

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.384.326

Ахмед Малік Лазім Аль-Мзіраві, Є.Г. Балінський, В.Г. Колобродов

УЗГОДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ОБ'ЄКТИВА І МАТРИЧНОГО ПРИЙМАЧА ВИПРОМІНЮВАННЯ МЕДИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

The paper considers the interrelation between radius of the confusion lens circle and the period matrix of modulation transfer function (MPF) with the concurrence lens and the detector. We propose two criteria of the alignment lens and the detector. The first criterion is the equality of the lens and matrix on the level M_0 while the second criterion is the equality of the MPF lens detector at the Nyquist frequency. Finally, we uncover the reduced dependence of the normalized radius of the circle r_0/V_D of confusion on the value of the contrast of the lens alignment M_0 .

Вступ

Сучасні тепловізори як приймачі випромінювання використовують мікроболометричні матриці, які працюють без систем охолодження [1, 2]. Такі тепловізори широко застосовуються в різних сферах діяльності людини, в т.ч. і в медичній термодіагностиці [3, 4]. Важливою характеристикою тепловізорів є просторова роздільна здатність, яка визначається модуляційною передавальною функцією (МПФ) об'єктива і матричного приймача випромінювання (МПВ). Проблемі узгодження аберацій об'єктива і геометричних параметрів МПВ присвячено значну кількість праць [5, 6]. Але в цих працях не розглядається питання про вибір просторової частоти або значення МПФ, за яких узгоджуються аберації об'єктива і період структури пікселів МПВ.

Постановка задачі

Мета статті – розглянути взаємозв'язок між радіусом кружка розсіювання об'єктива і періодом матриці пікселів МПВ при узгодженні МПФ об'єктива і приймача випромінювання.

Вихідні положення

Передавальну функцію можна застосовувати тільки для лінійних інваріантних систем. Тепловізори, які спостерігають об'єкти з невеликим температурним контрастом у межах обмеженого поля зору, можна вважати лінійними інваріантними системами. Для таких систем МПФ визначається добутком МПФ її окремих елементів: об'єктива, МПВ, електронного блока та дисплея. В більшості практичних випадків електронний блок і дисплей не спотворюють зображення, яке створює тепловізор [5]. Тому вважають, що МПФ електронного блока і

дисплея дорівнює одиниці. Для одновимірного випадку уздовж осі x , яка збігається з напрямком сканування, МПФ тепловізора визначається як

$$M_s(v_x) = M_o(v_x)M_{Ds}(v_x), \quad (1)$$

де $M_o(v_x)$ – МПФ об'єктива; $M_{Ds}(v_x)$ – просторова МПФ приймача випромінювання.

МПФ об'єктива будемо апроксимувати двома функціями [6]:

1. Для об'єктива, що має аберації

$$M_{oa}(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_x^2), \quad (2)$$

де r_o – радіус кружка розсіювання на рівні 0,606 від максимального значення освітленості в зображенні точкового джерела випромінювання.

2. Для дифракційно обмеженого об'єктива

$$M_{od}(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi}(\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } x > 1, \end{cases} \quad (3)$$

де $x = \frac{\lambda f'_o}{D_p}$; f'_o і D_p – фокусна відстань і діаметр вхідної зіниці об'єктива; λ – довжина хвилі світла.

Для спрощення математичних перетворень функцію (3) запишемо у вигляді

$$M_{od}(v_x) = 1 - r_E v_x, \quad (4)$$

де $r_E = 1,22 \frac{\lambda f'_o}{D_p}$ – радіус кружка Ері.

Модуляційна передавальна функція МПВ з пікселями прямокутної форми апроксимується функцією

$$M_{D_s}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}, \quad (5)$$

де V_D – відстань між сусідніми пікселями уздовж осі (період матриці).

Таким чином, МПФ тепловізора $M_s(v_x)$ залежить від радіуса кружка розсіювання r_o об'єктива (або радіуса кружка Ері r_E) і періоду V_D матриці приймача випромінювання. Для досягнення високого просторового розділення тепловізора необхідно узгодити між собою параметри r_o і V_D .

Критерії узгодження МПФ об'єктива і МПВ

Для МПФ об'єктива і приймача випромінювання пропонується використовувати два критерії.

