

**О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Куцурук**

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

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ТЕРМОРОЗФОКУСУВАННЯ ФОКУСУЮЧОГО ВУЗЛА В ІНФРАЧЕРВОНИХ СИСТЕМАХ.**

Представлені основні характеристики оптичних і механічних матеріалів, найбільш часто застосовуваних при конструюванні інфрачервоних систем. Наведені основні співвідношення для використання цих даних при розрахунках терморозфокусування у фокусуєчому вузлі інфрачервоних систем. Розглянуто приклад даного розрахунку. В статті наведені рекомендації вибору оптичного й механічного матеріалів конструкції для взаємної компенсації погрешностей зміни температури. Ці дані можуть бути використані в дослідженнях із впливу температури на складні конструктивні вузли з метою розробки автоматичних термокомпенсаторів різних типів.

**Ключові слова:** інфрачервоні системи, фокусуєчі вузли, терморозфокусування.

**O. K. Kucherenko, A. V. Muraviov, V. N. Kutsuruk**

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

**INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THERMAL DEFOCUSING OF FOCUSING KNOT IN INFRA-RED SYSTEMS.**

Basic descriptions of optical and mechanical materials are presented, which are most often used at constructing of the infra-red systems. There are basic correlations in this article for using of these data for the calculation of thermal defocusing in the focusing knots of the infra-red systems. The example of this calculation is considered. There are recommendations for choice of optical and mechanical materials of construction for mutual compensation of errors of temperature change in the article. These data can be used for researches of temperature influence on difficult structural knots with the purpose to develop different types of automatic temperature compensators.

**Keywords:** infra-red systems, focusing knots, thermal defocusing.

*Надійшла до редакції  
31 серпня 2010 року*

УДК 621.384.3

**ВПЛИВ РУХУ ОБ'ЄКТА НА МАКСИМАЛЬНУ ДАЛЬНІСТЬ  
ВИЯВЛЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

*Колобродов В.Г., Наздровецький О.О., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*Запропоновано метод розрахунку максимальної дальності виявлення оптико-електронної системи спостереження в разі присутності в полі зору точкового джерела, що довільно рухається.*

**Ключові слова:** тепловізійна система, оптико-електронна система спостереження, матричний приймач випромінювання, рухомий об'єкт, максимальна дальність виявлення.

**Вступ**

Тепловізійні системи поширені, як оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС), у військовій справі, космічних системах дистанційного зондування Землі, охоронних системах. Основною задачею таких систем є виявлення

об'єкта спостереження на максимальній дальності при заданому відношенні сигнал/шум, що визначається необхідною ймовірністю виявлення [1 - 3].

Недоліком більшості моделей по розрахунку максимальної дальності є те, що вони розраховуються для випадку, коли зображення об'єкта не рухається по пікселю приймача випромінювання (ПВ). Коли ж зображення рухається по пікселю, може бути випадок, коли зчитування з пікселя ще продовжується, а зображення об'єкту вже змістилося за межі пікселя. В такому разі можливі випадки, коли об'єкт рухається настільки швидко, що піксель не встигає нормально зреагувати на це випромінювання (час знаходження зображення об'єкту на пікселі значно менше постійної часу  $t_D$  ПВ, що більш характерно для теплових приймачів, оскільки в них постійна часу на порядки більша, ніж у фотонних приймачів). Тобто сигнал від об'єкту не встиг визвати таку зміну вихідного електричного сигналу, який би перевищував шумовий сигнал в задану кількість разів.

Для приймачів з накопиченням заряду необхідно ще враховувати час інтегрування матриці  $t_i$ . Тобто необхідно враховувати, що в момент часу, коли зображення об'єкта вийшло за межі пікселя, накопичення сигналу від фону ще продовжується, а накопичення сигналу від об'єкту вже припинилося.

У будь-якому разі це не всі проблеми, які необхідно вирішувати в даному випадку. Дана стаття присвячена лише аналізу впливу інерційності приймача випромінювання на формування вихідного сигналу.

