

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.384.3

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.100137

В.Г. Колобродов, М.М. Луцук*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МІНІМАЛЬНА СПРИЙМАНА РІЗНИЦЯ ТЕМПЕРАТУР МЕДИЧНОГО СУБДИСКРЕТНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

Background. Currently, thermal imagers with matrix radiation detectors (MRD) are widely used in medicine. A common feature of these thermal imagers is the ability to sample the signal in two directions: horizontal and vertical. Such thermal imagers are undersampled. That is why the question of evaluating the effectiveness of such thermal imagers is very relevant now.

Objective. The aim of the paper is to provide a physico-mathematical model of a thermal imager to calculate the minimum temperature difference perceived (*MTDP*).

Methods. It is proposed to determine *MTDP* based on the physico-mathematical model of the thermal imager for determining the minimum resolution temperature difference.

Results. The developed physico-mathematical model of a thermal imager with MRD allows calculating *MTDP* that enables determining the spatial resolution of a thermal imager outside the Nyquist frequency. It is proposed to consider the Average Modulation at Optimum Phase (*АМОП*) as the line scale average contrasts, which allow obtaining an equation for calculating the *MTDP* function.

Conclusions. The proposed physico-mathematical model provides an opportunity to determine the spatial resolution of the thermal imager outside the Nyquist frequency, which is an important factor in the effect on the thermal imaging quality.

Keywords: minimum temperature difference perceived; Nyquist frequency; average modulation at optimum phase.

Вступ

У наш час у медицині широко використовуються тепловізори з матричними приймачами випромінювання (МПВ). Загальною рисою таких тепловізорів є можливість вибірки сигналу у двох напрямках: горизонтальному та вертикальному. Ці тепловізори є субдискретними. Саме тому нині дуже актуальним є питання про оцінку ефективності роботи таких тепловізорів.

За останні роки широкими темпами відбувається розвиток теплобачення, що привело до розширення сфери використання тепловізорів, а отже, змінюються і вимоги до самого приладу. Інколи якість отримуваної термограми не зовсім достатня, оскільки вона є спотвореною, а тому необхідна характеристика, яка надасть змогу повноцінно оцінити ефективність роботи тепловізора.

Існує декілька підходів до оцінки ефективності субдискретних тепловізорів. Наприклад, для моделі FLIR92 був вибраний підхід, де основним оціночним фактором була мінімальна роздільна різниця температур (*MRTD*). Недоліком цього підходу було те, що *MRTD* обмежується частотою Найквіста [1–4].

У цій статті розглядається новий фактор оцінки ефективності субдискретних теплові-

зорів – мінімальна сприймана різниця температур (*MTDP*) [2]. Основна мета дослідження полягає в розробці фізико-математичної моделі, що дасть змогу визначати просторову роздільну здатність субдискретних тепловізорів за межами частоти Найквіста. Більш висока роздільна здатність надає можливість більш точно проводити вимірювання температури, які дуже важливі при визначенні термоаномальних зон (точок) на поверхні об'єкта дослідження. Ця проблема є дуже поширеною в медицині при виявленні хвороб на ранніх стадіях за допомогою термодіагностики. Основним критерієм при вимірюванні мінімальної сприйманої різниці температур є середня модуляція при оптимальній фазі.

Оцінювання ефективності роботи тепловізора вимагає теоретичних передбачень і фактичних результатів. Тому накладається ще одна вимога – можливість проводити вимірювання мінімальної сприйманої різниці температур у лабораторних умовах.

Постановка задачі

Дослідження спрямоване на розробку фізико-математичної моделі тепловізора, яка дає змогу отримати рівняння для розрахунку *MTDP*.

*corresponding author: fagot1993@gmail.com

Основна частина

Як було зазначено вище, мінімальна сприймана різниця температур – це новий фактор оцінки ефективності субдискретних тепловізорів, основна мета якого – усунення недоліків концепції мінімальної роздільної різниці температур.

