

УДК 621.384.326

В.В. ІВАНОВА, А.О. КИЯНИЦЯ, С.В. КОЛОБРОДОВ

Національний технічний університет України «КПІ»

ДАЛЬНІСТЬ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВІЗОРОМ НА ПРОЕЛЕКТРИЧНІЙ МАТРИЦІ

В статті досліджувався вплив параметрів теплової матриці та об'єктива на основну характеристику оглядової тепловізійної системи – дальність розпізнавання. Показана доцільність зменшення розміру пікселя матриці як фактору збільшення дальності розпізнавання та необхідність узгодження цього зменшення з параметрами оптичної системи, для чого використано узагальнюючий критерій відношення частот зрізу модуляційних передавальних функцій об'єктива та матричного теплового приймача випромінювання.

Ключові слова: тепловізор, дальність розпізнавання, піроелектрична матриця, модуляційна передавальна функція, роздільна здатність, діафрагмове число, піксель.

V.V. IVANOVA, A.O. KYIANYTSIA, S.V. KOLOBRODOV

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

RECOGNIZABLE RANGE OF AN INFRARED IMAGER ON PYROELECTRIC FOCAL PLANE ARRAY

Abstract – the paper considers the uncooled focal plane array and lens parameters influence on the main infrared imaging system characteristic- detection range. Reducing of pixel size advisability as the factor of recognizable range increasing and matching this reducing with lens parameters necessity has shown. To this purpose ratio of detector and lens modulation transfer functions cutoff frequencies was used as a general criterion.

Keywords: infrared imager, detection range, pyroelectric UFPA, modulation transfer function, spatial resolution, F-number, pixel.

Вступ

Використання засобів спостереження неможливе без використання систем, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектра. Тепловізори (ТПВ), в яких відсутні сканери та системи охолодження, завдяки малим габаритам, низьким енергоспоживанням та вартості є найбільш затребуваними. В сучасних неохолоджуваних тепловізорах такого класу застосовують теплові детектори (так звані Uncooled Focal Plane Array UFPA) у вигляді матриць мікроболометрів та піроелектричних матриць. Ключовою тенденцією останнього десятиліття в розробках провідних світових компаній по виробництву UFPA було стрімке зниження розміру пікселя, аж до 12 мкм для мікроболометричної матриці, та відповідне збільшення їх кількості на матрицю [1,2]. З позицій виробництва переваги малопіксельних матриць очевидні, так як дозволяють здешевити технологію виробництва шляхом збільшення відсотку заповнення пластин-підкладок. Сам модуль UFPA стає компактнішим і дешевшим. Крім того, зменшення розміру детектора дозволяє розробникам застосовувати об'єктиви менших розмірів. А це, в свою чергу, суттєво зменшує вагу, розмір та енергоспоживання, і зрештою вартість системи. Для ручних тепловізорів перелічені фактори є визначальними.

В той час як випуск та номенклатура мікроболометричних матриць невпинно зростають, з ряду технічних причин розробка і випуск піроелектричних матриць (ПМ) сповільнилась. Найменший розмір пікселя у відомих зразках становить 37 мкм, до того ж доцільність концентрації зусиль на зменшенні пікселя досліджувалась недостатньо. Серед недоліків реальних ТПВ на ПМ зазначають недостатню дальність дії. Тому важливим питанням є аналіз впливу розміру пікселя ПМ на характеристики ТПВ та обґрунтування доцільності подальших розробок з огляду на принципові переваги піроелектричних матриць над мікроболометричними. Наразі виникає проблема адекватної оцінки передбачуваних характеристик таких систем, зокрема, визначення максимальної дальності дії, виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів, та оцінка впливу на них параметрів окремих вузлів системи: матриці та об'єктива.

Постановка задачі

Метою статті є дослідження впливу розміру пікселя піроелектричної матриці та узгоджених з нею параметрів об'єктива на характеристики тепловізійної системи, зокрема, на дальність розпізнавання об'єктів.

