

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

УДК 623.4.027

**МАКСИМАЛЬНА ДАЛЬНІСТЬ ВИЯВЛЕННЯ ТЕПЛОВІЗОРОМ ОБ'ЄКТА НА
НЕРІВНОМІРНОМУ ФОНІ***Гордієнко В. І.**Науково-виробничий комплекс «Фотоприлад», м. Черкаси, Україна**E-mail: sokol@photopribor.ck.ua*

Розроблено метод розрахунку максимальної дальності виявлення (МДВ) тепловізором об'єкта спостереження, який розташований на фоні, що має нерівномірну яскравість в полі зору тепловізора. Розглянуто модель, коли фон, на який проектується об'єкт, нерівномірний, що рівнозначно дії на приймач випромінювання (ПВ) тепловізора змінного потоку. Цей потік розглядається як сума двох складових: постійної складової, яка погіршує чутливість ПВ, та змінної складової. Змінна складова разом з власними шумами ПВ утворює заваду, яка визначає пороговий потік тепловізора. Якщо змінна складова, що обумовлена флуктуаціями яскравості фону, перевищує власні шуми ПВ, то вона обмежує МДВ. Змінний потік, що сприймає ПВ від фону, визначено глибиною модуляції, яка залежить від просторового інтегрування миттєвим полем зору тепловізора, та дисперсії фону. Отримано загальне рівняння для розрахунку МДВ, яке залежить від співвідношення потоків від об'єкта і фону, і не залежить від площі вхідної зіниці об'єктива тепловізора. В якості прикладу застосування запропонованого методу розрахунку МДВ розглянуто тепловізор ALIS. Розроблено алгоритм розрахунку МДВ, за допомогою якого встановлено, що за заданих умов спостереження МДВ становить 10 км.

Ключові слова: *тепловізор, максимальна дальність виявлення, нерівномірний фон.*

Вступ

Тепловізійні системи знаходять широке застосування в якості оптико-електронних систем спостереження (ОЕСС) у космічних системах дистанційного зондування Землі, охоронних системах та інших сферах [1–4]. Основною задачею таких систем є виявлення об'єкта спостереження на максимальній дальності. Тому при розробці таких тепловізорів вихідною характеристикою є максимальна дальність виявлення (МДВ) об'єкта, яка визначає потенційні можливості ОЕСС.

Низкою стандартів, монографій і статей [3–5] були представлені методи розрахунку МДВ, засновані на певних математичних моделях системи «об'єкт – тепловізор – оператор». Однак в цих моделях тест-об'єкт спостереження, як правило, знаходиться на рівномірному фоні певної температури. В реальних умовах об'єкт завжди знаходиться на нерівномірному фоні. Тому виникає практична потреба в розробці методу розрахунку МДВ тепловізором тест-об'єкта, який знаходиться на фоні з нерівномірною яскравістю.

Постановка задачі

Стаття присвячена розробці методу розрахунку максимальної дальності виявлення тепловізійної системою об'єкта, який знаходиться на фоні, що має не-

рівномірну яскравість в полі зору тепловізора.

Метод визначення максимальної дальності виявлення об'єкта на нерівномірному фоні

Максимальна дальність виявлення (Maximum Detectable Range – MDR) R_d – це максимальна дальність між тепловізором і стандартним тест-об'єктом, при якій тест-об'єкт виявляється оператором на екрані дисплея з заданою ймовірністю P_d при необмеженому часі спостереження. Величина R_d залежить від таких параметрів тепловізора як просторова роздільна здатність, енергетична роздільна здатність, функція передачі сигналу, передавальна функція, еквівалентна шуму різниця температур, робочий спектральний діапазон.

