

УДК 621.384.326

В.І. Гордієнко, В.Г. Колобродов

## ВПЛИВ ФАКТОРА ЗАПОВНЕННЯ ЧУТЛИВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ІНФРАЧЕРВОНОЇ МАТРИЦІ НА ЯКІСТЬ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

### Вступ

Поява в 90-х роках минулого століття неохолоджуваних матричних приймачів випромінювання (МПВ), які працюють в інфрачервоному діапазоні спектра, привела до революційних змін у розвитку тепловачення [1, 2]. З'явилися тепловізори 3-го покоління, які використовують як приймач випромінювання мікроболометричні і піроелектричні матриці. Переваги тепловізорів цього покоління полягають у відсутності оптико-механічної системи сканування і криогенної системи охолодження, що призводить до значного зниження вартості тепловізора, менших розмірів, ваги і енергоспоживання. Технічні засоби реєстрації оптичного випромінювання і перетворення його в електричні сигнали є спільними як для телевізійних, так і для тепловізійних матриць, що дає можливість застосовувати в тепловізорах сучасні алгоритми обробки телевізійних зображень. Ці фактори значно розширюють сфери використання тепловізійних систем у військовій справі та різних галузях науки і техніки.

Тепловізори з повноформатними МПВ мають специфічні види спотворень, які пов'язані з двовимірною дискретизацією зображення і неповним заповненням пікселя чутливою площиною. Якість зображення, сформованого тепловізором, залежить насамперед від розмірів чутливої площинки (пікселя) МПВ. Було проведено ряд досліджень із впливу розмірів пікселя на якість зображення в тепловізійних і телевізійних системах [3, 4]. В той же час, нема досліджень з одночасного впливу на якість зображення розміру пікселя і періоду матричної структури, які можуть істотно відрізнятися один від одного в інфрачервоних МПВ.

### Постановка задачі

Стаття присвячена дослідженню впливу фактора заповнення чутливими елементами

матричного приймача випромінювання на якість тепловізійного зображення.

### Вихідні положення

Одним з основних факторів, який обмежує принципово досяжні параметри тепловізорів з МПВ, пов'язаний з особливостями дискретної структури МПВ. Для усунення оптичного зв'язку між пікселями через хвильову природу світла відстань між сусідніми пікселями повинна перевищувати робочу довжину хвилі.

Якість зображення, яке формує тепловізор на екрані дисплея, залежить від просторової і енергетичної роздільної здатності [5]. Просторове розділення визначається як здатність тепловізора спостерігати окремо (роздільно) два точкових джерела випромінювання, розміщені один біля одного. Просторове розділення обмежене періодичною структурою МПВ. Енергетичне розділення визначається як здатність тепловізора спостерігати об'єкт великих розмірів, розташований на фоні з пороговим температурним контрастом і залежить від розмірів чутливої площинки пікселя.

Зображення в площині МПВ, яке сформоване об'єктивом, в процесі перетворення в електричний сигнал за допомогою дискретного приймача випромінювання (ПВ) зазнає спотворення. Частина потоку випромінювання, яка падає на чутливу площадку пікселя, усереднюється в межах його площадок, а друга частина потоку, яка падає на зазори між чутливими площадками, не бере участі у формуванні корисного електричного сигналу. Відбувається втрата енергії випромінювання, яка не може бути компенсована обробкою сигналів в аналоговій або цифровій формі. Крім того, відбуваються додаткові спотворення високочастотної частини спектра сигналу, що також призводить до обмеження роздільної здатності тепловізора. Очевидно, що параметри тепловізора тим гірші, чим меншу частку в одному пікселі займає його чутлива зона. Для характеристики цих властивостей МПВ варто використовувати відношення площі чутливого елемента  $A_D$  до загальної площі пікселя  $A_{pix}$ , яке називається коефіцієнтом (фактором) заповнення (fill-factor):

$$k_{D,ff} = \frac{A_D}{A_{pix}}. \quad (1)$$

Просторова роздільна здатність залежить насамперед від геометричних розмірів пікселів і періодів МПВ, а також від аберацій об'єктива, смуги пропускання електронного тракту, розміру елемента розкладу зображення на екрані дисплея. Найбільш повно просторова роздільна здатність тепловізора визначається його модуляційною передавальною функцією (МПФ)  $M_s(v_x, v_y)$ . У багатьох випадках при моделюванні тепловізора він розглядається як лінійна інваріантна система, для якої справедливе співвідношення [5–7]

$$M_s(v_x, v_y) = M_o(v_x, v_y)M_{Ds}(v_x, v_y) \times M_{Dt}(f)M_{Et}(f)M_S(v'_x, v'_y), \quad (2)$$