Для реального тепловізора, на відміну від концепції *MRTD*, необхідно уникати синусоїдальної моделі. Нам необхідно розглядати тільки прямокутну міру. Оптимальна фаза – положення фази ϕ (розміщення зображення штрихової міри відносно матричної структури пікселів приймача випромінювання), при якому середня чисельність штрихів у дискретному зображенні $\Delta S(v_x, \phi)$ є максимальною. З іншого боку, середня чисельність штрихів $\Delta S(v_x, \phi)$ є ніщо інше, як середня різниця сигналу між штрихами картини, яку ми спостерігаємо. Тоді середня різниця сигналу при оптимальній фазі, отриманій для реального тепловізора, визначається як середня модуляція при оптимальній фазі (the Average Modulation at the Optimum Phase – *AMOP*). Існує припущення, що сприйняття окремого штриха у дискретному зображенні чотириштрихової міри пропорційне різниці сигналів, які утворюють цей штрих.

Тому ми можемо зробити висновок, що сприйняття зображення картини штриха при оптимальній фазі передбачається пропорційним середній модуляції при оптимальній фазі *AMOP*.

Мінімальна сприймана різниця температур

Розглянемо процес отримання формули для *MRTD*. Використовується тестова теплова міра (міра Фуко) (рис. 1).

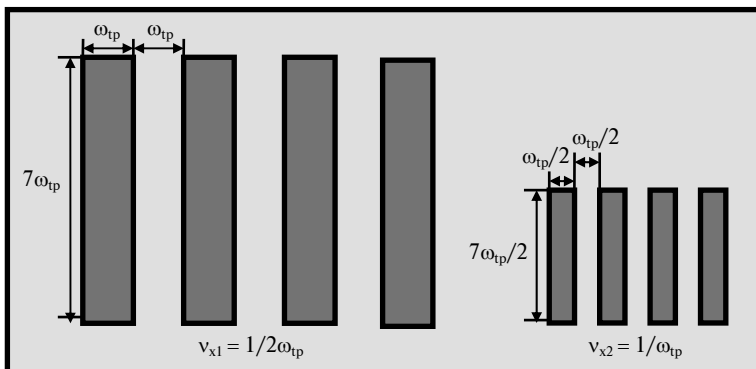


Рис. 1. Тест-об'єкт (міра Фуко) для визначення *MRTD*(v_x)

Структура з 4-х штрихів з однаковими відстанями між ними та співвідношеннями висоти до ширини 7:1 забезпечує певну періодичність у напрямку *X* та безкінечну протяжність штрихів у напрямку *Y*.

Для визначення *MRTD* використовується модуляційна передавальна функція (МПФ) усієї системи $M_s(v_x)$, що визначалася для синусоїдальної міри:

$$M_s(v_x) = M_o(v_x) \cdot M_{Ds}(v_x) \times M_{Dt}(f) \cdot M_{El}(f) \cdot M_S(v_x),$$

де $M_o(v_x)$ – МПФ оптичної системи;

$$M_{Ds}(v_x) = \text{sinc}(\alpha_D v_x)$$

є просторовою МПФ приймача випромінювання (ПВ) із прямокутною чутливою площею;

$$M_{Dt}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 t_D^2 f^2}}$$

є часовою МПФ ПВ, де t_D – стала часу ПВ; $M_{El}(f)$ – МПФ електронного блока; $M_S(v_x)$ – МПФ дисплея.

Оскільки мінімальна сприймана різниця температур *MTDP* є продовженням концепції мінімальної роздільної різниці температур *MRTD*, то виведемо формулу для *MTDP*(v_x) аналогічно до методу отримання формули для визначення *MRTD*(v_x) [1].

Концепція *MTDP* визнає, що у випадку субдискретизації зображення стандартного тест-шаблону спотворюється менше, ніж зображення стандартного тест-шаблону на частотах більше половини частоти дискретизації. Врахуємо, що для опису процесу сприйняття зображення картини штриха при оптимальній фазі доцільніше використовувати *AMOP* (середню модуляцію при оптимальній фазі) замість МПФ усієї системи $M_s(v_x)$, оскільки сприйняття зображення картини штриха при оптимальній фазі передбачається пропорційним середній модуляції при оптимальній фазі *AMOP*. Визначимо також амплітуду першої гармоніки прямокутної міри з періодом V_{tp} . Періодична функція зміни світності міри з періодом V_{tp} може бути подана у вигляді ряду Фур'є:

$$\Delta M(x) = \Delta M(x + iV_{tp}) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \left[A_i \cos \left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}} \right) + B_i \sin \left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}} \right) \right],$$

де $A_0/2$ – постійна складова;

$$A_i = \frac{2}{V_{tp}} \int_{-V_{tp}/2}^{V_{tp}/2} \Delta M(x) \cos \left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}} \right) dx;$$

$$B_i = \frac{2}{V_{tp}} \int_{-V_{tp}/2}^{V_{tp}/2} \Delta M(x) \sin \left(2\pi i \frac{x}{V_{tp}} \right) dx$$

є дійсними амплітудами відповідних складових.

Математично відносну світність прямокутної міри описують у межах періоду відповідною функцією:

$$\Delta M_r(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |x| \leq \frac{V_{tp}}{4}; \\ 0, & \text{якщо } \frac{V_{tp}}{4} < |x| < \frac{V_{tp}}{2}. \end{cases}$$

Графік цієї функції показано на рис. 2 порівняно з графіком функції для синусоїдальної міри, яка використовується для визначення *MRTD*.

Тоді амплітуда першої гармоніки дорівнює:

$$A_{1r} = \frac{2}{V_{tp}} \int_{-V_{tp}/4}^{V_{tp}/4} \cos \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) dx = \frac{2}{V_{tp}} \frac{V_{tp}}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{x}{V_{tp}} \right) \Big|_{-V_{tp}/4}^{V_{tp}/4} = \frac{2}{\pi}.$$

МПФ – це відношення контрасту на виході до контрасту на вході [1]:

$$M_s = \frac{C_{вих}}{C_{вх}}.$$

Середня модуляція при оптимальній фазі – це також відношення контрасту на виході до

контрасту на вході. Проте контраст на вході прямокутної міри дорівнює одиниці, тому

$$AMOP = C_{вих}.$$

Контраст на виході розраховуємо таким чином:

$$C_{вих} \equiv \frac{\bar{S}_{max} - \bar{S}_{min}}{\bar{S}_{max} + \bar{S}_{min}},$$

де \bar{S}_{max} , \bar{S}_{min} – середні значення максимумів та мінімумів сигналу відповідно в оптимальній фазі.

Отже, ми можемо розрахувати середню модуляцію при оптимальній фазі:

$$AMOP \equiv \frac{\bar{S}_{max} - \bar{S}_{min}}{\bar{S}_{max} + \bar{S}_{min}}.$$

Амплітуда 1-ї гармоніки прямокутного сигналу в $4/\pi$ разів більша амплітуди синусоїдального сигналу того ж періоду й амплітуди. Додатково слід врахувати, що око реєструє середню яскравість прямокутного штриха на фоні. Середнє значення за півперіод 1-ї гармоніки прямокутного сигналу, як показано вище, в $2/\pi$ разів більше амплітуди.

Опираючись на сказане вище та на працю [5], можемо зробити висновок, що формула для виведення *MRTD*

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s$$

матиме такий вигляд:

$$M_{tdp,E} = \frac{2}{\pi} \cdot AMOP. \quad (1)$$

Функція $M_{tdp,E}$ у формулі (1) відіграє роль, аналогічну функції $\bar{L}_{S,n}(\xi_{tp}^n)$ у разі отримання формули для мінімальної виявлюваної різниці температур *MDTD* [1].

Урахування механізму сприйняття оком зображення здійснюється через співвідношення

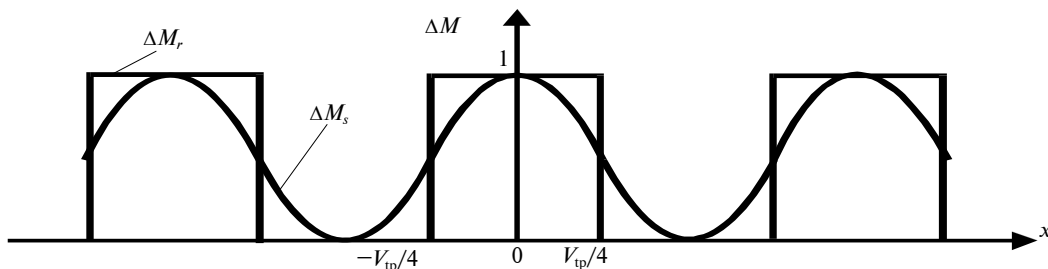


Рис. 2. Амплітуди прямокутної та синусоїдальної мір

сигнал/шум на виході еталонного фільтра, для якого справедлива пропорційність

$$SNR_f \approx \frac{M_{\text{tdp},E} \Delta T}{NETD},$$

де ΔT – температурний контраст штрихової міри.

