

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.384.3

Ахмед Малік Лазім Аль-Мзіраві, В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко

УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР МЕДИЧНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

The paper is devoted to improvement of the equation for calculating the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of medical thermovision camera by means of more sophisticated models of thermal images visual perception. An MRTD calculating algorithm, which is based on a more reliable approximation of the visual system modulation transfer function by Schultz, is considered. We obtain new expression for the bandwidth of Schultz's approximation, which does not depend on the angular size of the Foucault pattern bar. An improved equation for calculating the MRTD was obtained. Analysis of the equation has showed that it coincides with the well-known equations for Foucault pattern bar with appointed angular size. The limits of validity of this equation in the visual system spatial integration from 1 to 5,7 arc. minute were determined. An example calculation for Thermal Eye TSC Imager MRTD was fulfilled. There were received two differing analytical MRTD equations, which use Schultz and Lloyd approximations. It is shown that these equations coincide with each other when pixel angular size of microbolometer matrix is equal to 0,71 mrad.

Keywords: medical thermal imager, minimum resolvable temperature difference, modulation transfer function.

Вступ

Використання тепловізорів для діагностики захворювань відрізняється від інших методів діагностики своєю простотою, доступністю, високою інформативністю і швидкодією, є абсолютно неінвазивним і не має протипоказань, адже тепловізор працює на відстані від пацієнта і використовує його власне природне випромінювання [1]. Найбільш важливими характеристиками медичних тепловізорів є просторова і температурна роздільна здатність, взаємозв'язок між якими встановлює мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ). У деяких підручниках і монографіях [2–6] були отримані еквівалентні рівняння для розрахунку МРРТ, в основі яких лежить низка допущень, запропонованих Дж. Ллойдом ще на початку 70-х років ХХ ст. [3]. У той же час експериментальні дослідження свідчать про відмінність отриманих результатів від теоретичних розрахунків. Тому виникає потреба в подальшому удосконаленні методу розрахунку МРРТ з метою отримання більш достовірних значень цієї функції.

Постановка задачі

Метою роботи є удосконалення рівняння для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур медичного тепловізора за рахунок використання більш досконалої моделі сприйняття дослідником термографічного зображення.

Алгоритм отримання рівняння для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур

Мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ – Minimum Resolvable Temperature Difference) $MRTD(v_x)$ – це мінімальна різниця ефективних температур між смугами (штрихами) тест-об'єкта із заданою просторовою частотою v_x і фоном, яка дає змогу візуально розрізнити штрихи зображення об'єкта на екрані дисплея. Тест-об'єкт – це чотириштрихова міра Фуко, в якій смуги і проміжки мають однакову ширину V_{tp} , а їх висота дорівнює $7V_{tp}$ (рис. 1). Смуги і проміжки випромінюють як абсолютно чорне тіло. Просторова частота може бути виражена як у лінійних, так і в кутових величинах (найбільш часто в мм^{-1} або мрад^{-1}).

Виведемо рівняння для розрахунку МРРТ, використовуючи удосконалений алгоритм, що наведений у [4, 5].

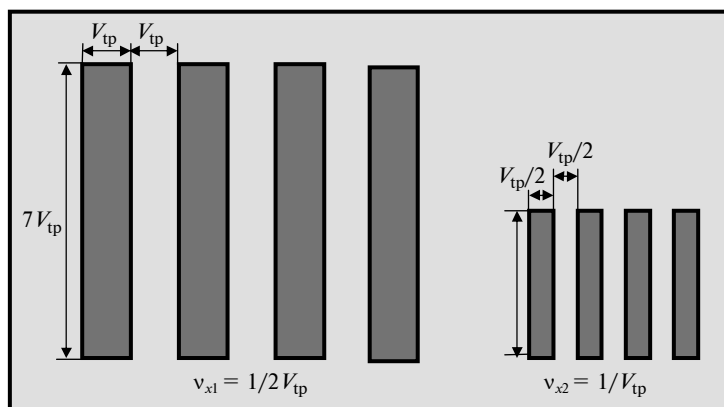


Рис. 1. Тест-об'єкт (міра Фуко) для визначення МРРТ

Одним із дискусійних допущень Дж. Ллойда є механізм сприйняття оком зображення міри Фуко на екрані дисплея. Було запропоновано просторове інтегрування ока уздовж координати сканування x враховувати узгодженою передавальною функцією, яка визначається кутовим розміром ξ''_{tp} зображення штриха міри на екрані дисплея. При цьому модуляційна передавальна функція (МПФ) зорової системи апроксимується функцією [4]