Розглянемо випадок, коли фон, на який проектується об'єкт, нерівномірний, що рівнозначно дії на приймач випромінювання (ПВ) змінної освітленості (потіку). Цей потік можна виразити як суму двох складових: постійної складової Φ_{b0} , яка погіршує чутливість ПВ, та змінної складової $\Delta\Phi_b$:

$$\Phi_b = \Phi_{b0} + \Delta\Phi_b.$$

Складові $\Delta\Phi_b$ безпосередньо бере участь в утворенні завади. У цьому випадку у разі незалежності внутрішніх і зовнішніх завад середнє квадратичне значення сигналу шуму дорівнює

$$u_{sb} = \sqrt{u_{nb}^2 + \overline{\Delta\Phi_b^2} \left(R_{Db} \frac{k_{Dr,b}}{k_{D,tp}} \right)^2}, \quad (1)$$

де u_{nb} – середнє квадратичне значення шуму ПВ з урахуванням постійної освітленості; $\overline{\Delta\Phi_b^2} \left(R_{Db} \frac{k_{Dr,b}}{k_{D,tp}} \right)^2$ – дисперсія зовнішнього шуму (сигнал завади, який утворюється внаслідок флуктуацій фонові освітленості); R_{Db} – інтегральна чутливість ПВ за випромінюванням еталонного джерела у разі наявності фонові освітленості; $k_{Dr,b}$ і $k_{D,tp}$ – коефіцієнти використання ПВ за випромінюванням фону й еталонного джерела відповідно [5].

Тоді пороговий потік, який сприймає тепловізор, визначається як

$$NEP = \frac{u_{sb}}{R_{Db}} = \frac{1}{R_{Db}} \sqrt{u_{nb}^2 + \overline{\Delta\Phi_b^2} \left(R_{Db} \frac{k_{Dr,b}}{k_{D,tp}} \right)^2} = NEP_{tp,b} \sqrt{1 + \overline{\Delta\Phi_b^2} \left(R_{Db} \frac{k_{Dr,b}}{u_{nb} k_{D,tp}} \right)^2}, \quad (2)$$

де $NEP_{tp,b}$ – пороговий потік тепловізора за еталонним випромінювачем у разі наявності фонові освітленості.

У формулі (2) множник у вигляді кореня погіршує чутливість через флуктуації фонові випромінювання. При цьому значення $NEP_{tp,b}$ знаходимо за формулою [5]

$$NEP_b = NEP_{tp,b}^1 k_{Db}(f), \quad (3)$$

де NEP^1 – пороговий потік у одиничній смузі пропускання підсилювача на еталонній частоті модуляції $f_{m,tp}$; k_{Db} – коефіцієнт, який характеризує збільшення порогового потоку ПВ через постійну фонову освітленість. Здебільшого цей коефіцієнт визначають експериментальним шляхом або за паспортними даними.

У тих випадках, коли складова внаслідок зовнішнього шуму (другий доданок під коренем у виразі (2)) значно менша складової, зумовлені внутрішнім шумом, розрахунок порогового потоку здійснюється за методикою, що враховує тільки постійну освітленість.

Якщо переважають зовнішні шуми, тобто друга складова під коренем у виразі (2) значно більша одиниці, то як пороговий потік приймають величину середньоквадратичного значення флуктуацій потоку від фону. Очевидно, що у цьому випадку для надійного виділення корисного сигналу $\Delta\Phi_{t,eff}$ із флуктуацій завад фону $\Delta\Phi_{b,eff}$ потрібно досягти такого перевищення сигналу над рівнем завад, щоб

$$\Delta\Phi_{t,eff} = SNR_d \Delta\Phi_{b,eff}. \quad (4)$$

ОЕСС повинна реагувати не на повний потік випромінювання від об'єкта $\Phi_{\Sigma,eff}$, а на його перевищення над рівнем потоку випромінювання від фону $\Phi_{b,eff}$, тобто

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{t,eff} = \Phi_{\Sigma,eff} - \Phi_{b,eff} &= k_{Dr,t} \Phi_t + L_b A_p k_{Dr,b} (\Omega_s - \Omega_t) - \\ &- L_b A_p k_{Dr,b} \Omega_s = k_{Dr,t} \Phi_t - k_{Dr,b} L_b A_p \Omega_t, \end{aligned} \quad (5)$$

де Φ_t – потік від об'єкта; L_b – яскравість фону; A_p – площа вхідної зіниці об'єктива; Ω_s – тілесний кут поля зору тепловізора; Ω_t – тілесний кут об'єкта.

