

<https://doi.org/10.15407/knit2024.03.022>
УДК 621.384.3

В. Г. КОЛОБРОДОВ¹, проф., д-р техн. наук, проф.
ORCID: 0000-0003-0941-0252
E-mail: thermo@ukr.net

М. І. ЛИХОЛІТ², радник в. о. дир. — голов. конструктора, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, доцент
В. М. ТЯГУР², заст. нач. наук.-техн. комплексу — голов. конструктор напрямку, д-р техн. наук, доцент
І. О. ВАСИЛЬКОВСЬКА¹, ст. викладач, канд. техн. наук
ORCID: 000-0001-9631-4087

E-mail: inna_kuchugura@ukr.net

М. С. КОЛОБРОДОВ¹, наук. співроб., PhD.

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», приладобудівний факультет
просп. Берестейський 37, Київ, Україна, 03056

² Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал»
вул. Князів Острозьких 8, Київ, Україна, 01010

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІЛІ АВІАЦІЙНОЮ ТЕПЛОВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ, ОБМЕЖЕНОЮ ШУМОМ

У сучасних військових операціях широко використовується тепловізійна техніка завдяки її здатності безперервно спостерігати за цілями, навіть у несприятливих погодних умовах. Тепловізійні системи спостереження в основному призначені для ідентифікації цілей. Незважаючи на постійне вдосконалення тепловізійних систем спостереження, наявні методи не дозволяють швидко обчислити ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілей.

У роботі розроблено більш досконалий і зручний алгоритм і метод розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження на заданій дальності, в основі якого лежать мінімальна роздільна різниця температур, критерій Джонсона, а також функції TTPF і TRTPF. Запропонований алгоритм дозволяє відносно просто розрахувати шукані параметри тепловізійної системи, яка обмежена шумами системи.

Ключові слова: авіаційна тепловізійна система; ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі; дальність до цілі; мінімальна виявлювана різниця температур; функція передачі ймовірності по дальності до цілі.

Цитування: Колобродов В. Г., Лихоліт М. І., Тягур В. М., Васильковська І. О., Колобродов М. С. Алгоритм визначення ймовірності виявлення і розпізнавання цілі авіаційною тепловізійною системою в умовах шумів. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 3 (148). С. 22—30. <https://doi.org/10.15407/knit2024.03.022>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ВСТУП

У сучасних військових конфліктах широко застосовують тепловізори, оскільки вони здатні спостерігати за цілями цілодобово у складних метеорологічних умовах [2, 3, 5, 7]. Основне призначення таких тепловізійних систем спостереження (ТПСС) є виявлення, розпізнавання та ідентифікація цілей на граничній дальності при заданій ймовірності виконання завдання. З точки зору тактичного застосування ТПСС важливо знати ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі на заданій до неї дальності.

Основними характеристиками ТПСС, які визначають ефективність їхнього застосування, є просторове і температурне розділення. Просторове розділення характерне для контрастно обмежених ТПСС, які були досліджені авторами у роботі [6]. Температурне (енергетичне) розділення відіграє важливу роль при визначенні ймовірності виконання завдання на граничній дальності, коли сигнал від цілі достатньо малий. Дослідженню ТПСС, обмежених шумом системи, присвячено значну кількість статей і монографій, які використовують складні фізико-математичні моделі. Серед них найбільш вдалим і поширеним, на думку авторів, є стандарт НАТО 4247, який відрізняється відносною простотою застосування [1]. Цей стандарт поєднує в собі просторове і енергетичне розділення тепловізора на основі його мінімально роздільної різниці температур *MRTD* (Minimum Resolvable Temperature Difference) [5, 7].

Однак ці методи не дозволяють оперативно розрахувати ймовірності виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі для довільно заданої відстані від ТПСС до цілі.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою статті є розробка більш досконалих методу й алгоритму розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження, що обмежена шумом, на основі мінімально роздільної різниці температур і критерію Джонсона сприйняття оператором зображення на екрані цілі дисплея.

2. СИСТЕМИ, ЩО ОБМЕЖЕНІ ШУМАМИ

У тепловізорах, основними елементами яких є інфрачервоний (ІЧ) об'єктив і матричний приймач випромінювання (МПВ), на екрані дисплея формується корисний (інформативний) сигнал від цілі і шумовий сигнал, зумовлений фоном і власними шумами приймача і електронної системи. Порогова чутливість ТПСС обмежена шумовим сигналом, який додається до сигналу від об'єкта, що викликає флуктуації яскравості у зображенні. У випадку високого рівня шумового сигналу зображення об'єкта неможливо розгледіти (розділити) на екрані дисплея. Найчастіше це явище спостерігається на граничній дальності дії ТПСС. У цьому випадку зображення об'єкта формується на екрані дисплея на фоні випадкового поля яскравості у вигляді «снігу», і саме цей контраст, а не пороговий, обмежує просторове розділення. Таким чином, що меншим є відношення сигнал/шум, то гіршими будуть просторове розділення і якість зображення. У загальному випадку «засніжені» зображення, як правило, обмежені шумом, а зображення високої якості відповідають контрастно обмеженим системам.

3. МІНІМАЛЬНА РОЗДІЛЬНА РІЗНИЦЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Мінімальна роздільна різниця температур *MRTD* є однією із важливих характеристик тепловізорів. Вона є функцією просторової частоти $MRTD(v_x)$, яка поєднує в собі температурне і просторове розділення. Це дозволяє досліджувати ТПСС, обмежені контрастом і шумами. Тому під час моделювання ТПСС з метою розробки методу розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта (цілі) будемо використовувати *MRTD* і критерій Джонсона для різних видів розрізнення зображення на екрані дисплея з імовірністю 50 %.

Мінімальна роздільна різниця температур MRTD — це мінімальна різниця ефективних температур між смугами (штрихами) тест-об'єкта із заданою просторовою частотою та фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея розділяти штрихи об'єкта. Тест-об'єкт — це чотириштрихова міра, в якій смуга та проміжки мають одна-

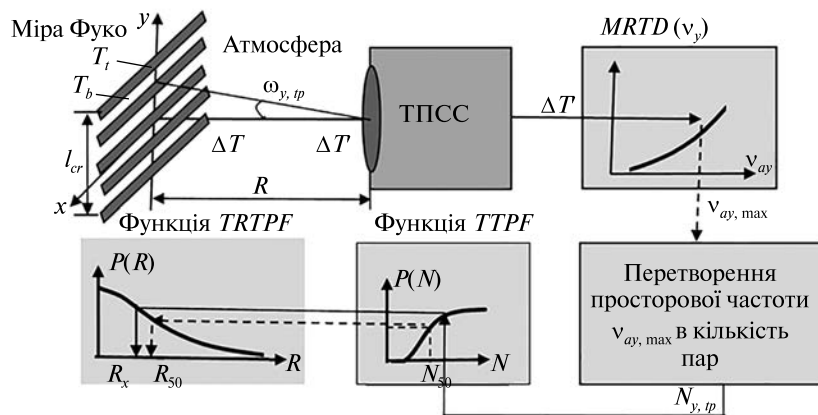


Рис. 1. Модель ТПСС для прогнозування виконання завдання спостереження, яка використовує мінімальну роздільну різницю температури тепловізора і критерій Джонсона

кову ширину $\xi_{tp,x} = \omega_{tp}$ а їхня висота дорівнює $\xi_{tp,y} = 7\omega_{tp}$ (рис. 1). Смуга та проміжки випромінюють як АЧТ з різною, але постійною температурою. Просторову частоту $\nu_x = 1/2\omega_{tp}$ можна виразити як в лінійних, так і в кутових величинах (найчастіше мм^{-1} чи мрад^{-1}). Такий тест-об'єкт часто називають мірою Фуко. Штрихові міри різних просторових частот становлять розклад Фур'є структури об'єкта спостереження.

Теплову тест-міру зображено на рис. 1. Структура з чотирьох штрихів з однаковими відстанями між ними та співвідношенням висоти до ширини 7:1 забезпечує певну періодичність в напрямку y і нескінченну протяжність штрихів у напрямку x .

Для описання тест-об'єкта використовують модуляційну передавальну функцію $M_s(\nu_y)$ (МПФ) усієї ТПСС. Оскільки $M_s(\nu_y)$ визначена для синусоїдальної міри, а тест-об'єкт для визначення $MRTD$ є прямокутною мірою, то потрібно ввести поправку на розклад Фур'є прямокутної міри. Із прикладу 1.3, наведеного у монографії [5], випливає, що амплітуда 1-ї гармоніки прямокутного сигналу в $4/\pi$ разів більша від амплітуди синусоїдального сигналу того ж періоду й амплітуди. Додатково слід врахувати, що око реєструє середню яскравість прямокутного штриха на фоні. Середнє значення за півперіод 1-ї гармоніки прямокутного сигналу в $2/\pi$ рази менша від амплітуди (див. приклад 1.3). Звідси впли-

ває, що МПФ ТПСС з урахуванням сприйняття тест-об'єкта оком має такий вигляд:

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s. \quad (1)$$

Урахування механізму сприйняття оком зображення здійснюється через співвідношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра, для якого справедлива пропорційність

$$SNR_f = \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD}, \quad (2)$$

де ΔT — температурний контраст, $NETD$ — еквівалентна шуму різниця температур МПВ, що визначає шуми на виході еталонного фільтра з ефективною шумовою смугою Δf , $M_{tp,E} \Delta T$ — сигнал з урахуванням роздільної здатності ТПСС. Для розрахунку відношення сигнал/шум потрібно врахувати відмінність ефективної шумової смуги ТПСС, що враховує спектр потужності шумів МПВ $NPS(f)$ та МПФ електронного тракту $M_{El}(f)$ і дисплея $M_S(f)$, від ефективної шумової смуги еталонного фільтра Δf . Тоді відношення сигнал/шум на екрані дисплея буде мати вигляд

$$SNR_s = \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD} \left[\Delta f / \int_0^\infty NPS(f) M_{El}^2(f) M_S^2(f) df \right]^{0.5}. \quad (3)$$

Інтегрувальні властивості ока врахуємо змінною відношення сигнал/шум. При цьому вво-

дять величину SNR_p , яка гарантує із заданою ймовірністю розпізнавання тест-міри на зашумленому фоні.

Закони зорового сприйняття врахуємо таким чином.

1. Око здійснює часове інтегрування, збільшуючи відношення сигнал/шум у $\sqrt{f_f t_E}$ разів, де f_f — частота кадрів; $t_E = 0.2$ с — постійна ока.

2. Око здійснює просторове інтегрування за двома координатами x , y і відповідно до формул [5] підвищує сприйняте відношення сигнал/шум:

- уздовж координати x — в $\alpha_D / (2\xi_{ip} t_o \Delta f)$ разів,

- уздовж координати y — в $\sqrt{\xi_{ip}} / \alpha_D$ разів, де t_o — час формування одного елемента зображення, α_D — кутовий розмір пікселя МПВ.

З урахуванням цього зі співвідношення (2) отримаємо формулу для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур:

$$\Delta T = MRTD(v_y) = 0.66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_y}{M_s(v_y)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}, \text{ К.} \quad (4)$$

Слід зазначити, що кутову просторову частоту v_y у формулі (4) визначено у просторі «дисплей — спостерігач». Отримана формула (4) має ряд обмежень. 1. Формула для МПФ ока справедлива для випадку, коли розмір зображення штриха міри ω_p'' перевищує кутове розділення ока. 2. Просторове інтегрування ока припиняється, якщо $7\omega_p'' > 40$ кут. хв.

Численні дослідження ТПСС свідчать про те, що розрахунок за формулою (4) дає хороші результати, які збігаються з експериментальними даними. Однак така узагальнена характеристика, як $MRTD$, має і певні недоліки. По-перше, вона не враховує реальну МПФ ока. По-друге, формула для $MRTD$ не враховує реальні об'єкти та фони. Проте формула (4) дозволяє проаналізувати вплив основних параметрів ТПСС на просторове і температурне розділення.

Важливість функції $MRTD(v_y)$ як узагальноної характеристики ТПСС у тому, що вона визначає температурну чутливість на низькій просторовій частоті (для великих об'єктів) і просторове розділення на високих частотах. Функція $MRTD(v_y)$ дозволяє ефективно порівнювати ТПСС, тому

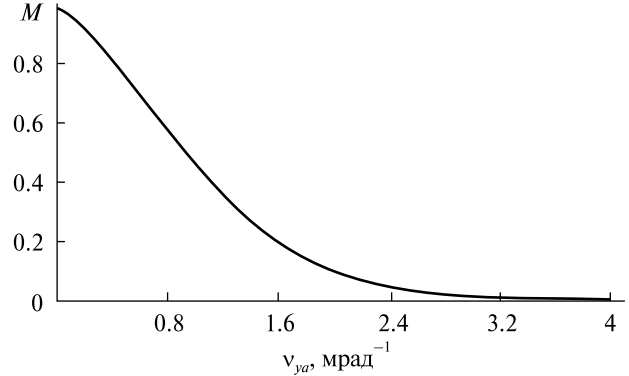


Рис. 2. Модуляційна передавальна функція ТПСС

що враховує всю систему в цілому, її шуми і сприйняття зображення оператором.

На рис. 2 наведено графік модуляційної передавальної функції $M_s(v_y)$ для тепловізора, параметри якого наведено у роботі [6]:

- об'єктив: фокусна відстань $f_o' = 70$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_{op} = 70$ мм;

- мікроболометрична матриця: формат матриці 320×240 пкл, розмір пікселя $W_D = 17$ мкм постійна часу $t_D = 10$ мкс, частота кадрів $f_f = 50$ Гц;

- дисплей: розмір пікселя $v_D = 15$ мкм, розмір екрана $Y_d = 7.2$ мм;

- еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 40$ мК.

4. КРИТЕРІЙ ДЖОНСОНА ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТПСС

Критерій Джонсона детально описано у роботі [6]. Основна ідея критерію Джонсона полягає в тому, що здатність спостерігача розпізнавати цілі на певному фоні залежить від того, наскільки добре він може розрізняти штрихові смуги міри Фуко з різними просторовими частотами і тим самим температурним контрастом ΔT , що і ціль, відносно фону:

$$\Delta T = T_t - T_b, \quad (5)$$

де T_t і T_b — температура поверхні цілі і фону відповідно.

Модель ТПСС для виявлення і розпізнавання цілі, яка використовує концепцію Джонсона і мінімальну роздільну різницю температур тепловізора, показано на рис. 1. Температурний контраст цілі ΔT зменшується за рахунок осла-

блення випромінювання в атмосфері, тобто

$$\Delta T' = \Delta T \tau_A(R), \quad (6)$$

де $\tau_A(R)$ — інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери, R — відстань між ціллю і ТПСС. Використовуючи рівняння (4) для $MRTD$ і температурний контраст $\Delta T'$, знаходимо кутову просторову частоту $\nu_{y,tp}$ міри Фуко, яка залежить від критичного розміру цілі l_{cr} та відстані R і вимірюється у град^{-1} . У залежності від відстані R кількість періодів міри Фуко, розташованих уздовж критичного розміру цілі l_{cr} , визначимо за формулою

$$N = \nu_{y,tp} \frac{l_{cr}}{R}, \quad (7)$$

де l_{cr} вимірюється у метрах, R — у кілометрах. Кількість пар штрихів N будемо використовувати для визначення ймовірності виконання завдання із спостереження за ціллю.

Ймовірність виконання завдання спостереження (виявлення, розпізнавання, ідентифікація) визначаємо за допомогою цільової функції передачі ймовірності $TTPF$ (Target Transfer Probability Function), яка розраховується за формулою [2, 4, 8]

$$P(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_D}\right)^k}{1 + \left(\frac{N}{N_D}\right)^k}, \quad (8)$$

де P — ймовірність виконання певного завдання спостереження, N_D — кількість пар штрихів згідно з критерієм Джонсона, яке забезпечує ймовірність виконання певного завдання спостереження $P = 50\%$, $k = 2.7 + 0.7(N/N_D)$.

Цю функцію було отримано в результаті великої кількості експериментальних польових досліджень. Наприклад, для ймовірності 50%

Таблиця 1. Кількість періодів (пар штрихів) міри N_{50} уздовж критичного розміру цілі для ймовірності виконання завдання спостереження $P = 50\%$ (критерій Джонсона)

Завдання для спостереження	Кількість періодів міри
Виявлення	1
Розпізнавання	3
Ідентифікація	6

виконання різних завдань із спостережень цілі у табл. 1 [2] наведено середню кількість періодів міри Фуко. Ці дані часто називають критерієм Джонсона.

Ймовірність рівня спостереження (виявлення, розпізнавання або ідентифікація) визначається за допомогою цільової функції передачі ймовірності $TTPF$ (8) і обирається із табл. 1 для ймовірності відповідного рівня $P(N_{50}) = 50\%$.

5. ЗАЛЕЖНІСТЬ ЙМОВІРНІСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІЛІ ВІД ДАЛЬНОСТІ ДО ТПСС

У роботі [6] було запропоновано функцію передачі ймовірності по дальності до цілі $TRTPF$ (Target Rang Transfer Probability Function), яка має вигляд

$$P(R) = \frac{\left(\frac{R_{50}}{R}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{R_{50}}{R}\right)}}{1 + \left(\frac{R_{50}}{R}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{R_{50}}{R}\right)}}, \quad (9)$$

де R_{50} — відстань від ТПСС до цілі, на якій виконується певне завдання спостереження з ймовірністю 50% згідно із критерієм Джонсона.

На рис. 3 наведено графік функції (9), з якого для отриманої ймовірності розпізнавання цілі $P(R)$ від дальності R до ТПСС можна визначити відношення R_{50}/R .

Мінімальний період $2V'_{\min}$ зображення міри (розмір світлої і темної смуг), що розділяється, визначають із умови $\nu_{x,\max} = 1/2V'_{tp,\min}$. Тоді мінімальний розмір зображення об'єкта, що розділяється системою, дорівнює

$$\delta V' = V'_{tp,\min} = 1/2\nu_{x,\max}. \quad (10)$$

При цьому мінімальний розмір об'єкта або його елемента, що розділяється системою, дорівнює

$$\delta V = \delta V' / |\beta_s| = 1/|\beta_s| 2\nu_{x,\max}, \quad (11)$$

де β_s — лінійне збільшення ТПСС. Із (11) маємо, що величина δV обернено пропорційна до ширини смуги пропускання просторових частот системою і її лінійного збільшення. Проте є обмеження на використання цієї формули. Зі збільшенням $|\beta_s|$ все менші деталі об'єкта розділяються, поки не буде досягнуто межі розділен-

ня, зумовленої ФРТ ТПСС. Тобто, зі збільшенням $|\beta_s|$ розмір елемента об'єкта δV що розділяється, зменшується.

У випадку значного збільшення $|\beta_s|$ якість зображення обмежена шириною смуги пропускання просторових частот, а збільшення $|\beta_s|$ зумовить лише збільшення кружка розсіювання ТПСС і не призведе до підвищення роздільної здатності. У загальному випадку, що більша ширина смуги пропускання просторових частот системи, то менші деталі об'єкта розділяються. Крім того, що більший розмір зображення об'єкта порівняно з δV , то якіснішим буде зображення.

6. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ ВІД ЦІЛІ ДО ТПСС ПРИ ВИКОНАННІ ЗАВДАННЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ПЕВНОЮ ЙМОВІРНІСТЮ НА ОСНОВІ МІНІМАЛЬНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР ТА ФУНКЦІЙ $TTPF$ І $TRTPF$

При розробці цього алгоритму будемо використовувати модель ТПСС, зображену на рис. 1.

1. Розраховуємо максимальну кутову просторову частоту $v_{ay,max}$ міри Фуко, яку здатна сприймати ТПСС, шляхом розв'язання рівняння

$$\Delta T_{\tau_A}(R) = MRTD(v_{ay}). \quad (12)$$

2. За формулою (7) розраховуємо кількість періодів N міри Фуко уздовж вертикального напрямку (критичного розміру цілі l_{cr}), де висота цілі l_{cr} вимірюється у метрах, відстань R до цілі — в кілометрах, а просторова частота міри $v_{y,tp}$ — в мрад⁻¹ (рис. 1). Кількість пар штрихів N будемо використовувати для визначення ймовірності виконання завдання із спостереження цілі.

3. За заданими температурами поверхні цілі T_t і фону T_b розраховуємо температурний контраст $\Delta T = T_t - T_b$, який дорівнює температурному контрасту міри Фуко. Температурний контраст ΔT зменшується за рахунок поглинання випромінювання в атмосфері за законом Бугера — Ламберта.

4. Згідно з критерієм Джонсона для ймовірності виконання завдання спостереження 50 % із табл. 1 визначаємо кількість періодів міри уздовж критичного розміру цілі: для виявлення — $N_{d,50} = 1$; для розпізнавання — $N_{r,50} = 3$; для ідентифікації — $N_{i,50} = 6$.

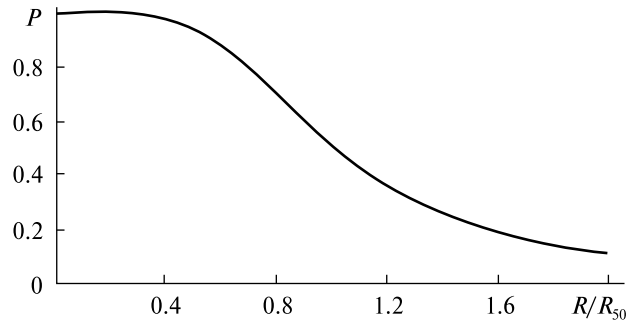


Рис. 3. Функція $TRTPF$: залежність ймовірності виконання завдання спостереження $P(R)$ від відстані R між ціллю і ТПСС

5. Для визначеного числа періодів N міри Фуко за формулою (8) для функції $TTPF$ визначаємо ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі.

6. Із формули (7) знаходимо відстані до цілі, на яких виконується завдання спостереження з ймовірністю 50 %:

$$R_{50} = v_{y,tp} \frac{l_{cr}}{N_{50}}. \quad (13)$$

7. Для визначеної відстані до цілі при виконанні спостереження з певною ймовірністю за формулою (9) для функції $TRTPF$ (рис. 3) визначаємо відстані виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі.

7. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Для практичного застосування запропонованого методу визначення ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації, розглянемо ТПСС, яка була досліджена у роботі [6] для контрастно обмеженого тепловізора. Це дасть можливість порівнювати ТПСС, що працює в режимі контрастно обмеженого системи, або системи, що обмежена шумом.

Тепловізійна система спостереження має такі характеристики.

- **Тепловізор.** Об'єктив: фокусна відстань $f'_o = 70$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_{op} = 70$ мм. Мікроболометрична матриця: формат матриці 320×240 пкл, розмір пікселя $V_D = W_D = 17$ мкм, постійна часу $t_D = 10$ мкс, частота кадрів $f_f = 50$ Гц. Дисплей: розмір пікселя $v_D = w_D =$

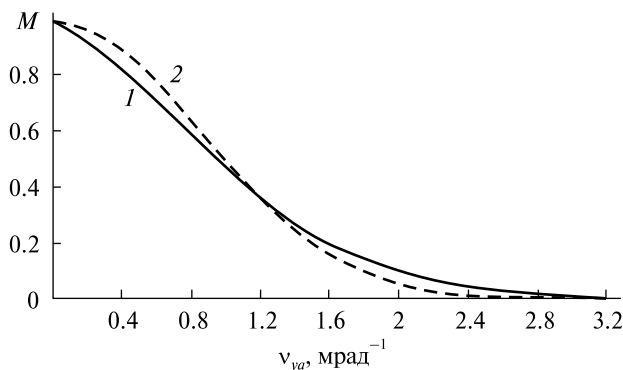


Рис. 4. Модуляційна передавальна функція тепловізора: 1 — за даними [6]; 2 — апроксимована функція (16) при $\omega_{TS} = 0.19$ мрад

= 15 мкм, розмір екрана $Y_d = 7.2$ мм. Еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 0.05$ К.

• **Об'єкт спостереження.** Тест-об'єкт, що використовується в стандарті НАТО 4347 для визначення максимальної дальності розрізнення цілі ТПСС і має такі параметри: спектральний діапазон випромінювання об'єкта і фону 8...14 мкм; температурний контраст між об'єктом і заднім фоном (відносно температури АЧТ в $T_b = 288$ К) — $\Delta T_o = 2$ К; розміри $V_{tp} \times W_{tp} = 2.3 \times 2.3$ м.

• **Умови спостереження.** Зміна початкового температурного контрасту ΔT_o між об'єктом і заднім фоном унаслідок ослаблення випромінювання в атмосфері враховується за законом Бугера — Ламберта, який має вигляд

$$\Delta T(R) = \Delta T_o \exp(-\kappa_A R), \quad (14)$$

де R — дальність, км; $\kappa_A = 0.2 \text{ км}^{-1}$ — показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери.

Нижче опишемо повну послідовність розрахунків.

1. Розраховуємо максимальну кутову просторову частоту $v_{ay, \max}$ міри Фуко, яку здатна сприймати ТПСС, шляхом розв'язання рівняння (12), де використовуються наведені раніше результати досліджень і задані умови прикладу.

1.1. Температурний контраст міри Фуко при надходженні випромінювання до об'єктива ТПСС змінюється згідно з формулою (14).

1.2. Мінімальна роздільна різниця температур тепловізора визначається формулою (4), яка для кутових просторових частот v_{ay} у просторі «дисплей — оператор» має вигляд

$$MRTD(v_{ay}) = 0.66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_{ay}}{M_s(v_{ay})} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}, \quad (15)$$

де $SNR_r = 4.2$ — відношення сигнал/шум у зображенні міри Фуко на екрані дисплея, яке забезпечує якісне розділення штрихів міри, $\Delta f t_o = 0.5$, $f_f = 50$ Гц, $t_E = 0.2$ с, $NETD = 0.05$ К.

Визначимо інші параметри, які входять до формули (15).

• Кутові розміри α_D, β_D чутливої площадки МПВ дорівнюють

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f'_o} = \frac{17}{70} = 0.24 \text{ мрад.}$$

• Модуляційну передавальну функцію $M_s(v_{ay})$, що розглядається у прикладі, було отримано у роботі [6] (див. рис. 4). З метою підвищення ефективності і зручності проектування ТПСС апроксимуємо цю МПФ гауссовою функцією згідно з методикою, викладеною у монографіях [6, 7]:

$$M_s(v_{ay}) = \exp(-2\pi^2 \omega_{TS}^2 v_{ay}^2), \quad (16)$$

де $\omega_{TS} = 0.19$ мрад радіус кружка функції розсіювання точки тепловізором. Графік функції (16) також наведено на рис. 4.

• Кутова просторова частота v_{ay} залежить від відстані R між мірою Фуко і тепловізором. Із рис. 1 і формули (7) маємо

$$v_{y, tp} = \frac{1}{\omega_{y, tp}} = \frac{N \cdot R}{l_{cr}}, \quad (17)$$

де $l_{cr} = W_{tp} = 2.3$ м — розмір тест-об'єкта.

Підставимо наведені вище параметри і функції до рівняння (12):

$$2 \exp(-0.2R) = 0.66 \cdot 4.2 \cdot 0.05 \frac{v_{y, tp}}{\exp(-0.71 v_{y, tp}^2)} \sqrt{\frac{(0.24)^2}{0.5 \cdot 50 \cdot 0.2}}.$$

Останнє рівняння запишемо у вигляді

$$\exp(-0.2R) \frac{\exp(-0.71 v_{y, tp}^2)}{v_{y, tp}} = 0.007 \text{ мрад.} \quad (18)$$

Розв'язком цього трансцендентного рівняння є кутова просторова частота ν_{ay} для різних значень відстані R . Наприклад, для $R = 2$ км маємо $\nu_{ay, \max} = 2.2$ мрад⁻¹.

2. За формулою (7) розраховуємо кількість періодів N міри Фуко уздовж вертикального напрямку (критичного розміру цілі, рис. 1).

$$N = 2.2 \frac{2.3}{2} \approx 3 \text{ періоди.}$$

Кількість пар штрихів N будемо використовувати для визначення ймовірності виконання завдання із спостереження за ціллю.

3. Згідно із критерієм Джонсона для ймовірності виконання завдання спостереження 50 % із табл. 1 визначаємо кількість періодів міри уздовж критичного розміру цілі: для виявлення — $N_{d,50} = 1$, для розпізнавання — $N_{r,50} = 3$, для ідентифікації — $N_{i,50} = 6$.

4. Для визначеного числа періодів $N = 3$ міри Фуко за формулою (8) для функції $TTPF$ визначаємо ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі: $P_d = 98$ %, $P_r = 50$ %, $P_i = 10$ %.

5. Із формули (7), яку представимо у вигляді

$$R_{50} = \nu_{y, tp} \frac{l_{cr}}{N_{50}}, \quad (19)$$

розраховуємо відстані від ТПСС до цілі, при якій виконується певне завдання спостереження з ймовірністю 50 % згідно з критерієм Джонсона: $R_{d,50} = 5.1$ км, $R_{r,50} = 1.69$ км, $R_{i,50} = 0.84$ км.

6. За формулою (7) для функції $TRTPF$ визначаємо ймовірність виконання завдання на заданій відстані R . Для отриманої ймовірності $P(R)$ із графіка, наведеного на рис. 4, визначаємо відношення R_{50} / R , яке для відстані $R = 1.7$ км дозволяє визначити ймовірності: виявлення —

$P_d = 0.99$, розпізнавання — $P_r = 0.5$, ідентифікації $P_i = 0.1$.

7. Порівняння результатів розрахунків ймовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі, які були отримані для ідентичних ТПСС для контрастно обмеженої системи [6] і системи, обмеженої шумом, свідчать про адекватність запропонованих моделей тепловізійних систем. На нашу думку, перевагу слід віддати ТПСС, обмеженій шумом, бо вона одночасно враховує просторове і енергетичне розділення, що важливо при застосуванні систем у військовій справі для розрізнення цілей на граничній дальності.

ВИСНОВКИ

Розроблено більш досконалий (зручний) алгоритм і метод розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження на заданій дальності, в основі якого лежать мінімальна роздільна різниця температур, критерій Джонсона сприйняття оператором зображення на екрані дисплея, а також функції $TTPF$ і $TRTPF$. У запропонованій моделі тепловізійна система спостереження розглядається як лінійна інваріантна система в кутових просторових частотах у просторі об'єкт — ТПСС.

Запропонований алгоритм дозволяє відносно просто розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі тепловізійною системою, яка обмежена шумами системи, що є дуже важливим для ефективного використання дронів для розрізнення цілей на граничній дальності. Подальші дослідження доцільно провести із застосування цього алгоритму для визначення просторових координат дронів.

REFERENCES

1. Definition of nominal static ranger performance for thermal imaging systems (1995). STANAG 4347.
2. Driggers R. G., Friedman M. H., Devitt J. W., Fuxhi O., Singh A. (2022). *Introduction to infrared and electro-optical systems* (3th ed.). Artech House, 712 p.
3. Kaplan H. (2010). *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment* (3th ed.). Washington, USA: SPIE Press, 192 p.
4. Keßler S., Galb R., Wittenstein W. (2017). TRM4: Range performance model for electro-optical imaging Systems. Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image. *Proc. of SPIE*, **10178**, 101780P.
5. Kolobrodov V. H., Lykholit M. I. (2007). *Design of thermal imaging and television surveillance systems*. Kyiv: NTUU KPI, 364 p.
6. Kolobrodov V. H., Lykholit M. I., Tiahur V. M., Vasylykovska I.O., Kolobrodov M. S. (2023). Probability of target discrimination by the contrast-limited thermal vision system of a UAV. *Space Science and Technology*, **29**(5), 20–32.
7. Lloyd J. M. (1975). *Thermal Imaging Systems Optical physics and engineering*. Plenum Press, 456 p.
8. Melamed R., Yitzhaky Y., Kopeika N. S., Rotman S. R. (1998). Experimental comparison of three target acquisition models. *Opt. Engineering*, **37**(7), 1902–1913.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2024

Після доопрацювання 08.04.2024

Прийнято до друку 15.04.2024

Received 28.02.2024

Revised 08.04.2024

Accepted 15.04.2024

V. G. Kolobrodov¹, Professor, Dr. Sci. in Tech., Professor
M. I. Lykholit², Advisor to the acting Director – Chief Designer,
Corresponding Member of NAS of Ukraine, Dr. Sci. in Tech., Docent
V. M. Tiagur², Deputy Chief of Scientific and Technical Complex –
Chief Designer of Division, Docent, Dr. Sci. in Tech., Docent
I. O. Vasylykovska¹, Senior Lecturer, Ph. D. in Tech
M. S. Kolobrodov¹, Researcher, Ph. D. in Tech

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056 Ukraine

²Special Device Production State Enterprise “Arsenal”
8, Princes of Ostrozki Str., Kyiv, 01010 Ukraine

ALGORITHM FOR DETERMINING THE PROBABILITY OF TARGET DETECTION AND RECOGNITION BY AN AVIATION THERMAL VISION SYSTEM IN NOISE CONDITIONS

Thermal imaging equipment is widely used in modern military operations due to its ability to observe targets even in adverse weather conditions continuously. Thermal imaging surveillance systems (TISS) are primarily designed to detect, recognize, and identify targets. Despite the progress, existing methods do not allow quickly calculating the probability of detecting, recognizing, or identifying a target at user-defined distances from the TISS to the target.

The article aims to develop a more advanced method and algorithm for calculating the probability of detection, recognition, and identification of a target by a noise-limited thermal imaging surveillance system.

A more advanced (convenient) algorithm and method for calculating the probability of detection, recognition, and identification of an object (target) by a thermal imaging surveillance system at a given range have been developed. This is based on the minimum resolution temperature difference, Johnson’s criterion, as well as the *TTPF* and *TRTPF* functions. The proposed algorithm makes it relatively easy to calculate the probability of detecting, recognizing, and identifying a target by a thermal imaging system, which is limited by system noise.

Keywords: aviation thermal imaging system; probability of detecting, recognizing, and identifying the target; target range; threshold contrast perception; probability transfer function based on target distance.