1. Рівність значень МПФ об'єктива і МПВ на певному рівні M_0 (рис. 1), тобто коли виконується умова

$$M_o(v_{x0}) = M_{D_s}(v_{x0}) = M_0. \quad (6)$$

2. Рівність значень МПФ об'єктива і МПВ на просторовій частоті Найквіста $v_N = \frac{1}{V_D}$ (рис. 2), тобто коли виконується умова

$$M_o(v_N) = M_{D_s}(v_N). \quad (7)$$

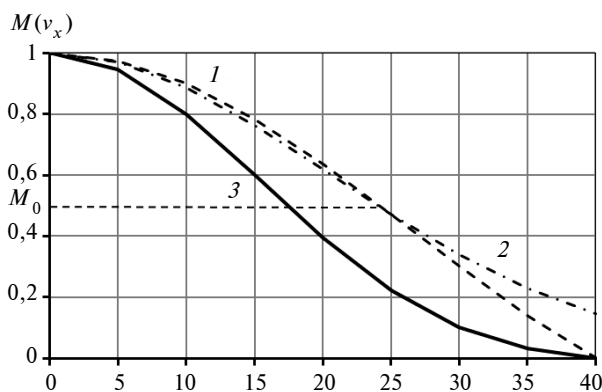


Рис. 1. Критерій рівності МПФ об'єктива і МПВ на рівні M_0 : 1 – МПФ МПВ ($V_D = 25$ мкм); 2 – МПФ об'єктива з абераціями ($r_o = 7,8$ мкм); 3 – МПФ тепловізора

Встановимо взаємозв'язок між радіусом кружка розсіювання r_o об'єктива і періодом V_D матриці приймача випромінювання за критеріями (6) і (7).

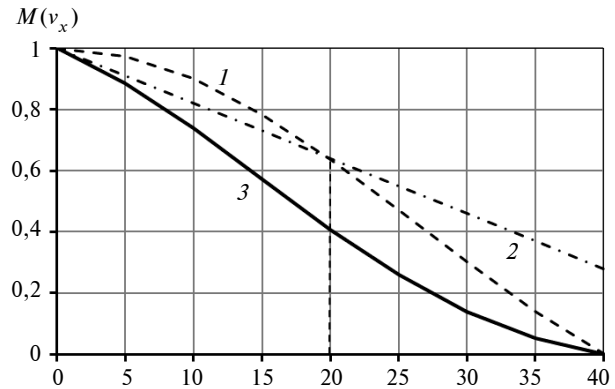


Рис. 2. Критерій рівності МПФ об'єктива і МПВ на частоті Найквіста $v_N = 20$ мм⁻¹: 1 – МПФ МПВ ($V_D = 25$ мкм); 2 – МПФ дифракційно обмеженого об'єктива з абераціями ($D_p : f'_o = 1:2$); 3 – МПФ тепловізора

Підставимо функції (2) і (5) у співвідношення (6):

$$\exp(-2\pi^2 r_o^2 v_x^2) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x} = M_0. \quad (8)$$

Із системи рівнянь (8) маємо

$$\frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x} = \text{sinc}(V_D v_x) = M_0,$$

де $\text{sinc } cx$ – sinc -функція.

Звідси отримаємо

$$v_{x0} = \frac{1}{V_D} \text{sinc}^{-1}(M_0), \quad (9)$$

де $\text{sinc}^{-1}x$ – функція, обернена до sinc -функції.

Із другого рівняння системи (8) маємо

$$\exp(-2\pi^2 r_o^2 v_{x0}^2) = M_0.$$

Звідси отримаємо

$$r_o = \sqrt{-\frac{\ln M_0}{2\pi^2}} \frac{V_D}{\text{sinc}^{-1}(M_0)}. \quad (10)$$

На рис. 3 наведено залежність нормованого радіуса кружка розсіювання $\frac{r_o}{V_D}$ об'єктива від значення контрасту узгодження M_0 . Аналіз функції (10) та її графіка показує, що із зменшенням залишкового контрасту M_0 величина кружка розсіювання r_o збільшується. На практиці, зазвичай, узгодження відбувається при

контрасті $M_0 = 0,5$ [6], що відображено на рис. 1, для якого $r_o = 0,26 V_D$.