Також необхідно враховувати інтегральні властивості ока. Врахуємо їх зміною відношення сигнал/шум. При цьому використаємо число SNR_r , яке гарантує із заданою ймовірністю сприйняття та розпізнавання тест-міри на фоні. Врахуємо три фактори, як і при виведенні формули для $MRTD(v_x)$, що впливають на зміну SNR .

1. Око здійснює часове інтегрування, збільшуючи відношення сигнал/шум у $\sqrt{f_f t_E}$ разів, де f_f – частота кадрів; $t_E = 0,2$ с – стала ока.

2. Просторове інтегрування уздовж координати x спричиняє збільшення ефективної шумової смуги у $k_{\Delta f}$ разів. При цьому сприймане SNR зменшується у $\sqrt{k_{\Delta f}}$ разів.

3. Під час інтегрування уздовж координати у сприймане відношення сигнал/шум підвищується в

$$\left(\frac{\text{angle target size}}{\text{angle detector size}} \right)^{0,5} = \left(\frac{\xi_{\text{tp}}}{\beta_D} \right)^{0,5} \text{ разів.}$$

Отже, просторове інтегрування уздовж координати у збільшує сприймане SNR у $\sqrt{7\omega_{\text{tp}} / \beta_D}$ разів.

З урахуванням цих зауважень відношення сигнал/шум для сприйняття та розпізнавання штрихової міри на зашумленому фоні матиме такий вигляд:

$$SNR_E = SNR_r = \frac{\Delta T}{NETD} \frac{2}{\pi} AMOP(v_x) \sqrt{\frac{f_f t_E 7\omega_{\text{tp}}}{k_{\Delta f} \beta_D}}. \quad (2)$$

Потрібне число SNR_r для розпізнавання та сприйняття штрихової міри розрахуємо для таких величин: порогове значення $SNR_{\text{th}} = 3,2$ та ймовірність виявлення $P_d = 90$ %. Для такої системи SNR_E становитиме 4,5. Якщо підставити це число значення у формулу (2), то ΔT

буде шуканою функцією $MTDP$ просторової частоти v_x :

$$\Delta T = MTDP(v_x) = 1,57 \cdot SNR_r \times \frac{NETD}{AMOP(v_x)} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \beta_D}{f_f t_E 7\omega_{\text{tp}}}}, \text{ К.}$$

Якщо припустити, що в робочій смузі пропускання тепловізора шум “білий”, то для $k_{\Delta f}$ справедливе співвідношення, яке за ширини штриха $\omega_{\text{tp}} = \xi_{\text{tp}}'' = (2v_x)^{-1}$ має вигляд

$$k_{\Delta f} = \frac{v_x \alpha_D}{\Delta f t_o}. \quad (3)$$

З урахуванням формули (3) отримаємо формулу для розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур:

$$\Delta T = MTDP(v_x) = 0,83 \cdot SNR_r \times \frac{NETD}{AMOP(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}, \text{ К.}$$

Висновки

Методам визначення просторової роздільної здатності тепловізорів присвячена низка монографій і статей. У той же час практично відсутня науково-технічна література щодо методів визначення просторової роздільної здатності тепловізорів за межами частоти Найквіста.

Розроблена фізико-математична модель тепловізора з МПВ дає змогу робити розрахунок мінімальної сприйманої різниці температур, що уможливорює визначення просторової роздільної здатності тепловізора за межами частоти Найквіста. Запропоновано розглядати оптимальну фазу $AMOP$ як середній контраст зображення штрихової міри, що дає можливість отримати рівняння для розрахунку функції $MTDP$.

Подальші дослідження слід спрямувати на визначення додаткових факторів, які також впливають на тепловізійну систему спостереження, і провести лабораторні дослідження з метою отримання практичних значень мінімальної сприйманої різниці температур та порівняти їх із теоретичними розрахунками.

Список літератури

1. Колобродов В.Г., Лихолім М.І. Проектування тепловізійних та телевізійних систем спостереження. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.
2. *Experimental Assessment Parameters and Procedures for Characterisation of Advanced Thermal Imagers.* – France: Research and Technology Organization, 2003. – 60 p.
3. *Chrzanowski K. Testing Thermal Imagers.* – Warsaw: Military University of Technology, 2010. – 164 p.
4. *Standard Test Method for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems: ASTM standard E 1213-2002.*
5. *Wittenstein W. Minimum Temperature Difference Perceived – A New Approach to Assess Undersampled Thermal Imagers.* – SPIE Optical Engineering Press, 1998. – P. 773–781.

