

УДК 621.384.3

В.Г. Колобродов

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТИВА І МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ МАТРИЦІ ТЕПЛОВІЗОРА

The relation between the radius of the lens aberration circle of confusion and the array period of thermal detector matrix is established, which provides the best image quality. Thermal imaging is determined by the spatial resolution and contrast. This fact has allowed us to offer new evaluation criterion for the thermal imager effectiveness – efficient spatial bandwidth, which is determined by the product of the Nyquist frequency and modulation transfer function (MTF) of the thermal imager at this frequency. We consider two criteria to match MTF lens matrix and the radiation detector, which allowed us to estimate the influence of the lens radius of the circle of confusion and the detector matrix period on thermal image quality. An example of application criteria considered for assessing the operation effectiveness of thermal imager with 25 micron pixels microbolometer arrays. It was showed, that the use of a diffraction-limited lens with a relative aperture 1:1 improves the picture quality by 19 % compared with a lens that has the same with detector's MTF at 0.5. It has been established that use of 17 microns imager matrix can improve image quality by 22 % in comparison with thermal matrix, which has a period of 25 microns.

**Keywords:** thermal imager, resolution, efficient spatial bandwidth, modulation transfer function.

### Вступ

Сучасні тепловізори як приймач випромінювання використовують мікроболометричні матриці (МБМ), які працюють без систем охолодження [1, 2]. Такі тепловізори мають широке застосування в різних сферах діяльності людини, в т.ч. у космічній діяльності, охоронних системах і медичній термодіагностиці [3, 4]. Важливою характеристикою тепловізорів є просторова роздільна здатність, яка визначається модуляційними передавальними функціями (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

У роботі досліджується взаємозв'язок між радіусом кружка розсіювання об'єктива і періодом матриці пікселів МПВ тепловізора при узгодженні модуляційних передавальних функцій об'єктива і приймача випромінювання з метою підвищення якості зображення.

### Вихідні положення

Якість зображення, яке формує тепловізор, визначається просторовим розділенням і контрастом зображення. Контраст зображення визначається МПФ тепловізора  $M_s(v_x, v_y)$ , яка

для об'єктів з одиничним контрастом відповідає контрасту сформованого зображення. Існують декілька критеріїв визначення просторового розділення, таких як: критерій Релея, просторова частота при певному значенні МПФ, функція концентрації енергії, частота Найквіста [6]. Більшість із них залежать від МПФ тепловізора. Тому розглянемо спочатку визначення МПФ тепловізора, який використовує мікроболометричну матрицю.

При дослідженні оптико-електронних систем передавальну функцію можна застосовувати тільки для лінійних інваріантних систем. Тепловізори, які спостерігають об'єкти з невеликим температурним контрастом в обмеженому полі зору, можна вважати лінійними інваріантними системами. Модуляційна передавальна функція таких систем 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 дорівнюють одиниці в межах робочого просторового спектрального діапазону.

Для спрощення обрахунків будемо використовувати одновимірний випадок уздовж осі  $x$ , яка збігається з напрямом сканування. За таких умов МПФ тепловізора визначається як

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

де  $M_s(v_x)$  – МПФ системи “об'єктив–МПВ”;  $M_o(v_x)$  – МПФ об'єктива;  $M_{D_s}(v_x)$  – просто-

рова МПФ матричного приймача випромінювання;  $v_x$  – просторова частота,  $\text{мм}^{-1}$ .

Сучасні інфрачервоні об'єктиви мають аберації, які обмежені дифракцією випромінювання на апертурі об'єктива. МПФ таких об'єктивів визначається функцією [6]

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

де  $x = 1,22\lambda k_{\text{eff}} v_x = r_E v_x$ ;  $k_{\text{eff}}$  – діафрагмове число об'єктива;  $r_E$  – радіус кружка Ейрі.

Для практичного застосування МПФ (2) її апроксимують функцією

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - \frac{x}{\eta_{di}}, & \text{якщо } 0 \leq x \leq \eta_{di}; \\ 0, & \text{якщо } x > \eta_{di}, \end{cases} \quad (3)$$

де параметр  $\eta_{di}$  визначає відносне відхилення МПФ об'єктива з абераціями від дифракційно обмеженої МПФ. Наприклад, 80 % дифракційного обмеження якості зображення відповідає значенню параметра  $\eta_{di} = 0,8$ . Для дифракційно обмеженого об'єктива  $\eta_{di} = 1,0$ .

Просторова МПФ мікроболометричної матриці визначається періодами матриці  $V_D \times W_D$  і має для одновимірного випадку вигляд

$$M_{Ds}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (4)$$

Таким чином, МПФ тепловізора залежить від радіуса кружка розсіювання  $r_o$  об'єктива (або радіуса кружка Ейрі  $r_E$ ) і періоду  $V_D$  матриці приймача випромінювання. Для досягнення високого просторового розділення тепловізора, а отже, і якості зображення, 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 два критерії узгодження параметрів  $r_o$  і  $V_D$ .

1. *Перший критерій* – рівність МПФ об'єктива і приймача випромінювання на частоті Найквіста  $v_N = 1/2V_D$ , тобто коли виконується умова

$$M_o(v_N) = M_{Ds}(v_N) = M_1. \quad (5)$$

2. *Другий критерій* – рівність значень МПФ об'єктива і МПВ на просторовій частоті  $v_{x2}$ , тобто коли виконується умова

$$M_o(v_{x2}) = M_{Ds}(v_{x2}) = M_2. \quad (6)$$

Розглянемо декілька варіантів формування зображення системою "об'єктив–МПВ".

1. МПВ з відносно великим розміром пікселів і об'єктив високої якості (малий абераційний кружок). У цьому випадку на скільки б якісним не був об'єктив, якість зображення буде обмежена МПВ.

2. Об'єктив з певними абераціями і МПВ з малим розміром пікселів. У цьому випадку, аналогічно попередньому, на скільки б якісну матрицю ми не використовували, якість зображення буде обмежена абераціями об'єктива.

3. МПВ і об'єктив однакової якості. В цьому випадку для отримання якісного зображення необхідно узгодити параметри об'єктива  $r_o$  і приймача випромінювання  $V_D$ .

### Узгодження радіуса кружка розсіювання $r_o$ об'єктива і періоду $V_D$ МПВ

Для узгодження параметрів системи за першим критерієм, спочатку встановимо залежність радіуса кружка розсіювання  $r_o$  об'єктива від періоду  $V_D$  матриці. Підставимо (3) і (4) до (5):

$$1 - \frac{1,22\lambda k_{\text{eff}}}{2V_D \eta_{di}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi V_D}{2V_D}\right)}{\frac{\pi V_D}{2V_D}} = \frac{2}{\pi} = M_1.$$

Звідси отримаємо залежність радіуса кружка Ейрі  $r_E$  від періоду матриці  $V_D$  при узгодженні МПФ об'єктива і МПВ на частоті Найквіста:

$$r_E = 1,22\lambda k_{\text{eff}} = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) 2V_D \eta_{di} = 0,726V_D \eta_{di}. \quad (7)$$

За таких умов узгодження результуюча МПФ системи на частоті Найквіста матиме значення  $M_{s1} = (2/\pi)^2 = 0,406$ , тобто контраст зображення зменшується до 40 %.

На рис. 1 наведені МПФ об'єктива, МПВ і тепловізора при узгодженні на частоті Найк-

віста, які визначаються формулами (1), (3) і (4), коли  $k_{\text{eff}} = 1$ ,  $\lambda = 10$  мкм,  $V_D = 25$  мкм. За таких умов відносно відхилення МПФ об'єктива з абераціями від дифракційно обмеженої МПФ становить  $\eta_{di} = 0,672$ . При цьому радіус абераційного кружка розраховується за формулою

$$r_o = \frac{r_E}{\eta_{di}} = 0,672 V_D = 16,8 \text{ мкм},$$

що свідчить про можливість використання простого об'єктива з відносно великими абераціями.

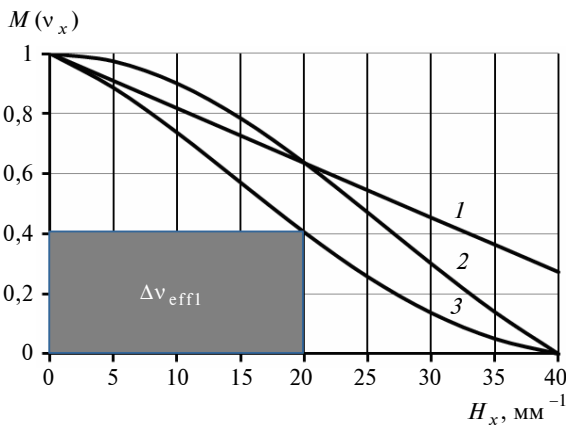


Рис. 1. Узгодження параметрів об'єктива  $r_o$  і МПВ  $V_D$  за першим критерієм: 1 – МПФ об'єктива  $M_o(v_x)$  для  $\eta_{di} = 0,672$ ; 2 – просторова МПФ МПВ  $M_{Ds}(v_x)$ ; 3 – МПФ тепловізора  $M_s(v_x)$

Для узгодження параметрів системи за другим критерієм підставимо (3) і (4) до (6)

$$1 - \frac{r_E v_{x2}}{\eta_{di}} = \frac{\sin(\pi V_D v_{x2})}{\pi V_D v_{x2}} = M_2. \quad (8)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (8) для встановлення залежності радіуса кружка Ейрі об'єктива  $r_E$  від періоду матриці  $V_D$  при заданому контрасті  $M_2$ . Знайдемо спочатку із другого рівняння залежність просторової частоти узгодження  $v_{x2}$  від значення МПФ  $M_2$ :

$$\frac{\sin(\pi V_D v_{x2})}{\pi V_D v_{x2}} = \text{sinc}(V_D v_{x2}) = M_2,$$

звідки

$$v_{x2} = \frac{1}{V_D} \text{sinc}^{-1}(M_2), \quad (9)$$

де  $\text{sinc}^{-1}(z)$  – функція, що обернена до функції  $\text{sinc}(z)$ .

