

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 621.384.326

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ОСВІТЛЕНОСТІ, ЩО ЕКВІВАЛЕНТНА ШУМУ, ДЛЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ І ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

¹⁾Власюк В.М., ¹⁾Гордієнко В.І., ²⁾Колобродов В.Г., ¹⁾НВК “Фотоприлад”, м. Черкаси, Україна; ²⁾Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Запропоновано узагальнена методика розрахунку освітленості, що еквівалентна шуму, для тепловізійних і телевізійних систем, яка враховує спектральні характеристики випромінювання об’єкта й фону, пропускання атмосфери та об’єктива, чутливості приймача випромінювання

Вступ

Тепловізійні й телевізійні системи поширені як оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС) у військовій справі, у космічних системах дистанційного зондування Землі, охоронних системах [1, 2]. Основною задачею таких систем є виявлення об’єкта спостереження на максимальній дальності. При розробці ОЕСС вихідною характеристикою є максимальна дальність виявлення або освітленість вхідної зіниці об’єктива, що еквівалентна шуму. Ці характеристики визначають потенційні можливості ОЕСС. У низці монографій [3 – 5] були представлені методики розрахунку освітленості, що еквівалентна шуму, але в них враховані лише середні значення параметрів окремих складових ОЕСС. Це призводить до значних похибок у визначенні характеристик системи. В статті представлена узагальнена методика розрахунку освітленості, що еквівалентна шуму, яка враховує спектральні характеристики випромінювання об’єкта й фону, пропускання атмосфери й об’єктива, чутливості приймача випромінювання (ПВ).

Постановка задачі

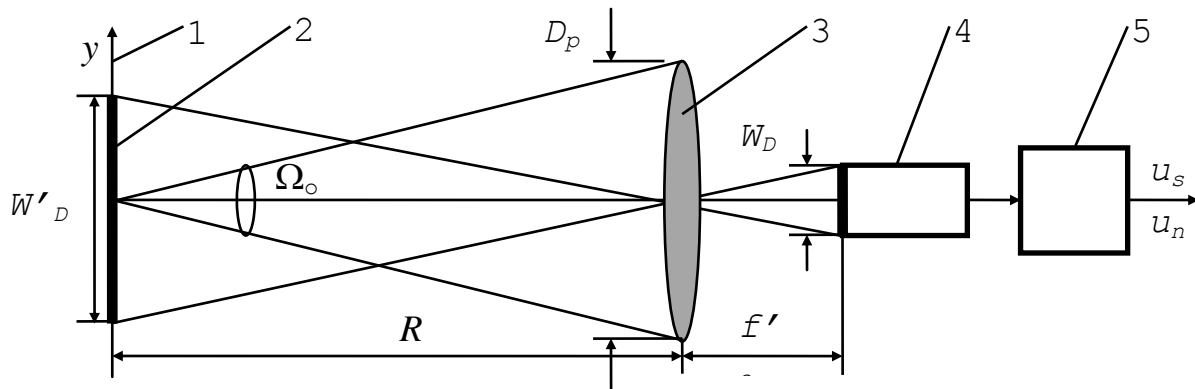
Освітленість, що еквівалентна шуму, (Noise Equivalent Irradiance) NEI – це освітленість у площині вхідної зіниці об’єктива, яка створює електричний сигнал u_s на виході ПВ, що еквівалентний (рівний) шумовому сигналу u_n , тобто

$$NEI = E_p \frac{u_n}{u_s}, \quad (1)$$

де E_p – освітленість вхідної зіниці, яка створює сигнал u_s . Інакше, параметр NEI визначає мінімальну освітленість, що виявляється.

Визначимо освітленість вхідної зіниці об’єктива E_p . Нехай об’єкт має рівномірну по площі спектральну яскравість $L_t(\lambda)$, а його кутові розміри знач-

но перевищують миттєве поле зору ОЕСС, яка розташована на відстані R від об'єкта спостереження (рис. 1). Об'єкт розташований на рівномірному фоні, який має спектральну яскравість $L_b(\lambda)$. Будемо також вважати, що поверхні об'єкта і фона випромінюють по закону Ламберта.