Зробимо заміну в (5):

$$\Phi_t = L_t \frac{A_t A_p}{R^2}; \quad \Omega_t = \frac{A_t}{R^2}, \quad (6)$$

де L_t – яскравість об'єкта; A_t – площа об'єкта; R – відстань між об'єктом і ОЕСС.

Тоді

$$\Delta\Phi_{t,eff} = \frac{A_t A_p}{R^2} (L_t k_{Dr,t} - L_b k_{Dr,b}). \quad (7)$$

Підставивши у (4) значення $\Delta\Phi_{t,eff}$ із (7) і визначаючи

$$\Delta\Phi_{b,eff} = m_m \Phi_{b,eff}, \quad (8)$$

де m_m – глибина модуляції потоку від фону, отримаємо

$$\Delta\Phi_{t,eff} = \frac{A_t A_p}{R_d^2} (L_t k_{Dr,t} - L_b k_{Dr,b}) = SNR_d \Delta\Phi_{b,eff} = SNR_d m_m L_b A_p \Omega_s k_{Dr,b}. \quad (9)$$

Звідси

$$R_d = \sqrt{\frac{A_t (L_t k_{Dr,t} - L_b k_{Dr,b})}{SNR_d m_m L_b \Omega_s k_{Dr,b}}}. \quad (10)$$

Із цієї формули видно, що дальність дії тепловізора залежить тільки від співвідношення потоків від об'єкта і фону і не залежить від площі вхідної зіниці системи. Тому під величиною R_d тут потрібно розуміти не дальність дії системи, а ту найбільшу дальність, починаючи з якої сигнал від об'єкта буде в задане число разів більший від сигналу, що створює нерівномірний фон.

Ефективну величину потоку від фону, що надходить до ПВ, знаходимо за формулою

$$\Phi_{b,eff} = k_{Dr,b} \Phi_b = L_b A_p \Omega_s k_{Dr,b}. \quad (11)$$

Тоді потік від фону, приведений за ефективністю дії на ПВ до випромінювання еталонного джерела,

$$\Phi_{Db} = \Phi_b \frac{k_{Dr,b}}{k_{D,tp}} = L_b A_p \Omega_s \frac{k_{Dr,b}}{k_{D,tp}}. \quad (12)$$

Розраховане за цією формулою значення потоку Φ_{Db} використовують для врахування впливу постійної освітленості на характеристики ПВ.

У випадку, коли об'єкт розміщений на нерівномірному фоні, пороговий потік ОЕСС розраховують за формулою (3), яка враховує вплив постійної освітленості. При цьому попередньо визначають величину постійної складової від фону на вході ПВ за формулою (12), за якою розраховують або коефіцієнт $k_{Db}(\Phi_{Db})$, або нові значення NEP і R_D . Якщо флуктуації від фону мають низькочастотний характер, то вплив фонові освітленості на ПВ розраховують за її максимальним значенням. За наявності високочастотних флуктуацій, зумовлених неоднорідністю фону, крім погіршення чутливості ПВ, потрібно враховувати сигнали завад, що формуються цією неоднорідністю. Якщо ці завади утворюють сигнали на виході ПВ, що порівняні з рівнем власних шумів, то розрахунок МДВ тепловізора виконують з урахуванням цієї складової завад.

Таким чином, щоб отримати відповідь про реальну МДВ, що працює в умовах неоднорідного фону, потрібно або знайти співвідношення між ефективними величинами реального порогового потоку ПВ і флуктуаціями потоку від фону, тобто між $NEP^1 k_{Db}(f) k_{Db}(\Phi_b) k_{D,tp}$ і $\Delta \Phi_b k_{Dr,b}$, або розрахувати МДВ за формулами (10) і (4.116) для рівномірного фону із [5].

У першому випадку, коли $\Delta \Phi_b k_{Dr,b} > NEP^1 k_{Db}(f) k_{Db}(\Phi_b) k_{D,tp}$, реальну дальність розраховують за формулою (10). Під час розрахунку МДВ за формулами (4.116) і (10) за реальну дальність приймають меншу із них.