### **Постановка задачі**

Мета даної статті – вдосконалення існуючої математичної моделі розрахунку максимальної дальності виявлення для випадку, коли в полі зору ОЕСС присутнє теплове точкове джерело, що рухається з довільною швидкістю. Модель розробляється для дослідження впливу інерційності ПВ на максимальну дальність виявлення, тобто з врахуванням постійної часу ПВ  $t_D$ . Роботу моделі буде проілюстровано на прикладі мікроболометричної матриці.

### **Основні методики розрахунку ОЕСС та критерії якості їх роботи**

В наш час досить часто для оцінки якості роботи ОЕСС використовують два параметри [1]:

1. *Максимальна дальність виявлення МДВ* (Maximum Detectable Range – MDR)  $R_d$  – це максимальна дальність між ОЕСС і об'єктом, за якої об'єкт буде виявлено електронною системою або спостерігачем на екрані дисплея із заданою ймовірністю  $P_d$ ;

2. *Максимальна дальність розпізнавання МДР* (Maximum Recognizable Range – MRR)  $R_r$  - це максимальна дальність між ОЕСС і об'єктом, за якої об'єкт розпізнається електронною системою або спостерігачем на екрані дисплею із заданою ймовірністю  $P_r$ .

Наразі створено досить багато методик енергетичного розрахунку ОЕСС та моделей самої системи. Загалом методику енергетичного розрахунку можна

звести до наступного алгоритму [2]:

– отримання узагальненого енергетичного рівняння або нерівності, яке встановлює у загальному вигляді зв'язок між корисним сигналом, шумом і завадами. Це рівняння – узагальнений алгоритм роботи ОЕСС з урахуванням структури системи та критерію якості її роботи;

– представлення корисного сигналу, шуму і завад, що входять в узагальнене рівняння у вигляді функцій параметрів і характеристик об'єкта спостереження, фону, атмосфери та ОЕСС;

– розв'язання узагальненого рівняння відносно одного або сукупності декількох параметрів, які входять до цього рівняння, або заданого критерію якості ОЕСС;

– вибір і розрахунок інших параметрів, а також перевірка виконання умов, заданих на першому етапі розрахунків.

Завдання спрощеного енергетичного розрахунку ОЕСС – визначення параметрів системи, за яких на виході приймача випромінювання забезпечується потрібне відношення сигнал/шум  $SNR$ . Ця задача зводиться до розрахунку або порогової чутливості і дальності дії ОЕСС за заданих параметрів (аналіз) або до знаходження значення цих параметрів, якщо задана дальність дії або порогова чутливість (синтез).

Під дальністю дії ОЕСС розуміємо ту найбільшу дальність до об'єкта спостереження, за якої величина потоку випромінювання від об'єкта забезпечує задане відношення сигнал/шум  $SNR$ .

### **Методика розрахунку максимальної дальності виявлення рухомого точкового об'єкту**

У роботі для розрахунку максимальної дальності виявлення зроблено низку допущень:

– поглинання атмосфери не залежить від довжини хвилі, і визначається за законом Бугера  $\tau_A(\lambda) = \tau_A(R) = \exp(-k_A R)$ ;

– на всьому проміжку траси об'єкт вважається точковим (тобто не враховується момент переходу від виявлення точкового об'єкту до режиму побудови його зображення);

– оптична система є ідеальною (точка в просторі предметів передається як точка в просторі зображень).

