

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 681.78

**ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК АВТОМАТИЧНИХ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ
МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ***Кравченко І. В., Микитенко В. І., Васильчук Є. О.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: v.mykytenko@kpi.ua*

Велика популярність невеликих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в задачах дистанційних спостережень вимагає подальшого вдосконалення не тільки носія, але й бортової апаратури. Стандартними засобами спостереження для БПЛА є телевізійні камери, а в більш дорогих технічних рішеннях – тепловізійні камери. Ефективність функціонування цих пристроїв насамперед залежить від просторової та енергетичної роздільної здатності вхідних блоків, що містять оптичну систему та приймач випромінювання. Особливість формування корисного сигналу оптико-електронними системами спостереження (ОЕСС) на невеликих відстанях, що є характерним для малорозмірних БПЛА, полягає в необхідності першочергового забезпечення достатньої енергетичної чутливості.

У статті розроблено метод визначення енергетичного розділення автоматичних ОЕСС невеликої дальності дії в складі двох інформаційних каналів – телевізійного та тепловізійного. Обґрунтовано, що для спрощених розрахунків доцільно як показники якості використовувати функції еквівалентної шуму різниці яскравості та еквівалентної шуму різниці температур відповідного каналу. Наведено приклади розрахунків енергетичного розділення телевізійного та тепловізійного каналів ОЕСС з матричними приймачами випромінювання. Досліджено вплив задньої фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктивів на енергетичне розділення для дуальності спостереження від 0,5 км до 2 км. Показано, що в ОЕСС із змінним збільшенням перевагу мають об'єктиви з більшим діаметром вхідної зіниці – вони забезпечують більш рівномірну енергетичну чутливість при зміні фокусної відстані. Розроблені розрахункові методи можна застосовувати для багатоспектральних ОЕСС, що працюють у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру.

Ключові слова: енергетичне розділення; оптико-електронні системи спостереження; еквівалентна шуму різниця температур.

Вступ

Швидке розповсюдження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у світі почалося кілька років тому. І цей процес набирає обертів: останні маркетингові дослідження показують, що глобальний ринок БПЛА зростає з 23,60 мільярдів доларів США в 2021 році до 77,69 мільярдів доларів в 2030 році [1]. Наразі основним драйвером зростання споживчого ринку є підвищення актуальності в забезпеченні прикордонників, військових, силових структур якісною візуальною інформацією про стан фоноцільової обстановки [2, 3]. Постійно підвищуються вимоги до інформативності авіаційних зображень, які мають давати змогу адекватно оцінювати ситуацію не тільки вдень, але і вночі. Тому на БПЛА розміщують передавальні камери не тільки телевізійного, але й тепловізійного каналів, а іноді також – лазерного далекоміра [4, 5]. Водночас, тех-

нічні характеристики передавальних камер здебільшого не обґрунтовуються, виходячи з виконуваної задачі, а вибираються в основному за масогабаритними параметрами та з маркетингових міркувань [6]. У цьому оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС) для БПЛА суттєво відрізняються від таких систем космічного базування. Причиною є відмінності у споживчій якості таких систем: космічні ОЕСС формують масиви даних високої метрологічної якості, що можуть використовуватись для точної оцінки та прогнозування стану об'єктів спостереження, а системи на борту БПЛА зазвичай формують зображення для поточного спостереження та виявлення певних об'єктів без необхідності кількісної оцінки їх стану.

Очевидно, що із насиченням продукцією та зниженням маржинальності ринку виграють технічні рішення, максимально оптимізовані для вико-

нання конкретного типу задач. Тільки такі рішення за мінімальної собівартості забезпечать максимальну ефективність для користувача. Однією з задач, яка має бути вирішеною в ході створення механізмів підвищення споживчої ефективності ОЕСС для БПЛА, є розробка розрахункових методів для проектування ОЕСС. Зазвичай ОЕСС розробляють виходячи з розділення, яке має забезпечити система. Частіше за все використовується просторове, енергетичне розділення [7 - 10]. Останнім часом також набуває актуальності забезпечення поляриметричного розділення [11]. ОЕСС БПЛА працюють на невеликих відстанях до об'єкту спостереження (до кількох кілометрів), тому забезпечення достатнього просторового розділення зазвичай не викликає технічних складнощів. Натомість формування радіометричного (фотометричного) контрасту, достатнього для виявлення замаскованих, малоконтрастних об'єктів часто викликає багато питань. Тим більше у випадках багатоканальних ОЕСС, які для забезпечення скритності при підльоті до зони інтересу переводяться в повністю автоматичний режим функціонування без радіообміну з наземною станцією. Звичайно виробник може використати найбільш чутливі матриці приймачів випромінювання (МПВ) з наявних у продажу та високоякісні об'єктиви. Але собівартість такого рішення навряд чи дозволить його виробнику довго знаходитись на ринку. У цьому контексті розробникам стане у нагоді розрахунковий метод, який дозволить оцінити конструкцію та склад ОЕСС з мінімально достатніми для виконання конкретного типу задач енергетичними характеристиками.