Розрахунок максимальної дальності розпізнавання

Максимальна дальність розпізнавання (МДР) залежить від багатьох факторів, кожен з яких має різний вплив на очікувану величину [3]. Оцінка дальності є задачею з багатьма параметрами, причому вагомість кожного з них досить різна. Тому виглядає привабливим скористатись деяким узагальненим критерієм, який би врівноважив вплив кількох різних факторів. На дальність розпізнавання об'єкта безпосередньо впливає

роздільна здатність системи. Для оцінки останньої використовують узагальнюючий критерій $\frac{F\lambda}{V_d}$, де F –

діафрагмове число об'єктива, λ – довжина хвилі ІЧ випромінювання, V_d – розмір пікселя матриці [4]. Тому цілком обґрунтованим є скористатись цим критерієм при оцінці впливу розміру пікселя на дальність

розпізнавання ТПВ ПМ.

Так в [4] показано, що для даного критерія межі значення $0,41 \leq F\lambda/V_d < 1,0$ визначають область домінування детектора, в якій роздільна здатність системи обмежується розміром пікселя матриці. Якщо ж $1,0 \leq F\lambda/V_d < 2,0$ то це область домінування об'єктива, де роздільна здатність обмежується дифракцією на об'єктиві ТПВ. При цьому прямі постійних значень критерія $F\lambda/V_d$ обмежують можливі комбінації значень діафрагмового числа об'єктива і розміру пікселя матриці в межах зазначених областей, що показано на рисунку 1.

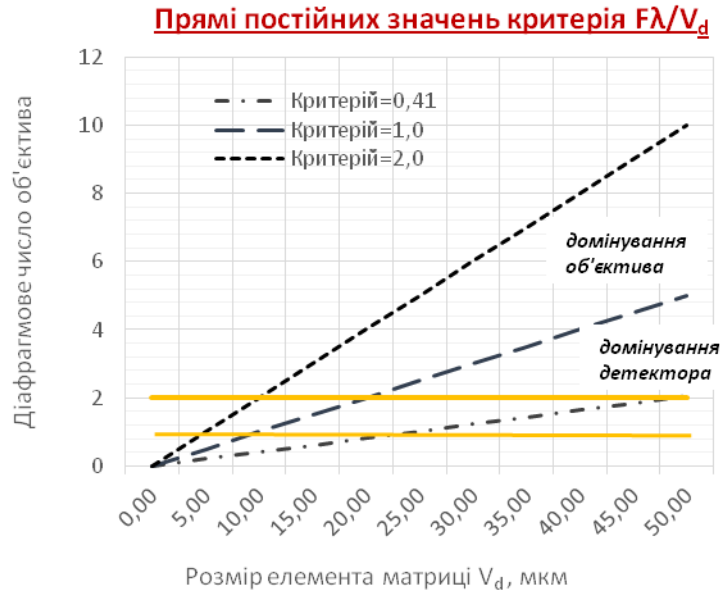


Рис. 1 – Залежність F від V_d . Прямі постійних значень критерія $F\lambda/V_d = 0,41; 1,0; 2,0$; суцільними горизонтальними лініями виділено діапазон $1,0 < F < 2,0$

Скористаємось отриманими результатами, ввівши параметр $C_{cr} = \frac{F\lambda}{V_d}$ в розрахунок дальності

розпізнавання. В основі методики розрахунку максимальної дальності розпізнавання МДР (R_r) лежить рівність усередненої мінімальної роздільної різниці температур МРРТ температурному контрасту об'єкта ΔT і критерію Джонсона, при умовах, прийнятих у стандарті НАТО 4247 [3]. Відповідно до критерія Джонсона для розпізнавання об'єкта необхідно, щоб уздовж його критичного (найменшого) розміру розміщувалась визначена кількість штрихів міри Фуко, яка залежить від ймовірності розпізнавання. За стандартом НАТО 4247 номінальні значення статичної дальності визначаються для об'єкта розміром $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$ з температурним контрастом між об'єктом і фоном (відносно температури АЧТ в 288 К) $\Delta T_o = 2 \text{ К}$.