За основну модель для вдосконалення взята формула розрахунку максимальної дальності виявлення при спостереженні об'єкту на рівномірному фоні [2]

$$R_n^2 \exp(k_A R_n) = \frac{A_{oc} \cdot \tau_{oc}}{SNR \cdot \pi \sqrt{A_D} \Delta f} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [A_t \varepsilon_t M(\lambda, T_t) - A_b \varepsilon_b M(\lambda, T_b)] D^*(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де  $R_n$  – максимальна дальність виявлення;  $k_A$  – показник поглинання атмосфери;  $A_{oc}, \tau_{oc}$  – площа вхідної зіниці і коефіцієнт пропускання оптичної системи відповідно;  $SNR$  – необхідне відношення сигнал/шум;  $A_D$  – площа чутливого елемента ПВ;  $\Delta f$  – еквівалентна шумова смуга пропускання електронного трак-

ту;  $A_t, A_b$  – площа об'єкту і фону відповідно;  $\varepsilon_t, \varepsilon_b$  – коефіцієнти випромінювання об'єкту і фону відповідно;  $T_t, T_b$  – температура об'єкту і фону відповідно;  $D^*(\lambda)$  – питома виявлювальна здатність ПВ.

Також враховуємо, що, коли фон заповнює все миттєве поле зору, то справедливим є співвідношення

$$A_b = A_D \left( \frac{R_m}{f'} \right)^2, \quad (2)$$

де  $f'$  – фокусна відстань оптичної системи.

Площа чутливого елемента знаходиться як

$$A_D = V_D W_D k_{Dff}, \quad (3)$$

де  $V_D \times W_D$  – розміри чутливого елемента (пікселя);  $k_{Dff}$  – коефіцієнт заповнення.

Площа вхідної зіниці

$$A_{oc} = \frac{\pi D_{oc}^2}{4}, \quad (4)$$

де  $D_{oc}$  – діаметр вхідної зіниці.

Ефективна шумова смуга пропускання для електронного сканування [1]

$$\Delta f = \frac{p_D q_d f_f}{2\eta_{sc}}, \quad (5)$$

де  $p_D \times q_d$  – кількість пікселів в стовпчику і рядку відповідно;  $f_f$  – частота кадрів;  $\eta_{sc}$  – ефективність сканування (для електронного сканування  $\eta_{sc} = 0.92$ ).

Для мікроболометрів відомо, що у досить широкому спектральному діапазоні спектральна чутливість та виявлювальна здатність приймача не залежать від довжини хвилі [2], тобто

$$\begin{cases} S_D(\lambda) = S_{Dth} = \text{const} \\ D^*(\lambda) = D_{th}^* \end{cases} \quad (6)$$

З теорії приймачів випромінювання відома формула, яка пов'язує між собою спектральну чутливість приймача і його виявлювальну здатність

$$S_{Dth} = D_{th}^* \frac{U_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (7)$$

де  $U_n$  – середнє квадратичне значення шуму.

Виявлювальна здатність мікроболометра визначається як [2]

$$D_{th}^* = \frac{4}{\sqrt{2 A_D t_i NETD} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{dM(\lambda, T_{ref})}{dT} d\lambda}, \quad (8)$$

де  $t_i$  – час інтегрування, що зазвичай визначається як  $t_i = 1/f_f$ ;  $NETD$  – еквівалентна шуму різниця температур, що вимірюється при температурі  $T_{ref}$ ;  $f_f$  – частота кадрів.

У випадку, коли об'єкт довільно рухається, необхідно ще враховувати падіння вихідного електричного сигналу з пікселя від об'єкту через малий час його знаходження на чутливому елементі (при великих швидкостях і малих кутах поля зору цей ефект буде дуже помітним).

Для ПВ характерним параметром, що суттєво впливає на роботу приладу, є постійна часу  $t_D$  – це час, за якого вихідний електричний сигнал досягає 63% від свого максимального значення.

Відомо, що залежність максимальної чутливості приймача від часу перебування об'єкту на пікселі можна апроксимувати функціями для наростання сигналу

$$S_D(\lambda, t) = S_D(\lambda) \left( 1 - \exp \left\{ -\frac{t}{t_D} \right\} \right), \quad (9)$$

де  $S_D(\lambda, t)$  – спектральна чутливість ПВ, що залежить від часу знаходження об'єкту на ПВ;  $S_D(\lambda)$  – спектральна чутливість ПВ в випадку, коли об'єкт постійно знаходиться на ПВ, паспортні дані.

