

УДК 621.384.3

Вплив ймовірності розпізнавання об'єкта тепловізором на максимальну дальність спостереження

Колобродов В. Г.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

E-mail: thermo@ukr.net

Головною функцією тепловізійних систем спостереження є виявлення і розпізнавання об'єктів (цілей) з заданою ймовірністю. Однією з основних характеристик таких тепловізорів є максимальна дальність спостереження при заданій ймовірності розпізнавання. Розробці і дослідженню процесів розпізнавання цілей присвячено багато монографій і статей, в яких запропоновані методи розрахунку максимальної дальності розпізнавання (МДР) на основі критерію Джонсона для ймовірності розпізнавання 50%. Для практичного застосування тепловізійних систем спостереження (ТПСС) необхідно знати МДР за заданою ймовірністю розпізнавання. Метою даної статті є розробка методу розрахунку максимальної дальності розпізнавання цілей в реальних умовах за допомогою ТПСС при заданій ймовірності розпізнавання. Розроблено метод розрахунку МДР цілей в реальних умовах при заданій ймовірності розпізнавання, який ґрунтується на запропонованій моделі формування зображення в тепловізійному монокулярі. Запропоновано розглядати ТПСС, максимальна дальність дії яких обмежена контрастом зображення або власними шумами системи. Розглянута модель тепловізійного монокуляра, яка враховує параметри об'єкта спостереження, атмосфери, об'єктива, приймача випромінювання, дисплея, окуляра і зорового аналізатора оператора. Запропонована модель дозволила розробити методи розрахунку МДР при заданих ймовірностях розпізнавання. Отримані рівняння для розрахунку МДР для ТПСС, що обмежені контрастом зображення або власним шумом системи. Розглянуто приклад розрахунку МДР тепловізійного монокуляра.

Ключові слова: тепловізор; максимальна дальність розпізнавання; ймовірність розпізнавання об'єкта

DOI: [10.20535/RADAP.2022.88.77-85](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.77-85)

Вступ

Головною функцією тепловізійних систем спостереження є виявлення і розпізнавання об'єктів (цілей) з заданою ймовірністю [1–3]. Однією із основних характеристик таких тепловізорів є максимальна дальність спостереження при заданій ймовірності розпізнавання. Розробці і дослідженню процесів розпізнавання цілей присвячено багато монографій і статей, в яких запропоновані методи розрахунку максимальної дальності розпізнавання (МДР), що ґрунтуються на критерію Джонсона для ймовірності розпізнавання 50% в лабораторних умовах [4–8]. Аналіз науко-технічної літератури показує відсутність спрощеного методу розрахунку МДР тест-об'єктів, що важливо для вирішення тактичних задач по виявленню і розпізнаванню потенційно небезпечних цілей з заданою ймовірністю. Для практичного застосування тепловізійних систем спостереження (ТПСС) необхідно знати МДР в реальних умовах за заданою ймовірністю розпізнавання, яка забезпечує вирішення певної задачі

спостереження. Тому розробка методу розрахунку МДР цілей з заданою ймовірністю за допомогою ТПСС є надзвичайно актуальною задачею.

1 Постановка задачі

Метою даної статті є розробка методу розрахунку максимальної дальності розпізнавання цілей в реальних умовах за допомогою тепловізійної системи спостереження при заданій ймовірності розпізнавання.

2 Фізико-математична модель процесу розпізнавання цілей

Максимальна дальність розпізнавання (Maximum Recognition Range – MRR) R_r – це максимальна відстань між ТПСС і тест-об'єктом у вигляді міри Фуко, що випромінює як абсолютно чорне тіло (АЧТ), за якої оператор розділяє штрихи

у зображенні міри на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_r . В основі методів розрахунку МДР лежить мінімальна роздільна різниця температур і критерій Джонсона, відповідно до якого для розпізнавання цілі необхідно, щоб уздовж її критичного (найменшого) розміру розміщувалась визначена кількість штрихів міри Фуко, яка залежить від ймовірності розпізнавання [6, 12, 13].

Розглянемо процес формування зображення міри Фуко на екрані дисплея і його сприйняття оператором, використовуючи Рис. 1.

Нехай тест-об'єкт у вигляді штрихової міри з періодом V_{tp} розташований у площині спостереження xy на відстані R від тепловізора. Потік теплового випромінювання від тест-об'єкта Φ_t розповсюджується через атмосферу і надходить до вхідної зіниці інфрачервоного (ІЧ) об'єктива, який має фокусну відстань f'_o , діаметр вхідної зіниці D_o і коефіцієнт пропускання τ_o . Об'єктив формує розподіл освітленості E_{tp} на чутливій поверхні матричного приймача випромінювання (МПВ), який відповідає зображенню тест-об'єкта з періодом V'_{tp} . Електронна система тепловізора перетворює вихідний сигнал приймача в розподіл яскравості на екрані дисплея, який відповідає зображенню тест-об'єкта з періодом V''_{tp} . Оператор за допомогою окуляра з фокусною відстанню f'_{ep} або безпосередньо на екрані дисплея, спостерігає і аналізує це зображення.

