

## ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.384.3

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.72034

В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук

НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

### ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФУНКЦІЙ РОЗСІЮВАННЯ ТОЧКИ АБЕРАЦІЙНОГО І ДИФРАКЦІЙНО ОБМЕЖЕНОГО ОБ'ЄКТИВІВ МАТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

**Background.** Thermal imagers are widely used in many areas, but the priority is to use them for military purposes where the primary goal is focused on the identification and recognition of objects in difficult weather conditions. The quality of thermal imaging is estimated by the modulation transfer function (MTF), which is obtained by Fourier transform of the point spread function (PSF).

**Objective.** The aim of the paper is to get the ratio, which would have established a relationship between the PSF aberration and diffraction limited lens matrix imagers.

**Methods.** An approximation of the PSF in the form of a Gaussian function was proposed to consider as PSF limited lens aberration.

**Results.** Based on the analysis of functions of energy concentration, the relationship between the PSF for the aberration and diffraction limited lens was established. The formula, which summarizes all the formulas with correspondingly different conditionally selected levels, which determine the radius of the circle scattering PSF aberration of an optical system (AOS) was obtained.

**Conclusions.** Analysis of the resulting relationship for PSF aberration and diffraction-limited lens showed that produced by PSF luminance highs differ in 2 times, on condition that the radius of the circle scattering AOS is minimum. The formula for calculating the minimum radius of the circle of confusion, in which AOS is considered diffraction limited, is obtained.

**Keywords:** thermal imager; modulation transfer function; point spread function; radius of the circle scattering of lens.

#### Вступ

Сучасні тепловізори – це складні оптико-електронні пристрої безконтактного типу, які формують теплові зображення об'єктів у заданому полі зору та вимірюють їх температуру. Матричний приймач випромінювання (МПВ) є одним із основних елементів тепловізора, який сприймає сфокусований об'єктивом потік інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. Якість тепловізійного зображення залежить від аберацій об'єктива і параметрів МПВ [1].

Необхідність отримувати достатньою мірою повну інформацію про об'єкт спостереження пов'язана з проблемою високоякісної передачі сигналу через оптичну систему (ОС) [2]. Як правило, основним критерієм для оцінки якості тепловізорів вважають модуляційну передавальну функцію (МПФ), яка являє собою модуль передавальної функції, отриманої через перетворення Фур'є від функції розсіювання точки (ФРТ) [3, 4].

ФРТ об'єктивів присвячено значну кількість наукових праць [5–7], у яких наведені й описані різні апроксимаційні формули, але найпоширенішими є дифракційна картина Ейрі та абераційна форма в загальному випадку, апроксимована функцією Гауса [3, 4, 8].

Практично в кожній із робіт аналізується окремо ідеальна або апроксимована формула ФРТ об'єктивів, але не зустрічається праць, у яких було б розглянуто взаємозв'язок цих формул.

#### Постановка задачі

Стаття присвячена отриманню співвідношення, яке б встановлювало взаємозв'язок між функціями розсіювання точки абераційного і дифракційно обмеженого об'єктивів матричних тепловізорів. Практична цінність встановленого взаємозв'язку в тому, що це дасть змогу визначити, які з дешевших ІЧ-об'єктивів з більшими аберациями слід використовувати без істотного погіршення якості тепловізійного зображення.

#### Вихідні положення

Тепловізори, які спостерігають об'єкти з невеликим температурним контрастом у межах обмеженого поля зору, можна вважати лінійними інваріантними системами. Застосування теорії лінійних інваріантних систем для об'єктивів сформулювало поняття оптичної передавальної функції як нормованого Фур'є-перетворення від ФРТ. Функція розсіювання точки

$PSF(x, y)$  являє собою розподіл освітленості  $E(x, y)$  у зображенні ідеального точкового об'єкта, яка сформувалася під дією дифракції та аберацій [3].