1 – площина об'єкта випромінювання; 2 – миттєве лінійне поле зору; 3 – об'єктив; 4 – ПВ; 5 – відеопідсилувач

Рисунок 1 – До визначення освітленості, що еквівалентна шуму

Тоді для тепловізійної системи спектральна яскравість поверхні об'єкта (фона) визначається як

$$L_t(\lambda) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_t(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t), \quad (2)$$

де $\varepsilon_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта (фона); $M_\lambda(\lambda, T_t)$ – функція Планка.

Для телевізійної системи спектральна яскравість поверхні об'єкта (фона) визначається як

$$L_t(\lambda) = \rho_t(\lambda) \frac{E_\lambda(\lambda)}{\pi}, \quad (3)$$

де $\rho_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт відбиття поверхні об'єкта; $E_\lambda(\lambda)$ – спектральна освітленість об'єкта (природна або/і штучна).

Якщо поверхня об'єкта розташована перпендикулярно до осі спостереження, то до входньої зіниці ОЕСС надходить спектральний потік випромінювання

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) A_t \Omega_o, \quad (4)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; $A_t = A_b$ – площа об'єкта або фона, що знаходиться у межах миттєвого поля зору ОЕСС; $\Omega_o = A_p / R^2$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання від об'єкта надходить до входньої зіниці об'єктивів площею A_p .

Сигнал від об'єкта на виході ПВ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ дорівнюватиме

$$u_{st} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_t \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Аналогічно можна отримати сигнал на виході ПВ, який утворюється у випадку, коли миттєве поле зору ОЕСС сканує фон,

$$u_{sb} = A_b \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_b(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Об'єкт спостереження завжди знаходиться на фоні. Тому корисний (інформативний) сигнал на виході ПВ являє собою різницю між сигналами, що утворюються об'єктом і фоном, тобто

$$u_s = u_{st} - u_{sb} = A_t \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

де

$$\Delta L(\lambda) = L_t(\lambda) - L_b(\lambda) \quad (8)$$

– абсолютний контраст яскравості у площині спостереження.

Освітленість, що еквівалентна шуму

Із рис.1 знаходимо, що спектральна освітленість вхідної зіниці дорівнює

$$E_p(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda}(\lambda)}{A_p} = \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) A_t \frac{1}{R^2}. \quad (9)$$

Використаємо зв'язок між спектральною чутливістю ПВ $R_D(\lambda)$ і його питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$ [5]

$$R_D(\lambda) = D^*(\lambda) \frac{u_n}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}, \quad (10)$$

де A_D – площа чутливої площадки ПВ; Δf – ефективна шумова смуга пропускання відео підсилувача.

Тоді із формули (7) знаходимо, що відношення сигналу до шуму на виході ПВ дорівнюватиме

$$\frac{u_s}{u_n} = \frac{A_t}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}} \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

Освітленість, що еквівалентна шуму, NEI визначимо за формулою (1) з урахуванням співвідношень (9) і (11), тобто

$$NEI = \frac{A_t}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) d\lambda \times \frac{1}{\frac{A_t}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}} \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \Delta L(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda} = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{A_p \cdot D_r^*}, \quad (12)$$

де

$$D_r^* = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \Delta L(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

– питома виявлювальна здатність ПВ, що редуцирована (приведена) до вхідної зіниці об'єктива.

Отримана формула (12) дозволяє вказати шляхи зменшення освітленості, що еквівалентна шуму, а отже і підвищити енергетичну роздільну здатність ОЕСС:

1. Збільшення площі вхідної зіниці об'єктива A_p . Це найбільш ефективний спосіб, так як параметр NEI обернено пропорційний до квадрату діаметра вхідної зіниці D_p^2 .
2. Використання ПВ з великою питомою виявлювальною здатністю D_r^* . Максимальне значення D_r^* обмежене фотонним шумом.
3. Збільшення інтегрального коефіцієнта пропускання об'єктива τ_o .
4. Використання ПВ з малою площею чутливого елемента A_D .
5. Зменшення ефективної шумової смуги пропускання відео підсилювача Δf . Але зменшення смуги Δf призводить до зменшення кількості елементів розкладу зображення, що означає погіршення якості зображення. Тому величина смуги пропускання частот Δf обирається, виходячи із кількості елементів розкладу зображення.

Приклад розрахунку NEI

Як приклад розрахунку освітленості, що еквівалентна шуму, розглянемо тепловізійну систему, яка має такі параметри:

- Об'єктив – фокусна відстань $f_o' = 100$ мм, діафрагмове число $k_o = 1$, інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,7$.
- ПВ – одноелементний, фотонний з розміром чутливої площадки $V_D \times W_D = 50 \times 50$ мкм і питомою виявлювальною здатністю

$$D^*(\lambda_2) = 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{см} \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}} \text{ при } \lambda_2 = 12 \text{ мкм.}$$

- Система сканування – поле зору $2\omega_{ox} \times 2\omega_{oy} = 4^\circ \times 3^\circ$, частота кадрів $f_f = 25$ Гц, ефективність сканування $\eta_{sc} = 0,64$.

ОЕСС розташована на відстані $R = 3$ км від об'єкта. Об'єкт і фон мають ефективні температури поверхні $T_t = 310$ К і $T_b = 300$ К відповідно. Параметри

атмосфери: метеорологічна дальність видимості 15 км, температура 27 °С, вологість 70%.

Розрахуємо NEI в такій послідовності:

1. Скористаємося формулою (12), яку представимо у вигляді

$$NEI = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{A_p \cdot \tau_o \cdot D_r^*}, \quad (14)$$

де $A_D = V_D \cdot W_D = 25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ – площа чутливого елемента ПВ; τ_o – інтегральний коефіцієнт пропускання об'єктива;

$$D_r^* = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) d\lambda}. \quad (15)$$

2. Ефективну шумову смугу визначимо за формулою [5]

$$\Delta f = \frac{2\omega_{ox} \cdot 2\omega_{oy} \cdot f_f}{2\alpha_D \beta_D \eta_{sc}}, \quad (16)$$

де $\alpha_D = \beta_D = V_D / f_o' = 0,05/100 = 0,5 \text{ мрад} = 0,0286^\circ$ – кутовий розмір чутливого елемента ПВ. Після підстановки маємо

$$\Delta f = \frac{4 \cdot 3 \cdot 25}{2 \cdot 0,0286^2 \cdot 0,64} = 286 \text{ кГц.}$$

3. Площа входної зіниці об'єктива визначається, як

$$A_p = \frac{\pi D_o^2}{4} = \frac{\pi f_o'^2}{4k_o^2} = 78,5 \text{ см}^2.$$

4. Розрахуємо питому виявлювальну здатність ПВ, приведену до входної зіниці об'єктива за формулою (15), яку представимо у вигляді

$$D_r^* = \frac{\int_8^{12} \tau_A(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T_t) - M_\lambda(\lambda, T_b)] D^*(\lambda) d\lambda}{\int_8^{12} \tau_A(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T_t) - M_\lambda(\lambda, T_b)] d\lambda}. \quad (17)$$

Спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери розрахуємо за методикою, що наведена в підручнику [5]. Результати розрахунків представлені в таблиці. Там же представлені спектральні світності об'єкта і фона.

Для фотонних ПВ питома виявлювальна здатність апроксимується функцією [5]

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_2} D_{\max}^* & \text{при } \lambda \leq \lambda_2 \\ 0 & \text{при } \lambda > \lambda_2, \end{cases} \quad (18)$$

де λ_2 – гранична довжина хвилі. Значення функції $D^*(\lambda)/D^*(\lambda_2)$ наведені в таблиці.