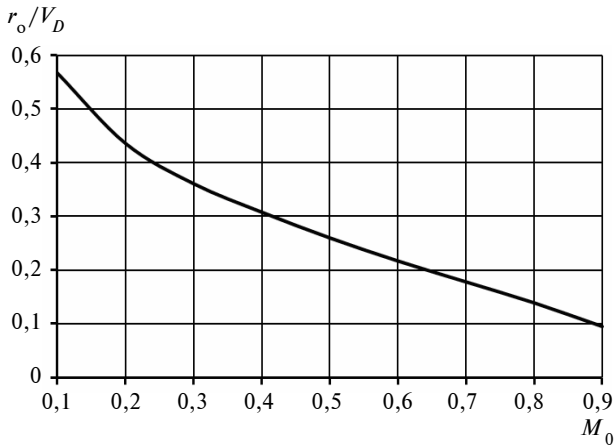


Рис. 3. Залежність нормованого радіуса кружка розсіювання $\frac{r_o}{V_D}$ об'єктива від значення контрасту узгодження M_0

Для апроксимації МПФ об'єктива (4) маємо

$$1 - r_E v_x = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x} = M_0. \quad (11)$$

З рівняння (11) з урахуванням просторової частоти (9) маємо

$$r_E = \frac{1 - M_0}{v_{x0}} = \frac{1 - M_0}{\sin c^{-1}(M_0)} V_D. \quad (12)$$

Звідси отримаємо

$$\frac{D_p}{f'_o} = \frac{\sin c^{-1}(M_0)}{(1 - M_0) V_D}. \quad (13)$$

Аналіз функції (13) показує, що критерій (6) для інфрачервоного об'єктива з $D_p : f'_o = 1:1$ при $\lambda = 10$ мкм і $V_D = 25$ мкм забезпечується залишковим контрастом у зображенні $M_0 = 0,9$.

Для узгодження МПФ об'єктива і МПВ за другим критерієм підставимо функції (2) і (5) у співвідношення (7):

$$\exp(-2\pi^2 r_o^2 v_N^2) = \frac{2}{\pi}. \quad (14)$$

Звідси з урахуванням частоти Найквіста маємо $r_o = 0,3 V_D$.

Для апроксимації МПФ об'єктива (4) маємо

$$1 - r_E \frac{1}{2V_D} = \frac{2}{\pi}, \quad (15)$$

звідки

$$r_E = 1,22 \frac{\lambda f'_o}{D_p} = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) 2V_D = 0,727V_D \quad (16)$$

або

$$\frac{D_p}{f'_o} = \frac{1,22\lambda}{0,727V_D} = 1,678 \frac{\lambda}{V_D}. \quad (17)$$

При $\lambda = 10$ мкм і $V_D = 25$ мкм маємо $D_p : f'_o \approx 1:1,5$.

Просторова роздільна здатність тепловізора визначається результуючою МПФ $M_s(v_x)$ (1). На рис. 1 і 2 наведено графіки функції $M_s(v_x)$ для різних критеріїв узгодження.

Висновки

Аналіз отриманих результатів узгодження МПФ об'єктива і МПВ та графіків на рис. 1–3 дає змогу зробити такі висновки.

1. Модуляційна передавальна функція тепловізора $M_s(v_x)$ при узгодженні за критерієм (6), коли $M_0 = 0,5$, на просторовій частоті $v_{x0} = 24$ мм⁻¹ становить $M_{s1}(v_{x0}) = 0,25$, а при узгодженні за критерієм (7) на просторовій частоті Найквіста $v_{xN} = 20$ мм⁻¹ становить $M_{s1}(v_{xN}) = 0,4$. Це означає, що узгодження за критерієм (7) дає можливість отримати більше просторове розділення тепловізора, ніж за критерієм (6), коли $M_0 = 0,5$.

2. Із рис. 1 і 2 видно, що узгодження за критерієм (7) більш ефективне, ніж за критерієм (6), на усіх просторових частотах, оскільки $M_{s2}(v_x) \geq M_{s1}(v_x)$. В той же час різниця $M_{s2}(v_x) - M_{s1}(v_x)$ незначна.

У подальшому доцільно дослідити узгодження параметрів об'єктива і МПВ за критерієм максимальної ширини ефективної геометричної смуги пропускання тепловізора. Аналогічний критерій – ефективна шумова смуга пропускання – широко використовується при дослідженні електронних пристроїв.

1. *Тарасов М.М., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы "смотрящего типа". – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. *Хребтов И.А., Маляров В.Г.* Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения // Оптический журнал. – 1997. – № 6. – С. 3–17.
3. *Kaplan H.* Practical applications of infrared and imaging equipment. – SPIE, Bellingham, Washington USA, 1999. – 164 p.
4. *Иваницкий Г.В.* Современное матричное тепловидение в биомедицине // Успехи физ. наук. – 2006. – **176**, № 12. – С. 1295–1320.
5. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
6. *Колобродов В.Г., Лихолит М.І.* Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 364 с.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
23 січня 2012 року