References

- [1] V.G. Kolobrodov and M.I. Lyholit, *Design of Thermal and Television Observing Systems.* Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2007 (in Ukrainian).
- [2] *Experimental Assessment Parameters and Procedures for Characterisation of Advanced Thermal Imagers.* France: Research and Technology Organization, 2003.
- [3] K. Chrzanowski, *Testing Thermal Imagers.* Warsaw, Poland: Military University of Technology, 2010.
- [4] *Standard Test Method for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems,* ASTM standard E 1213-2002.
- [5] W. Wittenstein, *Minimum Temperature Difference Perceived – A New Approach to Assess Undersampled Thermal Imagers.* SPIE Optical Engineering Press, 1998, pp. 773–781.

В.Г. Колобродов, М.М. Луцук

МІНІМАЛЬНА СПРИЙМАНА РІЗНИЦЯ ТЕМПЕРАТУР МЕДИЧНОГО СУБДИСКРЕТНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

Проблематика. В наш час у медицині широко використовуються тепловізори з матричними приймачами випромінювання (МПВ). Загальною рисою таких тепловізорів є можливість вибірки сигналу у двох напрямках: горизонтальному та вертикальному. Ці тепловізори є субдискретними. Саме тому зараз дуже актуальним є питання оцінки ефективності роботи таких тепловізорів.

Мета дослідження. Розробка фізико-математичної моделі тепловізора, яка дає змогу отримати рівняння для розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур (MTDP).

Методика реалізації. На основі фізико-математичної моделі тепловізора для визначення мінімальної роздільної різниці температур запропоновано визначити мінімальну сприйману різницю температур.

Результати дослідження. Розроблена фізико-математична модель тепловізора з МПВ дає можливість робити розрахунок мінімальної сприйманої різниці температур, що дає змогу визначити просторову роздільну здатність тепловізора за межами частоти Найквіста. Запропоновано розглядати оптимальну фазу АМОР як середні контрасти зображення штрихової міри, що дає можливість отримати рівняння для розрахунку функції MTDP.

Висновки. Запропонована фізико-математична модель надає можливість визначити просторову роздільну здатність тепловізора за межами частоти Найквіста, що є важливим чинником впливу на якість тепловізійних зображень.

Ключові слова: мінімальна сприймана різниця температур; частота Найквіста; середня модуляція при оптимальній фазі.

В.Г. Колобродов, Н.М. Луцук

МИНИМАЛЬНАЯ ВОСПРИНИМАЕМАЯ РАЗНОСТЬ ТЕМПЕРАТУР МЕДИЦИНСКОГО СУБДИСКРЕТНОГО ТЕПЛОВИЗОРА

Проблематика. В настоящее время в медицине широко используются тепловизоры с матричными приемниками излучения (МПИ). Общей чертой данных тепловизоров является возможность выборки сигнала в двух направлениях: горизонтальном и вертикальном. Такие тепловизоры являются субдискретными. Именно поэтому сейчас очень актуален вопрос об оценке эффективности работы данных тепловизоров.

Цель исследования. Разработка физико-математической модели тепловизора, которая позволяет получить уравнение для расчета минимальной воспринимаемой разности температур (MTDP).

Методика реализации. На основе физико-математической модели тепловизора для определения минимальной разрешающей разности температур предложено определять минимальную воспринимаемую разность температур.

Результаты исследования. Разработанная физико-математическая модель тепловизора с МПИ позволяет делать расчет минимальной воспринимаемой разности температур, что дает возможность определять пространственное разрешение тепловизора за пределами частоты Найквиста. Предложено рассматривать оптимальную фазу АМОР как средние контрасты изображения штриховой меры, что позволяет получить уравнение для расчета функции MTDP.

Выводы. Предложенная физико-математическая модель позволяет определять пространственное разрешение тепловизора за пределами частоты Найквиста, что является важным фактором влияния на качество тепловизионных изображений.

Ключевые слова: минимальная воспринимаемая разность температур; частота Найквиста; средняя модуляция при оптимальной фазе.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
11 травня 2017 року