Використовуючи рівняння (7) можна показати, що для виявлювальної здатності ПВ можна записати рівняння, аналогічне рівнянню (9)

$$D^*(\lambda, t) = D^*(\lambda) \left( 1 - \exp \left\{ -\frac{t}{t_D} \right\} \right), \quad (10)$$

де  $D^*(\lambda)$  – питома виявлювальна здатність ПВ, паспортні дані.

Як видно з рівняння (10), виявлювальна здатність значною мірою залежить від постійної часу  $t_D$ . Чим більше значення постійної часу та чим менше час  $t$  знаходження об'єкту на пікселі, тим більше падає значення виявлювальної здатності приймача.

Отже, визначимо час  $t$  знаходження зображення об'єкту на пікселі. Побудуємо модель, яка б пов'язувала простір предметів із площиною зображень.

Внаслідок геометричних перетворень можна знайти відстань, на яку зміщується зображення об'єкту, що рухається зі швидкістю  $V$  за час  $t$  у площині зображення, в проєкціях на осі  $x' y'$  (рис. 1)

$$\begin{cases} x'_1 = \frac{Vt f' \sqrt{1 - \cos^2 \gamma}}{R_m - Vt \cos \gamma} \cos \alpha; \\ y'_1 = \frac{Vt f' \sqrt{1 - \cos^2 \gamma}}{R_m - Vt \cos \gamma} \cos \beta, \end{cases} \quad (11)$$

де  $x'_1, y'_1$  – проєкції, що відповідають переміщенню зображення точкового джерела;  $\alpha, \beta$  – направляючі кути вектора швидкості руху в площині предметів (рис.2);  $V$  – швидкість руху точкового джерела;  $t$  – час руху точкового джерела;  $R_m$  – початкова відстань до точкового джерела в момент початку відліку;  $\gamma$  – кут напрямку руху точкового джерела відносно оптичної осі.

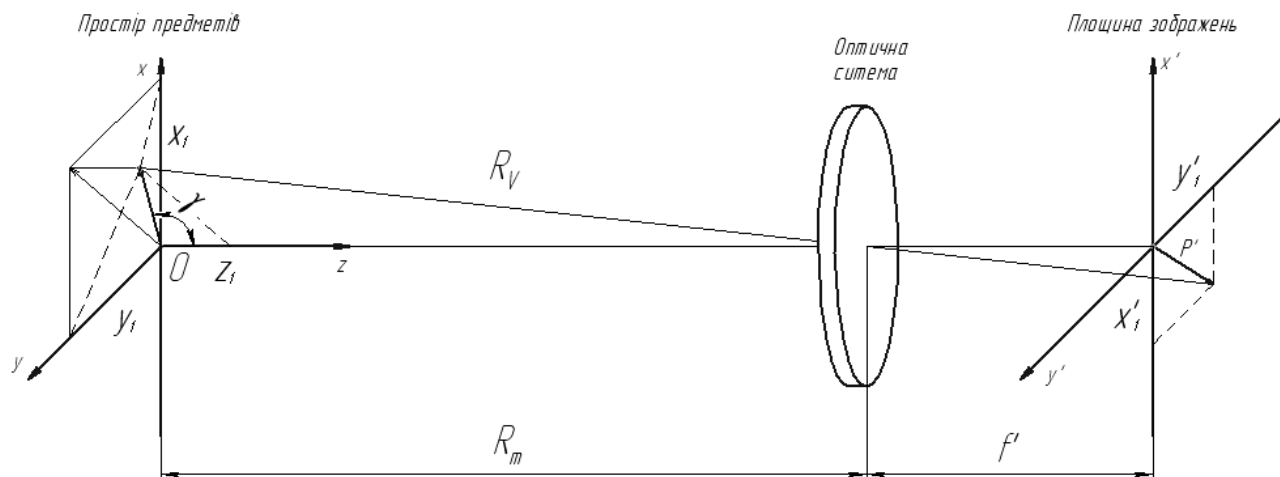


Рис. 1. Просторова модель формування зображення точкового джерела випромінювання, що довільно рухається