За вихідний вираз для знаходження МДР візьмемо рівняння [3]:

$$\frac{R_r^3 \cdot \exp(\kappa_A R_r)}{M_s(v_{xr})} = \frac{0,965 \Delta T_o \cdot V_t \cdot A_p \cdot A_t \cdot \tau_o}{SNR(P_r) [7,45 \sqrt{-\ln(1-P_r)} - 1]} \cdot \sqrt{\frac{t_o f f_E}{A_d \alpha_d \beta_d}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda. \quad (1)$$

де R_r – максимальна дальність розпізнавання (МДР), км; $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери; $M_s(v_{xr})$ – модуляційна передавальна функція (МПФ) системи на просторовій частоті об'єкта; A_p – площа вхідної зіниці об'єктива; A_t – площа об'єкта; P_r – ймовірність розпізнавання об'єкта; F – ефективне діафрагмове число об'єктива; τ_o – коефіцієнт пропускання об'єктива; A_d – площа пікселя; $\frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T}$ – диференційна спектральна енергетична світність АЧТ; $SNR(P_r)$ – відношення сигнал/шум; f – частота кадрів; t_o – час розкладу одного елемента матриці; $t_e = 0,2 \text{ с}$ – часова стала ока; α_d, β_d – миттєве поле зору по горизонталі і вертикалі.

В спектральному інтервалі 8-14 мкм інтеграл в (1) дорівнює $2,63 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{К}}$ [3]. Згідно з критерієм

розпізнавання Джонсона для ймовірності розпізнавання $P_r = 50\%$ в критичному розмірі об'єкта має вкладатися 3 пари ліній, тобто $v_{xr} = 3R_r/V_t$. Врахувавши це та ввівши в (1) параметр C_{cr} , отримуємо

$$\frac{R_r^3 \cdot \exp(\kappa_A R_r)}{M_s(R_r)} = \frac{0,965 \cdot \Delta T \cdot V_t \cdot A_t \cdot \tau_o \cdot A_p \cdot f_o}{SNR \cdot 6 \cdot V_d^2} \cdot \sqrt{t_o f f_E} \cdot D^* \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda, \quad (2)$$

де МПФ тепловізора визначається як

$$M_s(\nu_x) = M_o(\nu_x) M_d(\nu_x), \quad (3)$$

де f_o – фокусна відстань об'єктива, $M_o(\nu_x)$ – МПФ об'єктива, $M_d(\nu_x)$ – МПФ матриці детекторів.

Вважаючи об'єкт дифракційно обмеженим, а матрицю, складену з квадратних пікселів з кроком V_d , приймемо згідно з [3]:

$$M_o(\nu_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} (\cos^{-1}(F\lambda\nu_x) - (F\lambda\nu_x)\sqrt{1-(F\lambda\nu_x)^2}), & \text{якщо } 0 \leq \nu_x \leq \frac{1}{F\lambda} \\ 0, & \text{якщо } \nu_x \geq \frac{1}{F\lambda} \end{cases} \quad (4)$$

$$M_d(\nu_x) = \frac{\sin(\pi V_d \nu_x)}{\pi V_d \nu_x} \quad (5)$$

Тоді для МПФ системи отримаємо

$$M_s(R_r) = \frac{\sin\left(\pi \frac{\lambda}{D_o C_{cr}} 3 \frac{R_r}{V_t}\right)}{\left(\pi \frac{\lambda}{D_o C_{cr}} 3 \frac{R_r}{V_t}\right)} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arccos\left(C_{cr} V_d 3 \frac{R_r}{V_t}\right) - C_{cr} V_d 3 \frac{R_r}{V_t} \sqrt{1 - \left(C_{cr} V_d 3 \frac{R_r}{V_t}\right)^2} \right), \quad (6)$$

де D_o – діаметр вхідної зіниці об'єктива.

Для чисельних розрахунків врахуємо в (2), що $SNR(P_r)=4,5$, $f_f = 50$ Гц, а для матриці 320x240 пікселів $t_o=0,26$ мкс. Значення питомої виявлювальної здатності, яка для теплових приймачів не залежить від довжини хвилі, приймемо рівною $D^*=10^9$ см·Гц^{1/2}/Вт.

Результуючі залежності дальності розпізнавання ТПВ від розміру пікселя матриці для різних значень критерію C_{cr} показані на рисунку 2.

На рисунку 3 наведені залежності очікуваної дальності розпізнавання для ТПВ, роздільна здатність яких визначається об'єктивом (криві в області домінування об'єктива) або матрицею (права крива в області домінування детектора). Так як в неохолоджуваних ТПВ зазвичай застосовують об'єктиви з F між 1,0 і 1,4, то результати розрахунків для суттєво більших значень діафрагмового числа не брались до уваги.