Для виявлення і розпізнавання цілі з ймовірністю 50% використовують критерій Джонсона, що пов'язує розділення еквівалентної штрихової міри із баченням цілі. Якість бачення цілі можна передбачити, якщо визначити максимальну частоту розділення еквівалентної міри, що має такий самий контраст яскравості зображення міри на екрані дисплея ΔL_{th} і спостерігається за тих же умов, що й ціль. Ця теорія у трохи іншому вигляді була запропонована Джонсоном [3], який намагався знайти зв'язок характеристик зображення, що створено електронно-оптичним перетворювачем у реальних

умовах, з об'єктивними лабораторними критеріями. Джонсон визначив число штрихів, що розділяються, які відповідають критичному розміру об'єкта для восьми типів військових машин і людини, що стоїть. Широко відомі тепер критерії Джонсона, узагальнені за усіма класами об'єктів, і мають такі значення числа штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50%-ї ймовірності правильного рішення: у разі виявлення – $1,0 \pm 0,25$ штрихів; у разі розпізнавання – $4,0 \pm 0,8$ штрихів [14]. Ці критерії було отримано безпосередньо з експериментальних спостережень, вони справедливі тільки для безрастрової структури зображення в електронно-оптичних перетворювачах.

Для растрового зображення в [3] наведено емпіричну формулу:

$$P_r = 1 - \exp[-0,018(N_l + 1)^2], \quad (1)$$

де N_l – кількість рядків тепловізійного растру у зображенні об'єкта.

З формули (1) легко визначити кількість рядків, що відповідає заданій ймовірності розпізнавання P_r :

$$N_l = 7,45\sqrt{-\ln(1 - P_r)} - 1. \quad (2)$$

Наприклад, для розпізнавання із ймовірністю 50% кількість штрихів, що розділяються, на критичний розмір об'єкта становить $N_{0,5} = 6$, а для ймовірності 90% – $N_{0,9} = 12$. Отримані значення числа штрихів відповідають стандарту НАТО 4347 для виявлення цілі і її ідентифікації з ймовірністю 50%.

Використовуючи формулу (1) і Рис. 1 знаходимо просторову частоту міри Фуко, що відповідає ймовірності розпізнавання P_r :

$$\nu_{xr} = \frac{N_l R_r}{2V_{tp}} = \frac{R_r}{2V_{tp}} \left[7,45\sqrt{-\ln(1 - P_r)} - 1 \right], \quad (3)$$

де $2V_{tp}/N_l$ – період міри Фуко.

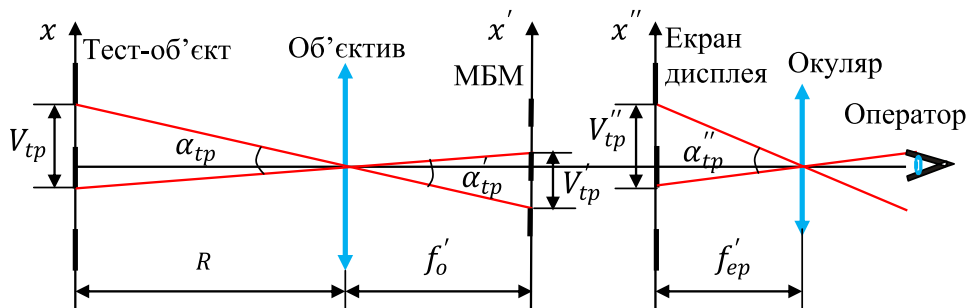


Рис. 1. До визначення максимальної дальності розпізнавання тест-об'єкта за допомогою контрастно обмеженої ТПСС

3 Розрахунок максимальної дальності розпізнавання ТПСС, обмежених контрастом і шумами

Згідно критерію Джонсона для розпізнавання об'єкта необхідно, щоб уздовж його критичного розміру l_{cr} розміщувалось N_r пар штрихів міри Фуко, яка має період V_{tp} , тобто [3]

$$l_{cr} = N_r V_{tp}, \quad (4)$$

де число N_r визначається конкретним критерієм розпізнавання.

Цей критерій був розроблений для систем з великим відношенням сигнал/шум. Тобто такі ТПСС були обмежені контрастом, а критерій Джонсона буде справедливим тільки для контрастно обмежених систем.

Для оцінки ефективності ТПСС за наявності шумів використовують мінімальну роздільну різницю температур (МРРТ), яка являє собою порогове значення відношення сигнал/шум як функцію просторової частоти [1, 3, 13].

Втрати випромінювання в атмосфері будемо враховувати у вигляді зменшення температурного контрасту ΔT_t між об'єктом і заднім фоном у наслідок ослаблення випромінювання в атмосфері згідно закону Бугера-Ламберта. Зміна початкового температурного контрасту визначається за формулою [1-4]:

$$\Delta T(R) = \Delta T_0 \exp(-\kappa_A R), \quad (5)$$

де κ_A – інтегральний показник ослаблення атмосфери.

Розглянемо два метода розрахунку МДР для ТПСС, що обмежені контрастом і шумами.

3.1 Контрастно обмежені системи

Для визначення МДР використаємо модуляційну передавальну функцію (МПФ) ТПСС, яку можна апроксимувати гаусоїдою [3, 5, 14]

$$M_s(\nu_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 \nu_x^2), \quad (6)$$

де r_s – радіус зображення точкового джерела випромінювання на екрані дисплея, мрад.

Ймовірність розпізнавання і час виконання роботи залежать від смуги пропускання просторових частот ТПСС. Ця смуга пропускання $\Delta\nu_x \approx \nu_{x,max}$ визначається в точці перетину МПФ системи і порогового контрасту зорового аналізатора (ЗА) оператора. Для апроксимації порогового контрасту ЗА оператора скористаємося функцією, запропонованою Шульцем, яку представимо у вигляді [15]:

$$C_{E,th}(\nu_x) = \frac{0,01}{\exp(-1,98\nu_x) - \exp(-5,67\nu_x)}, \quad (7)$$

де ν_x – просторова частота, мрад⁻¹.