Постановка задачі

Мета статті полягає в обґрунтуванні вибору енергетичного показника якості ОЕСС невеликої дальності дії, які встановлюються на малорозмірних БПЛА, і в розробці на його основі методу розрахунків основних параметрів вхідних блоків ОЕСС видимого та інфрачервоного діапазонів спектру.

Вибір розрахункового показника якості ОЕСС БПЛА

Малорозмірні БПЛА літають на висотах від 1 до 1,5 км, що при нахилі візирної осі ОЕСС 45°-60° формує довжину похилої траси спостереження від 2 до 3 км. При використанні короткофокусного об'єктива 50 мм просторове розділення на найбільшій відстані спостереження складе 120 мм для пікселя МПВ розміром 2 мкм, 300 мм для пікселя розміром 5 мкм, 720 мм для пікселя розміром 12 мкм. Вказані розміри пікселів є стандартними для телевізійних та тепловізійних МПВ і навіть за малої фокусної відстані об'єктива дають достатне для виявлення типових об'єктів просторове розділення. Тому немає сенсу використовувати складні для розрахунків показники, що описують одночас-

но просторові та енергетичні параметри, такі, наприклад, як мінімальну роздільну різницю температур [12] і доцільно в основу розрахункового методу покласти суто енергетичний показник якості.

Обмеження розгляду тільки ОЕСС, які працюють в автоматичному режимі, дозволяє вилучити з розгляду аспект зорового сприйняття зображення оператором. Зазвичай для ОЕСС інфрачервоного діапазону спектру енергетичне розділення оцінюється для всього інформаційного комплексу, який включає також спостерігача. Водночас, використовують поняття мінімальної виявлювальної різниці температур [13]. У це поняття входить функція еквівалентної шуму різниці температур (англ. Noise Equivalent Temperature Difference, NETD). Функція NETD найбільш повно характеризує енергетичну роздільну здатність тепловізійного каналу ОЕСС і містить основні параметри, що описують приймач випромінювання, оптичну систему і фонощільову обстановку в частині проходження випромінювання через атмосферу. Отже, буде виправданим покласти NETD в основу розрахункового методу.

Функція NETD може бути модифікована також для телевізійного каналу ОЕСС. Фактично основною відмінністю формування сигналу в тепловізійному та телевізійному каналах є те, що в першому випадку об'єкт на фоні описується різницею поверхневих щільностей випромінювання, а другому – різницею яскравості. Це означає, що в інфрачервоному діапазоні параметрами площинного об'єкта на фоні є власна температура та коефіцієнти випромінювання, а в видимому – освітленість і коефіцієнти відбиття. Отже, якщо замінити різницю температур різницею яскравості, то можна отримати еквівалентну шуму різницю яскравості (англ. Noise Equivalent Luminance Difference, NELD). Відповідно енергетичне розділення тепловізійного каналу визначається розділенням за температурою, а телевізійного каналу – за яскравістю.

Обидва показники NETD та NELD визначаються за умови, що відношення сигнал/шум у даному каналі дорівнює одиниці. Якщо об'єкт і фон є ламбертівськими випромінювачами, то маємо [14]

$$NETD_S = \frac{4k_o^2}{D_{th}^* \tau_A \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (1)$$

де D_{th}^* – питома виявлювальна здатність МПВ; $k_o = f_o'^2 / D_p$ – діафрагмове число об'єктива; f_o' і D_p – задня фокусна відстань і діаметр вхідної зіниці об'єктива відповідно; τ_A – коефіцієнт пропускання атмосфери; τ_o – коефіцієнт пропускання оптичної системи ОЕСС; $M_{\lambda}(\lambda, T)$ – функція Планка; $(\lambda_1 - \lambda_2)$ – робочий спектральний діапазон; Δf – ефективна шумова смуга електронного тракту МПВ; A_D – площа пікселя.

Ефективна шумова смуга Δf обраховується відповідно до часу розкладу одного елементу розгортки зображення:

$$\Delta f = p \cdot q \cdot f_c / 2\eta_{sc}, \quad (2)$$

де p, q – кількість пікселів в МПВ; f_c – частота кадрової розгортки; η_{sc} – коефіцієнт ефективності сканування.