де  $M_o(v_x, v_y)$  – МПФ об'єктива;  $M_{Ds}(v_x, v_y)$  і  $M_{Dt}(f)$  – просторова і часова МПФ ПВ, відповідно;  $M_{Et}(f)$  – МПФ електронного тракту;  $M_S(v'_x, v'_y)$  – МПФ дисплея. На рис. 1 наведено МПФ окремих складових компонентів тепловізора та їх загальну дію.

Існує ряд визначень просторової роздільної здатності  $v_{res}$ , а отже, і якості зображення, яке формує тепловізор, що має одновимірну

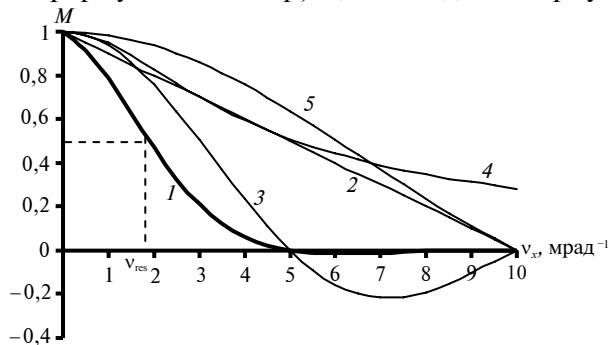


Рис. 1. МПФ тепловізора, що має об'єктив з фокусною відстанню  $f'_0 = 100$  мм і час розкладу одного елемента зображення  $t_0 = 0,37$  мкс: 1 – загальна МПФ тепловізора; 2 – МПФ об'єктива ( $M_{o1} = 0,5$ ,  $v_{x1} = 5$  мрад<sup>-1</sup>); 3 – просторова МПФ ПВ з  $V_D = 20$  мкм; 4 – часова МПФ ПВ із сталою часу  $t_D = 0,1$  мкс; 5 – МПФ дисплея з розміром пікселя  $V_S = 0,5$  мм і відстанню до спостерігача  $R_{SE} = 1,72$  м

МПФ  $M_s(v_x)$  [6, 7]. Найбільше поширення знайшло визначення параметра  $v_{res}$  як просторової частоти, при якій МПФ зменшується до

певного рівня  $M_{s1}$ , наприклад до 0,5. Іншими словами, числове значення роздільної здатності  $v_{res}$  є розв'язком рівняння  $M_s(v_{res}) = M_{s1}$ .

Досвід проектування тепловізорів свідчить про те, що його просторове розділення обмежене передусім геометричними параметрами матричної структури ПВ (рис. 1). Тому можна вважати, що рівняння (2) має вигляд

$$M_s(v_{res}) \approx M_{Ds}(v_{res}) = M_{s1}. \quad (3)$$

У зв'язку з цим визначимо МПФ МПВ.

### Модуляційна передавальна функція МПВ

У загальному випадку МПФ визначається як нормоване значення передавальної функції ПВ:

$$M_D(v_x, v_y) = \frac{H_D(v_x, v_y)}{H_D(0, 0)}, \quad (4)$$

де  $H_D(v_x, v_y) = F\{R_D(x, y)\}$  – передавальна функція (ПФ), яка являє собою перетворення Фур'є від імпульсного відгуку (розподілу інтегральної чутливості  $R_D(x, y)$ ) ПВ.

Визначимо спочатку функцію  $R_D(x, y)$ .

Нехай матрична структура ПВ характеризується такими геометричними параметрами:  $V_D \times W_D$  – періоди розміщення пікселів (відстань між сусідніми чутливими елементами вздовж відповідних осей);  $v_D \times w_D$  – розмір чутливого елемента МПВ;  $X_D \times Y_D$  – розмір матриці. Систему координат  $xu$  у площині ПВ виберемо так, як показано на рис. 2.

Будемо вважати, що в межах чутливої площадки чутливість ПВ постійна і однакова для всіх пікселів. Тоді імпульсний відгук або чутливість центрального пікселя визначимо як

$$R_{D,00}(x, y) = \begin{cases} R_D, & \text{якщо } -\frac{v_D}{2} \leq x \leq \frac{v_D}{2}; -\frac{w_D}{2} \leq y \leq \frac{w_D}{2}; \\ 0, & \text{в інших випадках,} \end{cases}$$

тобто

$$R_{D,00}(x, y) = R_D \operatorname{rect}\left(\frac{x}{v_D}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y}{w_D}\right). \quad (5)$$

Чутливість усіх пікселів матриці можна записати у вигляді суми [8]:

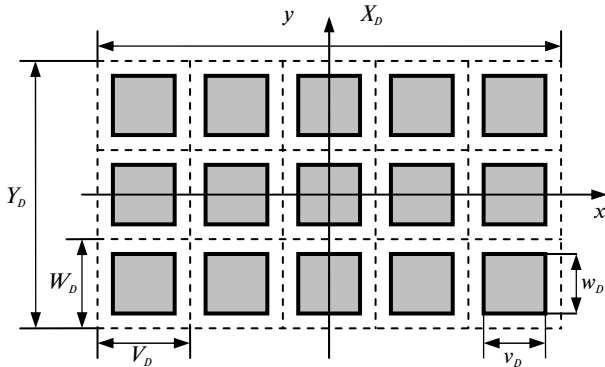


Рис. 2. Геометричні параметри МПВ

$$\begin{aligned}
 R_D(x, y) &= R_{D,-m-n} + \dots + R_{D,00} + \dots + R_{D,mn} = \\
 &= R_D \left\{ \left[ \text{rect} \left( \frac{x}{V_D} \right) \text{rect} \left( \frac{y}{W_D} \right) \right] * \right. \\
 & \quad * \left[ \text{comb} \left( \frac{x}{V_D} \right) \text{comb} \left( \frac{y}{W_D} \right) \right] \left. \right\} \times \\
 & \quad \times \text{rect} \left( \frac{x}{X_D} \right) \text{rect} \left( \frac{y}{Y_D} \right), \quad (6)
 \end{aligned}$$

де  $\text{comb}(z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(z - m)$ .

У формулі (6) вираз у фігурних дужках означає імпульсний відгук нескінченної матриці, а множник  $\text{rect}(x/X_D) \text{rect}(y/Y_D)$  обмежує її розміри до  $X_D \times Y_D$ . Функція (6) є функцією з розділними змінними  $R_D(x, y) = R_D(x)R_D(y)$ . У зв'язку з цим будемо спочатку розглядати одновимірні імпульсний відгук і ПФ ПВ без врахування постійної чутливості  $R_D$ . Тоді  $H_D(v_x) = F\{R_D(x)\}$ .

Виразимо чутливість усіх пікселів матриці (у нашому випадку лінійки) через чутливість центрального пікселя:

$$\begin{aligned}
 R_D(x) &= R_{D,-m} + \dots + R_{D,0} + \dots + R_{D,m} = \\
 &= R_{D,0}(x + mV_D) + \dots + R_{D,0}(x) + \\
 & \quad + \dots + R_{D,0}(x - mV_D). \quad (7)
 \end{aligned}$$

Користуючись теоремами лінійності і зсуву стосовно перетворення Фур'є [8] і сумою геометричної прогресії, із (7) маємо

$$H_D(v_x) = F\{R_D(x)\} =$$

$$\begin{aligned}
 &= F\{R_{D,0}(x)\} \times [\exp(2\pi m V_D v_x) + \dots + 1 + \dots + \\
 & \quad + \exp(-2\pi m V_D v_x)] = F\{R_{D,0}(x)\} \times \\
 & \quad \times \left[ \frac{\exp(2\pi m V_D v_x)}{1 - \exp(-2\pi V_D v_x)} - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\exp(-2\pi V_D v_x) \exp(-2\pi m V_D v_x)}{1 - \exp(-2\pi V_D v_x)} \right] = \\
 &= F\{R_{D,0}(x)\} \left[ \frac{\sin[\pi(2m+1)V_D v_x]}{\sin(\pi V_D v_x)} \right]. \quad (8)
 \end{aligned}$$