Таблиця - Значення функції $D^*(\lambda)/D^*(\lambda_2)$

λ , мкм	$\tau_A(\lambda)$	$M_\lambda(\lambda, T_t)$, мВт/(см ² ·мкм)	$M_\lambda(\lambda, T_b)$, мВт/(см ² ·мкм)	$D^*(\lambda)/D^*(\lambda_2)$
8	0,007	3,46	2,85	0,667
8,5	0,218	3,60	3,00	0,708
9	0,411	3,67	3,09	0,75
9,5	0,432	3,68	3,12	0,792
10	0,507	3,64	3,12	0,833
10,5	0,514	3,57	3,08	0,875
11	0,506	3,47	3,01	0,917
11,5	0,460	3,35	2,92	0,958
12	0,492	3,21	2,82	1

Використовуючи дані таблиці методом числового інтегрування була отримана питома виявлювальна здатність ПВ, що приведена до вхідної зіниці об'єктива

$$D_r^* = D^*(\lambda_2) \frac{0,752}{0,878} = 1,71 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}\sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}.$$

5. Після підстановки вихідних параметрів у розрахункову формулу (14) отримаємо

$$NEI = \frac{\sqrt{25 \cdot 10^{-6} \cdot 28,6 \cdot 10^4}}{87,5 \cdot 0,7 \cdot 1,71 \cdot 10^{10} D_r^*} = 2,6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

На рис. 2 представлена залежність освітленості, що еквівалента шуму, від діаметра вхідної зіниці об'єктива. При цьому усі інші параметри ОЕСС, що наведені у прикладі, залишаються незмінними. Аналіз цієї залежності свідчить про те, що збільшення діаметра вхідної зіниці від 100 мм да 200 мм призводить до зменшення освітленості, що еквівалентна шуму, від $2,6 \cdot 10^{-12}$ Вт/см² до $6,4 \cdot 10^{-13}$ Вт/см².

Висновки

1. Отримана узагальнена формула (12) для розрахунку освітленості, що еквівалента шуму, для тепловізійних і телевізійних систем. На відміну від відомих формул вона враховує спектральні характеристики випромінювання об'єкта і фона, пропускання атмосфери й об'єктива, чутливості ПВ.
2. Найбільш ефективним способом зменшення освітленості, що еквівалентна шуму, є використання об'єктивів великого діаметра. Параметр NEI можна зменшити також за рахунок збільшення інтегрального коефіцієнта пропускання об'єктива, використання ПВ з великою питомою виявлювальною

здатністю та малим розміром чутливої площадки. Наприклад, збільшення діаметра вхідної зіниці від 100 мм до 200 мм призводить до зменшення NEI в 4 рази.

- У відомих методиках розрахунку освітленості, що еквівалентна шуму, NEI є параметром ОЕСС. Отримана формула (12) свідчить про те, що параметр NEI залежить також від спектральних характеристик випромінювання об'єкта і фону, а також пропускання атмосфери.
- Для подальшого удосконалення методики розрахунку NEI слід враховувати зміну питомої виявлювальної здатності ПВ, яка вимірюється по еталонному тест-об'єкту, відносно реальної яскравості об'єкта і фону.

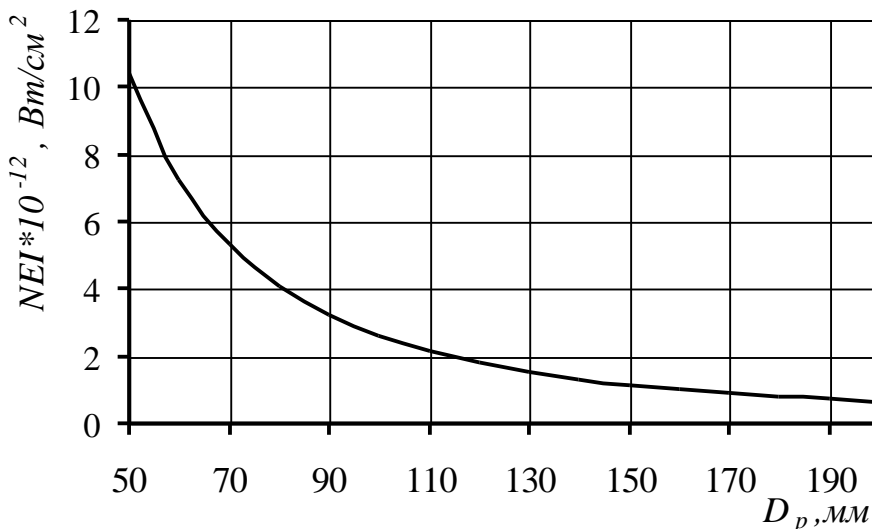


Рисунок 2 – Залежність освітленості, що еквівалентна шуму, NEI від діаметра вхідної зіниці об'єктива D_p для тепловізійної системи