Для визначення максимальної просторової частоти $\nu_{x,max}$, яку пропускає контрастно обмежена система, необхідно розв'язати рівняння

$$M_s(\nu_x) = C_{E,th}(\nu_x), \quad (8)$$

де просторова частота визначається в кутових одиницях у просторі «окуляр – оператор».

Для знаходження максимальної просторової частоти $\nu_{x,max}$, використаємо Рис. 1 і формулу (3):

$$\nu_{x,max} = \frac{1}{\alpha''_{tp}} = \frac{f'_{ep}}{V''_{tp}} = \frac{f'_{ep}}{V'_{tp}\beta_{el}} = \frac{Rf'_{ep}}{V_{tp}f'_{o}\beta_{el}} = \frac{N_{vr}Rf'_{ep}}{l_{cr}f'_{o}\beta_{el}}, \quad (9)$$

де β_{el} – електронне збільшення ТПСС; N_{vr} – число пар штрихів міри Фуко, яке забезпечує необхідну ймовірність розпізнавання об'єкта спостереження.

Звідси знаходимо МДР

$$R_r = \nu_{x,max} \frac{l_{cr}f'_{o}\beta_{el}}{N_{vr}f'_{ep}}, \quad (10)$$

де N_{vr} – число періодів міри Фуко уздовж критичного розміру тест-об'єкта l_{cr} , яке визначається ймовірністю розпізнавання цілі, тобто $l_{cr} = V_{tp}N_{vr}$. В формулі (10) просторова частота вимірюється в мрад⁻¹, відстань розпізнавання R_r – в км, період міри V_{tp} – в метрах.

Для визначення числа пар штрихів N_{vr} у роботі [15] використана залежність ймовірності розпізнавання P_r від N_{vr} у вигляді

$$P_r = \frac{(N_{vr}/N_D)^k}{1 + (N_{vr}/N_D)^k}, \quad (11)$$

де $k = 2,7 + 0,7(N_{vr}/N_D)$; N_D – число пар штрихів згідно з критерієм Джонсона, який забезпечує ймовірність розпізнавання $P_r = 50\%$.

3.2 Системи, обмежені шумом

Таку модель широко використовують у дослідженнях ТПСС військового призначення [15]. Для визначення МДР використаємо критерій Джонсона (4) і мінімальну роздільну різницю температур, яку описують функцією [3, 5]

$$\begin{aligned} MRTD \left(\nu_x = \frac{N_r R}{l_{cr}} \right) &= \\ &= 0,66 SNR_E NETD \frac{N_r R}{l_{cr}} \frac{1}{M_s \left(\frac{N_r R}{l_{cr}} \right)} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}, \end{aligned} \quad (12)$$

де SNR_E – величина відношення сигнал/шум, що сприймає оператор, яка визначає ймовірність розпізнавання зображення об'єкта P_r ; $\alpha_D \times \beta_D$ – кутові розміри пікселя МПВ; f_f – частота кадрів; $t_E = 0,2$ с

– постійна зорової системи оператора; ν_x – просторова частота, яка визначається в кутових одиницях у просторі об'єктів: $\nu_x = N_r R / l_{cr}$.

Рівняння для розрахунку МДР ґрунтується на законі Бугера-Ламберта (5) і рівнянні (12) для МРРТ:

$$\Delta T_{0exp}(-\kappa_A R) = MRTD \left(\nu_x = \frac{N_r R}{l_{cr}} \right). \quad (13)$$

Величина SNR_E , що сприймає оператор, визначає ймовірність розпізнавання зображення об'єкта P_r і залежить від відношення сигнал/шум SNR_E і може бути розрахована за формулою [15]

$$P_r = \frac{(SNR_E)^k}{1 + (SNR_E)^k}, \quad (14)$$

де $k = 2,7 + 0,7SNR_E$.

У загальному випадку ймовірність розпізнавання об'єкта з урахуванням числа штрихів N_r і відношення сигнал/шум SNR_E може бути записана у вигляді

$$P_r = P_{r,N} P_{r,SNR}, \quad (15)$$

де $P_{r,N}$ – ймовірність, що розраховується за формулою (11), а $P_{r,SNR}$ – за формулою (14).

МДР є розв'язком рівняння (13), в якому відношення сигнал/шум SNR_E розраховують за формулою (14), а число штрихів N_r – за формулою (11) у випадку заданої ймовірності розпізнавання P_r .

4 Приклад розрахунку максимальної дальності розпізнавання

Для практичного застосування розробленого методу розрахунку МДР розглянемо ТПСС, яка має такі характеристики:

- ГЧ об'єктів:
 - фокусна відстань $f'_o = 60$ мм;
 - діаметр вхідної зіниці $D_o = 60$ мм;
 - інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,8$.
- Приймач випромінювання – мікроболометрична матриця (МБМ):
 - формат матриці $p_D \times q_D = 400 \times 300$;
 - період матричної структури $V_D \times W_D = 17 \times 17$ мкм²;
 - еквівалента шуму різниці температур $NETD_D = 40$ мК;
 - частота кадрів $f_f = 50$ Гц.
- Розмір екрана дисплея $X_S \times Y_S = 9,6 \times 7,2$ мм².