ПФ центрального пікселя становить [8]

$$F\{R_{D,0}(x)\} = v_D \sin c(v_D v_x). \quad (9)$$

Аналогічно можна знайти ПФ уздовж координати  $y$ :

$$\begin{aligned}
 H_D(v_y) &= F\{R_D(y)\} = w_D \sin c(w_D v_y) \times \\
 & \quad \times \left[ \frac{\sin[\pi(2n+1)W_D v_y]}{\sin(\pi W_D v_y)} \right]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Тоді ПФ МПФ із врахуванням чутливості матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 H_D(v_x, v_y) &= F\{R_D(x, y)\} = \\
 &= R_D v_D w_D \sin c(v_D v_x) \sin c(w_D v_y) \times \\
 & \quad \times \left[ \frac{\sin[\pi(2m+1)V_D v_x]}{\sin(\pi V_D v_x)} \right] \left[ \frac{\sin[\pi(2n+1)W_D v_y]}{\sin(\pi W_D v_y)} \right], \quad (11)
 \end{aligned}$$

де  $(2m+1)V_D \times (2n+1)W_D = X_D \times Y_D$  – розмір матриці;  $(2m+1) \times (2n+1) = p_D \times q_D$  – формат МПВ.

При  $v_x = v_y = 0$  функція (11) має значення  $H_D(0,0) = R_D v_D w_D p_D q_D$ . Тоді МПФ МПВ (4) матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 M_{D_s}(v_x, v_y) &= \sin c(v_D v_x) \sin c(w_D v_y) \times \\
 & \quad \times \left[ \frac{\sin c(X_D v_x)}{\sin c(\pi V_D v_x)} \right] \left[ \frac{\sin c(Y_D v_y)}{\sin c(\pi W_D v_y)} \right]. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Якщо  $v_D = V_D$ , а  $w_D = W_D$ , то матрична структура зникає, а розмір чутливої площадки становитиме  $X_D \times Y_D$ . При цьому МПФ такого ПВ буде мати вигляд

$$M'_{D_s}(v_x, v_y) = \sin c(X_D v_x) \sin c(Y_D v_y), \quad (13)$$

що підтверджує достовірність вибраної моделі.

### Аналіз впливу фактора заповнення МПВ на його МПФ

У більшості випадків збільшення об'єктива тепловізора вибирають таким, щоб максимальна просторова частота зображення в площині ПВ не перевищувала частоту Найквіста  $\nu_N = 1 / 2V_D$  [3, 5, 8]. Тому будемо розглядати ПФ (8) саме на частоті Найквіста, тобто

$$H_D \left( \nu_N = \frac{1}{2V_D} \right) = \nu_D \sin c \left( \frac{\nu_D}{2V_D} \right) \times \left[ \frac{\sin[\pi(2n+1)/2]}{\sin(\pi/2)} \right] = \nu_D \sin c \left( \frac{\nu_D}{2V_D} \right). \quad (14)$$

Використання ПФ (12) замість МПФ (13) дає можливість врахувати вплив розміру чутливого елемента  $\nu_D \times w_D$ , а отже, і фактора заповнення  $k_{D,ff}$ , на вихідний сигнал МПВ.

Врахуємо фактор заповнення  $k_{D,ff} = (\nu_D / V_D)^2$  у функції (14), подавши її в нормованому вигляді

$$H_{Dn} = \frac{1}{V_D} H_D \left( \nu_N = \frac{1}{2V_D} \right) = \sqrt{k_{D,ff}} \sin c \left( \frac{1}{2} \sqrt{k_{D,ff}} \right). \quad (15)$$

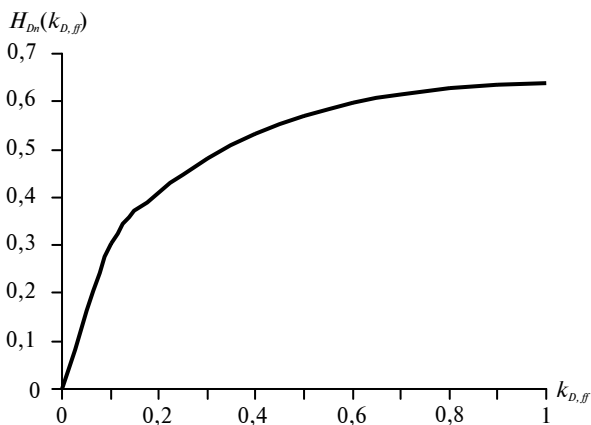


Рис. 3. Залежність нормованої одновимірної передавальної функції МПВ  $H_{Dn}$  від фактора заповнення пікселя чутливою площадкою  $k_{D,ff}$