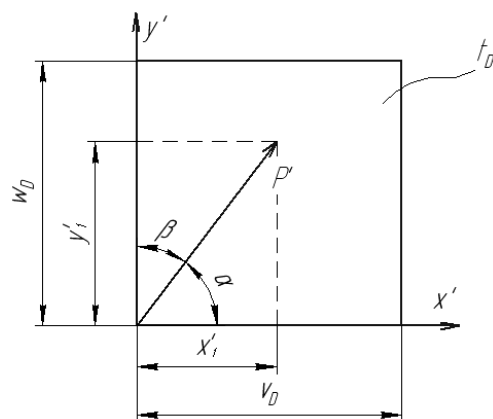


Рис. 2. Проекція переміщення зображення точкового джерела на піксель

Розглянемо центр системи координат площини зображення так, щоб він співпадав із краєм пікселя (рис. 2). Замінімо в системі рівнянь (11)  $x'_1, y'_1$  на розміри пікселя  $V_D, W_D$  і початкову відстань  $R_m$  на відстань  $R_v$  (відстань до об'єкту в момент часу  $t$ ), та перепишемо рівняння (11) так, щоб знайти час реєстрації  $t$  точкового джерела. Також оберемо серед розмірів пікселя мінімальне значення, нехай це буде  $V_D$ , та будемо вважати що об'єкт рухається вздовж найменшого розміру пікселя, в такому разі  $\alpha$  або  $\beta = 90^\circ$ . Отже

$$t = \frac{R_v V_D}{V(f' \sqrt{1 - \cos^2 \gamma} + V_D \cos \gamma)}. \quad (12)$$

Підставивши (12) в (10) остаточно отримаємо залежність зменшення питомої виявлювальної здатності приймача від часу знаходження зображення об'єкту на пікселі

$$D^*(\lambda, t) = D^*(\lambda) \left( 1 - \exp \left\{ - \frac{R_v V_D}{V t_D (f' \sqrt{1 - \cos^2 \gamma} + V_D \cos \gamma)} \right\} \right). \quad (13)$$

Отже, отримане рівняння (13) показує залежність виявлювальної здатності приймача від часу знаходження зображення об'єкту на пікселі ПВ та довільних параметрів руху об'єкту.

У такому випадку, коли об'єкт рухається, ми вже не можемо користуватись рівнянням (1) для визначення максимальної дальності виявлення об'єкту. Це пояснюється двома причинами: сигнал від фону постійно присутній на пікселі і не змінюється в часі, тобто виявлювальна здатність приймача для фону не змінюється; об'єкт рухається довільно, тому час перебування його на пікселі може змінюватися залежно від напрямку руху об'єкту та його швидкості. Тоді виявлювальна здатність приймача зменшуватиметься згідно рівняння (13).

Враховуючи дані зауваження та після деяких перетворень рівняння (1) набуває наступного вигляду

$$R_v^2 \exp(k_A R_v) = \frac{A_{oc} \cdot \tau_{oc}}{SNR \cdot \pi \sqrt{A_D \Delta f}} D^*(\lambda) \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [A_t \varepsilon_t M(\lambda, T_t) - A_b \varepsilon_b M(\lambda, T_b)] d\lambda - \right. \\ \left. - A_t \varepsilon_t \exp \left\{ - \frac{R_v V_D}{V t_D (f' \sqrt{1 - \cos^2 \gamma} + V_D \cos \gamma)} \right\} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_t) d\lambda \right) \quad (14)$$

Якщо вже відома максимальна дальність виявлення об'єкту  $R_m$  для випадку, коли об'єкт не рухається (тобто коли об'єкт рухається на систему,  $\gamma = 0^\circ$ ), то враховуючи рівняння (1), рівняння (14) набуває вигляду

$$R_v^2 \exp(k_A R_v) - R_m^2 \exp(k_A R_m) = \frac{A_{oc} \cdot \tau_{oc}}{SNR \cdot \pi \sqrt{A_D \Delta f}} D^*(\lambda) \times \\ \times A_t \varepsilon_t \exp \left\{ - \frac{R_v V_D}{V t_D (f' \sqrt{1 - \cos^2 \gamma} + V_D \cos \gamma)} \right\} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_t) d\lambda. \quad (15)$$