$$M_{E,L}(v_x) = \frac{\sin(\pi \xi''_{tp} v_x)}{\pi \xi''_{tp} v_x} = \text{sinc}(\xi''_{tp} v_x). \quad (1)$$

На рис. 2 показані графіки реальної МПФ зорової системи і дві її апроксимації за Ллойдом (1) і Шульцем [5]:

$$M_{E,S}(v_x) = 2,71[\exp(-0,11v_x) - \exp(-0,35v_x)]. \quad (2)$$

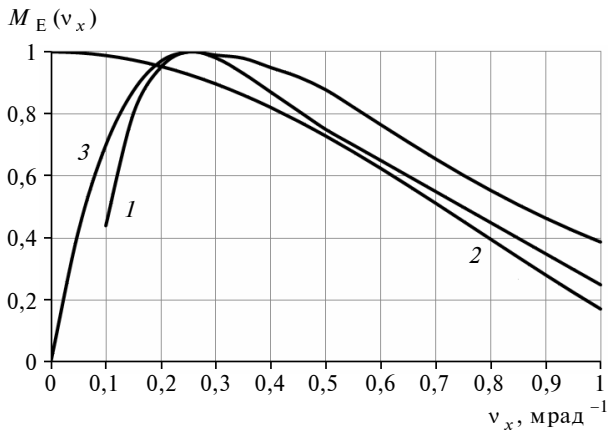


Рис. 2. Модуляційна передавальна функція зорової системи людини: 1 – експериментально отримана (реальна); 2 – апроксимація (1), коли $\xi''_{tp} = 0,85$ мрад; 3 – апроксимація (2)

Аналіз наведених графіків показує:

1) апроксимація Ллойда (1) істотно відрізняється від реальної МПФ зорової системи, особливо на низьких просторових частотах;

2) апроксимація Шульца значною мірою відповідає реальній МПФ зорової системи.

Тому в алгоритмі отримання рівняння для розрахунку МРРТ будемо використовувати апроксимацію Шульца (2).

Механізм зорового сприйняття зображення міри Фуко будемо враховувати через відношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра, для якого є справедливою пропорційність

$$SNR_f \approx \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD}, \quad (3)$$

де ΔT – температурний контраст міри Фуко; $M_{tp,E}$ – функція передачі контрасту тепловізора; $NETD$ – еквівалентна шуму різниця температур.

МПФ тепловізора $M_s(v_x)$ визначається для синусоїдальної міри і пов'язана з функцією передачі контрасту тепловізора з урахуванням зорового сприйняття співвідношенням [5]

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s. \quad (4)$$

Просторове інтегрування зорової системи збільшує відношення сигнал/шум, що сприймає око, в $\sqrt{\xi''_{tp,x} \xi''_{tp,y} / \alpha_D \beta_D} = \xi''_{tp} \sqrt{7 / \alpha_D \beta_D}$ разів [4–6], де $\xi''_{tp,x} \times \xi''_{tp,y}$ – кутові розміри зображення штриха міри Фуко на екрані дисплея уздовж відповідних осей.

З урахуванням цих зауважень, відношення сигнал/шум, яке сприймає дослідник для розпізнавання зображення міри на екрані за наявності шуму, матиме такий вигляд [4, 5]:

$$SNR_E = \frac{\Delta T}{NETD} \frac{8}{\pi^2} M_s(v_x) \xi_{tp} \sqrt{\frac{7 f_f t_E}{k_{\Delta f} \alpha_D \beta_D}}, \quad (5)$$

де f_f – частота кадрів; t_E – стала часу зорової системи; ξ_{tp} – кутовий розмір штриха міри; $\alpha_D \times \beta_D$ – кутові розміри пікселя приймача випромінювання; $k_{\Delta f}$ – коефіцієнт ширини смуги, який показує відмінність реальної смуги пропускання тепловізора з урахуванням зорового сприйняття від ефективної шумової смуги еталонного фільтра:

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^{\infty} NPS(f) M_{E1}^2(f) M_S^2(f) M_E^2(f) df}{\Delta f}, \quad (6)$$

де $NPS(f)$ – спектр потужності шуму приймача випромінювання; M_{E1} , M_S , M_E – МПФ електронного блоку, дисплея і зорової системи відповідно.

При цьому необхідно зазначити, що у формулі (5):

- кутовий розмір зображення штриха ξ''_{tp} у просторі “дисплей–дослідник” пов'язаний із кутовим розміром штриха ξ_{tp} у просторі “тест-об’єкт–тепловізор” співвідношенням [5]

$$\frac{\xi''_{tp}}{\xi_{tp}} = \frac{f'_0 \beta_{EI}}{R_{SE}}, \quad (7)$$

де f'_0 – фокусна відстань об'єктива; β_{EI} – електронне збільшення тепловізора; R_{SE} – відстань між дисплеєм і дослідником;

• кутова просторова частота v_x у МПФ дисплея і ока пов'язані з часовою частотою f співвідношенням [5]

$$v_x = \frac{t_0}{\alpha_D} f \quad \text{і} \quad v''_x = \frac{v_x}{\Gamma_s}, \quad (8)$$

де t_0 – час формування одного елемента розкладу зображення; Γ_s – кутове збільшення тепловізора.

Для практичного застосування співвідношення (5) спростимо його згідно з рекомендаціями Дж. Ллойда [3]: електронний блок і дисплей мають досить широкі ефективні смуги пропускання порівняно зі смугою пропускання зорової системи, тобто $M_{EI}(f) \approx 1$, $M_S(f) \approx 1$, сигнал шуму тепловізора в межах цих смуг є “білим”, тобто $NPS(f) \approx 1$.

Тоді коефіцієнт ширини смуги (6) з урахуванням (8) при кутовому збільшенні $\Gamma_s = 1$ буде мати вигляд

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \times$$

$$\times \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-1,92 \frac{t_0}{\alpha_D} f\right) - \exp\left(-5,67 \frac{t_0}{\alpha_D} f\right) \right]^2 df, \quad (9)$$

де час формування одного елемента розкладу зображення t_0 вимірюється в секундах, кутовий розмір пікселя α_D – у мілірадіанах.

Обчислення інтеграла (9) дає такий результат:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \frac{\alpha_D}{t_0} 0,138 \approx \frac{\alpha_D^*}{t_0 \Delta f},$$

де параметр α_D^* є безрозмірною величиною, яка чисельно дорівнює кутовому розміру пікселя в мілірадіанах.

Коефіцієнт ширини смуги, отриманий Дж. Ллойдом, має вигляд [3]

$$k_{\Delta f, L} = \frac{\alpha_D}{2\xi_{tp} t_0 \Delta f}. \quad (10)$$

На рис. 3 наведені графіки функцій (9) і (10) залежно від кутових розмірів штриха міри. Аналіз цих функцій показує, що вони збігаються для випадку, коли кутовий розмір штриха дорівнює $\xi_{tp} = 0,5$ мрад = 1,72 кут. мінут.

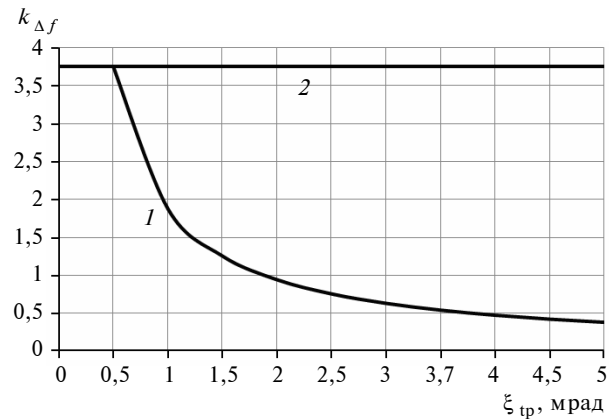


Рис. 3. Залежність коефіцієнта ширини смуги $k_{\Delta f}$ системи “тепловізор–спостерігач” від кутового розміру ξ_{tp} штриха міри Фуко, коли $\alpha_D = 1,88$ мрад і $t_0 \Delta f = 0,5$: 1 – для апроксимації Ллойда (10); 2 – для апроксимації Шульца (9)

Імовірність розділення штрихів у зображенні міри Фуко залежить від відношення $SNR_r = SNR_E$, яке сприймає спостерігач. Наприклад, для ймовірності розпізнавання 90 % необхідно, щоб $SNR_E = 4,5$. Якщо підставити це число у формулу (5), то ΔT буде шуканою функцією $MRTD(v_x)$ просторової частоти v_x :

$$\Delta T = MRTD(v_x) =$$

$$= \frac{\pi^2}{8} SNR_r \cdot NETD \frac{1}{M_s(v_x) \xi_{tp}} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \alpha_D \beta_D}{7 f_f t_E}}. \quad (11)$$

Підставимо (9) в (11) з урахуванням того, що просторова частота міри $v_x = 1/2 \xi_{tp}$. Тоді мінімальна роздільна різниця температур буде визначатися рівнянням

$$MRTD_S(v_x) =$$

$$= 0,93 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x \alpha_D^*}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_0 f_f t_E}}. \quad (12)$$

У роботах [3, 6] було отримано подібне рівняння для розрахунку МРРТ, в основі якого лежить апроксимація Ллойда МПФ зорової системи (10):

$$MRTD_L(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}} \quad (13)$$

Отримане рівняння (12) є справедливим тільки для області просторового інтегрування зорової системи від $\xi_{tp, \min} = 1$ кут. мінути до $\xi_{tp, \max} = 5,7$ кут. мінути. Аналіз рівнянь (12) і (13) показує, що за умови $\alpha_D^* = 0,71$ ці рівняння збігаються.

Приклад розрахунку мінімальної роздільної різниці температур

Як приклад розрахунку МРРТ розглянемо медичний тепловізор Thermal Eye TSC, який має такі характеристики:

- приймач випромінювання – мікроболометрична матриця – формат матриці $p \times q = 160 \times 120$, розмір пікселя $V_D \times W_D = 30 \times 30$ мкм², температурна чутливість $NETD = 0,1$ К;
- об'єктив – фокусна відстань $f_o = 16$ мм, відносний отвір 1:1;
- кутове поле зору $2\omega_{ox} \times 2\omega_{oy} = 17^\circ \times 12^\circ$;
- частота кадрів $f_f = 30$ Гц.

Для розрахунку функції $MRTD_S(v_x)$ за формулою (12) використаємо методику, що наведена в підручнику [4].

1. У вихідній формулі (12) відомими є: $SNR_r = 4,5$ (для ймовірності виявлення штрихів міри 90 %) $NETD = 0,1$ К; $f_f = 30$ Гц; $t_E = 0,3$ с.

2. Кутові розміри пікселя МБМ визначаємо як

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад.}$$

3. При оптимальному узгодженні смуги пропускання Δf і часу формування одного елемента розкладу зображення t_o справедливе співвідношення [4] $\Delta f \cdot t_o = 0,5$.