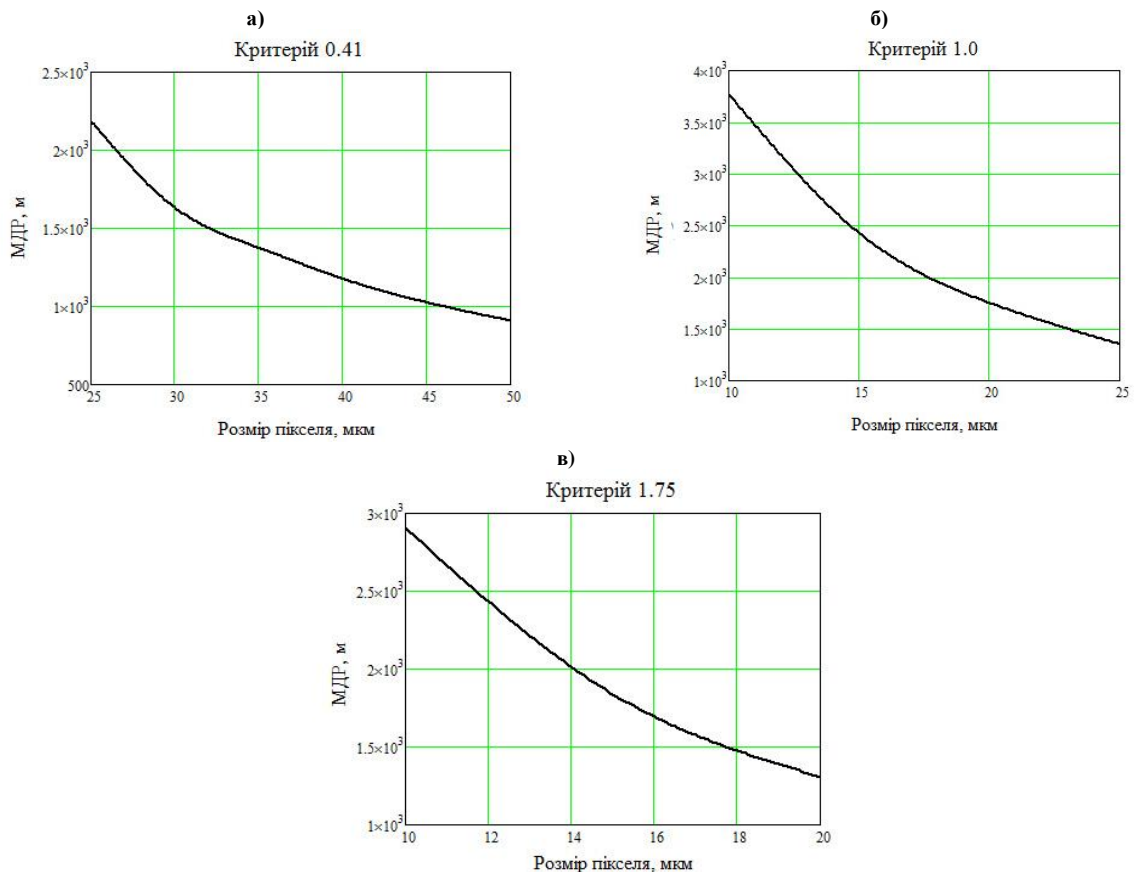


Рис. 2. Залежність МДР від розміру пікселя матриці для критерія; а) $C_{cr}=0,41$; б) $C_{cr}=1,0$; в) $C_{cr}=1,75$