Коефіцієнт пропускання атмосфери в межах робочого спектрального діапазону визначається законом Бугера-Ламберта:

$$\tau_A(R) = \exp(-\kappa_A R), \quad (3)$$

де $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення за сприятливих умов пропускання атмосфери; $\kappa_A = 0,1 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення за поганих умов пропускання атмосфери.

Формула (1) потребує коментарів. Вона дозволяє визначити основні параметри об'єктиву, МПВ, електронного блоку ОЕСС. Але, по-перше, в формулі не враховані спектральні залежності величин D_{in}^*, τ_A, τ_o і використано їх інтегральні в діапазоні $(\lambda_1 - \lambda_2)$ значення. По-друге, коефіцієнт пропускання атмосфери звичайно залежить від відстані R до об'єкта спостереження. Ці спрощення значно зменшують обсяг розрахунків і фактично не впливають на якість виконання поставленого завдання – розроблення методу енергетичного розрахунку ОЕСС у мінімальній для реалізації поточної задачі спостереження конфігурації. Але за необхідності можна врахувати вказані спектральні залежності. Також видно, що (1) не враховує характеристик безпосередньо об'єкту і фону, тобто є характеристикою тільки комплексу «атмосфера – ОЕСС». Частково середню температуру фоноцільової обстановки можна врахувати через коефіцієнт, що показує відмінність реального тест-об'єкту від того, що використовувався при визначенні характеристик МПВ

$$\beta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T_p)}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda},$$

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

Але на практиці коефіцієнт β незначно відрізняється від одиниці. Для більш повного аналізу всього інформаційного комплексу дистанційного спостереження необхідно використовувати інші характеристики, наприклад, мінімальну виявлювальну різницю температур.

Деякі виробники інфрачервоних МПВ в спеціфікації на прилад вказують не D_{in}^* , а виміряну для цього приймача еквівалентну шуму різницю температур $NETD_D$:

$$NETD_D = \frac{4}{D_{in}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (4)$$

Якщо відома ця величина, то формула (1) набуде компактнішого вигляду:

$$NETD_S = NETD_D \frac{k_o^2}{\tau_A \tau_o}. \quad (5)$$

Еквівалентну шуму різницю яскравості визначимо використовуючи відому формулу для обчислення освітленості в фокальній площині об'єктива при спостереженні площинного об'єкту на рівномірному фоні:

$$\Delta E = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \tau_A \tau_o E_o \Delta \rho, \quad (6)$$

де E_o – інтегральна освітленість площини спостереження; $\Delta \rho = \rho_t - \rho_b$ – різниця коефіцієнтів відбиття об'єкту і фону.

У найпростішому випадку ламбертівської моделі відбиття елементами фоноцільової обстановки яскравість поверхні L пов'язана з її освітленістю E як

$$L = \rho \frac{E}{\pi}, \quad (7)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття.

Тоді різниця у яскравості об'єкту і фону дорівнює

$$\Delta L = \Delta \rho \frac{E_o}{\pi}. \quad (8)$$

Позначивши порогову освітленість МПВ як E_n , отримаємо відношення сигнал/шум

$$SNR = \frac{\Delta E}{E_n}. \quad (9)$$

Тоді з врахуванням (6) для $SNR = 1$ маємо

$$NELD = \Delta L = \frac{4k_o^2}{\pi \tau_A \tau_o} E_n. \quad (10)$$

Розрахунок енергетичного розділення двоканальної ОЕСС

Розглянемо послідовність розрахунків енергетичного розділення двоканальної ОЕСС, що працює в пасивному (в інфрачервоному діапазоні спектру) та напівактивному (у видимому діапазоні спектру) режимах на похилій трасі спостереження. Схема розрахункової моделі зображена на рис. 1.

Формула (1) дозволяє досліджувати вплив різних характеристик оптичної системи та МПВ на величину NETD або NELD. Втім на практиці номенклатура доступних МПВ інфрачервоного діапазону є досить обмеженою. Для видимого діапазону спектру кількість типів МПВ також є меншою, ніж можливих варіантів об'єктивів, які до того ж можна розрахувати і виготовити на замовлення. Тому доцільно як приклад дослідити можливі варіанти габаритних параметрів

об'єктів при заданому типі МПВ. Розрахуємо еквівалентні температури та яскравості для різних значень фокусних відстаней об'єктів f_o' і діаметрів вхідної зіниці D_p при незмінних інших

заданих параметрах. Діапазон зміни f_o' і D_p виберемо виходячи з наявної практики застосування на невеликих БПЛА.

