

## ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.2.167793

УДК 621.384.3

В.Г. Колобродов<sup>1</sup>, М.М. Луцюк<sup>1\*</sup>, В.М. Тягур<sup>2</sup><sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна<sup>2</sup>КП СПБ “Арсенал”, Київ, Україна

\*corresponding author: fagot1993@gmail.com

### МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНОЇ СПРИЙМАНОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР СУБДИСКРЕТНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

**Проблематика.** У наш час широко використовуються тепловізори з матричними приймачами випромінювання (МПВ). Загальною рисою таких тепловізорів є можливість вибірки сигналу у двох напрямках: горизонтальному та вертикальному. Теорема дискретизації присвячена можливості дискретизованої системи для передачі інформації. У разі оптичної інформації це означає здатність системи відтворювати просторові частоти, які утворюють конкретне зображення. Основним результатом цієї теореми є встановлення верхньої границі для частот, які можуть бути точно передані й відновлені з вихідного сигналу. Якщо спектр вихідного сигналу містить частоти вище частоти Найквіста, то вихідний спектр і спектр, що повторюється, перекриваються. В такому випадку вихідний сигнал фактично неможливо реконструювати. Тепловізор, який уможливує перекривання вихідного спектра зі зворотно складеним спектром, називається субдискретним. Тепловізор субдискретний, якщо попередній фільтр МПФ не дорівнює нулю на частоті Найквіста.

**Мета дослідження.** Дослідження методики розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур, що допоможе визначити роздільну здатність тепловізора за межами частоти Найквіста.

**Методика реалізації.** На основі концепції мінімальної роздільної різниці температур визначається нова концепція мінімальної сприйманої різниці температур, яка допомагає досягти мети дослідження.

**Результати дослідження.** Отримано графік функції мінімальної сприйманої різниці температур, що дає можливість визначити роздільну здатність тепловізора за межами частоти Найквіста.

**Висновки.** Розроблений метод розрахунку мінімальної сприйманої різниці температури дає нам можливість побудувати графік цієї функції. Графік своєю чергою показує, що існує реальна можливість визначити роздільну здатність тепловізора за межами частоти Найквіста за більш високого значення температурного контрасту міри Фуко.

**Ключові слова:** мінімальна сприймана різниця температур; частота Найквіста.

#### Вступ

За останні роки широкими темпами відбувається розвиток теплобачення, що привело до збільшення кількості різноманітних сфер, де використовуються тепловізори, а отже, змінюються і вимоги до самого приладу. Інколи якість отримуваної термограми є недостатньою, оскільки остання спотворена, тому необхідна характеристика, яка надасть змогу повноцінно оцінити ефективність роботи тепловізора.

Такою характеристикою є мінімальна сприймана різниця температур. Вона дає змогу визначити 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 верхній об'єкта дослідження [1–4].

У цій статті розглянуто метод розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур на

основі проведеного експерименту на КП СПБ “Арсенал”.

#### Постановка задачі

Стаття присвячена розробці методу розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур субдискретного тепловізора.

#### Основна частина

Мінімальна сприймана різниця температур – це мінімальна різниця температури між штрихами міри Фуко та фоном, за якої спостерігач може розрізнити 4 штрихи на дисплеї [5, 6]. Використовуючи формулу для визначення мінімальної сприйманої різниці температур, отриману в роботі [7], ми можемо розрахувати теоретичне значення цієї величини. Але для початку нам необхідно обчислити значення середньої модуляції за оптимальної фази  $AMOP(v_x)$ . Оптимальна фаза – положення фази  $\phi$ , при

якому кількості штрихів, які може розрізнити спостерігач, дорівнює 3 або 4-м, а середня різниця сигналу  $\Delta S(v_x, \varphi)$  між штрихами є максимальною [6, 8]. Для реального тепловізора необхідно уникати синусоїдальної моделі. Нам необхідно розглядати тільки прямокутну міру. Ми розглянули, що таке оптимальна фаза – положення фази  $\varphi$ , при якому середня чисельність штрихів у дискретному зображенні  $\Delta S(v_x, \varphi)$  є максимальною. З іншого боку, ми сказали, що середня чисельність штрихів  $\Delta S(v_x, \varphi)$  є нічим іншим, як середньою різницею сигналу між штрихами картини, яку ми спостерігаємо. Тоді середня різниця сигналу за оптимальної фази, отриманої для реального тепловізора, визначається як середня модуляція за оптимальної фази (the average modulation at the optimum phase – *AMOP*). Існує припущення, що сприйняття окремого штриха у дискретному зображенні чотириштрихової міри пропорційне різниці сигналів, які складають цей штрих.

Тому ми можемо зробити висновок, що сприйняття зображення картини штриха за оптимальної фази передбачається пропорційним середній модуляції за оптимальної фази *AMOP*.

Тоді середню різницю сигналу за оптимальної фази, отриманої для реального тепловізора, визначають як середню модуляцію за оптимальної фази *AMOP*. Спільно з КП СПБ “Арсенал” були проведені лабораторні дослідження, за допомогою яких змогли визначити середню модуляцію за оптимальної фази.

Було розглянуто 6 штрихових мір, які показані на рис. 1.

Характеристики мір наведено в табл. 1.

У дослідженнях використовувалася мікроболометрична матриця з розміром пікселя 0,025 мм.

Оптимальне положення зображення штрихової міри відносно матриці показано на рис. 2.

За допомогою такого рисунка, на якому показано оптимальне положення зображення штрихової міри відносно матричного приймача випромінювання, ми можемо отримати сигнал, що дорівнює площі накладання зображення міри на піксель, на кожному пікселі, а також розрахувати *AMOP* за допомогою формули [7]

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

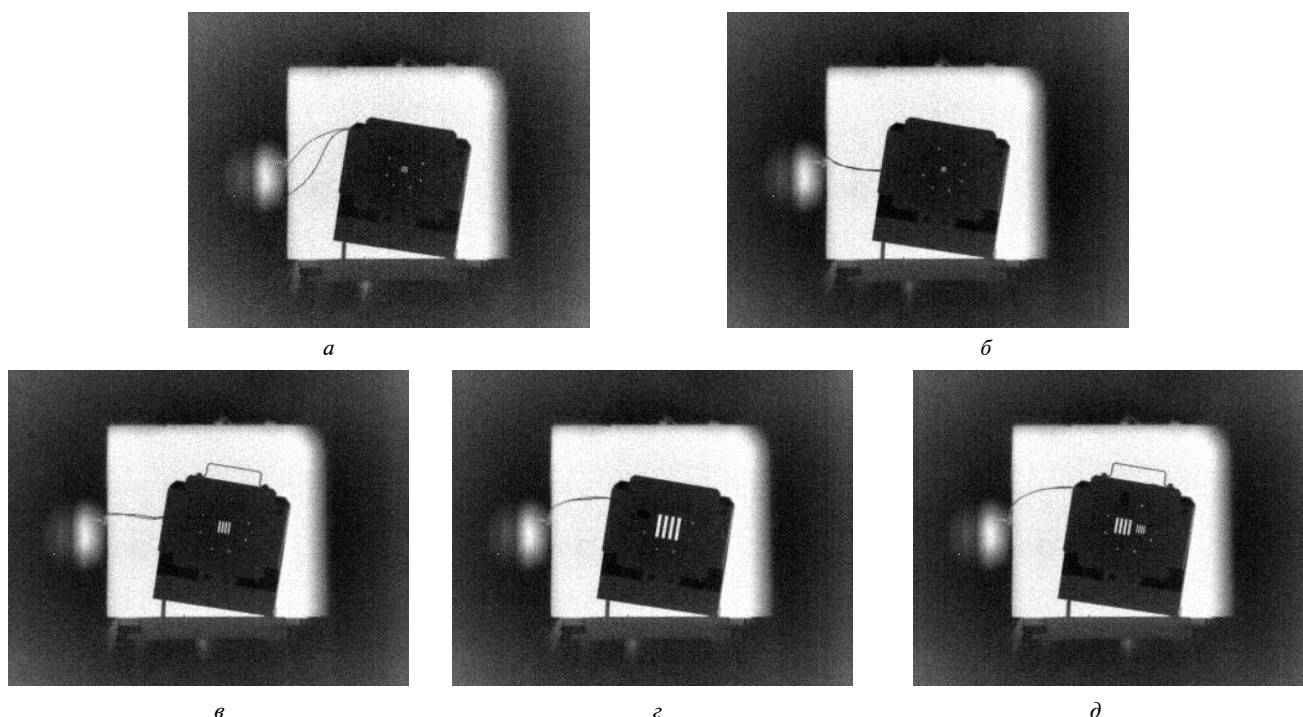


Рис. 1. Штрихові міри, використані в експериментах: *a* – міра СТ1 СДИК 1-01, температура фону 32,96 °С, температура міри 20,66 °С; *б* – міра СТ1 СДИК 1-02, температура фону 35,56 °С, температура міри 21,66 °С; *в* – міра СТ1 СДИК 1-05, температура фону 35,49 °С, температура міри 21,82 °С; *г* – міра СТ1 СДИК 1-33, температура фону 35,07 °С, температура міри 21,62 °С; *д* – міри ПР5-121-1-01 та ПР5-121-1-02, температура фону 35,69 °С, температура міри 21,76 °С

Таблиця 1. Розміри мір Фуко та їх просторова частота в площині мікроболометричної матриці

Позначення міри	$\omega_f$ , мм	$\omega'_f$ , мм	$\nu_x$ , мм <sup>-1</sup>	$\nu_x/\nu_N$
СТ1 СДИК 1-33	2,67	0,0665	7,5	$0,376\nu_N$
ПР5-121-1-01	1,825	0,0455	11,0	$0,55\nu_N$
СТ1 СДИК 1-05	1,34	0,0334	15	$0,75\nu_N$
ПР5-121-1-02	0,95	0,0237	21,1	$1,05\nu_N$
СТ1 СДИК 1-02	0,54	0,0135	37,0	$1,85\nu_N$
СТ1 СДИК 1-01	0,46	0,0115	43,5	$2,174\nu_N$

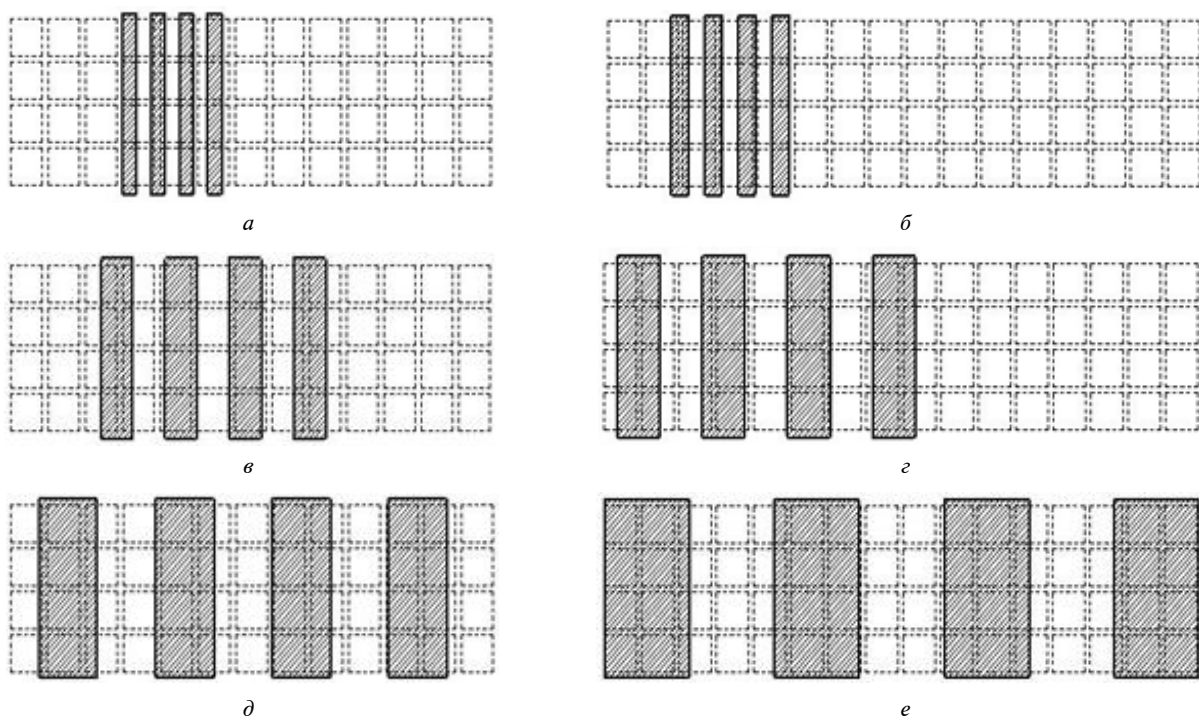


Рис. 2. Відносне розміщення зображення мір на матричному приймачі випромінювання: а – міра СТ1 СДИК 1-01; б – міра СТ1 СДИК 1-02; в – міра ПР5-121-1-02; г – міра СТ1 СДИК 1-05; e – міра СТ1 СДИК 1-33; — — міра Фуко; ..... – пікселі; ■ – зображення міри

Визначимо мінімальну сприйману різницю температур субдискретного тепловізора, використовуючи формулу для розрахунку  $MTDP$  [7]:

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

де  $\alpha_D \beta_D$  – горизонтальний і вертикальний кутові розміри приймача випромінювання,  $t_o$  – час формування одного елемента розкладу зображення,  $f_f$  – частота кадрів,  $t_E$  – стала ока,  $\Delta f$  – смуга пропускання,  $NETD$  – еквівалент-

на шуму різниця температур,  $SNR_r$  – відношення сигнал/шум.

#### Приклад розрахунку $MTDP$

Розглянемо метод розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур тепловізора. Як приклад розглянемо тепловізор із такими характеристиками:

– приймач випромінювання – мікроболометрична матриця – формат матриці  $p \times q = 160 \times 120$ , розмір пікселя  $V_D \times W_D = 25 \times 25$  мкм<sup>2</sup>, температурна чутливість  $NETD = 0,1$  К;

– об'єктив – фокусна відстань  $f_o = 16$  мм, відносний отвір 1:1;

Таблиця 2. Значення *MTDP* для кожної просторової частоти міри

Позначення міри	$v_x, \text{мм}^{-1}$	$v_x/v_N$	<i>АМОР</i>	<i>MTDP</i> , К
СТ1 СДИК 1-33	7,5	$0,376v_N$	1	2,52
ПР5-121-1-01	11,0	$0,55v_N$	0,973	3,799
СТ1 СДИК 1-05	15	$0,75v_N$	0,793	6,356
ПР5-121-1-02	21,1	$1,05v_N$	0,739	9,594
СТ1 СДИК 1-02	37,0	$1,85v_N$	0,031	80
СТ1 СДИК 1-01	43,5	$2,174v_N$	0,011	163

– кутове поле зору  $2\omega_{ox} \times 2\omega_{oy} = 17^\circ \times 12^\circ$ ;

– частота кадрів  $f_f = 30$  Гц;

– штрихова міра знаходиться в оптимальній фазі.

Розрахунок проводимо в такій послідовності.

1. Для розрахунку *MTDP* відомо  $SNR_r = 4,5$  (для ймовірності виявлення штрихової міри 90 %);  $NETD = 0,1$  К;  $f_f = 30$  Гц;  $t_E = 0,2$  Гц·с.

2. Кутові розміри пікселя МБМ визначаємо як

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f'_o} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,56 \text{ мрад.}$$

3. За оптимального узгодження смуги пропускання  $\Delta f$  і часу формування одного елемента розкладу зображення  $t_o$  справедливе співвідношення  $\Delta f \cdot t_o = 0,5$  Гц [9].

4. Після підстановки отриманих даних у формулу розрахуємо мінімальну сприйману різницю температур *MTDP*:

$$\Delta T = MTDP(v_x) = 0,83 \cdot 4,5 \cdot 0,1 \cdot \frac{v_x}{AMOP(v_x)} \times \sqrt{\frac{1,56^2}{0,5 \cdot 30 \cdot 0,2}} = 0,336 \cdot \frac{v_x}{AMOP(v_x)}.$$

Тепер, знаючи значення контрасту та змінюючи період штрихової міри і використовуючи наведену формулу, можемо отримати значення мінімальної сприйманої температури для

кожної просторової частоти міри. Результати розрахунків наведені в табл. 2 і на рис. 3.

Побудуємо графік функції мінімальної сприйманої різниці температур субдискретного тепловізора (вісь *OX* – *MTDP*, вісь *OY* –  $v_x$  – просторова частота).

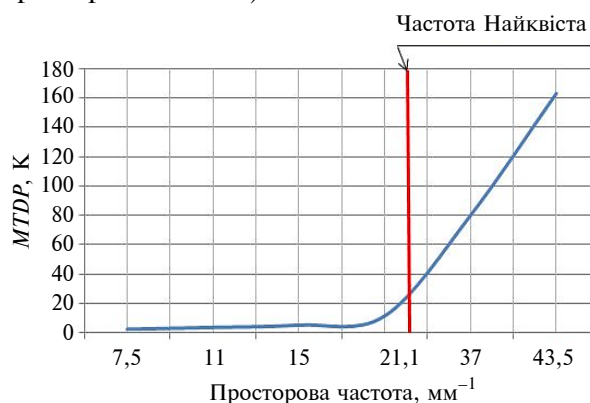


Рис. 3. Функція *MTDP*

### Висновки

Розроблений метод розрахунку мінімальної сприйманої різниці температури дає нам змогу побудувати графік цієї функції. Графік своєю чергою показує, що існує реальна можливість визначити роздільну здатність тепловізора за межами частоти Найквіста за більш високого значення температурного контрасту міри Фуко.

Подальшу роботу слід спрямувати на порівняння та обробку отриманих теоретичних і експериментальних даних, а також на дослідження впливу характеристики тепловізора на мінімальну сприйману різницю температур.

### References

[1] *Experimental Assessment Parameters and Procedures for Characterisation of Advanced Thermal Imagers*. Neuilly-sur-Seine: North Atlantic Treaty Organisation, Research and Technology Organisation, 2003, 60 p.  
 [2] K. Chrzanowski, *Testing Thermal Imagers*. Warsaw: Military University of Technology, 2010, 164 p.

- [3] W. Wittenstein, "Minimum temperature difference perceived – a new approach to assess undersampled thermal imagers", *Optical Eng.*, vol. 38, no. 5, p. 773, 1999. doi: 10.1117/1.602265
- [4] R. Vollmerhausen *et al.*, *Analysis and Evaluation of Sampled Imaging Systems*. Bellingham: SPIE Press, 2010, 292 p.
- [5] R. Fiete, *Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras*. Bellingham: SPIE Press, 2010, 208 p.
- [6] V. Kolobrodov and M. Lutsjuk, "Minimum temperature difference perceived for undersampled medical thermal imager", *Naukovi Visti KPI*, no. 5, pp. 99–103, 2017. doi: 10.20535/1810-0546.2017.5.100137
- [7] M. Lutsjuk *et al.*, "Determination of the optimal phase and the minimum temperature difference perceived", *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Instrument Making*, no. 1, pp. 34–37, 2016. doi: [https://doi.org/10.20535/1970.51\(1\).2016.77750](https://doi.org/10.20535/1970.51(1).2016.77750)
- [8] V. Kolobrodov and M. Lykholit, *Design of Thermal Imaging and Television Observation Systems*. Kyiv: NTUU KPI, 2007, 364 p.

В.Г. Колобродов, М.М. Луцюк, В.М. Тягур

#### МЕТОД РАСЧЕТА МИНИМАЛЬНОЙ ВОСПРИНИМАЕМОЙ РАЗНИЦЫ ТЕМПЕРАТУР СУБДИСКРЕТНЫХ ТЕПЛОВИЗОРОВ

**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. Теорема дискретизации посвящена возможности дискретизированной системы для передачи информации. В случае оптической информации это означает способность системы воспроизводить пространственные частоты, которые образуют конкретное изображение. Основным результатом этой теоремы является установление верхнего предела для частот, которые могут быть точно переданы и восстановлены из исходного сигнала. Если спектр исходного сигнала содержит частоты выше частоты Найквиста, то исходный и повторяющийся спектры перекрываются. В таком случае исходный сигнал фактически невозможно реконструировать. Тепловизор, который позволяет перекрывание исходного спектра с обратно составленным спектром, называется субдискретным. Тепловизор субдискретный, если предварительный фильтр МПФ не равен нулю на частоте Найквиста.

**Цель исследования.** Исследование методики расчета минимальной воспринимаемой разницы температур, что поможет определять разрешение тепловизора за пределами частоты Найквиста.

**Методика реализации.** На основе концепции минимальной разрешаемой разницы температур определяется новая концепция минимальной воспринимаемой разницы температур, которая помогает достичь цели исследования.

**Результаты исследования.** Получен график функции минимальной воспринимаемой разницы температур, позволяющий определять разрешение тепловизора за пределами частоты Найквиста.

**Выводы.** Разработанный метод расчета минимальной воспринимаемой разницы температур позволяет нам построить график этой функции. График в свою очередь показывает, что существует реальная возможность определить разрешение тепловизора за пределами частоты Найквиста при более высоком значении температурного контраста меры Фуко.

**Ключевые слова:** минимальная воспринимаемая разница температур; частота Найквиста.

V.G. Kolobrodov, M.M. Lutsjuk, V.M. Tiagur

#### METHOD OF CALCULATING THE MINIMUM TEMPERATURE DIFFERENCE PERCEIVED OF UNDERSAMPLED THERMAL IMAGERS

**Background.** Nowadays thermal matrix detectors are commonly used. A common feature of these thermal imagers is the opportunity to sample the signal in two directions, horizontal and vertical. The sampling theorem deals with the capacity of a sampled system to transmit information. In case of optical information this capacity means the ability of the system to reproduce the spatial frequencies that form a particular scene. The principal result of this theorem is to establish an upper limit for frequencies that can be accurately transmitted and reconstructed from the original signal. If the spectrum of the original signal contains frequencies higher than the Nyquist frequency, the original spectrum and the replicated spectra overlap. In such a case, the original signal can by no means be reconstructed. An imager that can overlap the original spectrum with the back-folded spectrum is called undersampled. The imager is undersampled if the MTF prefilter is not equal to zero at Nyquist frequency.

**Objective.** The aim of the paper is to study the method of calculating the minimum temperature difference perceived, which will help determine the resolution of the thermal imager outside the Nyquist frequency.

**Methods.** New concept of the minimum temperature difference perceived is determined based on the concept of minimum resolution temperature difference that helps fulfill the objective.

**Results.** A graph of the function of the minimum temperature difference perceived is obtained, which allows determining the resolution of the thermal imager outside the Nyquist frequency.

**Conclusions.** The developed method for calculating the minimum temperature difference perceived allows us to construct a graph of this function. The graph in turn shows that there is a real possibility to determine the resolution of the thermal imager outside the Nyquist frequency, at a higher value of the temperature contrast of the Foucault measure.

**Keywords:** minimum temperature difference perceived; Nyquist frequency.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
4 вересня 2018 року

Прийнята до публікації  
25 квітня 2019 року