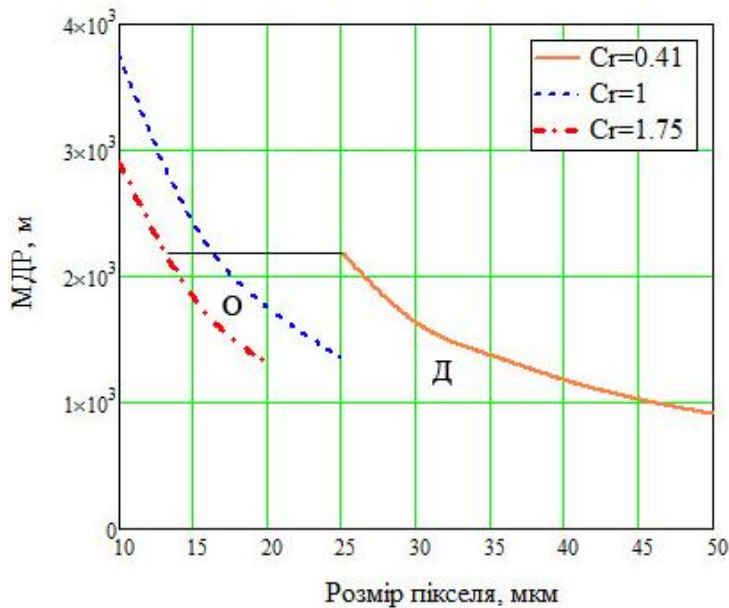


Рис. 3. Залежність МДР від розміру пікселя матриці для систем з роздільною здатністю, обмеженою об'єктивом або детектором

пікселя, рівним 25 мкм, з об'єктивом $F=1,0$, можна досягти такого ж очікуваного МДР, як і в системі з обмеженням роздільної здатності дифракцією на об'єктиві при $F=2,35$, однак з меншим розміром пікселя, рівним 13 мкм. Слід зазначити, що при цьому в останній системі значно погіршиться температурне розділення.

Висновки

При розрахунку максимальної дальності розпізнавання була взята до уваги необхідність узгодження з точки зору роздільної здатності параметрів об'єктива і теплової матриці. Для цього було використано узагальнений критерій $C_r = F \lambda / V_d$, за значенням якого система може бути віднесена до областей домінування об'єктива або матриці. Показано, що найкращі очікувані значення максимальної дальності розпізнавання можуть бути досягнуті при узгодженні роздільних здатностей об'єктива і матриці за критерієм рівності частот зрізу їхніх модуляційних передавальних функцій, тобто при $C_r=1,0$. При використанні об'єктива з діафрагмовим числом, рівним $F=1,0$, це узгоджується з застосуванням матриці з 10 мкм пікселями. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості при попередніх розрахунках очікуваної МДР ТПВ ПМ визначити обґрунтовані взаємозалежні параметри матриці (розмір пікселя) і об'єктива, тобто діафрагмове число, поле зору, масо-габаритні характеристики і, зрештою, вартість.

Література

1. Becker S., Imperinetti P., Yon J.J., Ouvrier-Buffet J.-L., Goudon V., Hamelin A., Vialle C., Arnaud A. Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI // Proc. SPIE. – 2014. – 8541. – P.85410C-1-7.
2. Christel-Loic Tisse, Jean-Luc Tissot, Arnaud Crastes. An Information-Theoretic Perspective on the Challenges and Advances in the Race towards 12 μ m Pixel Pitch Megapixel Uncooled Infrared Imaging // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 8353. – P. 83531M1 – M15.
3. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: підручник / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 364 с.
4. Кияниця А.О. Узгодження параметрів піроелектричної матриці та об'єктива тепловізора / А.О. Кияниця, В.В. Іванова, В.Г. Колобродов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – №1. – С.107–111.

References

1. Becker S., Imperinetti P., Yon J.J., Ouvrier-Buffet J.-L., Goudon V., Hamelin A., Vialle C and Arnaud A. "Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI", Proc. SPIE., 2014, 8541, pp.85410C-1-7.
2. Christel-Loic Tisse, Jean-Luc Tissot, Arnaud Crastes. An Information-Theoretic Perspective on the Challenges and Advances in the Race towards 12 μ m Pixel Pitch Megapixel Uncooled Infrared Imaging, Proc. SPIE., 2014, 8353, P. 83531M1 – M15.
3. Kolobrodov V.H., Lykholit M.I., "Proektuvannia teploviziynykh i televiziynykh system sposterezhenia", Kiev, Ukraine, NTUU "KPI", 2007, 364p. [in Ukrainian]
4. Kyianysia A.O., Ivanova V.V., Kolobrodov V.G. "Matching of pyroelectric uncooled focal plane array and lens of an infrared imager", Bulletin of Khmelnytsky National University, 2015, 1, pp.107-111.

Рецензія/Peer review : 3.5.2015 р. Надрукована/Printed : 15.5.2015 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією