

**Keywords:** calculation optics, mirror systems, aberration correction, an optimization, optical design, anastigmat, refresh extension list, the objective, system summary graphic, image quality.

Надійшла до редакції  
14 січня 2016 року

Рецензовано  
26 січня 2016 року

© Артюхина Н. К., 2016

УДК 621.384.3

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФАЗИ ТА МІНІМАЛЬНОЇ СПРИЙМАЮЧОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР

*Колобродов В. Г., Луцюк М. М., Балінський Є. Г.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*E-mail: [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net)*

*Мінімальна сприймаюча різниця температур (Minimum Temperature Difference Perceived - MTDP) новий фактор оцінки субдискретних тепловізорів, що заснований на концепції мінімальної роздільної різниці температур (Minimum Resolvable Temperature Difference – MRTD). Показано зв'язок між MRTD та MTDP. Основною величиною даної концепції є середня модуляція при оптимальній фазі (Average Modulation at Optimum Phase - AMOP). Для кожної просторової частоти існує своя оптимальна фаза. За допомогою цього критерію можна оцінити роботу тепловізора за межами частоти Найквіста. Розглянуто метод визначення оптимальної фази.*

**Ключові слова:** мінімальна сприймаюча різниця температур, мінімальна роздільна різниця температур, частота Найквіста, оптимальна фаза.

### Вступ

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

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

Також, нещодавно, був запропонований ще один підхід, а саме модуляційна передавальна функція (МПФ) стисненої моделі, яка використовує теоретичну систему МПФ. Такий підхід призводив до розмивання зображення, що здійснювалося за рахунок дискретизації.

У даній статті розглядається новий фактор оцінки ефективності субдискретних тепловізорів – мінімальна сприймаюча різниця температур (MTDP) [2]. Основна мета дослідження полягає в

можливості оцінювання роботи субдискретних тепловізорів за межами частоти Найквіста. Даний підхід не повинен далеко відхилитися від концепції MRTD. Саме зв'язок між цими двома факторами і буде показаний у даній статті.

Оцінювання ефективності роботи тепловізора вимагає теоретичних передбачень та фактичних результатів. Тому накладається ще одна потреба – можливість проводити вимірювання MTDP в лабораторних умовах.

### Постановка задачі

Метою даної статті є розробка моделі визначення оптимальної фази при вимірюванні мінімальної сприймаючої різниці температур.

### Основна частина

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

Одним з основних недоліків MRTD є неможливість оцінки роботи субдискретного

тепловізора за межами частоти Найквіста. У такому випадку втрачається інформація за межами частоти Найквіста [2,3]. На прикладі стандартного тест-об'єкта, у вигляді чотирьох штрихів, розглянемо, яку кількість просторової інформації можна отримати на нормованих частотах 0.25, 0.5 (частота Найквіста), 0.75 та 0.85 (Рис.1). Саме тому і був запропонований новий фактор, який дозволяє отримувати значну кількість просторової інформації за межами частоти Найквіста.

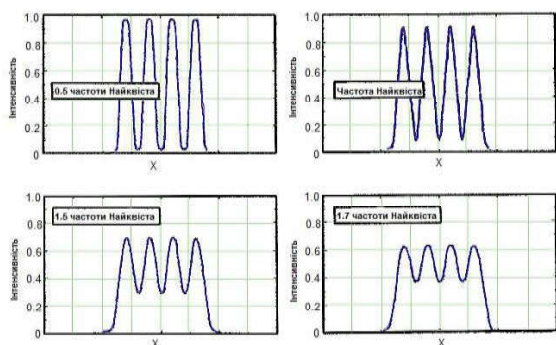


Рис. 1. Відтворення зображення тест-об'єкта, у вигляді чотирьох штрихів, після попередньої фільтрації, на нормованих частотах 0.25, 0.5, 0.75, 0.85

MTDP дозволяє оцінити як дискретні, так і субдискретні тепловізори. MTDP вперше була використана в німецькій моделі TRM3. Вона заснована на сприйнятті стандартної тестової міри, що зображується 4-ма штрихами. MTDP це мінімальна різниця температури, при якій чотири, три чи два штрихи можуть бути розрізнені спостерігачем, за допомогою тестового шаблону в оптимальній фазі [2].