Підставимо частоту (9) до першого рівняння (8):

$$1 - \frac{r_E}{\eta_{di}} \frac{1}{V_D} \text{sinc}^{-1}(M_2) = M_2,$$

звідки

$$r_E = \frac{1 - M_2}{\text{sinc}^{-1}(M_2)} \eta_{di} V_D. \quad (10)$$

Для перевірки достовірності отриманого рівняння (10) розглянемо застосування цього рівняння при узгодженні за першим критерієм, коли  $M_2 = 2/\pi$ :

$$r_E = \frac{1 - \pi/2}{\text{sinc}^{-1}(\pi/2)} \eta_{di} V_D = 0,726 \eta_{di} V_D,$$

що збігається з формулою (7). На рис. 2 наведені МПФ об'єктива, МПВ і тепловізора при узгодженні за другим критерієм (6), які визначаються формулами (1), (3) і (4), коли  $k_{\text{eff}} = 1$ ,  $\lambda = 10$  мкм,  $V_D = 25$  мкм,  $\eta_{di} = 1,0$ .

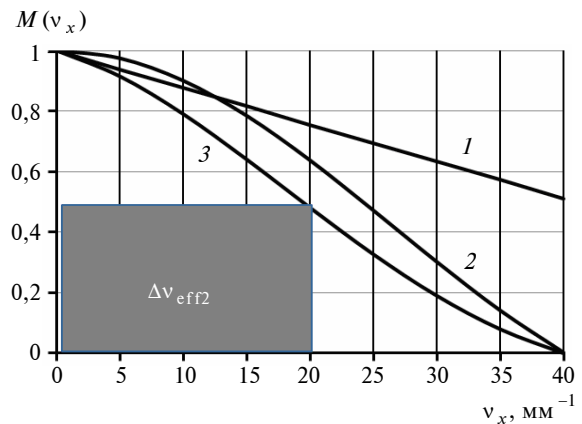


Рис. 2. Узгодження параметрів об'єктива  $r_o$  і МПВ  $V_D$  за другим критерієм: 1 – МПФ дифракційно обмеженого об'єктива  $M_o(v_x)$ ; 2 – просторова МПФ МПВ  $M_{Ds}(v_x)$ ; 3 – МПФ тепловізора  $M_s(v_x)$

Аналіз отриманих результатів свідчить про таке:

- 1) при узгодженні за першим критерієм контраст зображення зменшується до 0,406;
- 2) для дифракційно обмеженого об'єктива результуюча МПФ системи на частоті Найквіста дорівнює 0,482, що свідчить про підвищення контрасту зображення на 7,6 % відносно

но зображення, отриманого при узгодженні за першим критерієм. За цих умов узгодження відбувається на частоті  $\nu_{x2} = 13 \text{ мм}^{-1}$  при контрасті  $M_2 = 0,86$ .

Пропонується ефективність узгодження аберацій об'єктива і періоду матричної структури ПВ визначати добутком просторової частоти Найквіста  $\nu_N$  і МПФ тепловізора на цій частоті  $M_s(\nu_N)$ , який назвемо *ефективною просторовою смугою пропускання тепловізора*:

$$\Delta \nu_{\text{eff}} = \nu_N M_s(\nu_N). \quad (11)$$

Використання такого критерію для визначення якості зображення дає змогу одночасно враховувати просторове розділення, яке визначається просторовою частотою узгодження, і контраст зображення, який визначається значенням МПФ на цій частоті. З геометричної точки зору критерій (12) визначає площу прямокутника, ширина якого дорівнює просторовій частоті узгодження, а висота — значенню МПФ на цій частоті. Тому чим більша площа цього прямокутника, тим краща якість тепловізійного зображення.