- Окуляр: фокусна відстань $f'_{ep} = 25$ мм.

В якості об'єкта розпізнавання використаємо тест-об'єкт згідно стандарту НАТО 4347, який має параметри:

- Розмір об'єкта $-V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3$ мм².
- Температурний контраст між об'єктом і заднім фоном (відносно температури АЧТ в 288 К) $-\Delta T_0 = 2$ К.
- Об'єкт і фон випромінюють як АЧТ.

Ймовірність розпізнавання $P_r = 90\%$.

Спочатку розглянемо метод визначення МДР для контрастно обмеженої ТПСС, використовуючи формулу (10), в якій відомими є: $l_{cr} = 2,3$ м; $f'_o = 60$ мм; $f'_{ep} = 25$ мм.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Розраховуємо електронне збільшення ТПСС β_{el} як відношення розміру екрана дисплея $Y_S = 9,6$ мм до відповідного розміру матриці ПВ Y_D :

$$\beta_{el} = \frac{Y_S}{Y_D} = \frac{Y_S}{q_D W_D} = \frac{7,2}{300 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} = 1,4^\times.$$

2. Число пар штрихів $N_{\nu r}$ міри Фуко, що розташовані уздовж критичного розміру тест-об'єкту, яке забезпечує ймовірність розпізнавання об'єкта $P_r = 90\%$, розраховуємо із рівняння (11), або знаходимо:

$$\frac{N_{\nu r}}{N_D} = 1,8; \Rightarrow N_{\nu r} = 4 \cdot 1,8 \approx 8.$$

3. Для розрахунку максимальної просторової частоти $\nu_{x,max}$, яку пропускає контрастно обмежена система, необхідно розв'язати рівняння (8), де просторова частота визначається в кутових одиницях у просторі «окуляр – оператор», а пороговий контраст сприйняття оком міри Фуко – рівнянням (7).

Визначимо МПФ ТПСС, яка має дифракційно обмежений об'єктів з $\frac{f'_o}{D_o} = 1$ і розмір пікселя МПВ $V_D = 17$ мкм. Для лінійних інваріантних систем МПФ визначаємо за формулою [3, 6]:

$$M_s(\nu_x) = M_o(\nu_x) M_{Ds}(\nu_x), \quad (16)$$

де $M_o(\nu_x)$ – МПФ об'єктива; $M_{Ds}(\nu_x)$ – просторова МПФ ПВ.

МПФ дифракційно обмеженого об'єктиву описується функцією [3, 6]:

$$M_o(\nu'_x) = 1 - 1,22\lambda \frac{f'_o}{D_o} \nu'_x, \quad (17)$$

а МПФ ПВ – функцією

$$M_{Ds}(\nu'_x) = \frac{\sin(\pi V_D \nu'_x)}{\pi V_D \nu'_x}. \quad (18)$$

Функції (17) і (18) визначені в задній фокальній площині ГЧ об'єктива для просторових частот, що вимірюються в мм⁻¹. Представимо ці функції в просторових частотах ν'_{xa} , що визначаються в кутових

одиницях мрад^{-1} у просторі «окуляр – оператор», використовуючи Рис. 1 і співвідношення [5]

$$\nu''_{xa} = \frac{f'_p}{V''_{tp}} = \frac{f'_p}{V'_{tp}\beta_{El}} = \nu_{xa} \frac{f'_p}{f'_o\beta_{El}}. \quad (19)$$

Крім того, перехід від лінійних просторових частот ν'_{xl} до кутових просторових частот ν'_{xa} в функціях (17) і (18) здійснюється за формулою

$$\nu'_{xl} = \frac{1}{V'_{tp}} = \frac{\nu'_{xa}}{f'_o}. \quad (20)$$

Представимо МПФ об'єктива (17) і ПВ (18) як функції кутової просторової з урахуванням (20)

$$M_o(\nu''_{xa}) = 1 - 1,22\lambda \frac{\nu'_{xa}}{D_o} = 1 - 1,22\lambda \frac{f'_o\beta_{El}}{D_o f'_p} \nu''_{xa}, \quad (21)$$

$$M_{Ds}(\nu''_x) = \frac{\sin\left(\pi V_D \nu'_{xa} / f'_o\right)}{\pi V_D \nu'_{xa} / f'_o} = \frac{\sin\left(\pi V_D \frac{\beta_{El}}{f'_p} \nu''_{xa}\right)}{\pi V_D \frac{\beta_{El}}{f'_p} \nu''_{xa}}. \quad (22)$$

Загальну МПФ ТПСС визначаємо шляхом підстановки (21) і (22) до (16)

$$M_s(\nu''_x) = \left(1 - 1,22\lambda \frac{f'_o\beta_{El}}{D_o f'_p} \nu''_{xa}\right) \frac{\sin\left(\pi V_D \frac{\beta_{El}}{f'_p} \nu''_{xa}\right)}{\pi V_D \frac{\beta_{El}}{f'_p} \nu''_{xa}}. \quad (23)$$

На Рис. 2 наведені графіки модуляційних передавальних функцій об'єктива $M_o(\nu''_{xa})$, приймача випромінювання $M_D(\nu''_{xa})$ і ТПСС $M_s(\nu''_{xa})$ для тепловізора, параметри якого були наведені раніше.