Для вимірювання MTDP, спочатку необхідно при досить великій різниці температур  $\Delta T$  виміряти оптимальну фазу  $AMOP(v_x)$  – положення фази, при якому середня чисельність штрихів у дискретному зображенні є максимальною. Варто зауважити також, що для кожної просторової частоти існує своя оптимальна фаза  $AMOP(v_x)$ . Далі утримуючи тестову міру в оптимальній фазі проводимо всі ті самі розрахунки, що і при вимірюванні MRTD [4].

Для субдискретних тепловізорів MRTD розраховується за наступною формулою [1]:

$$MRTD(v_x) = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot SNR \cdot NETD}{M_2(v_x)} \cdot \sqrt{\frac{k_{df} \beta_D}{f_f t_E \omega_{TP}}} \quad (1)$$

де  $SNR$  – порогове відношення сигнал/шум, яке потрібне для розділення спостерігачем міри Фуко з імовірністю 50%,  $NETD$  – еквівалентна шуму різниця температур,  $k_{df}$  – коефіцієнт ширини смуги, що показує відмінність реальної смуги пропускання ТПСС з урахування зорового сприйняття від ефективного смуги еталонного фільтра,  $M_2(v_x)$  – МПФ системи «ТПСС-оператор»,  $f_f$  – частота кадрової розгортки,  $t_E$  – стала часу ока,

$\omega_{TP}$  – кутова ширина штриха,  $\beta_D$  – кутовий розмір чутливого елемента ПВ.

Для субдискретних тепловізорів провівши заміну  $MRTD(v_x)$  на  $MTDP(v_x)$ , отримуємо наступне співвідношення [2]:

$$MTDP(v_x) = \frac{\pi \cdot SNR \cdot \psi^{1/2}}{AMOP(v_x)} \quad (2)$$

де  $\psi$  – рівень шуму в системі.

#### Розрахунок МДТР

Як бачимо з формул (1) та (2), зв'язок між MRTD та MTDP показує відношення  $4/\pi$ , яке є нічим іншим, як наближенням прямокутної картини до синусоїдальної при розрахунках MRTD. В рівнянні MTDP дане наближення відсутнє, оскільки AMOP – це фактична модуляція в зображенні шаблону.

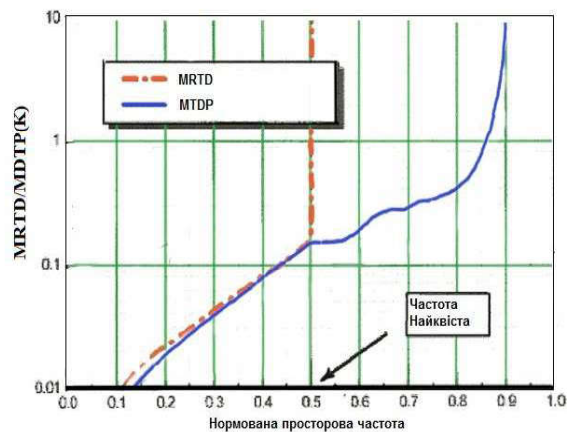


Рис. 2. Порівняння характеристик MRTD та MTDP

#### Математична модель оптимальної фази

У випадку недискретного тепловізора на частоті Найквіста  $MTDP(v_x) = MRTD(v_x)$ , оскільки MTF на частоті Найквіста дорівнює 0 [2].

У такому разі, при рівності лівих частин рівнянь (1) та (2), можемо прирівняти і праві частини даних рівнянь:

$$\frac{\frac{\pi}{2} \cdot SNR \cdot \psi^{1/2}}{AMOP(v_x)} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot SNR \cdot NETD}{M_2(v_x)} \cdot \sqrt{\frac{k_{df} \beta_D}{f_f t_E \omega_{TP}}} \quad (3)$$

Звідки:

$$AMOP(v_x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{M_2(v_x) \psi^{1/2}}{NETD \cdot \sqrt{\frac{k_{df} \beta_D}{f_f t_E \omega_{TP}}}} \quad (4)$$

МПФ системи «ТПСС-оператор»  $M_2(v_x)$  можна розрахувати за наступною формулою [1]:

$$M_2(v_x) = \exp(-2 \cdot \pi^2 \cdot r_{\text{об}}^2 \cdot v_x^2) \quad (5)$$

де  $r_{\text{об}}$  – радіус зображення точкового джерела випромінювання на екрані дисплея, мрад.

Під час практичного застосування функції  $MRTD(v_x)$  допускають, що у робочій смугі пропускання ТПСС шум «білий». Тоді для  $k_{df}$ ,

при ширині штриха  $\omega_{\text{ш}} = (2 \cdot v_{\text{ш}})^{-1}$ , можемо використати наступне співвідношення [1]:

$$K_{\Delta f} = \frac{v_{\text{ш}} \Delta f}{f_{\text{ш}} \Delta f}, \quad (6)$$

де  $\alpha_{\text{ш}}$  – кутовий розмір чутливого елемента ПВ,  $t_{\text{ш}}$  – час формування одного елемента розкладу,  $\Delta f$  – ефективна шумова смуга.

Підставивши рівняння (5) та (6) в рівність (4) отримаємо формулу для розрахунку оптимальної фази в залежності від просторової частоти:

$$\text{АМОР}(v_{\text{ш}}) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\exp(-2\pi^2 \cdot v_{\text{ш}}^2 \cdot t_{\text{ш}}^2 \cdot \Delta f^2 / 2)}{\text{МЕТД} \cdot v_{\text{ш}} \cdot \sqrt{f_{\text{ш}}^2 + t_{\text{ш}}^2 \Delta f^2}}. \quad (7)$$

Рівняння (7) дозволяє зробити розрахунок оптимальної фази на будь-якій просторовій частоті та приступити до розрахунку МТДР.

#### Висновки

Розроблена модель тепловізійної системи дозволяє розраховувати оптимальну фазу в залежності від просторової частоти з урахуванням МПФ та кутових розмірів приймача випромінювання.

Визначення оптимальної фази дозволяє визначити мінімальну сприймаючу різницю температур, що в свою чергу дозволяє оцінювати

ефективність роботи субдискретних тепловізорів за межами частоти Найквіста.

Подальші роботи слід спрямувати на визначення факторів системи «ТПСС-оператор», які також впливають на оптимальну фазу, і провести розрахунки мінімальної роздільної різниці температур і сприймаючої мінімальної різниці температур та порівняти отримані результати.

#### Література

1. Колобродов В. Г. Проективання тепловізійних та телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
2. Experimental Assessment Parameters and Procedures for Characterisation of Advanced Thermal Imagers / NATO. – France: Research and Technology organization, 2003. – 60 с.
3. Chrzanowski K. Testing thermal imagers / Krzysztof Chrzanowski. – Warsaw: Military University of Technology, 2010. – 164 с.
4. ASTM standard E 1213-2002 “Standard Test Method for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems

УДК 621.384.3

**В. Г. Колобродов, М. М. Луцюк, Е. Г. Балинський**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФАЗЫ И МИНИМАЛЬНОЙ ВОСПРИНИМАЮЩЕЙ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР

**Проблематика.** В настоящее время 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 таких тепловизоров. В данной статье исследуется методика определения критерия, который поможет оценить эффективность работы тепловизора.

**Цель исследования** - исследование методики определения оптимальной фазы тепловизора, которая поможет определить критерий оценки эффективности работы тепловизора за пределами частоты Найквиста.

**Методика реализации.** На основе концепции минимальной разрешающей разницы температур определяется новая концепция минимальной воспринимающей разницы температур, которая помогает выполнить цель исследования.

**Результаты исследования.** Получено уравнение, позволяющее рассчитывать оптимальную фазу в зависимости от пространственной частоты с учетом МПФ и угловых размеров приемника излучения.

**Выводы.** Разработанная модель тепловизионной системы позволяет рассчитывать оптимальную фазу в зависимости от пространственной частоты с учетом МПФ и угловых размеров приемника излучения. Определение оптимальной фазы позволяет определить минимальную воспринимающую разницу температур, что в свою очередь позволяет оценивать эффективность работы субдискретных тепловизоров за пределами частоты Найквиста.

**Ключевые слова:** минимальная воспринимающая разность температур, минимальная разрешающая разность температур, частота Найквиста, оптимальная фаза.

**V. G. Kolobrodov, M. M. Lutsiuk, E. G. Balinskiy**

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL PHASE AND MINIMUM TEMPERATURE DIFFERENCE PERCEIVED

**Background.** Nowadays commonly used with thermal matrix detector. A common feature of these thermal imagers have the opportunity to sample the signal in two directions, horizontal and vertical. These imagers are sampled. It is therefore very important is the issue of performance assessment of thermal imagers. This article examines the methods for determining criteria to help evaluate the effectiveness of the thermal imager.

**Objective** – to study methods for determining the optimal phase thermal imager to help define criteria to help evaluate the effectiveness of the thermal imager beyond the Nyquist frequency.

**Methods.** Based on the concept of minimum resolution temperature difference between the new concept of the minimum temperature difference perceived that helps fulfill the objective.

**Results.** The equation that allows you to calculate the optimal phase depending on the spatial frequency based MTF and angular size detector. **Conclusions.** The model thermal imaging system allows to calculate the optimal phase depending on the spatial frequency based MTF and angular size detector. The definition phase to determine optimum minimum temperature difference perceived, which in turn allows to evaluate the efficiency of sampled thermal imagers beyond the Nyquist frequency.

**Key words:** minimum temperature difference perceived, minimum resolution temperature difference, the Nyquist frequency, the optimal phase.

*Надійшла до редакції  
04 листопада 2015 року*

*Рецензовано  
19 листопада 2015 року*

© Колобродов В. Г., Луцюк М. М., Балінський Є. Г., 2016

УДК 621.384.3

## РОЗРОБКА ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ КОМБІНОВАНИМ СПОСОБОМ

*Півторак Д.О.*

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,  
м. Київ, Україна*

*E-mail: [p\\_diana@i.ua](mailto:p_diana@i.ua)*

*Для зниження інформаційних втрат при фотозйомці в умовах великого інтервалу яскравості в межах кадру, використовуються мультиплікативний, адитивний і комбінований способи реєстрації зображень.*

*При комбінованому способі реєстрації зображень проводиться експонування світлочутливого сенсора через задалегідь побудовану частотно-вибіркову фільтр-маску оптичного зображення об'єкта фотографування і зображення екрану рівномірної яскравості.*

*Розроблена просторово-частотна модель процесу формування зображення в цифрових фотокамерах, що використовують комбінований спосіб локального управління експозиції. З моделі видно, що експонетрична система локального управління експозицією безпосередньо впливає на процес формування зображення, змінюючи свою модуляційну передатну функцію, і опосередковано, змінюючи параметри, що входять у вирази для модуляційних передавальних функцій більшості ланок, які приймають участь у формуванні даного зображення.*

**Ключові слова:** *зображення, експозиція, інтервал яскравості.*

**Вступ**

Для зниження втрат інформації, які викликані не відповідністю динамічного діапазону вхідного сигналу (інтервалу яскравості об'єктів фотографування) динамічному діапазону

реєстратора зображення, в сучасних фотоапаратах широко використовується попередня просторово-частотна фільтрація оптичного сигналу. Функції найпростіших фільтрів зазвичай виконують експонетричні пристрої, що забезпечують