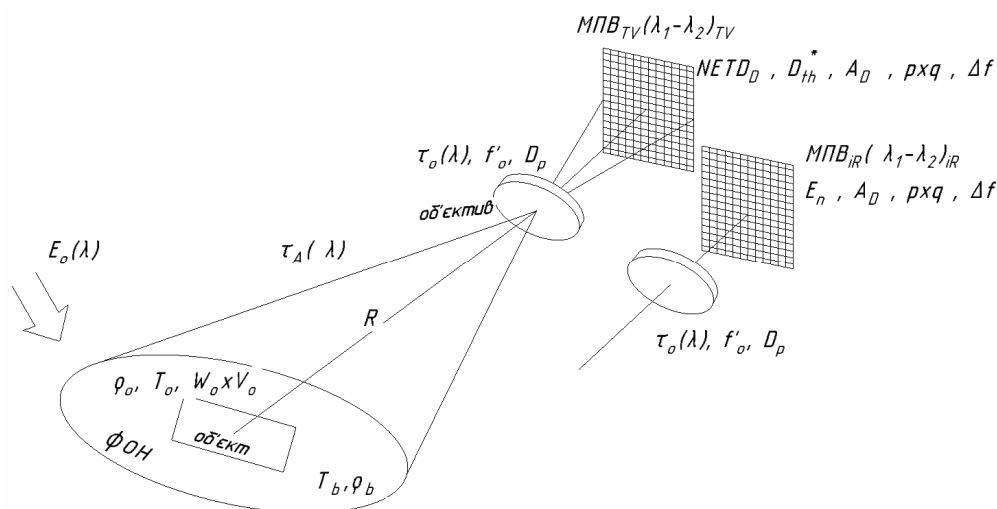


Рис. 1. Схема двоканальних дистанційних спостережень

Тепловізійний канал $\Delta\lambda = (8-14)$ мкм має такі вихідні параметри:

- об'єктів:
 - фокусна відстань $f_o' = (30-120)$ мм;
 - діаметр вхідної зіниці $D_p = (30-60)$ мм;
 - інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,8$;
- МПВ – мікроболометрична матриця VOx Uncooled Infrared Detector [15]:
 - формат матриці $p \times q = 640 \times 512$;
 - період матричної структури $V_D \times W_D = 12 \times 12$ мкм²;
 - робочий спектральний діапазон $\lambda_1 - \lambda_2 = (8-14)$ мкм;
 - еквівалентна шуму різниця температур $NETD_D = 40$ мК.

Телевізійний канал ($\Delta\lambda = (0,4-0,8)$) мкм має такі вихідні параметри:

- об'єктів:
 - фокусна відстань $f_o' = (50-150)$ мм;
 - діаметр вхідної зіниці $D_p = (20-50)$ мм;
 - інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,9$;
- МПВ - ПЗЗ матриця KAF-0402 [16], яка має такі параметри:
 - формат матриці $p \times q = 784 \times 520$;
 - розмір пікселя $V_D \times W_D = 9 \times 9$ мкм²;
 - еквівалентна шуму різниця освітленості $E_n = 10^{-3}$ лк.

Вважатимемо, що умови спостереження є сприятливими для обох спектральних діапазонів –

коефіцієнт ослаблення атмосфери $\kappa_A = 0,2$ км⁻¹. Розрахунки виконаємо для чотирьох відстаней спостереження – 0,5 км, 1,0 км, 2,0 км, 3,0 км. Відповідні коефіцієнти пропускання атмосфери дорівнюють:

$$\begin{aligned}\tau_A(0,5) &= \exp(-0,2 \cdot 0,5) = 0,905, \\ \tau_A(1,0) &= \exp(-0,2 \cdot 1,0) = 0,819, \\ \tau_A(2,0) &= \exp(-0,2 \cdot 2,0) = 0,670, \\ \tau_A(3,0) &= \exp(-0,2 \cdot 3,0) = 0,549.\end{aligned}$$

Для розрахунку температурного розділення використаємо формулу (5)

$$NETD_S = NETD_D \frac{f_o'^2}{\tau_A \tau_o D_p^2}.$$

Після підстановки вихідних параметрів до формули отримаємо рівняння для дослідження температурного розділення тепловізійного каналу ОЕСС для різних відстаней спостереження:

- $R = 0,5$ км:

$$NETD_{S0,5}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,724 D_p^2} = 55,2 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК};$$

- $R = 1,0$ км:

$$NETD_{S1,0}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,655 D_p^2} = 61,1 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК};$$

- $R = 2,0$ км:

$$NETD_{S2,0}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,536 D_p^2} = 74,6 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК};$$

- $R = 3,0$ км:

$$NETD_{S3,0}(f_o', D_p) = 40 \frac{f_o'^2}{0,439 D_p^2} = 91,1 \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \text{ мК}.$$

На рис. 2 наведено графіки залежності еквівалентної шуму різниці температур $NETD_s(f_o', D_p)$ тепловізійного каналу від фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктиву для різних відстаней спостереження.

Слід мати на увазі, що об'єктиви з діафрагмовим числом меншим за одиницю використовуються доволі нечасто через складність абераційної

корекції, тому графіки на рис. 2 для $D_p = 50$ мм і $D_p = 60$ мм при $f_o' < 50$ мм мають скоріше ілюстративний характер. Для розрахунку розділення за яскравістю тепловізійного каналу ОЕСС використовуємо формулу (10)

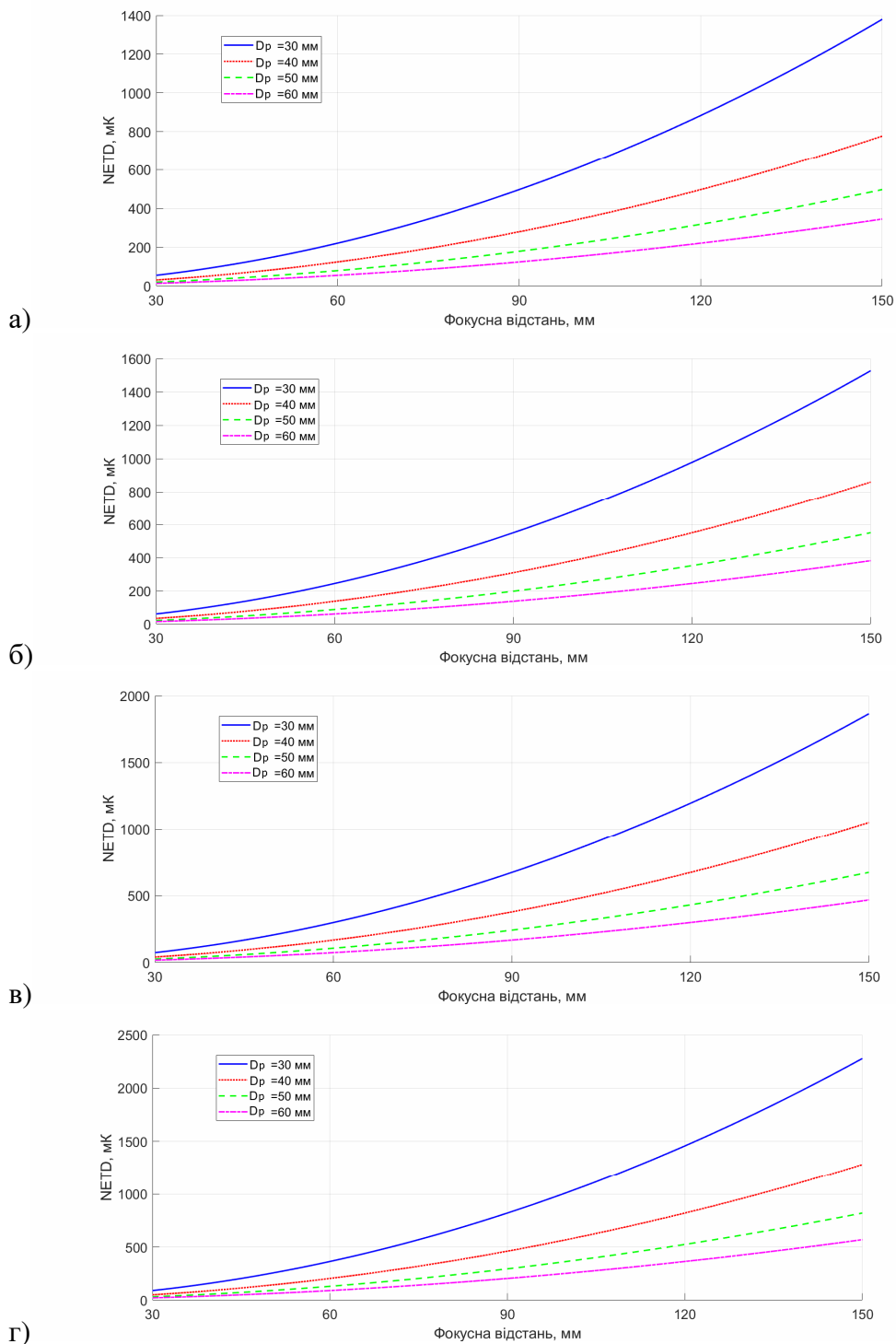


Рис. 2. Залежність еквівалентної шуму різниці температур тепловізійного каналу від фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктиву: а) $R=0,5$ км, б) $R=1,0$ км, в) $R=2,0$ км, г) $R=3,0$ км

$$NELD(f_o', D_p) = \frac{4f_o'^2}{\pi \tau_A \tau_o D_p^2} E_n.$$

Після підстановки вихідних параметрів до формули отримуємо рівняння для дослідження енергетичного розділення телевізійного каналу OECC для різних відстаней спостереження:

- $R = 0,5$ км:

$$NELD_{S_{0,5}}(f_o', D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,905 D_p^2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \frac{\text{лк}}{\text{ср}};$$

- $R = 1,0$ км:

$$NELD_{S_{1,0}}(f_o', D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,819 D_p^2} = 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \frac{\text{лк}}{\text{ср}};$$

- $R = 2,0$ км:

$$NELD_{S_{2,0}}(f_o', D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,670 D_p^2} = 2,1 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \frac{\text{лк}}{\text{ср}};$$

- $R = 3,0$ км:

$$NELD_{S_{3,0}}(f_o', D_p) = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} f_o'^2}{0,549 D_p^2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{f_o'^2}{D_p^2}, \frac{\text{лк}}{\text{ср}}.$$

На рис. 3 наведено графіки залежності еквівалентної шуму різниці яскравості $NELD_S(f_o', D_p)$ телевізійного каналу від фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктиву для різних відстаней спостереження.

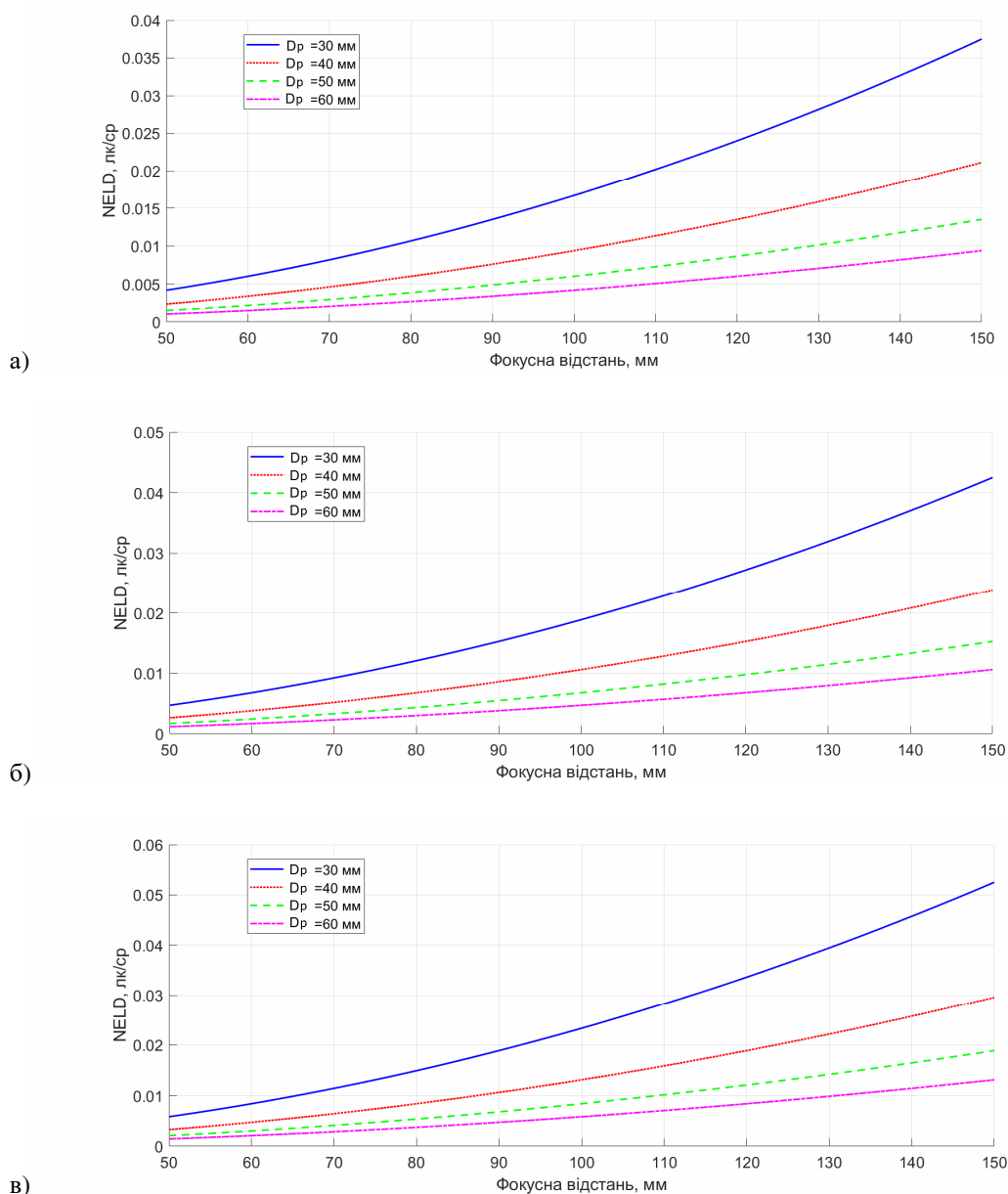
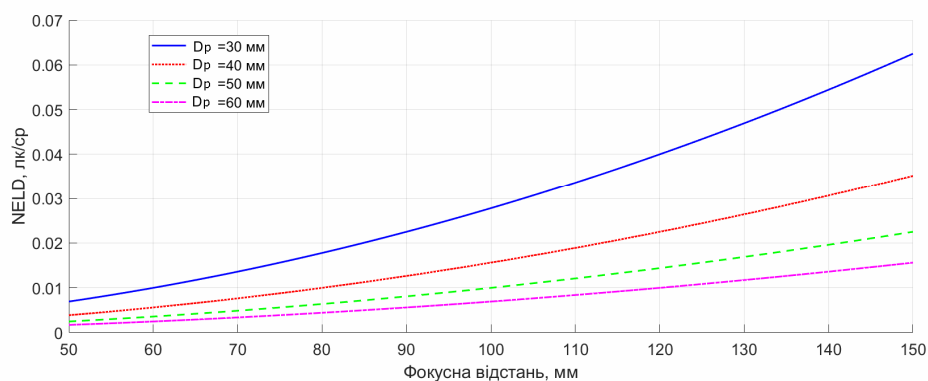


Рис. 3. Залежність еквівалентної шуму різниці яскравості телевізійного каналу від фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктиву: а) $R=0,5$ км, б) $R=1,0$ км, в) $R=2,0$ км



г)

Рис. 3 (продовження). Залежність еквівалентної шуму різниці яскравості телевізійного каналу від фокусної відстані та діаметру вхідної зіниці об'єктиву: г) $R=3,0$ км

Для практичного застосування отриманих результатів можна оцінити їх відповідно до мінімальних типових контрастів фоноцільової обстановки. При низьких рівнях сонячного освітлення у сутінках приблизно 10 лк і ламбертівському характері відбиття об'єктом з коефіцієнтом $\rho=0,3$ має яскравість 1 лк/ср. Стандартним температурним контрастом для енергетичних розрахунків є $T=2^\circ$. Порівнюючи ці контрасти з розрахунковими значеннями чутливості, можна відмітити, що вибрані конфігурації каналів ОЕСС задовольняють стандартним вимогам. Звичайно такі порівняння є наближеними, адже не враховані шумові компоненти сигналу крім власних шумів МПВ. Більш точні результати можна отримати через розрахунки ймовірнісних характеристик виявлення сигналу.

Часто навіть на недорогих невеликих БПЛА бажано мати змінне збільшення об'єктива для забезпечення детальнішого огляду зони інтересу. В об'єктивах із змінним збільшенням діафрагмове число залишається незмінним. Наведені графіки дозволяють оцінити падіння енергетичного розділення при підвищенні фокусної відстані. Наприклад, при використанні об'єктива з $D_p = 30$ мм при 3-х кратному зумі з $f_o' = 40$ мм до $f_o' = 120$ мм температурне розділення тепловізійного каналу зменшується в 9 разів – з 0,1 К до 0,9 К. Для об'єктивів з більшим значенням діаметру вхідної зіниці таке падіння не змінюється у відносних одиницях, але є набагато меншим в абсолютних одиницях. Наприклад, при $D_p = 60$ мм і $f_o' = 120$ мм температурне розділення становить приблизно 0,2 К. Отже, якщо габарити ОЕСС дозволяють, то краще використовувати об'єктиви з більшим значенням D_p .

Висновки

Розроблено спрощений метод розрахунку енергетичного розділення тепловізійного та телевізійного каналів ОЕСС для невеликих БПЛА. Він дозволяє досліджувати основні характеристики

вхідних блоків ОЕСС і порівнювати між собою різні технічні рішення для забезпечення певної дальності спостереження. Збільшення діаметру вхідної зіниці об'єктиву призводить до покращення енергетичної чутливості обох каналів ОЕСС, а збільшення фокусної відстані – до погіршення. Вибір конкретних значень цих геометричних параметрів залежить від допустимих габаритів вхідного блоку ОЕСС.

Для більш повного врахування всіх аспектів формування інформації при дистанційних спостереженнях в подальших дослідженнях доцільно використовувати характеристики, що поєднують енергетичні та геометричні параметри і на їх основі визначати ймовірнісні характеристики виявлення об'єктів.