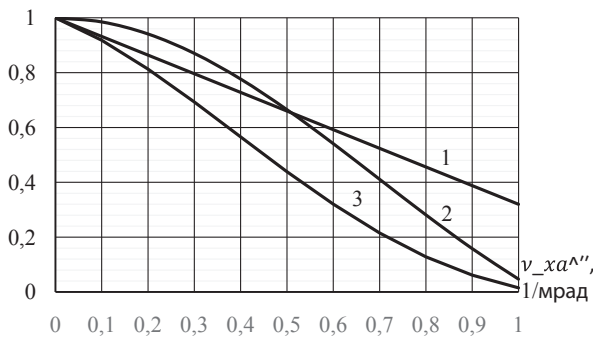


Рис. 2. Модуляційні передавальні функції:
1 – об'єктива; 2 – приймача випромінювання;
3 – ТПСС

Аналіз цих функцій і їх графіків свідчить про те, що:

1. Найбільший вплив на погіршення якості зображення і відповідно до зменшення МДР здійснює МПФ приймача випромінювання $M_D(\nu''_{xa})$.

2. При обраних параметрах об'єктива і МПВ рівність їх МПФ спостерігається на частоті $\nu''_{xa0} = 0,5 \text{ мрад}^{-1}$, що відповідає частоті Найквіста ПВ. Це свідчить про оптимальне узгодження параметрів об'єктива і МПВ [16].

3. Для об'єктів великих кутових розмірів, коли $\nu''_{xa} < \nu''_{xa0}$, більший вплив на погіршення результуючої МПФ ТПСС здійснює об'єктив, а для об'єктів малих розмірів, коли $\nu''_{xa} > \nu''_{xa0}$, більший вплив на погіршення результуючої МПФ ТПСС здійснює МПВ.

4. Зменшення впливу об'єктива на результуючу МПВ ТПСС можна досягти за рахунок збільшення відносного отвору об'єктива. Для таких дифракційно обмежених об'єктів їх вартість значно збільшується, що свідчить про нецільність такого підходу.

5. Зменшити вплив МПВ на результуючу МПФ системи $M_s(\nu''_{xa})$ можна за рахунок зменшення розміру пікселя. Але цей вплив незначний, що обумовлено хвильовими ефектами між сусідніми пікселями для спектральної області ІЧ випромінювання 8 – 14 мкм.

Для визначення максимальної просторової частоти яку пропускає контрастно обмежена система, підставимо в рівняння (8) МПФ ТПСС (23) і пороговий контраст ЗА оператора (7):

$$\left(1 - 1,22\lambda \frac{f'_o\beta_{El}}{D_o f'_p} \nu''_{xa}\right) \frac{\sin\left(\pi V_D \frac{\beta_{El}}{f'_p} \nu''_{xa}\right)}{\pi V_D \frac{\beta_{El}}{f'_p} \nu''_{xa}} = \frac{0,01}{\exp(-1,98\nu_x) - \exp(-5,67\nu_x)}. \quad (24)$$

Розв'язати аналітично трансцендентне рівняння (24) неможливо. Тому для наближеного визначення максимальної просторової частоти $\nu_{x,max}$ використовуємо графічний метод, який наведено на Рис. 3. Із графіків МПФ ТПСС і порогового контрасту ЗА оператора визначаємо точку їх перетину, яка має координати $(0,9 \text{ мрад}^{-1}; 0,06)$, тобто шукана просторова частота дорівнює $\nu''_{xa,max} \approx 0,9 \text{ мрад}^{-1}$.

Для розрахунку МДР контрастно обмеженої ТПСС підставимо знайдені параметри до рівняння (10)

$$R_r = 0,9 \cdot 10^3 \frac{2,3 \cdot 60 \cdot 1,4}{8 \cdot 25} = 870 \text{ м.}$$

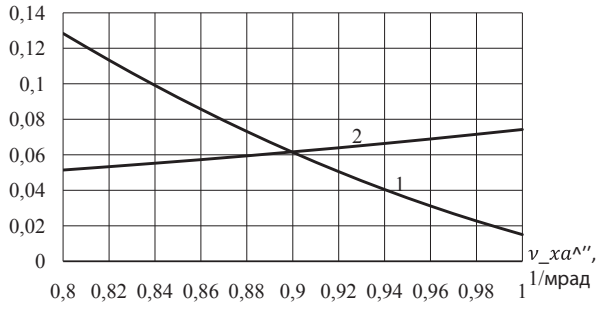


Рис. 3. Графічний метод визначення максимальної просторової частоти $\nu_{x,max}$, яку пропускає контрастно обмежена ТПСС: 1 – МПФ ТПСС; 2 – пороговий контраст ЗА

Рівняння для розрахунку МДР R_{rn} ТПСС, що обмежена шумом, ґрунтується на законі Бугера-Ламберта (7) і рівнянні (12) для МРРТ. Із формули (5) маємо рівняння для розрахунку МДР:

$$R_{rn} = \frac{1}{\kappa_A} \ln \left(\frac{\Delta T_0}{MRTD} \right), \quad (25)$$

в якому згідно стандарту НАТО 4347 відомими є: $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення випромінювання за сприятливих умов спостереження; $\Delta T_0 = 2 \text{ К}$ – температурний контраст об'єкта в площині спостереження [9]. Для розрахунку МРРТ, використаємо рівняння (12), в якому відомими є: розмір тест-об'єкта $l_{cr} = V_{tp} = 2,3 \text{ м}$; частота кадрів $f_f = 50 \text{ Гц}$; постійна часу ЗА оператора $t_E = 0,2 \text{ с}$; еквівалентна шуму різниця температур МБМ $NETD_D = 40 \text{ мК}$.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Число пар штрихів міри Фуко $N_{\nu r} = 8$ було розраховане раніше.

