир, 1988.
- [13] В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт, *Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2007.
- [14] Дж. Ллойд, *Системы тепловидения*; пер. с англ., Москва: Мир, 1978.
- [15] V. G. Kolobrodov, V. I. Mykytenko, G. S. Tymchuk, B. V. Sokol, “Temperature resolution of computer integrated polarization thermal imager”, *Journal of Thermoelectricity*, no.4, pp. 22–37, 2020.
- [16] NATO Military Agency for standardization 4347 “Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems,” 1995.

UDC 621.384.3

Valentin G. Kolobrodov, Volodymyr I. Mykytenko, Grygorij S. Tymchik, Mykyta S. Kolobrodov, Bogdan V. Sokol

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ERRORS IN THERMAL IMAGERS TEMPERATURE RESOLUTION DETERMINING

Thermal imaging methods of environmental observation are often accompanied by the need to quantify the temperature distribution on the object's surfaces. In such cases, the accuracy of modeling the information conversion processes that occur in thermal imaging systems is essential. All questions concerning the determination of thermal imagers temperature resolution are important. Experimental methods for determining temperature resolution in this sense are quite unambiguous and well-established in practice. And calculation methods are still being refined and are of interest to the scientific community.

The article is devoted to the development of practical methods for calculating the thermal imagers temperature resolution. Such methods must be on the hand one accurate enough, and on the other hand - simple enough to be used in design organizations. The definition of the calculations error is also considered. The calculation model is based on the concept of equivalent noise temperature difference NETD as the most general characteristic of energy transformations in thermal imaging observations. The definition of NETD is based on the use of the thermal imager signal transmission function. A simplified version of the calculation method and an example of determining the temperature resolution for a thermal imager with a microbolometric matrix detector are presented. Such thermal imagers currently occupy a significant part of the market and the calculation of the characteristics of the device with a standard specification may be of interest to specialists. The influence of some elements of the mathematical information transformations model on the temperature resolution is shown. For example, as the background temperature increases, the temperature resolution decreases. The analysis of the proposed calculation model allowed us to outline ways to improve (reduce) temperature resolution. A feature of the developed methods is the possibility of their use for different thermal imaging systems, for example, for polarizing thermal imagers.

Keywords: thermal imager; temperature resolution; noise equivalent temperature difference; mathematical model.

*Надійшла до редакції
03 травня 2022 року*

*Рецензовано
25 травня 2022 року*