На рис. 3 наведено графік цієї функції. Аналіз функцій (11), (12) і (15) показує, що:

1) якість зображення поліпшується, коли фактор заповнення прямує до 1:  $k_{D,ff} \rightarrow 1$ ; але при цьому слід пам'ятати, що роздільна здатність тепловізора визначається розміром пікселя  $V_D$  на частоті Найквіста  $\nu_N = 1 / 2V_D$ ;

2) на частоті Найквіста контраст зображення згідно з формулою (12) погіршується до величини  $M_{D_s}(\nu_N) = \sin c \left( \frac{1}{2} \sqrt{k_{D,ff}} \right)$ ;

3) при факторі заповнення  $k_{D,ff} = 0,5$ , що властиво більшості мікроболометричних матриць [1, 2], контраст зображення погіршується на 20 % порівняно із зображенням, яке формує тепловізор з МПВ, для якого  $k_{D,ff} = 1$ ;

4) якщо  $k_{D,ff} \rightarrow 0$ , то якість зображення погіршується і при  $k_{D,ff} = 0$  зображення зникає, що зумовлено відсутністю сигналу на виході пікселя.

### Висновки

Розроблена модель перетворення МПВ двовимірного зображення в дискретну форму дала можливість отримати МПФ такого приймача, яка враховує розміри пікселя, формат матриці і фактор її заповнення чутливими елементами.

Для оцінки якості тепловізійного зображення запропоновано визначати МПФ МПВ на частоті Найквіста, яка дорівнює оберненому подвійному періоду матриці. Ця частота визначає ширину смуги пропускання електронного тракту, який обробляє сигнал ПВ.

Аналіз отриманої МПФ (13) показав, що:

1) просторова роздільна здатність тепловізора збільшується, якщо фактор заповнення МПВ наближається до одиниці;

2) при зменшенні фактора заповнення в два рази контраст зображення зменшується лише на 20 %.

Отримані результати моделювання тепловізора з МПВ збігаються з експериментальними результатами, наведеними в статті [3], що свідчить про їх достовірність.

В подальшому доцільно дослідити вплив фактора заповнення на якість зображення на просторових частотах, відмінних від частоти Найквіста.

В.И. Гордиенко, В.Г. Колобродов

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ЗАПОЛНЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИНФРАКРАСНОЙ МАТРИЦЫ НА КАЧЕСТВО ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Получена модуляционная передаточная функция матричного приемника излучения, которая учитывает размеры пикселя, формат матрицы и фактор ее заполнения чувствительными элементами. Исследована зависимость контраста изображения на частоте Найквиста от фактора заполнения.

V.I. Gordienko, V.G. Kolobrodov

THE INFLUENCE OF FILL-FACTOR BY PIXELS OF AN INFRA-RED MATRIX DETECTOR ON THE QUALITY THERMAL IMAGES

The present paper deals with the modulation transfer function of the matrix detector which takes into account the sizes of a pixel, the format and the fill-factor of a matrix. Investigated here is the dependence of image contrast on the Niquist's frequency from the fill-factor of the matrix.

1. *Хребтов И.А., Маляров В.Г.* Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения // Оптический журнал. – 1997. – № 6. – С. 3–17.
2. *Маляров В.Г.* Неохлаждаемые тепловые инфракрасные матрицы // Там же. – 2002. – 69, № 10. – С. 60–72.
3. *Утёнков А.Б., Белоусов Ю.И., Смирнов А.Л.* Влияние коэффициента заполнения матричного фотоприемника на качество тепловизионного изображения // Там же. – 2001. – № 8. – С. 75–80.
4. *Колобродов В.Г., Пиронер Я.М., Протасов В.Г.* Функція розсіювання точки телевізійної системи спостереження з матричним приймачем випромінювання // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2003. – № 4. – С. 103–108.
5. *Тарасов М.М., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы “смотрящего” типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
6. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
7. *Колобродов В.Г., Шустер Н.* Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підр. для вузів. – К.: Тираж, 1999. – 340 с.
8. *Колобродов В.Г., Лихоліт М.І.* Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підр. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
12 листопада 2009 року