Для аналізу отриманого рівняння використаємо наступні вхідні дані:  $f' = 120\text{мм}$ ;  $D_{oc} = 100\text{мм}$ ;  $D_t = 1\text{м}$ ;  $V_D \times W_D = 25\text{мкм}^2$ ;  $k_{dff} = 0,5$ ;  $NETD = 50\text{мК}$ ;  $f_f = 50\text{Гц}$ ;  $\lambda = 8-14\text{мкм}$ ;  $T_{ref} = 300\text{К}$ ;  $T_t = 800\text{К}$ ;  $T_b = 273\text{К}$ ;  $\tau_{oc} = 0.8$ ;  $\varepsilon_t = \varepsilon_b = 0.9$ ;  $t_D = 5\text{мс}$ ;  $p_D \times q_D = 384 \times 288$ ;  $V = 1500-5000 \text{ км/год.}$

Внаслідок розрахунку за формулам (2-11) було отримано, що:  $\Delta f = 3\text{МГц}$ ;

$$S_{Dth} = 1.771 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}; D_{th}^* = 8.604 \cdot 10^6 \frac{\text{м} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}; U_n = 6,31 \cdot 10^{-5} \text{В.}$$

Побудуємо тепер графіки максимальної дальності виявлення від кута польоту об'єкту згідно рівняння (14) залежно від швидкості польоту об'єкту та від відношення сигнал/шум  $SNR$  (рис. 3, 4).

## Висновки

На основі розробленої методики розрахунку максимальної дальності виявлення було встановлено, що рух об'єкта в довільному напрямку призводить до зменшення МДВ. Причому, чим більший кут руху об'єкта відносно оптичної

осі системи і чим більша швидкість його руху, тим більше буде зменшуватись МДВ. Зменшення відношення сигнал/шум призводить до зменшення МДВ незалежно від напрямку і швидкості руху об'єкту.

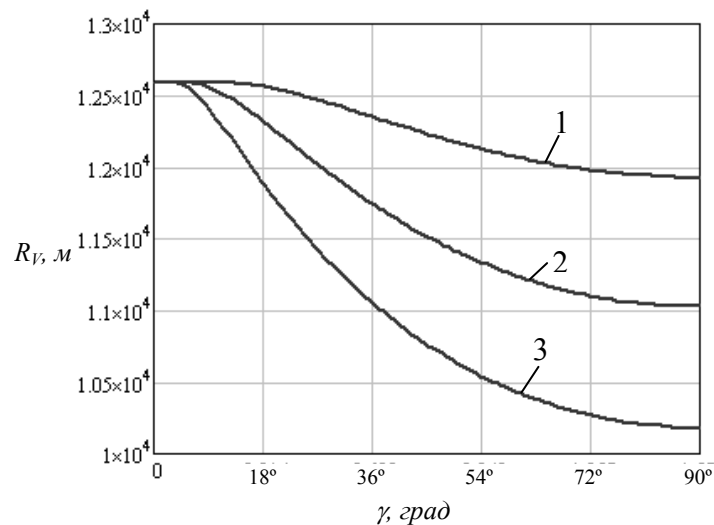


Рис. 3. Залежність максимальної дальності виявлення від напрямку руху об'єкта при швидкості польоту  $V$  об'єкту: 1 – 1500 км/год, 2 – 3000 км/год, 3 – 5000 км/год