Приклад розрахунку максимальної дальності виявлення

В якості прикладу застосування представленого методу розрахунку максимальної дальності виявлення R_d розглянемо тепловізор, який має такі парамет-

ри: об'єктив – фокусна відстань $f'_o = 76$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_p = 76$ мм, коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,65$; МСТ-ПВ – робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 7,5 \dots 12,5$ мкм, питома виявлювальна здатність $D_{\max}^* = 5,5 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\Gamma}$ ц/Вт, розмір пікселя $V_D \times W_D = 22 \times 28$ мкм 2 ; шумова смуга пропускання попереднього підсилювача $\Delta f = 1,8$ МГц; частота кадрів $f_f = 25$ Гц. Згідно до стандарту НАТО 4347 тест-об'єкт являє собою квадрат розміром $2,3 \times 2,3$ м 2 з температурним контрастом $\Delta T_0 = 2$ К і розташований на фоні з температурою $T_b = 288$ К. Тест-об'єкт і фон випромінюють як абсолютно чорне тіло. Фон має такі параметри: інтегральне середньоквадратичне значення флуктуацій яскравості $\sigma_b = 10^{-3}$ Вт/(см $^2 \cdot$ ср); кутові розміри флуктуацій яскравості $\xi_{cb} = 0,1^\circ$. Для впевненого виявлення об'єкта система повинна забезпечити на виході ПВ відношення сигнал/шум $SNR_d = 4,5$.

Алгоритм застосування методу наступний:

1. Для розрахунку МДВ скористаємося формулою (10), де відомі з умови прикладу $SNR_d = 4,5$ і $A_t = 5,29 \cdot 10^4$ см 2 . Для спрощення розрахунків вважаємо, що коефіцієнт використання ПВ за об'єктом і фоном близькі один до одного, тобто $k_{Dr,t} \approx k_{Dr,b}$. Тоді формулу (10) запишемо у вигляді

$$R_d = \sqrt{\frac{A_t (L_t - L_b)}{SNR_d m_m L_b \Omega_s}}. \quad (13)$$

2. Розраховуємо різницю яскравості між об'єктом і фоном, вважаючи їх ламбертівськими джерелами випромінювання:

$$L_t - L_b = \frac{1}{\pi} \int_{7,5}^{12,5} [M_\lambda(\lambda, T_t = 300K) - M_\lambda(\lambda, T_b = 288K)] d\lambda, \quad (14)$$

де $M_\lambda(\lambda, T)$ – функція Планка [5]. Використовуючи програму Mathcad маємо

$$L_t - L_b = \frac{1}{\pi} [15 - 12] \cdot 10^{-3} = 0,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср}}.$$

3. Тілесний кут миттєвого поля зору ТПСС Ω_s пов'язаний з плоским кутом $\delta\omega_s$ співвідношенням [5]:

$$\Omega_s = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\delta\omega_s}{2} \right) = 4\pi \sin^2 \frac{\delta\omega_s}{4} \approx \frac{\pi}{4} (\delta\omega_s)^2.$$

Вважатимемо, що миттєве поле зору визначається розміром чутливого елемента ПВ за формулою:

$$\delta\omega_s = \frac{V_D}{f'_o} = \frac{22 \cdot 10^{-3}}{76} = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,0166^\circ.$$

$$\text{Тоді } \Omega_s = \frac{\pi}{4} (0,29 \cdot 10^{-3})^2 = 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ ср.}$$

4. Глибину модуляції m_m визначимо таким чином [6]. У формулі (13) добуток $m_m L_b$ характеризує змінну складову яскравості фону, яку сприймає тепловізор. З урахуванням просторового інтегрування флуктуацій яскравості фону миттєвим полем зору тепловізора $\delta\omega_s$ цей добуток наближено можна подати у вигляді

$$m_m L_b \approx \sigma_b \frac{\delta\omega_s}{\xi_{cb}}, \quad (15)$$

де σ_b^2 – дисперсія флуктуацій яскравості фону; $\xi_{cb} = 0,1^\circ$ – радіус кореляції фону (кутові розміри неоднорідності фону). Після підстановки маємо $m_m L_b = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$.