4. МПФ тепловізора $M_s(v_x)$ визначимо із умови, що для тепловізора з високоякісним об'єктивом ця функція визначається розміром пікселя α_D МБМ, тобто

$$M_s(v_x) \approx M_D(v_x) = \text{sinc}(v_x \alpha_D) = \frac{\sin(1,87\pi v_x)}{1,87\pi v_x}.$$

5. Після підстановки отриманих вихідних параметрів у рівняння (12) отримаємо функцію для розрахунку МРРТ тепловізора Thermal Eye TSC:

$$MRTD_S(v_x) = 0,93 \cdot 4,5 \cdot 0,1 \cdot 1,87 v_x \times \left[\frac{1,87\pi v_x}{\sin(1,87\pi v_x)} \right] \sqrt{\frac{1,87^2}{0,5 \cdot 30 \cdot 0,2}} = 0,845 v_x \left[\frac{1,87\pi v_x}{\sin(1,87\pi v_x)} \right].$$

На рис. 4 наведені графіки МРРТ тепловізора Thermal Eye TSC, які побудовані за формулами (12) і (13). Аналіз цих функцій показує, що

- значення функцій $MRTD_S(v_x)$ і $MRTD_L(v_x)$ різняться між собою в 2,6 разу;
- функція $MRTD_S(v_x)$ залежить від параметра α_D^* . Якщо $\alpha_D^* = 0,71$, то функції $MRTD_S(v_x)$ і $MRTD_L(v_x)$ збігаються.

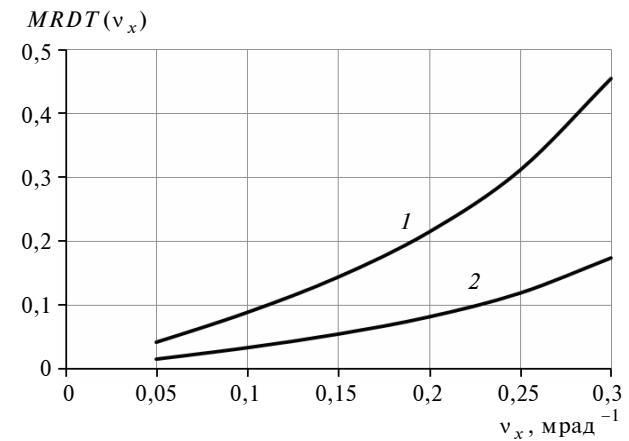


Рис. 4. Мінімальна роздільна різниця температур тепловізора Thermal Eye TSC, розрахована для апроксимації: 1 – Шульца $MRTD_S(v_x)$; 2 – Ллойда $MRTD_L(v_x)$

Висновки

Отримано удосконалене рівняння для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур тепловізора, в основі якого лежить більш достовірною апроксимацією модуляційної передавальної функції зорової системи, що запропонована Шульцем.

Дослідження рівнянь для розрахунку МРРТ, у яких використані МПФ зорової системи, запропоновані Ллойдом і Шульцем, показало, що

- значення МРРТ за цими рівняннями істотно різняться;
- коефіцієнт ширини смуги, який показує відмінність реальної смуги пропускання тепловізора з урахуванням зорового сприйняття від ефективної шумової смуги еталонного фільтра, отриманий Ллойдом, залежить від кутового роз-

міру штриха міри Фуко, а для апроксимації Шульца – не залежить. У цьому полягає принципова відмінність отриманого рівняння для розрахунку МРРТ від відомих рівнянь.

Подальші дослідження слід спрямувати на удосконалення алгоритму отримання рівняння для розрахунку МРРТ і проведення експериментальних вимірювань МРРТ, які зможуть підтвердити моделі Ллойда або запропоновану модель.

Список літератури

1. *G.C. Wishart et al.*, "The accuracy of digital infrared imaging for breast cancer detection in women undergoing breast biopsy", *European J. Surgical Oncology*, vol. 36, no. 6, pp. 535–540, 2010.
2. *R.H. Vollmerhausen et al.*, *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. SPIE Press, 2010, 304 p.
3. *Ллойд Дж.* Системи тепловидення / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
4. *Колобродов В.Г., Лихолім М.І.* Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 364 с.
5. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
6. *Тарасов М.М., Якушенко Ю.Г.* Инфракрасные системы "смотрящего" типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
28 серпня 2014 року