

<https://doi.org/10.15407/knit2023.05.020>
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. ТЯГУР^{1,2}, 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

ЙМОВІРНІСТЬ РОЗРІЗНЕННЯ ЦІЛІ КОНТРАСТНО ОБМЕЖЕНОЮ ТЕПЛОВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ БЕЗПІЛОТНИКА

Оснащення сучасних безпілотних літальних апаратів тепловізійними камерами розширює можливості використання їх у будь-яких умовах навколишнього середовища, що дозволяє здійснювати ефективну повітряну розвідку чи виконання інших бойових задач. Головними задачами з розрізнення цілей є виявлення, розпізнавання та ідентифікація. Наявні методи і алгоритми визначення ймовірності розрізнення цілей не дозволяють ефективно і швидко розраховувати перелічені ймовірності в залежності від дальності до цілі.

Метою статті є розробка нового методу розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження.

Розроблено удосконалений метод і алгоритм розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання і ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження на основі критерію Джонсона згідно із стандартом НАТО 4347, апроксимації Шульца порогового контрасту сприйняття оператором зображення на екрані дисплея, а також за допомогою цільової функції передачі ймовірності та функції передачі ймовірності по дальності до цілі. Наведено приклад розрахунку ймовірності розрізнення цілі. Запропонований алгоритм дозволяє оперативно розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою безпілотника.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат з тепловізійною камерою; ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі; дальність до цілі; пороговий контраст сприйняття; функція передачі ймовірності по дальності до цілі.

Цитування: Колобродов В. Г., Лихоліт М. І., Тягур В. М., Васильковська І. О., Колобродов М. С. Ймовірність розрізнення цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою безпілотника. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 5 (144). С. 20—32. <https://doi.org/10.15407/knit2023.05.020>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ВСТУП

З початку двадцять першого століття тепловізори знайшли широке застосування в різних галузях науки, техніки й аерокосмічної промисловості [3, 5, 6, 19]. Більшість сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), або дронів, оснащена тепловізійними камерами, що дозволяє їхнє використання цілодобово у складних погодних умовах [3, 19]. Тепловізійне зображення, отримане такими камерами, на екрані дисплея аналізується оператором для прийняття відповідного рішення. Дрони також масово застосовуються у військовій справі, насамперед для здійснення повітряної розвідки — як тактичної, так і стратегічної, а також для нанесення вогневих ударів по наземних цілях [6, 19].

Основними споживчими характеристиками таких тепловізійних систем спостереження (ТПСС) є просторова і температурна роздільність, максимальні дальності виявлення і розпізнавання цілі, або відповідні ймовірності [1, 7, 11]. Ці характеристики обмежені просторовим або енергетичним розділенням [14]. Дослідженню ТПСС, основними компонентами яких є об'єкти в приймач випромінювання, присвячено значну кількість наукових праць [2, 8, 10, 12, 18]. Водночас практично немає досліджень з розробки методів і алгоритмів визначення ймовірності виконання поставленого завдання із розрізнення цілей (виявлення, розпізнавання та ідентифікації) в залежності від дальності до цілі. Ці ймовірності обмежені контрастом зображення або шумами ТПСС. У основі цих складних методів лежить розрахунок відношення сигнал/шум на виході матричного приймача випромінювання (МПВ) з урахуванням характеристик об'єкта спостереження, відстані між ціллю і тепловізором, а також температурної чутливості ТПСС і законів зорового сприйняття [1, 7, 9, 11]. Однак ці методи не дозволяють оперативно розрахувати ймовірності виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі для довільно заданої відстані до цілі.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою статті є розробка більш досконалого методу і алгоритму розрахунку ймовірності вияв-

лення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження на заданій відстані до цілі на основі критерію Джонсона і порогового контрасту сприйняття оператором зображення на екрані дисплея.

2. КОНТРАСТНО ОБМЕЖЕНІ ТЕПЛОВІЗОРИ

2.1. Просторова роздільна здатність. Для ТПСС використовують різні види розділення: просторове, енергетичне, спектральне, часове. Для більшості ТПСС важливо забезпечити необхідне просторове й енергетичне розділення.

Просторова частота $\nu_{x,\max}$, при якій модуляційна передавальна функція (МПФ) ТПСС зменшується до певного рівня, наприклад до значення порогового контрасту, що сприймається оператором, часто служить мірою просторового розділення. За таку просторову частоту можна прийняти частоту Найквіста ν_N , яка дорівнює половині частоти просторової вибірки, що здійснюється в ТПСС з МПВ.

Під час моделювання ТПСС використовують різні моделі, в яких враховують як просторову, так і енергетичну роздільну здатність системи. Як правило, під час дослідження процесів розпізнавання об'єктів за допомогою ТПСС використовуються такі моделі [5, 7, 16, 17]:

1. Модель для контрастно обмежених систем, яка враховує пропускання атмосфери без спотворень зображення.

2. Стандартна модель для систем, обмежених шумами, яка враховує пропускання атмосфери без спотворень зображення.

В основному ТПСС мають дві порогові чутливості: порогову чутливість зорового аналізатора оператора і порогову чутливість МПВ.

2.2. Контрастно обмежені системи. Тепловізійна система спостереження створює зображення об'єкта, наприклад штрихової міри, на екрані дисплея з певним контрастом, який сприймає спостерігач (оператор). Зоровий аналізатор (око) спостерігача має певний пороговий контраст, який залежить від просторової частоти ν_x зображення міри. Зі збільшенням просторової частоти зображення міри контраст зображення між світлими і темними смугами зменшується. На певній просторовій частоті $\nu_{x,\max}$, смуги в зо-

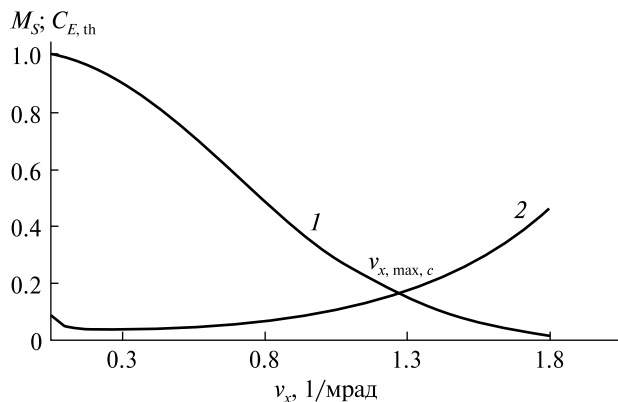


Рис. 1. До визначення максимальної смуги пропускання контрастно обмеженої ТПСС: 1 — МПФ тепловізора, 2 — пороговий контраст v_x сприйняття зображення оператором

браженні не спостерігаються. Ця максимальна просторова частота $v_{x, \max, c}$ у зображенні і характеризує граничне просторове розділення ТПСС, тобто система «ТПСС — оператор» пропускає просторові частоти тільки у межах від 0 до $v_{x, \max, c}$ (рис. 1). Тому ТПСС, які працюють у даних умовах, називають обмеженими за контрастом, або *контрастно обмеженими*. Верхня крива описує МПФ M_s ТПСС. Просторову частоту визначають у точці перетину графіків МПФ M_s і порогового контрасту $C_{E,th}$ сприйняття зображення оператором. Під час роботи такої системи об'єкт спостереження розрізняється тільки в тому випадку, коли його контраст перевищує порогове значення. Істотно, що в даній ситуації відношення сигнал/шум на виході системи вважається достатньо великим, а тому обмеження просторового розділення визначаються тільки низьким контрастом.

2.3. Критерій Джонсона для оцінки ефективності тепловізійних систем спостереження. Дослідження ефективності (performance — продуктивності) ІЧ-систем спостереження тривають понад 60 років у відділі досліджень і розробок армії США. Результати цих досліджень використовуються більшістю експертів з ІЧ-систем у світі. Були розроблені моделі тепловізорів, які виконували завдання виявлення, розпізнавання та ідентифікації тактичних цілей на полі бою. Найголовніше, що військові користувачі

цих моделей розуміють як метрики, передбачені моделями, співвідносяться з тим, як працюватимуть системи на полі бою.

Основну гіпотезу для моделей приладів нічного бачення (ПНБ) запропонував Джонсон у 1958 році [15, 18]. Згідно із цією моделлю здатність спостерігача виявляти, визначати орієнтацію, розпізнавати та ідентифікувати військові цілі, що перебувають на певному фоні, за допомогою ПНБ, залежить від того, наскільки добре він може розрізнити штрихові смуги міри Фуко з різними просторовими частотами і тим самим температурним контрастом ΔT відносно фону, що і ціль:

$$\Delta T = T_t - T_b, \quad (1)$$

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

Подальший розвиток моделювання ТПСС полягав у створенні простої у використанні моделі, яка враховує характеристики тест-об'єкта у вигляді штрихової міри Фуко (розміри, температурний контраст, просторова частота міри), послаблення випромінювання від цілі в атмосфері, параметри оптичної системи (діаметр вхідної зіниці, фокусна відстань і коефіцієнт пропускання), приймача випромінювання (розмір пікселів, розмір матриці, питома виявлювальна здатність), електронної системи обробки сигналів МПВ; дисплей і закони зорового сприйняття оператором тепловізійного зображення з екрану дисплея. З цією метою було використано мінімально роздільну різницю температур (МРРТ) як функцію просторової частоти міри Фуко. Такий підхід дозволив порівнювати результати спостереження фонові цільові обстановки у польових умовах з лабораторними вимірюваннями характеристик тепловізорів. Розроблена модель дозволила аналізувати і оптимізувати ТПСС різного призначення, і насамперед тепловізійні приціли.

Модель ТПСС для розрізнення цілі, яка використовує концепцію Джонсона і порогового контрасту, наведено на рис. 2. Температурний контраст цілі ΔT зменшується за рахунок ослаблення випромінювання в атмосфері, тобто

$$\Delta T' = \Delta T \tau_A(R), \quad (2)$$

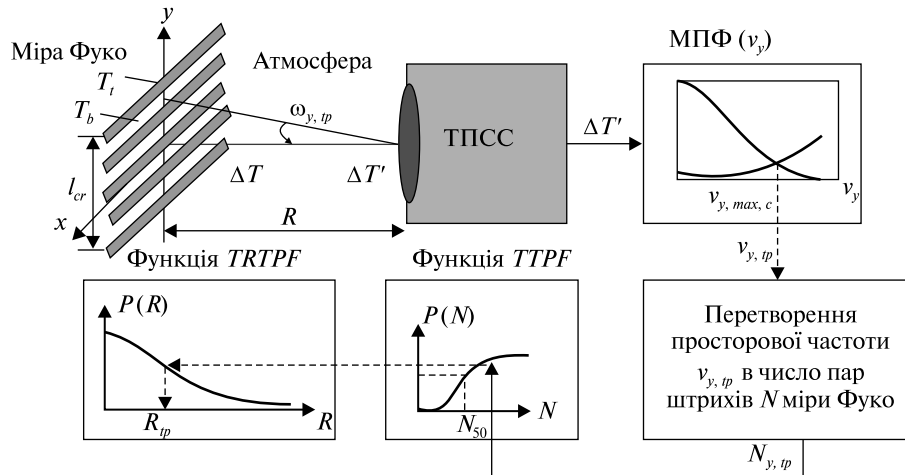


Рис. 2. Модель ТПСС для прогнозування виконання завдання спостереження, яка використовує концепцію Джонсона і пороговий контраст

де $\tau_A(R)$ — інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери, R — відстань між ціллю і ТПСС.

Різниця температур відповідає просторовій частоті $v_{y,tp}$ міри, що спостерігає ТПСС, яка залежить від критичного розміру цілі l_{cr} і відстані R . Число штрихів (періодів) міри Фуко, розташованих уздовж критичного розміру l_{cr} цілі, визначаються за формулою

$$N [\text{періодів}] = v_{y,tp} [\text{періодів/мрад}] l_{cr} [\text{мрад}]. \quad (3)$$

У залежності від відстані R число періодів міри Фуко, розташованих уздовж критичного розміру l_{cr} цілі, визначимо за формулою

$$N = v_{y,tp} \frac{l_{cr}}{R}, \quad (4)$$

де l_{cr} вимірюється в метрах, R — в кілометрах.

Число штрихів N будемо використовувати для визначення ймовірності виконання завдання із спостереження цілі. На рис. 2 показано вплив поглинання випромінювання в атмосфері на температурний контраст цілі ΔT , що призводить до його зменшення до величини $\Delta T'$ у площині вхідної зіниці об'єктива тепловізора. Важливо, що при цьому для контрастно обмежених ТПСС, температурний контраст в тепловізійному зображенні тест-об'єкта на екрані дисплея залишається незмінним. У точці перетину графіків функцій $M_s(v_y)$ і $C_{E,th}(v_y)$ визначаємо просторову частоту $v_{y,tp}$, а потім за формулою (4) розраховуємо мак-

симальне число періодів міри Фуко N , що розрізняються уздовж критичного розміру цілі l_{cr} .

Ймовірність виконання завдання спостереження (виявлення, орієнтація, розпізнавання, ідентифікація) визначаємо за допомогою цільової функції передачі ймовірності TTPF (Target Transfer Probability Function), яка розраховується за формулою [3, 7, 18]

$$P(N) = \frac{(N/N_D)^k}{1 + (N/N_D)^k}, \quad (5)$$

де P — ймовірність виконання певного завдання спостереження, N — кількість пар штрихів міри Фуко, що розміщуються уздовж критичного розміру цілі, N_D — кількість пар штрихів згідно з критерієм Джонсона, яка забезпечує ймовірність виконання певного завдання спостереження $P = 50\%$, $k = 2.7 + 0.7(N/N_D)$.

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	
	НАТО [7]	Монографія [3]
Виявлення	1.0	1.0
Орієнтація	—	2.5
Розпізнавання	3.0	4.0
Ідентифікація	6.0	8.0

Таблиця 2. Критерії дискримінації з використанням підходу Джонсона (гранична частота)

Рівень дискримінації	Призначення	1-D періодів уздовж критичного розміру N_{50}	2-D періодів уздовж критичного розміру N_{50}
Виявлення	ціль військового призначення присутня	1.0	0.75
Розпізнавання	клас розпізнавання, до якого належить ціль (танк, вантажівка або бронетехніка)	4.0	3.0
Ідентифікація	вказіть тип цілі (танк М1А, танк Т62, танк Т72)	8.0	6.0

Цю функцію було отримано в результаті великої кількості експериментальних польових досліджень. Наприклад, для ймовірності 50 % виконання різних завдань із спостережень цілі у табл. 1 [3] 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

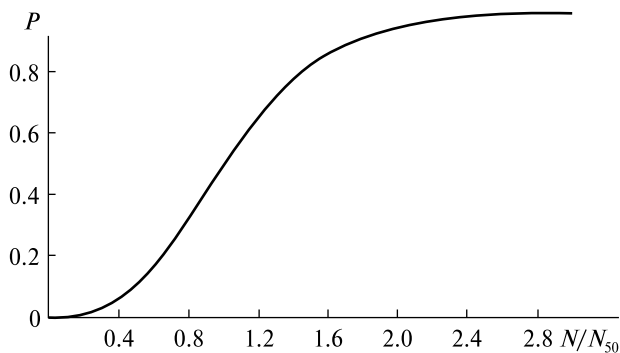


Рис. 3. Цільова функція передачі ймовірності $TTPF$

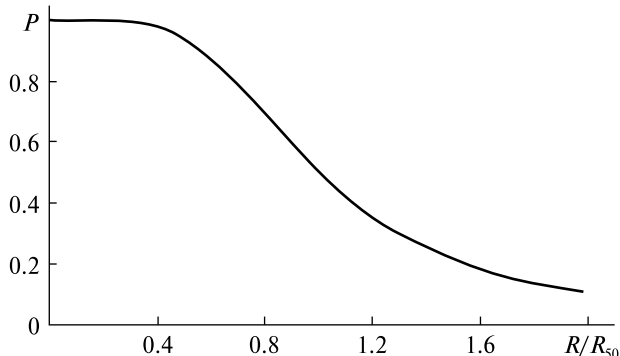


Рис. 4. Функція $TRTPF$: залежність ймовірності виконання завдання спостереження $P(R)$ від відстані R між ціллю і ТПСС

$TTPF$ і обирається із табл. 2 для ймовірності відповідного рівня $P(N_{50}) = 50\%$ [3].

Ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації потім визначається за допомогою $TTPF$ як [3]

$$P(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_{50}}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{N}{N_{50}}\right)}}{1 + \left(\frac{N}{N_{50}}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{N}{N_{50}}\right)}} \quad (6)$$

Графік функції (6) наведено на рис. 3.

Аналогічно до цільової функції передачі ймовірності $TTPF$ пропонується ввести нову функцію передачі ймовірності по дальності до цілі (rang) (Target Rang Transfer Probability Function) $TRTPF$. Із системи рівнянь (3), (4) і (6) маємо функцію $P(R)$, яка має вигляд

$$P(R) = \frac{\left(\frac{R_{50}}{R}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{R_{50}}{R}\right)}}{1 + \left(\frac{R_{50}}{R}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{R_{50}}{R}\right)}} \quad (7)$$

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

На рис. 4 наведено графік функції (7). Для отриманої ймовірності $P(R)$ із графіка, що наведений на рис. 4, визначаємо відношення R_{50}/R .

3. МОДУЛЯЦІЙНА ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ ТЕПЛОВІЗОРА

Мета цього розділу полягає в розробці методу визначення модуляційної передавальної функції тепловізора, до складу якого входять об'єктив,

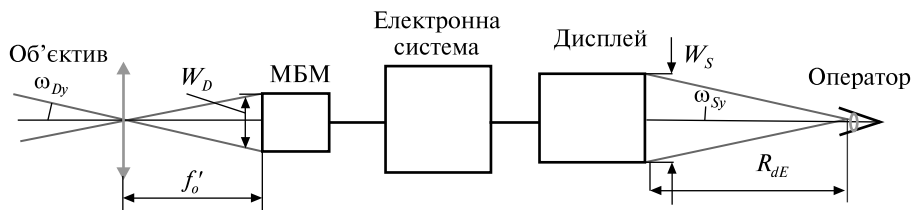


Рис. 5. Функціональна схема ТПСС

мікроболометрична матриця, електронна система і дисплей, що дозволить оптимізувати характеристики тепловізора для вирішення конкретної задачі спостереження.

Функціональну схему ТПСС наведено на рис. 5. Інфрачервоне випромінювання від об'єкта спостереження послаблюється в атмосфері і надходить до вхідної зіниці об'єктива. Об'єктив формує ІЧ-зображення об'єкта і фону на чутливій поверхні мікроболометричної матриці (МБМ). Електричний відеосигнал з МБМ обробляється електронною системою і надходить по каналу зв'язку на пульти керування дроном, дисплей якого формує на екрані зображення об'єкта у видимій області спектру.

Математичну модель ТПСС будемо розглядати в області частот (просторових і часових), вважаючи що вона є лінійною інваріантною системою. При цьому вважають, що об'єкт і фон випромінюють некогерентно, а кожен елемент ТПСС має свою модуляційну передавальну функцію. У цих умовах МПФ ТПСС M_s визначається добутком МПФ її окремих елементів: об'єктива, МБМ, електронного блоку та дисплея. Для одновимірного випадку маємо

$$M_s(v_y) = M_o(v_y)M_{Ds}(v_y)M_{Dt}(t)M_{El}(t)M_d(v_y), \quad (8)$$

де $M_o(v_x)$, $M_{Ds}(v_x)$, $M_{Dt}(t)$, $M_{El}(t)$ і $M_d(v_x)$ — МПФ об'єктива, МБМ, електронного блоку і дисплея відповідно.

Високоякісні об'єктиви без центрального екранування з діаметром вхідної зіниці D_{po} можна розглядати як дифракційно обмежені, МПФ яких визначається функцією [1]

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi}(\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } x > 1, \end{cases} \quad (9)$$

де

$$x = \lambda \frac{f'_o}{D_{po}} v_x.$$

Графік МПФ дифракційно обмеженого об'єктива наведено на рис. 6.

Для спрощення математичних перетворень апроксимуємо складну функцію (9) лінійною функцією

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - 1.218x, & \text{якщо } 0 \leq x \leq 0.821, \\ 0, & \text{якщо } x > 0.821. \end{cases} \quad (10)$$

Одновимірна просторова МПФ мікроболометричної матриці апроксимується функцією [8]

$$M_{Ds}(v_y) = \text{sinc}(W_D v_y) \text{sinc}(w_D v_y), \quad (11)$$

де W_D — період матричної структури, w_D — розмір чутливої площадки пікселя.

Часова МПФ МБМ є просторовим фільтром низьких частот, який апроксимується функцією [11]

$$M_{Dt} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 t_D^2 f^2}}, \quad (12)$$

де t_D — постійна часу мікроболометра.

МПФ електронного блоку $M_{El}(t)$ моделюється фільтрами Баттерворта n -го порядку [1]. Сучасні

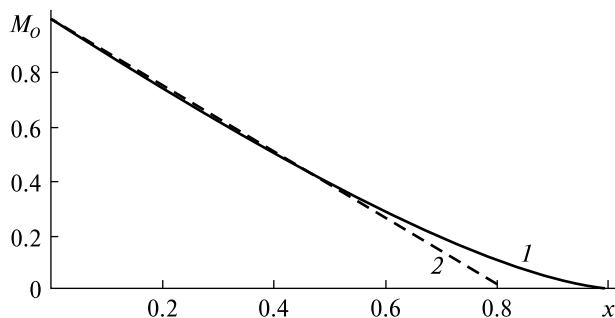


Рис. 6. МПФ дифракційно обмеженого об'єктива (графік 1) та її лінійна апроксимація (10) (графік 2)

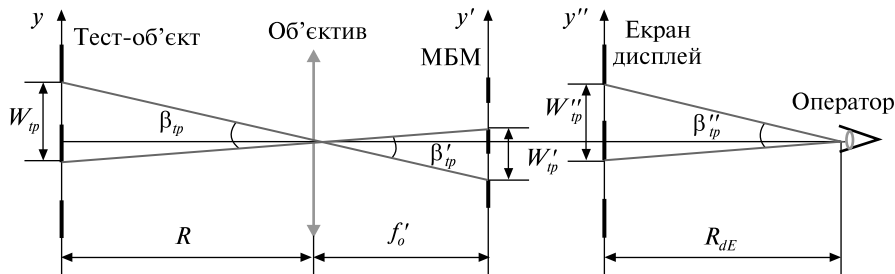


Рис. 7. Зв'язок між кутовими просторовими частотами у просторі спостереження v''_{ya} і просторі предметів v_{ya}

електронні блоки мають $M_{El}(f) \approx 1$ [7]. МПФ дисплея апроксимується функцією, аналогічною МПФ МБМ, тобто

$$M_D(v_y) = \text{sinc}(W_D v_y) \text{sinc}(w_D v_y). \quad (13)$$

Із наведеної на рис. 5 узагальненої схеми ТПСС видно, що МПФ об'єктива і МБМ визначаються в задній фокальній площині об'єктива, а МПФ дисплея — у площині екрана дисплея. Слід також відзначити, що у більшості випадків просторову частоту v_y визначають у просторі предметів і вимірюють у мрад⁻¹. Крім того, часові МПФ МБМ і електронного блоку залежать від часової частоти f .

Зв'язок між кутовою просторовою v_{ya} і часовою f частотами визначають співвідношенням [1]

$$f = \frac{\beta_D}{t_o} v_{ya}, \text{ Гц}, \quad (14)$$

де β_D — кутовий розмір пікселя матриці, t_o — час формування сигналу одним пікселем.

Встановимо зв'язок між кутовою просторовою частотою у просторі спостереження v''_{ya} і просторі предметів v_{ya} , використовуючи рис. 7. Нехай у площині предметів на відстані R від ТПСС розташовано міру Фуко з лінійним періодом W_{tp} . Тоді кутовий період і просторова частота визначаються як

$$\beta_{tp} = \frac{W_{tp}}{R}, \quad (15)$$

$$v_{ya} = \frac{1}{\beta_{tp}} = \frac{R}{W_{tp}}.$$

Об'єктив формує зображення міри Фуко з лінійним періодом W'_{tp} і кутовою просторовою

частотою

$$v'_{ya} = \frac{f'_o}{W'_{tp}} = \frac{R}{W_{tp}} = v_{ya}. \quad (16)$$

МБМ формує на екрані дисплея зображення міри Фуко з періодом W''_{tp} , яке спостерігає оператор, що перебуває на відстані R_{dE} від дисплея. Кутовий період цього зображення і кутова просторова частота визначаються як

$$\beta''_{tp} = \frac{W''_{tp}}{R_{dE}} \text{ і } v''_{ya} = \frac{1}{\beta''_{tp}} = \frac{R_{dE}}{W''_{tp}}. \quad (17)$$

З урахуванням співвідношень (16) і (17) встановлюємо зв'язок між кутовими просторовими частотами у просторі спостереження v''_{ya} і просторі предметів v_{xa} :

$$v''_{ya} = \frac{R_{dE}}{W''_{tp}} = \frac{R_{dE}}{W'_{tp} \beta_{el}} = \frac{R_{dE}}{f'_o \beta_{el}} v_{ya}, \quad (18)$$

де $\beta_{el} = W''_{tp} / W'_{tp}$ — електронне збільшення ТПСС.

Кутове збільшення системи «ТПСС — оператор» визначають як (рис. 7)

$$\Gamma_s = \frac{\text{tg} \beta''_{tp}}{\text{tg} \beta_{tp}} \approx \frac{\beta''_{tp}}{\beta_{tp}} = \frac{W''_{tp}}{W'_{tp}} \frac{R}{R_{dE}} = \frac{W''_{tp}}{W'_{tp}} \frac{f'_o}{R_{dE}} = \frac{f'_o \beta_{el}}{R_{dE}}. \quad (19)$$

Тому співвідношення (18) можна подати у вигляді

$$v''_{ya} = \frac{v_{ya}}{\Gamma_s}. \quad (20)$$

Представимо МПФ окремих складових ТПСС у вигляді функцій, які залежать від кутової просторової частоти у просторі об'єкта (рис. 7).

МПФ об'єктива визначимо із функції (11), де

$$x = \lambda \frac{v_{ya}}{D_{po}}.$$

Тоді

$$M_o(v_{ya}) = \begin{cases} 1 - 1.218\lambda \frac{v_{ya}}{D_{po}}, & \text{якщо } 0 \leq v_{ya} \leq 0.821 \frac{D_{po}}{\lambda}, \\ 0, & \text{якщо } v_{ya} > 0.821 \frac{D_{po}}{\lambda}. \end{cases} \quad (21)$$

Просторову МПФ МБМ визначимо із функції (11), яку представимо у вигляді

$$M_{Ds}(v_{xa}) = \text{sinc}\left(\frac{W_D}{f'_o} v_{ya}\right) \text{sinc}\left(\frac{w_D}{f'_o} v_{ya}\right). \quad (22)$$

Часову МПФ МБМ визначимо із функції (12), яка з урахуванням співвідношення (16) матиме вигляд

$$M_{Dt}(v_{ya}) = \left[1 + 4\pi^2 \left(\frac{t_D}{t_o}\right)^2 \left(\frac{W_D}{f'_o}\right)^2 v_{ya}^2 \right]^{-0.5}. \quad (23)$$

Остаточну МПФ дисплея визначимо із функції (13), яка з урахуванням співвідношення (16) матиме вигляд

$$M_d(v_{xa}) = \text{sinc}\left(\frac{V_D}{f'_o \beta_{el}} v_{ya}\right) \text{sinc}\left(\frac{v_D}{f'_o \beta_{el}} v_{ya}\right). \quad (24)$$

Розглянемо приклад розрахунку МПФ ТПСС, яка має такі характеристики:

- об'єktiv — фокусна відстань $f'_o = 70$ мм, діаметр входної зіниці $D_{po} = 70$ мм.
- МБМ — розмір пікселя $V_D = 17$ мкм, розмір чутливої площадки $v_D = 14$ мкм, розмір матриці $X_D = 6.8$ мм, постійна часу $t_D = 10$ мс, частота кадрів $f_f = 50$ Гц;
- дисплей — розмір пікселя $V_d = 17$ мкм, розмір кольорової групи пікселя $v_D = 15$ мкм, розмір екрана $X_d = 9.6$ мм.

На рис. 8 наведено модуляційні передавальні функції окремих складових ТПСС і його результуюча МПФ (8).

Аналіз функцій (8), (22)–(24) і їхніх графіків показав, що:

1. МПФ окремих складових визначаються, як правило, в різних місцях ТПСС: об'єктива і МБМ — в задній фокальній площині об'єктива; дисплея — у площині екрана дисплея. Часова МПФ залежить від часової частоти. При визна-

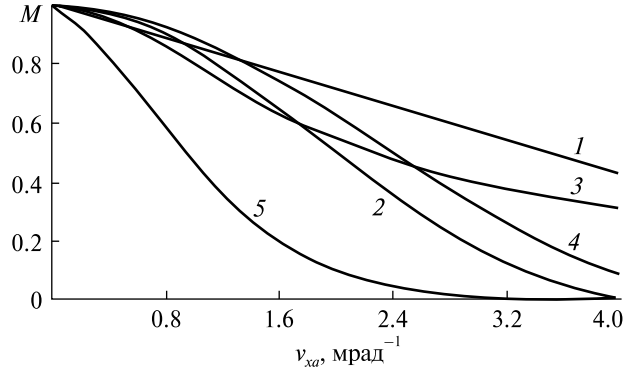


Рис. 8. Модуляційні передавальні функції ТПСС: 1 — МПФ об'єктива, 2 — просторова МПФ МБМ, 3 — часова МПФ МБМ, 4 — МПФ дисплея, 5 — сумарна МПФ ТПСС

ченні остаточної МПФ ТПСС необхідно, щоб усі МПФ складових каналу розглядались у певній площині або просторі. Для зручності практичного застосування пропонується МПФ усіх складових розглядати у просторі «об'єкт спостереження — ТПСС» як функції кутової просторової частоти.

2. Найбільший вплив на погіршення результуючої МПФ ТПСС $M_s(v_x)$ має просторова МПФ МБМ $M_{Ds}(v_{xa})$, яка визначається розміром пікселя. На частоті Найквіста $v_N = 2$ мм⁻¹ відбувається зниження контрасту за рахунок МБМ до 28 %, дифракційно обмеженого об'єктива до 71 %, дисплея до 62 %. При цьому сумарна МПФ ТПСС $M_s(v_N) = 0.095$.

3. Результуюча МПФ ТПСС добре апроксимується гауссовою функцією [11]

$$M_{s,ap}(v_{xa}) = \exp(-2\pi^2 r_{sa}^2 v_x^2), \quad (25)$$

де r_{sa} , мрад — кутовий радіус зображення точкового джерела випромінювання, яке спостерігає оператор на екрані дисплея.

Таким чином, ми пропонуємо розглядати МПФ тепловізора у просторі «об'єкт спостереження — ТПСС», що дозволяє розраховувати кутову роздільну здатність контрастно обмеженого ТПСС. Отримані аналітичні вирази МПФ окремих компонентів дозволяють оптимізувати характеристики ТПСС для вирішення конкретної задачі спостереження.

4. ПОРОГОВИЙ КОНТРАСТ СПРИЙНЯТТЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Здатність передбачити ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі як функція діапазону залежить від того, наскільки добре бачить людське око; це описано *пороговою функцією контрасту* (СТФ). Зображення видно на дисплеях, які працюють із обмеженою частотою кадрів, і через обмеження сенсора часто виникає шум дисплея. Це зумовлює вимогу визначити СТФ ока без шуму і модель, яка апроксимує цю функцію. Робота, описана тут, застосовується до будь-яких систем візуалізації незалежно від того, чи сприймають ці системи видиме або інфрачервоне випромінювання за умови, що система зображення створює відтінки сірого зображення, яке бачить людське око. Ми визначаємо функцію контрасту очей для будь-якого відтінку сірого дисплея (наприклад, плоска панель).

Поріг контрастності та метрика ТТР (Targeting Task Performance) — це здатність передбачити ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі. Вони характеризуються функцією порогового контрасту зображення СТФ (contrast threshold function) в залежності від просторової частоти зображення цілі на екрані дисплея, яке добре бачить людське око. На вигляд функції СТФ впливають частота кадрів і шуми дисплея. При визначенні порогового контрасту зображення ці фактори у більшості випадків не враховуються.

У монографії [3] розглянуто порогову функцію контрасту неозброєного ока, яке спостерігає

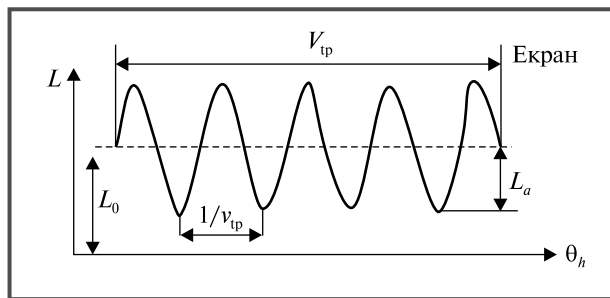


Рис. 9. Розподіл яскравості в зображенні тест-об'єкта на екрані дисплея для вимірювання функції порогового контрасту оператора: $V_{tp} \times W_{th}$ — розмір тест-об'єкта, v_{tp} — просторова частота тест-об'єкта

синусоїдальний малюнок на ідеальному дисплеї великих розмірів, в якому відсутні шуми.

Для визначення порогового контрасту зображення СТФ за допомогою комп'ютера синтезується тест-об'єкт у вигляді синусоїдального розподілу яскравості екрану, який є функцією кута θ_h з амплітудою L_a і середньою яскравістю L_0 (рис. 9).

Яскравість тест-об'єкта описується функцією

$$L_{tp}(\theta_h) = L_0 + L_a \sin(2\pi v_{tp} \theta_h) \operatorname{rect}\left(\frac{\theta_h}{V_{tp}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{\theta_v}{W_{tp}}\right), \quad (26)$$

де просторова частота v_{tp} вимірюється у мрад^{-1} , а $\theta_h, \theta_v, V_{tp}$ і W_{tp} — в мрад.

Контраст тест-об'єкта визначається як

$$C_{tp}(v_{tp}) = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (27)$$

де L_{\max} і L_{\min} — максимальна і мінімальна яскравість дисплея. Із формули (26) маємо: $L_{\max} = L_0 + L_a$ і $L_{\min} = L_0 - L_a$.

Із рис. 9 видно, що C_{tp} лежить у межах від 0 до 1. Для фіксованого значення L_a , оскільки яскравість не може бути від'ємною, найменше значення L_0 дорівнює L_a , а це означає, що максимальне значення C_{tp} дорівнює 1. Для фіксованого значення L_0 найменше значення L_a дорівнює 0, а найменше значення C_{tp} дорівнює 0.

Процедура вимірювання СТФ полягає в наступному. Синусоїдальний тест-об'єкт випадковим чином відображається у верхній або нижній частині дисплея, а спостерігач повинен визначити, в якій частині дисплея з'явиться шаблон — у верхній чи нижній.

При заданих просторовій частоті v_{tp} і середній яскравості тест-об'єкта L_0 контраст тест-об'єкта зменшується шляхом зменшення L_a таким чином, щоб модульований сигнал був ледь помітним. Тест-об'єкт нульового контрасту випадково відображається у будь-якій половині екрану, а тест-об'єкт з ледь помітним контрастом — в іншій половині екрану. Спостерігач повинен вирішити, де перебуває модульований тест-об'єкт. У залежності від яскравості L_0 і просторової частоти v_{tp} визначається, яка частина екрана мала три чверті правильної відповіді. Це буде відповідати ймовірності виявлення 50 %.

Експериментально встановлено, що у випадку, коли розміри тест-об'єкта $V_{tp} \times W_{th}$ перевищують 15° , то функція порогового контрасту майже не залежить від розміру $V_{tp} \times W_{th}$.

Експериментальні дослідження свідчать про те, що пороговий контраст сприйняття зображення $C_{v,th}$ залежить від яскравості фону L_{sb} і кутових розмірів елемента розкладу зображення $\delta\omega_E$. Пороговий контраст $C_{v,th}$ різко змінюється зі збільшенням $\delta\omega_E$ до $10' \dots 20'$ і далі змінюється неістотно. Іноді вважають [11], що найоптимальнішим пороговим контрастом є величина $C_{v,th,opt} = 0.027$.

Для апроксимації порогового контрасту іноді використовують функцію, запропоновану Шулцем [13]:

$$C_{E,th}(v_x) = \frac{C_E}{\exp(-c_1 v_{ya}) - \exp(-c_2 v_{ya})}, \quad (28)$$

де $C_E = 0.01033$ — константа, $c_1 = 0.1138^\circ$, $c_2 = 0.325^\circ$, v_x , град $^{-1}$ — просторова частота. Під час дослідження ТПСС у більшості випадків просторову частоту вимірюють у мрад $^{-1}$. Причому $1 \text{ град}^{-1} = 0.01745 \text{ мрад}^{-1}$. У цьому випадку постійні коефіцієнти у формулі (28) матимуть значення $c_1 = 1.986 \text{ мрад}$ і $c_2 = 5.673 \text{ мрад}$.

5. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ ВІД ЦІЛІ ДО ТПСС ПРИ ВИКОНАННІ ЗАВДАННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ З ПЕВНОЮ ЙМОВІРНІСТЮ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ $TTPF$ І $TRTPF$

1. Визначаємо просторову частоту міри Фуко $v_{y,tp}$ графічним методом із рівняння

$$M_s(v_y) = C_{E,tp}(v_y), \quad (29)$$

яка забезпечує рівність МПФ ТПСС $M_s(v_y)$ і порогового контрасту $C_{E,tp}(v_y)$ у просторі об'єкта спостереження.

2. За формулою (4) розраховуємо кількість періодів N міри Фуко уздовж вертикального напрямку (критичного розміру цілі l_{cr}), де висота цілі l_{cr} вимірюється в метрах, відстань R до цілі — в кілометрах, а просторова частота міри $v_{y,tp}$ — у мрад (рис. 2).

3. За заданими температурами поверхні цілі T_t і фону T_b за формулою (1) розраховуємо температурний контраст $\Delta T = T_t - T_b$, який дорівнює температурному контрасту міри Фуко.

4. Температурний контраст ΔT зменшується за рахунок поглинання випромінювання в атмосфері за законом Бугера — Ламберта, але при надходженні до вхідної зіниці об'єктива за умови перевищення його порогового контрасту він не впливає на просторове розділення ТПСС.

5. Згідно із критерієм Джонсона для ймовірності виконання завдання спостереження 50 % із табл. 2 визначаємо кількість періодів міри уздовж критичного розміру цілі: для виявлення — $N_{d,50} = 1$, $N_{r,50} = 3$, $N_{i,50} = 6$.

Для визначеної кількості періодів N міри Фуко за формулою (6) для функції $TTPF$ або її графіка (рис. 3) визначаємо ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі.

6. Із формули (4) знаходимо відстані до цілі, на яких виконується завдання спостереження з ймовірністю 50 %:

$$R_{50} = v_{y,tp} \frac{l_{cr}}{N_{50}}. \quad (30)$$

Для визначеної відстані до цілі для виконання завдання спостереження з певною ймовірністю за формулою (7) для функції $TRTPF$ або її графіка (рис. 4) визначаємо відстані виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі.

6. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Для практичного застосування запропонованого методу визначення ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації розглянемо ТПСС, яка має такі характеристики.

- Тепловізор — об'єктив: фокусна відстань $f'_o = 70 \text{ мм}$, діаметр вхідної зіниці $D_{po} = 70 \text{ мм}$, мікроболометрична матриця: формат матриці 320×240 пкл, розмір пікселя $V_D = 17 \text{ мкм}$, постійна часу $t_D = 10 \text{ мс}$, частота кадрів $f_f = 50 \text{ Гц}$; дисплей: розмір пікселя $v_D = 15 \text{ мкм}$, розмір екрана $Y_d = 7.2 \text{ мм}$.

- Об'єкт спостереження — тест-об'єкт, що використовується в стандарті НАТО 4347 для визначення максимальної дальності виявлення 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 $T_b = 288 \text{ К}$) — $\Delta T_o = 2 \text{ К}$, розміри $V_{tp} \times W_{tp} = 2.3 \times 2.3 \text{ м}^2$.

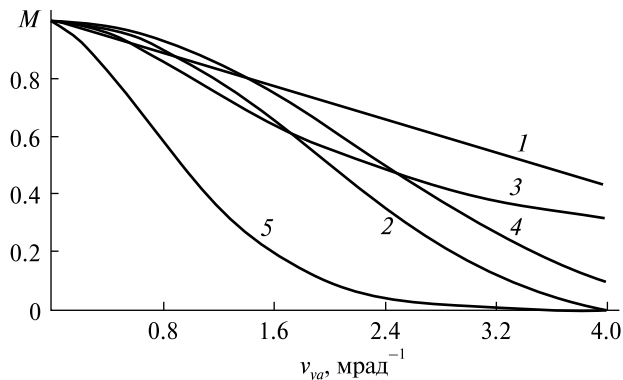


Рис. 10. Модуляційні передавальні функції: 1 — МПФ об’єктива, 2 — просторова МПФ МБМ, 3 — часова МПФ МБМ, 4 — МПФ — дисплея, 5 — сумарна МПФ ТПСС

• Умови спостережень: зміна початкового температурного контрасту ΔT_o між об’єктом і заднім фоном унаслідок послаблення випромінювання в атмосфері враховується законом Бугера — Ламберта (2), який має вигляд

$$\Delta T(R) = \Delta T_o \exp(-\kappa_A R), \quad (31)$$

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

Послідовність розрахунків наступна.

1. За формулами (10)—(12) і (8) розраховуємо МПФ об’єктива, просторову і часову МПФ МБМ, дисплея і сумарну МПФ ТПСС у просторі цілі, використовуючи формулу (12). Графіки цих функцій наведено на рис. 10.

2. За формулою (28) визначаємо пороговий контраст у просторі об’єкта, враховуючи зв’язок між просторовими частотами у просторах оператора і об’єкта спостереження, який визначається співвідношенням (18). Тоді пороговий контраст буде визначатися за формулою

$$C_{E,th}(v_{ya}) = \frac{C_E}{\exp(-1.986v''_{ya}) - \exp(-5.673v''_{ya})} = \frac{C_E}{\exp\left(-1.986 \frac{R_{dE}}{f'_O \beta_{El}} v_{ya}\right) - \exp\left(-5.673 \frac{R_{dE}}{f'_O \beta_{El}} v_{ya}\right)}, \quad (32)$$

де кутова просторова частота v_{ya} вимірюється в мрад^{-1} .

З умови знаходимо:

• фокусну відстань об’єктива $f'_o = 70 \text{ мм}$,

• електронне збільшення $\beta_{el} = \frac{W''_{tp}}{W'_{tp}} = \frac{7.2}{4.08} = 1.76$,

• оптимальну відстань між екраном дисплея і оператором [11] $R_{dE} = 6Y_d = 43.2 \text{ мм}$.

Для цих параметрів розрахункова формула (32) матиме вигляд

$$C_{E,th}(v_{ya}) = \frac{0.01033}{\exp(-0.696v_{ya}) - \exp(-1.972v_{ya})}. \quad (33)$$

3. Підставляємо сумарну МПФ ТПСС і пороговий контраст (33) до рівняння (29). У точці перетину графіків функцій $M_s(v_{ya})$ і $C_{E,th}(v_{ya})$ визначаємо просторову частоту міри Фуко $v_{y,tp} = 2.2 \text{ мрад}^{-1}$.

4. За формулою (4) розраховуємо максимальну кількість періодів міри Фуко N , що розрізняються уздовж критичного розміру цілі l_{cr} . Наприклад, для відстані до тест-об’єкта $R = 1.7 \text{ км}$ маємо $N = 3$.

5. Згідно із критерієм Джонсона для ймовірності виконання завдання спостереження 50 % із табл. 2 визначаємо кількість періодів міри уздовж критичного розміру цілі: для виявлення — $N_{d,50} = 1$; для розпізнавання — $N_{r,50} = 3$; для ідентифікації $N_{i,50} = 6$.

Для визначеної кількості періодів $N = 3$ міри Фуко за формулою (6) для функції $TTPF$ або її графіка (рис. 3) визначаємо ймовірність виявлення, розпізнавання або ідентифікації цілі: $P_d = 99 \%$, $P_r = 50 \%$, $P_i = 10 \%$.

6. Із формули (4), яку представимо у вигляді

$$R_{50} = v_{y,tp} \frac{l_{cr}}{N_{50}}. \quad (34)$$

розраховуємо відстані від ТПСС до цілі, при якій виконується певне завдання спостереження з ймовірністю 50 % згідно критерію Джонсона: $R_{d,50} = 5.0 \text{ км}$, $R_{r,50} = 1.7 \text{ км}$, $R_{i,50} = 0.84 \text{ км}$.

7. 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 $R = 1.7 \text{ км}$ дозволяє

визначити ймовірності: виявлення — $P_d = 0.99$, розпізнавання — $P_r = 0.5$, ідентифікації $P_i = 0.1$.

ВИСНОВКИ

Розроблено більш досконалий (зручний) метод і алгоритм розрахунку ймовірності виявлення, розпізнавання і ідентифікації об'єкта (цілі) тепловізійною системою спостереження на заданій дальності, в основі якого лежить критерій Джонсона і пороговий контраст сприйняття оператором зображення на екрані дисплея, а також функцій $TTPF$ (6) і $TRTPF$ (7).

Запропоновано в розробленій моделі тепловізора використовувати критерій Джонсона відповідно до стандарту НАТО 4347, апроксимацію Шульца порогового контрасту сприйняття оператором зображення на екрані дисплея. Тепловізор розглядається як лінійна інваріантна система в кутових просторових частотах у просторі об'єкт — ТПСС. Запропонований алгоритм дозволяє оперативно розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою безпілотної.

REFERENCES

1. *Definition of nominal static ranger performance for thermal imaging systems* (1995). STANAG 4347.
2. Dobrovols'ka K. V., Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I., Tiahur V. M. (2018). *Increasing the spatial resolution of space microbolometric cameras*. Kyiv: Vik print. 223 p.
3. Driggers R. G., Friedman M. H., Devitt J. W., Fuxhi O., Singh A. (2002). *Introduction to infrared and electro-optical systems* (3rd ed.). Artech House, 712 p.
4. Driggers R. G., et al. (2021). Simple target acquisition model based on FI/d. *Opt. Eng.*, **60** (2).
5. Holst G. C. (2008). *Electro-optical imaging system performance* (5th ed.). Winter Park, Florida: JCD Publishing, 502 p.
6. Kaplan H. (2010). *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment* (3rd ed.). Washington, USA: SPIE Press, 192 p.
7. 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.
8. Kolobrodov V. G. (2019). Modulation transfer function of the thermal imaging monocular. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika. Radioaparobuduvannia*, 74—78.
9. Kolobrodov V. G. (2022) The influence of the probability of object recognition by a thermal imager on the maximum observation range. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, **88**, 77—85 [In Ukrainian].
10. Kolobrodov V. G., Lykholit M. I., Mykytenko V. I., Tiagur V. M., Dobrovolska K. V. (2017). Calculation model for optoelectronic remote sensing system's radiometric resolution at arbitrary viewing angles. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, **69**, 30—34.
11. Kolobrodov V. H., Lykholit M. I. (2007). *Design of thermal imaging and television surveillance systems*. Kyiv: NTUU KPI, 364 p.
12. Kolobrodov V. H., Lykholit M. I., Tiahur V. M., Pinchuk B. Yu. (2021). Image distortion in Earth remote sensing systems at arbitrary viewing angles. *Space Science and Technology*, **27** (3), 51—65.
13. Melamed R., Yitzhaky Y., Kopeika N. S., Rotman S. R. (1998). Experimental comparison of three target acquisition models. *Opt. Engineering*, **37** (7), 1902—1913.
14. Perić D., Livada B., Perić M., Vujić S. (2019). Thermal imager range: Predictions, expectations and reality. Vlatacom Institute, 11070 Belgrade, Serbia, *Sensors* 2019, 19, 3313.
15. Ratches J., Vollmerhausen R., Driggers R. (2001). Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: Past, present, and future. *IEEE Sensors J.*, **1** (1), 31—40.
16. Teaney B. P. (2012). Human target acquisition performance. *Proc. SPIE.*, **8355**.
17. Teaney B., Reynolds J. (2010). Next generation imager performance mode. *Proc. SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, **21**, 7662.
18. Vollmer M., Mollman K.-P. (2018). *Infrared thermal imaging. Fundamentals, research, and applications* (2nd ed.). Wiley — VCH, Weinheim, Germany, 788 p.
19. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications magazine*, **54** (5), 36—42.

Стаття надійшла до редакції 29.05.2023

Після доопрацювання 11.07.2023

Прийнято до друку 14.07.2023

Received 29.05.2023

Revised 11.07.2023

Accepted 14.07.2023

*V. G. Kolobrodov*¹, Professor, Dr. Sci. in Tech., Professor

*M. I. Lykholit*², Advisor to the acting Director – Chief Designer, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Dr. Sci. in Tech., Docent

V. M. Tiagur^{1,2}, Deputy Chief of Scientific and Technical Complex – Chief Designer of Division, Docent, Dr. Sci. in Tech., Docent

*I. O. Vasylkovska*¹, Senior Lecturer, Ph. D. in Tech

*M. S. Kolobrodov*¹, Researcher, Ph. D. in Tech

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056 Ukraine

² Special Device Production State Enterprise “Arsenal”

8 Prince Ostrozki Str., Kyiv, 01010 Ukraine

PROBABILITY OF TARGET DISCRIMINATION BY THE CONTRAST-LIMITED THERMAL VISION SYSTEM OF A UAV

Equipping modern unmanned aerial vehicles (UAVs) with thermal imaging cameras expands their potential utilization in various environmental conditions, enabling efficient aerial reconnaissance and execution of combat-related tasks. The primary objectives for target discrimination encompass detection, recognition, and identification. However, existing methods and algorithms for determining the probability of distinguishing targets do not offer an efficient and swift means of calculating these probabilities based on the target’s distance.

This article aims to develop a novel method for calculating the probability of detecting, recognizing, and identifying an object (target) using a thermal imaging surveillance system. The proposed approach involves an improved algorithm that utilizes the Johnson criterion, as per the NATO standard 4347, the Schultz approximation of the threshold contrast for the operator’s perception of the image on the display screen, and incorporates the objective function of probability transfer along with probability transfer functions based on the target’s distance. An example illustrating the calculation of the target discrimination probability is included to provide clarity. With the suggested algorithm, the probability of detecting, recognizing, and identifying the target through the contrast-limited thermal imaging system of the drone can be rapidly calculated.

Keywords: unmanned aerial vehicle with a thermal imaging camera, probability of detecting, recognizing, and identifying the target, target range, threshold contrast perception, probability transfer function based on the target distance.