5. Підставляємо вихідні дані до формули (13):

$$R_d = \sqrt{\frac{5,29 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 1,66 \cdot 10^{-4} \cdot 6,6 \cdot 10^{-8}}} = 10^6 \text{ см} = 10 \text{ км.}$$

Отримані результати потрібно порівняти з результатами розрахунку, коли об'єкт міститься на рівномірному фоні [5]. Якщо отримане при цьому значення МДД буде більшим за $R_d = 10 \text{ км}$, то дальність 10 км і буде максимальною дальністю виявлення об'єкта тепловізором за заданих умов спостереження.

Висновки

1. Розроблена математична модель системи «об'єкт спостереження – фон – тепловізор», яка дозволила отримати рівняння для розрахунку максимальної дальності виявлення об'єкта, що знаходиться на нерівномірному фоні.

2. В якості моделі нерівномірного фону запропоновано використовувати стаціонарний розподіл флуктуацій яскравості із заданими дисперсією і середнім розміром неоднорідності. Глибина модуляції відеосигналу нерівномірним фоном враховується просторовим інтегруванням флуктуацій фону миттєвим полем зору тепловізора.

3. Запропоновано алгоритм розрахунку МДВ тепловізором тест-об'єкта, що знаходиться на нерівномірному фоні, практичне застосування якого дозволило визначити МДВ, яка обмежена флуктуаціями фону.

4. Подальші дослідження слід спрямувати на розробку метода узгодження розміру неоднорідності фону та миттєвого поля зору тепловізора з метою збільшення МДВ.

Література

1. Глущенко А. Р. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. Бурак, А. Ю. Денисенко. – Черкассы: ПП Чабаненко Ю. А., 2007. – 442 с.

2. Филатов Г. Развитие подвижных наземных комплексов оптико-электронных средств разведки СВ за рубежом / Г. Филатов, С. Якобсон, Н. Беглова // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 1. – С. 17 – 19.
3. Колобродов В. Г. О пространственном разрешении космических ИК-систем дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т.3. – № 5 – 6. – С. 55 – 59.
4. Diakides N. A., Bronzino J. D. Medical Infrared Imaging. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 452 p.
5. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.
6. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы (основы теории и расчета). – М.: Энергия, 1974. – 360 с.

*Надійшла до редакції
05 березня 2015 року*

© Гордієнко В. І., 2015

УДК 621.384.3

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО НОРМОВАНОГО РАДІУСА РОЗСІЮВАННЯ ОБ’ЄКТИВА ТЕПЛОВІЗОРА

Колобродов В. Г., Балінський Є. Г., Пінчук Б. Ю.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

E-mail: thermo@ukr.net, pinchuk.brus@gmail.com

Дана стаття присвячена вирішенню проблеми визначення оптимального нормованого радіуса кружка розсіювання об’єктива тепловізора, використовуючи запропоновані критерії узгодження. На базі профілакторію НТУУ «КПІ» проведена оцінка впливу нормованого радіуса кружка розсіювання об’єктива тепловізора на якість тепловізійного зображення, за умови узгодження МПФ компонентів системи.

Було розглянуто два критерії узгодження за новим методом, що дозволив узагальнити та узгодити систему, при яких описані в статті об’єктиви, знаходяться в рівних умовах. Отримані результати показали, що нормований радіус першого критерію менший від другого майже втричі. При цьому, за другим критерієм якість отриманого зображення не погіршується, а затрати на компоненти значно менші.

***Ключові слова:** тепловізор, модуляційна передавальна функція, нормований радіус кружка розсіювання об’єктива.*

Вступ

Суттєвим кроком вперед в розвитку теплобачення стало використання неохолоджуваних мікроболометричних матриць [1,2]. Внаслідок чого в значній мірі збільшилася кількість різноманітних сфер, де застосовують тепловізори. Найактуальнішими ж областями їх застосування вважаються військова та медична. В свою чергу, дані галузі є пріоритетними для передових країн світу США, Франції, Китаю та інші.

Якість отриманого зображення залежить від просторової роздільної здатності, в основу якої покладено узгодження параметрів об’єктива та матричного приймача випромінювання (МПВ) [3].