Література

- [1] Unmanned Aerial Vehicle Market By Product (Small UAV, Tactical and Strategic UAV), By Point of Sale (Aftermarket, OEM), By Technology, By System, By Wing Type, By Application, By End-Use, and By Region Forecast to 2030. [Online]. Available: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/unmanned-aerial-vehicle-market>
- [2] Unmanned combat aerial vehicle. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_combat_aerial_vehicle
- [3] The Drone Databook. [Online]. Available: <https://dronecenter.bard.edu/files/2019/10/CSD-Drone-Databook-Web.pdf>
- [4] C. Yang, "A high resolution airborne four-camera imaging system for agricultural applications", *Comput. Electron. Agric.* 88 (2012), pp.13–24.
- [5] USG-400. [Online]. Available: <https://ukrspecsystems.com/drone-gimbals/usg-400>
- [6] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, and M. H. Alsharif, "Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive

- Review”, *Drones*, 2022, no. 6, pp. 1-147. DOI:10.3390/drones6060147
- [7] G. C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance*. Fifth Edition. JCD Publishing, 2008.
- [8] Axel Baumann, Marco Boltz, Julia Ebling, etc. “A Review and Comparison of Measures for Automatic Video Surveillance Systems”, *Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2008, Article ID 824726, pp. 1-30. DOI:10.1155/2008/824726
- [9] K. Chrzanowski, *Testing thermal imager*. Warsaw: Military University of Technology, 2010.
- [10] G. D. Boreman, *Modulation transfer function in optical and electro-optical systems*. Second edition. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2021.
- [11] V. G. Kolobrodov, G. S. Tymchyk, B. V. Sokol, V. I. Mykytenko, “Temperature resolution of computerintegrated polarization thermal imager”, *Journal of Thermoelectricity*, 2020(4), pp. 22–37, 2020.
- [12] V. G. Kolobrodov, V. I. Mykytenko, “Refinement of thermal imager minimum resolvable temperature difference calculating method”, *Proceedings of SPIE*, vol. 9809, (2015), 98090C.
- [13] Vollmer Michael. *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications*. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany, 2018.
- [14] Igor G. Chyzh, Valentin G. Kolobrodov, Anatoly V. Molodyk, Volodymyr I. Mykytenko, Grygorij S. Tymchik, etc. “Energy resolution of dual-channel opto-electronic surveillance system”, *Proceedings of SPIE*, vol. 11581, 115810K (2020).
- [15] WLP Uncooled Infrared Detectors. [Online]. Available: <https://www.gst-ir.net/uploads/products/pdf/wlp-uncooled-infrared-detectors.pdf>
- [16] KAF-0402 - 768 (H) x 512 (V) Full Frame CCD Image Sensor. [Online]. Available: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ON%20Semiconductor%20PDFs/KAF-0402_Rev2_Apr2015.pdf

УДК 681.78

Igor V. Kravchenko, Volodymyr I. Mykytenko, Yelizaveta O. Vasylchuk*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***ENERGY CALCULATION OF SMALL-SIZED UAVs AUTOMATIC OPTOELECTRONIC OBSERVATION SYSTEMS**

Great popularity of small unmanned aerial vehicles (UAVs) in remote observation tasks requires further improvement of not only the carrier, but also the on-board equipment. Standard means of surveillance for UAVs are television cameras. Thermal imaging cameras are used in more expensive technical solutions. The efficiency of the functioning of these devices primarily depends on spatial and energy resolution of their input units, which contain optical system and detector. Small-sized UAVs operate at short distances. The peculiarity of useful signal formation by optical-electronic surveillance systems (OESS) of such UAVs is the need to primarily ensure sufficient energy sensitivity.

The article develops a method for determining the energy resolution of short-range automatic UESs with two information channels - television and thermal imaging. It is justified that for simplified calculations it is advisable to use the functions of the noise-equivalent luminance difference and the noise-equivalent temperature difference of the corresponding channel as quality indicators. Examples of energy resolution calculations of television and thermal imaging channels of the OESS with matrix detectors are given. The influence of focal length and of entrance pupil diameter of the lenses on the energy resolution was studied for observation distances from 0.5 km to 2 km. It is shown that, in OESS with variable magnification, lenses with a larger diameter of the entrance pupil are preferred - they provide more uniform energy sensitivity when changing the focal length. The developed calculation methods can be used for multispectral OESS operating in the visible and infrared spectrum ranges.

Keywords: energy resolution; optical-electronic observation systems; noise-equivalent temperature difference.

*Надійшла до редакції
13 жовтня 2022 року*

*Рецензовано
18 листопада 2022 року*



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).