Література

- Орлов В.А., Петров В.И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. – М.: Воениздат, 1989. – 212 с.
- Колобродов В.Г. О пространственном разрешении космических ИК-систем дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т.3. – № 5 – 6. – С. 55 – 59.
- Грязин Г.Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: Системы телевидения. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
- Ллойд Дж. Системы тепловидения /Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 417 с.
- Колобродов В. Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник для вузів. – К.: Тираж. – 1999.– 40 с.

<p>Власюк В.М., Гордиенко В.И., Колобродов В.Г. Особенности расчета освещенности, эквивалентной шуму, для тепловизионных и телевизионных систем. Предложена обобщенная методика расчета освещенности, эквивалентной шуму, для тепловизионных и телевизионных систем, которая учитывает спектральные характеристики излучения объекта и фону, пропускание атмосферы и объектива, чувствительно-</p>	<p>Vlasjuk V.M., Gordienko V.I., Kolobrodov V.G. The features of calculation of the noise-equivalent irradiance for thermovision and television systems. A generalized technique is proposed for calculating the noise-equivalent irradiance for thermovision and television systems. It takes into account spectral characteristics of a target, background radiation, atmospheric and a objective lens' transmittance, as well as a detec-</p>
---	---

сти приемника излучения.

tor's sensitivity.

Надійшло до редакції
16 травня 2005 року

УДК 681.7.013.8

ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ НОРМАЛИЗАЦИИ ЯРКОСТИ И КонтРАСТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЁННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВВОДА

Агалиди Ю.С., Левый С.В., Мачнев А.М., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

Рассматриваются основные оптические источники неравномерности освещённости приёмников изображения. Предлагаются средства программного восстановления яркости и контрастности изображений. Описывается алгоритм коррекции изображений, построенный на использовании передаточной функции системы, полученной экспериментальным путём

Вступление

Одним из важных показателей качества изображений, построенных оптической системой, является соответствие распределения яркости предмета, и освещённости, создаваемой изображением предмета в плоскости приёмника изображения (освещённости изображения). Для оценки качества изображений в теории Линфута [1] в виде меры качества предложен уровень корреляции между распределением яркости предмета и распределением освещённости изображения.

Тем не менее, в оптических системах могут иметь место искажения распределения освещённости изображения, обусловленные ограничением пучков лучей. В таких системах, обладающих пространственными неоднородностями передаточной функции, происходят нарушения распределения яркости и контрастности изображений, что затрудняет их исследования и обработку.

В теории расчёта оптических систем [2] принято оценивать освещённость элементарной внеосевой площадки E'_{ew} из соотношения:

$$E'_{ew} = k_{\omega} \cdot E'_e \cdot \cos^4 \omega', \quad (1)$$

где k_{ω} – коэффициент линейного виньетирования;

E'_e – освещённость элементарной осевой площадки;

ω' – угол между оптической осью и осью пучка лучей в пространстве изображений, который образует изображение центра элементарной внеосевой площадки (главный луч).

Таким образом, при равномерной яркости объекта и наличии виньетирования, убывание освещённости изображения от центральной части к периферии объективно имеет место (1). Для большинства оптических приборов виньетирование 20-65% считается допустимым, в некоторых приборах (например, широкоугольные объективы) виньетирование может превышать 70% [2-3].

Кроме того, в оптических системах со значительными отклонениями лучей от гомоцентричности, могут присутствовать аберрации в зрачках (рис. 1а), которые обусловлены ограничением диафрагмой части параксиальных пучков [2-