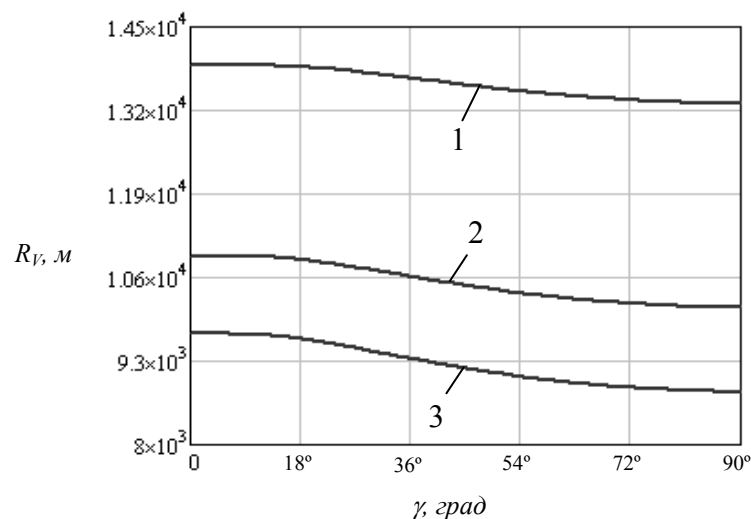


Рис. 4. Залежність максимальної дальності виявлення від напрямку руху об'єкта при відношення сигнал/шум  $SNR$ : 1 – 1, 2 – 5, 3 – 10

Як видно з отриманих результатів, велике значення постійної часу  $t_d$  ПВ призводить до суттєвого зменшення МДВ, коли об'єкт рухається з довільною швидкістю. Одним з можливих варіантів запобігання падіння МДВ (при неможливості вибору приймача з меншим значенням  $t_d$ ) є зменшення фокусної відстані системи та вибору приймача з більшими розмірами пікселя (збільшення миттєвого поля зору), як видно з (15), але на жаль це буде призводити до зменшення роздільної здатності системи.



Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методів розрахунку МДВ з врахуванням аберацій оптичної системи та розробку спеціальних алгоритмів адаптивної розгортки зображення на МПВ для збільшення МДВ.

#### **Література**

1. Колобродов В.Г. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): підручник / В.Г. Колобродов, Н. Шустер. – К.: НТУУ «КПІ», 1999. – 340 с.
2. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: підручник / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебное пособие. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.

#### **В. Г. Колобродов, О. О. Наздровецкий**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

#### **ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА МАКСИМАЛЬНУЮ ДАЛЬНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ**

Предложен метод расчета максимальной дальности выявления оптико-электронной системы наблюдения в случае присутствия в поле зрения точечного источника, который движется произвольно.

**Ключевые слова:** тепловизионная система, оптико-электронная система наблюдения, матричный приемник излучения, подвижный объект, максимальная дальность выявления.

#### **V.G. Kolobrodov, O.O. Nazdravetsky**

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

#### **INFLUENCE OF MOTION OF OBJECT IS ON MAXIMAL DISTANCE OF EXPOSURE OF THE INFRARED SYSTEM OF SUPERVISION.**

The method of calculation of maximal distance of exposure of the optical-electronic system of supervision is offered in the case of being in sight point source which moves arbitrarily.

**Keywords:** infrared imaging system, optical-electronic system of supervision, matrix sensor of radiation, mobile object, maximal distance of detection.

*Надійшла до редакції  
12 червня 2010 року*

УДК 629.78

### **РАДИОМЕТРИЯ І МЕТРОЛОГІЯ СВІТЛОДІОДІВ**

*Дідух Н.І., Міхеєнко Л.А., Свєшніков В.С., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*В роботі представлений огляд та аналіз методів вимірювання радіометричних характеристик світлодіодів. Розроблено зручну для повторення установку, що дозволяє вимірювати основні параметри світлодіодів на основі наявного і доступного в Україні метрологічного устаткування та елементної бази. Проаналізовані основні похибки вимірювань радіометричних характеристик світлодіодів, надані рекомендації щодо їх мінімізації. Результати роботи будуть корисні фахівцям в області прецизійної радіометрії та розробникам елементів оптико-електроніки.*