Згідно з цим критерієм тепловізори, МПФ яких зображені на рис. 1 і 2, мають відповідні смуги пропускання  $\Delta \nu_{\text{eff1}} = 20 \cdot 0,406 = 8,12 \text{ мм}^{-1}$  і  $\Delta \nu_{\text{eff2}} = 20 \cdot 0,482 = 9,64 \text{ мм}^{-1}$ . Це означає, що якість (інформативність) зображення при узгодженні за другим критерієм збільшилася на 18,8%. За останній час проведені значні науково-технологічні роботи зі створення мікроболометричної матриці з періодом  $V_D = 17 \text{ мкм}$ . Тому виникла потреба у визначенні МПФ тепловізора  $M_s(\nu_x)$ , який використовує саме таку матрицю. На рис. 3 наведені модуляційні передавальні функції об'єктива, МПВ і тепловізора, які визначаються формулами (1), (3) і (4), коли  $k_{\text{eff}} = 1$ ,  $\lambda = 10 \text{ мкм}$ ,  $V_D = 17 \text{ мкм}$ ,  $\eta_{di} = 1,0$ .

Із отриманих графіків випливає важливий висновок, що узгодження дифракційно обмеженого об'єктива для довжини хвилі  $\lambda = 10 \text{ мкм}$  з матрицею, яка має період пікселів  $V_D = 17 \text{ мкм}$ , відбувається на просторовій частоті  $\nu_{xr} = 28 \text{ мм}^{-1}$ , яка близька до частоти Найквіста  $\nu_{xN} = 1000/(2 \cdot 17) = 29 \text{ мм}^{-1}$ . Повне узгодження відбувається для довжини хвилі  $\lambda = 10,1 \text{ мкм}$ . При цьому ефективна смуга пропускання такого

тепловізора становить  $\Delta \nu_{\text{eff3}} = 29 \cdot 0,406 = 11,8 \text{ мм}^{-1}$ . Це означає, що якість зображення тепловізора, який використовує мікроболометричну матрицю з періодом пікселів  $V_D = 17 \text{ мкм}$  і дифракційно обмежений об'єктив, збільшилася на 22,1% порівняно з тепловізором, що має матрицю з періодом  $V_D = 25 \text{ мкм}$ .

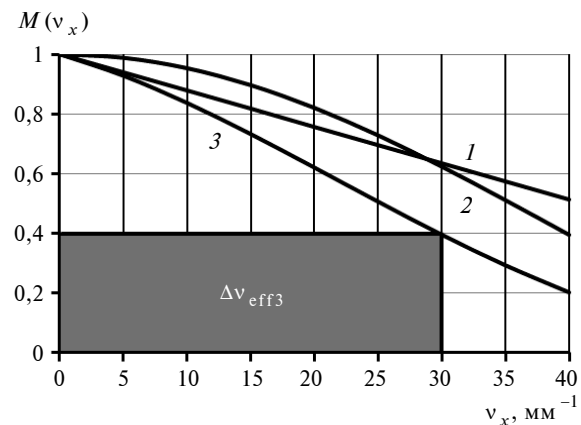


Рис. 3. Узгодження параметрів об'єктива  $r_o$  і МПВ  $V_D$  за першим критерієм: 1 – МПФ дифракційно обмеженого об'єктива  $M_o(\nu_x)$ ; 2 – просторова МПВ МПВ  $M_{Ds}(\nu_x)$ , коли  $V_D = 17 \text{ мкм}$ ; 3 – МПФ тепловізора  $M_s(\nu_x)$

## Висновки

Встановлено взаємозв'язок між радіусом кружка розсіювання об'єктива і періодом матриці пікселів приймача випромінювання, який забезпечує найкращу якість зображення.

Якість тепловізійного зображення визначається просторовим розділенням і контрастом. Цей факт дав можливість запропонувати для оцінювання ефективності тепловізора новий критерій – ефективну просторову смугу пропускання, яка визначається добутком частоти Найквіста і модуляційної передавальної функції тепловізора на цій частоті.

Розглянуто два критерії узгодження МПФ об'єктива і матричного приймача випромінювання, які дали змогу оцінити вплив радіуса кружка розсіювання об'єктива і періоду матриці приймача випромінювання на якість тепловізійного зображення. За першим критерієм МПФ об'єктива і приймача випромінювання рівні між собою на частоті Найквіста. За другим критерієм МПФ об'єктива і приймача випромінювання рівні між собою на певній час-

тоті, яка забезпечує заданий контраст зображення.

Наведений приклад застосування розглянутих критеріїв для оцінки ефективності тепловізора, який використовує мікроболометричну матрицю з періодом пікселів 25 мкм, показав, що використання дифракційно обмеженого об'єктива з відносним отвором 1:1 дає змогу підвищити якість зображення на 19 % порівняно з об'єктивом, який має однакову з приймачем випромінювання МПФ на рівні 0,5.

### Список літератури

1. *Тарасов М.М., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы “смотрящего типа”. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Современные медицинские тепловизоры / Г.С. Мельников, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов, В.В. Кортаев // Тепловидение в медицине и промышленности: Матер. IX Междунар. конф. “Прикладная оптика – 2010”, Санкт-Петербург, 18–22 окт. 2010 г. – СПб, 2010. – С. 11–17.
3. *H. Kaplan*, 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  
8 травня 2014 року