2. Відношення сигнал/шум, що сприймає оператор, для ймовірності розпізнавання зображення об'єкта $P_r = 90\%$, знаходимо із рівняння (14): $SNR_E = 1,75$.

3. Кутові розміри пікселя МПВ розраховуємо за формулою

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f'_o} = \frac{17 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

4. Модуляційну передавальну функцію ТПСС будемо визначати в задній фокальній площині об'єктива, використовуючи функції (17) і (18) для кутової просторової частоти $\nu'_{xa} = \frac{N_r R}{l_{cr}}$. Тоді МПФ дифракційно обмеженого об'єктива описується функцією [3, 6]:

$$M_o(\nu'_{xa}) = 1 - 1,22\lambda \frac{1}{D_o} \frac{N_r R}{l_{cr}}, \quad (26)$$

а МПФ МПВ – функцією

$$M_{Ds}(\nu'_{xa}) = \frac{\sin \left(\pi \alpha_D \frac{N_r R}{l_{cr}} \right)}{\pi \alpha_D \frac{N_r R}{l_{cr}}}. \quad (27)$$

Підставимо (26) і (27) до (16) з наступною підставкою (16) до (12), а (12) – до рівняння (13). Після незначних математичних перетворень отримаємо загальне рівняння для визначення МДР ТПСС, що обмежена шумом МПВ:

$$\Delta T_0 \exp(-\kappa_A R_{rn}) = 0,66 SNR_E \times \times NETD \frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} \frac{1}{M_o \left(\frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} \right) M_{Ds} \left(\frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} \right)} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}. \quad (28)$$

Розв'язком цього трансцендентного рівняння буде максимальна дальність розпізнавання R_{rn} тест-об'єкта ТПСС, що обмежена власними шумами МБМ, для довільної ймовірності розпізнавання. Для практичного застосування рівняння (28), представимо його у вигляді:

$$\frac{1}{R_{rn}} \exp(-\kappa_A R_{rn}) M_o \left(\frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} \right) M_{Ds} \left(\frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} \right) = = 0,66 SNR_E \cdot \frac{NETD N_r}{\Delta T_0 l_{cr}} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}. \quad (29)$$

Еквівалентну шуму різницю температур $NETD$ ТПСС, яка використовує мікроболометричну матрицю, визначимо за формулою [5]

$$NETD = NETD_D \frac{k_{eff}^2}{\tau_o}, \quad (30)$$

де $NETD_D = 0,04 \text{ К}$ – еквівалентна шуму різниця температур МБМ; $k_{eff} = 1$ – ефективне діафрагмове число об'єктива; $\tau_o = 0,85$ – інтегральний коефіцієнт пропускання об'єктива. Для цих параметрів $NETD = 0,047 \text{ К}$.

Для обраних параметрів ТПСС МПФ об'єктива (26) і ПВ (27) матимуть вигляд:

$$M_o(\nu'_{xa}) = 1 - 1,22\lambda \frac{1}{D_o} \frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} = 1 - 0,71 R_{rn}, \quad (31)$$

$$M_{Ds}(\nu'_{xa}) = \frac{\sin \left(\pi \alpha_D \frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}} \right)}{\pi \alpha_D \frac{N_r R_{rn}}{l_{cr}}} = \frac{\sin(\pi 0,97 R_{rn})}{\pi 0,97 R_{rn}}. \quad (32)$$

Тоді загальне рівняння (29) матиме вигляд

$$\frac{1}{R_{rn}} \exp(-0,2 R_{rn}) M_o(0,71 R_{rn}) M_{Ds}(0,97 R_{rn}) = = 0,012 \text{ км}^{-1}. \quad (33)$$

Розв'язком цього трансцендентного рівняння графічним методом (Рис. 4) є максимальна дальність розпізнавання $R_{rn} \approx 980 \text{ м}$ ТПСС, що обмежена шумом.

Таким чином, контрастно обмежена ТПСС, що розглядається, має максимальну дальність розпізнавання $R_{rc} = 870 \text{ м}$, а система, що обмежена

шумом МПВ, має дальність $R_{rn} = 980$ м. Звідси маємо, що така ТПСС є контрастно обмеженою і має МДР 870 м.

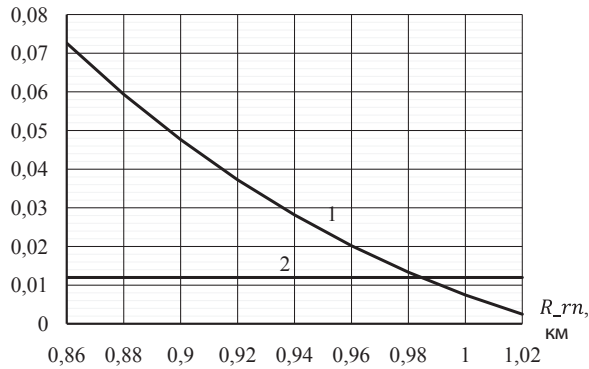


Рис. 4. Графічний метод визначення максимальної дальності розпізнавання ТПСС, що обмежена шумом: 1 – ліва частина рівняння (33); 2 – права частина рівняння (33)

5 Залежність МДР від ймовірності розпізнавання

Для практичного застосування тепловізійних систем спостереження у військовій справі і охоронних системах важливо знати залежність максимальної дальності розпізнавання об'єкта від ймовірності розпізнавання. Таку залежність для контрастно обмежених ТПСС можна отримати із рівняння (10), в якому ймовірність розпізнавання P_r визначається числом $N_{\nu r}$ періодів міри Фуко уздовж критичного розміру тест-об'єкта l_{cr} . Для визначення числа $N_{\nu r}$ використовуємо рівняння (11). Розрахунки наведені в Табл. 1.

Табл. 1 Результати розрахунку максимальної дальності розпізнавання

$P_r, \%$	50	60	70	80	90
$N_{\nu r}$	4,0	4,5	5,1	5,8	7,2
$R_{rc}, \text{ м}$	1750	1550	1370	1200	960

Раніше були обґрунтовані значення параметрів, які входять до формули (10):

1. Критичний розмір тест-об'єкта $l_{cr} = 2,3$ м.
2. Фокусна відстань об'єктива $f'_o = 60$ мм.
3. Електронне збільшення ТПСС $\beta_{el} = 1,4$.
4. Фокусна відстань окуляра $f'_{ep} = 25$ мм.
5. Максимальна просторова частота, яку пропускає контрастно обмежена система, $\nu_{xa,max} \approx 0,9 \text{ мрад}^{-1}$.
6. Число періодів міри Фуко $N_{\nu r}$ наведено в Табл. 1.

Результати розрахунків МДР за формулою (10) в залежності від ймовірності розпізнавання об'єкта спостереження наведені в Табл. 1 і на Рис. 5. Аналіз отриманих результатів свідчить, що:

1. Максимальна дальність розпізнавання істотно зменшується із збільшенням ймовірності розпізнавання. Наприклад, для ймовірності розпізнавання 80% МРД становить 1180 м, тобто зменшується в 1,48 рази порівняно з дальністю для ймовірності 50%.

2. Отримані числові значення МДР необхідно враховувати при застосуванні ТПСС.

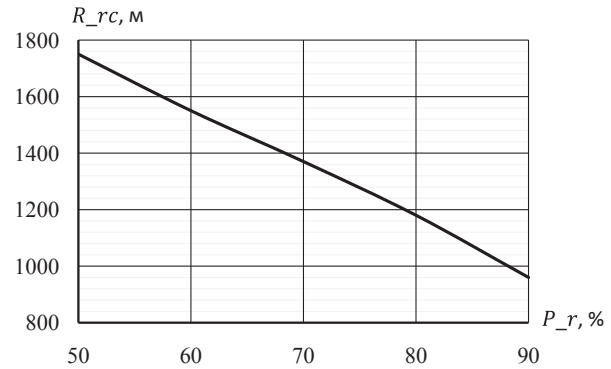


Рис. 5. Залежність максимальної дальності розпізнавання R_{rc} тест-об'єкта контрастно обмеженою ТПСС від ймовірності розпізнавання P_r .

Висновки

Розроблено метод розрахунку максимальної дальності розпізнавання цілей в реальних умовах за допомогою ТПСС при заданій ймовірності розпізнавання, який ґрунтується на запропонованій моделі формування зображення в тепловізійному монокулярі. Дослідження цієї моделі дозволило:

1. Запропонувати розглядати ТПСС, максимальна дальність яких обмежена контрастом зображення або власними шумами системи.

2. Вперше запропонована фізико-математична модель тепловізійного монокуляря, яка враховує параметри об'єкта спостереження, атмосфери, об'єктива, МПВ, дисплея, окуляра і зорового аналізатора оператора. Така модель дозволила розробити методи розрахунку максимальної дальності розпізнавання об'єктів спостереження при заданих ймовірностях розпізнавання.

3. Отримані рівняння для розрахунку МДР для ТПСС, що обмежені контрастом зображення або власним шумом системи. Менша дальність визначає максимальну дальність розпізнавання системи. Аналіз отриманих рівнянь свідчить про те, що при обраних параметрах об'єктива і МПВ рівність їх МПФ спостерігається на частоті Найквіста $\nu''_{xa0} = 0,5 \text{ мрад}^{-1}$, що свідчить про оптимальне узгодження параметрів об'єктива і ПВ.

4. Подальший розвиток досліджень слід спрямувати на розробку фізико-математичної моделі ТПСС, яка враховує матричну структуру приймача випромінювання і дисплея.

References

- [1] Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. (2018). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, 2-nd Edition*. Wiley – VCH, 794 p.
- [2] Driggers R. G., Friedman M. H., Nichols J. (2012). *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems, Second Edition (Artech Optoelectronics and Applied Optics)*. Artech House (USA), 599 p.
- [3] Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov. (2004). *Infrarotthermographie: Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe*. WILEY-VCH, 356 p. DOI:10.1002/9783527624645.
- [4] Raghu V. Prakash (ed.) (2012). *Infrared Thermography*. IntechOpen, 248 p. DOI: 10.5772/1353.
- [5] Kolobrodov V. G., Lykholit M. I. (2007). *Design of thermal imaging and television surveillance systems [Proektuvannia teploviziynykh i televiziynykh system sposterezheniia]*. K.: NTUU «KPI», 364 p. [In Ukrainian].
- [6] Keßler S., Gal R. and Wittensteinc W. (2017). TRM4: Range performance model for electro-optical imaging systems. *Proceedings of SPIE*. Vol. 10178. doi: 10.1117/12.2262543.
- [7] Peri'c D., Livada B., Peri'c M. and Vuji'c S. (2019). Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality *MDPI. Sensors*, 19(15), 3313, pp. 1–23. doi: 10.3390/s19153313.
- [8] Herbert Kaplan (2007). *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, 3rd ed. SPIE. 236 p. doi: 10.1117/3.725072.
- [9] Katkovskiy L. V. (2020). Calculation of parameters of thermal imaging of objects from unmanned aerial vehicles [Raschet parametrov teplovizionnoy s"emki ob"ektov s bespilotnyh avianositelej]. *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics [Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki]*, Vol. 18 (2), pp. 53–61.
- [10] Fritze J., Schlemmer H. (2013). New Thermal Imager for Long Range Surveillance. *AMA Conferences*, pp. 43–47. DOI: 10.5162/irs2013/i2.5.
- [11] Keler S., Perez J., and Steiner D. (2019). An intensified camera module for the range performance model TRM4. *Proceedings of SPIE*, Vol. 11001. doi: 10.1117/12.2518317.
- [12] Teaney B. P., Reynolds J. P., Bosq T. W. D., Repasi E. (2015). A TRM4 component for the Night Vision Integrated Performance Model (NV-IPM). *Proceedings of SPIE*, Vol. 9452. doi: 10.1117/12.2180002.
- [13] Chrzanowski K. (2010). *Testing thermal imagers. Practical guidebook*. Military University of Technology, Warsaw, Poland, 164 p.
- [14] Braat J., Torok P. (2019). *Imaging Optics*. Cambridge university press, 988 p.
- [15] Melamed R., Yitzhaky Y., Kopeika N. S., Rotman S. R. (1998). Experimental comparison of three target acquisition models. *SPIE, Optical Engineering*, Vol. 37(7), pp. 1902–1913. doi: 10.1117/1.602029.
- [16] Kolobrodov V. G. (2015). Optimization of lens parameters and microbolometric matrix of thermal imager [Optimizatsiia parametriv obiektyva i mikrobolometrychnoi matrytsi teplovizora]. *KPI Science News [Naukovi visti NTUU «KPI»]*, Vol.1(99), pp. 91–95. [In Ukrainian].

Влияние вероятности распознавания объекта тепловизором на максимальную дальность наблюдения

Kolobrodov V. G.

Главной функцией тепловизионных систем наблюдения является обнаружение и распознавание объектов (целей) с заданной вероятностью. Одной из основных характеристик таких тепловизоров есть максимальная дальность наблюдения при заданной вероятности распознавания. Разработке и исследованию процессов распознавания целей посвящены многие монографии и статьи, в которых предложены методы расчета максимальной дальности распознавания (МДР) на основе критерия Джонсона для вероятности распознавания 50%. Для практического применения тепловизионных систем наблюдения (ТПСН) необходимо знать МДР по заданной вероятности распознавания.

Целью данной статьи является разработка метода расчета максимальной дальности распознавания целей в реальных условиях с помощью ТПСН при заданной вероятности распознавания.

Разработан метод расчета МДР целей в реальных условиях при заданной вероятности распознавания, основанный на предложенной модели формирования изображения в тепловизионном монокуляре. Предложено рассматривать ТПСН, максимальная дальность действия которых ограничена контрастом изображения или собственными шумами системы. Рассмотрена модель тепловизионного монокуляра, учитывающая параметры объекта наблюдения, атмосферы, объектива, приемника излучения, дисплея, окуляра и зрительного анализатора оператора. Предложенная модель позволила разработать методы расчета МДР для заданных вероятностей распознавания. Получены уравнения для расчета МДР для ТПСН, ограниченные контрастом изображения или собственным шумом системы. Рассмотрен пример расчета МДР тепловизионного монокуляра.

Ключевые слова: тепловизор; максимальная дальность распознавания; вероятность распознавания объекта

Influence of the Probability of Object Recognition by a Thermal Imager on the Maximum Observation Range

Kolobrodov V. G.

The main function of thermal imaging systems is to detect and recognize objects (targets) with a given probability. One of the main characteristics of such thermal imagers is the maximum range of observation at a given probability of recognition. Many monographs and articles have been devoted to the development and research of goal recognition processes, in which methods of calculating the maximum recognition range (MRR) are proposed, based on Johnson's criterion for a probability of recognition of 50%. For the practical application of thermal imaging surveillance systems (TISS) it is necessary to know the MRR for a given probability of recognition.

The purpose of this article is to develop a method for calculating of the maximum recognition range in real conditions using TISS at a given probability of recognition.

A method for calculating MRR targets in real conditions with a given probability of recognition, which is based on the proposed model of image formation in the thermal imaging monocular, has been developed. It is proposed to consider TISS, the maximum range of which is limited by the contrast of the image or the system's own noise. The model of thermal imaging monocular is considered, which takes into account the parameters of the object of

observation, atmosphere, lens, radiation detector, display, eyepiece and visual analyzer of the operator. The proposed model allowed to develop methods for calculating MRR for given recognition probabilities. The equations obtained for the calculation of the MRR for TISS, which are limited by the contrast of the image or the intrinsic noise of the system. An example of calculating the MRR of a thermal imaging monocular is considered.

Keywords: thermal imager; maximum recognition range; probability of object recognition