Математично ФРТ – це зважена сума реакцій системи на дельта-функції, що є компонентами системи, яку ще називають імпульсною реакцією (відгуком) системи [3, 4, 8]. Загальний вигляд ФРТ визначається як

$$PSF(x, y) = PSF(r) = \frac{E(r)}{E_0},$$

де  $E_0 = E(0)$  – освітленість у центрі зображення ФРТ.

Нормований розподіл освітленості у фокальній площині для дифракційно обмеженої системи (ДОС) [3, 8] становить:

$$PSF_d(r) = \text{besinc}^2\left(\frac{D_p}{\lambda f'_o} r\right), \quad (1)$$

де  $\text{besinc}(x)$  – функція, є аналогом  $\text{sinc}(x)$  функції у двовимірних полярних координатах;  $f'_o$  – фокусна відстань об'єктива;  $D_p$  – діаметр вхідної зіниці об'єктива;  $\lambda$  – довжина хвилі світла. Функція  $\text{besinc}(x)$  визначається як

$$\text{besinc}(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x = 0, \\ 2 \frac{J_1(\pi x)}{\pi x} & \text{при } x \neq 0. \end{cases}$$

де  $J_1(x)$  – функція Бесселя першого роду [9].

Оскільки існує велика кількість апроксимацій ФРТ для абераційно обмеженої системи (АОС), то нормований розподіл освітленості у фокальній площині ОС пропонується визначати у вигляді такої функції (функції Гауса) [3]:

$$PSF_a(r) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right], \quad (2)$$

де  $r_o$  – радіус кружка розсіювання АОС на рівні 0,607 від максимального значення освітленості.

У деяких джерелах автори визначають  $r_o$  на рівні, відмінному від 0,607, наприклад на рівні 0,5 від максимального значення. Тому слід записати формулу ФРТ для АОС, яка б узагальнила всі формули різних авторів з відповідно різними умовно вибраними рівнями, на яких визначають  $r_o$ .

Щоб вивести узагальнену формулу для АОС скористаємося (2). Після простих математичних перетворень отримаємо

$$PSF_a(r) = \exp\left[\ln(h_{PSF})\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] = h_{PSF}\left(\frac{r}{r_o}\right)^2, \quad (3)$$

де  $h_{PSF}$  – рівень, умовно вибраний автором, для опису ФРТ АОС, причому  $h_{PSF} \in (0, 1)$ , де  $h_{PSF} \neq 0$  і  $h_{PSF} \neq 1$ .

Для спрощення подальших розрахунків, зробимо заміни в (1) і (3): для ДОС

$$a = \pi \frac{D_p}{\lambda f'_o}; \quad (4)$$

для АОС

$$b = -\frac{\ln(h_{PSF})}{r_o^2}. \quad (5)$$

Підставимо (4) в (1):

$$PSF_d(r) = \text{besinc}\left(\frac{a}{\pi} r\right)^2 = \left[2 \frac{J_1(ar)}{ar}\right]^2, \quad (6)$$

аналогічно, підставимо (5) в (3):

$$PSF_a(r) = \exp(-br^2). \quad (7)$$

### Взаємозв'язок між ФРТ різних об'єктивів

У теорії оптичних систем еквівалентом ФРТ є функція концентрації енергії (ФКЕ), під якою розуміють частку  $\eta_{oe}$  енергії випромінювання у зображенні точкового джерела в межах ефективного кружка розсіювання [3, 10]. На графіках ФКЕ показує залежність енергії плями розсіювання, що міститься в колі певного діаметра, від величини діаметра за умови, що повна енергія дорівнює 100 %:

$$\eta_{oe} = \frac{\int_0^{r_i} PSF(r) r dr}{\int_0^{\infty} PSF(r) r dr},$$

де  $r_i$  – радіус, у якому розраховується відповідна частка енергії випромінювання.

Скориставшись вказаною вище формулою, знайдемо ФКЕ для кожної з оптичних систем. ФКЕ в загальному вигляді для ДОС визначається як

$$\eta_{oe}^d = \frac{\int_0^{r_d} PSF_d(r) r dr}{\int_0^{\infty} PSF_d(r) r dr} = \frac{I_d^I}{I_d^{II}}. \quad (8)$$

Спочатку знайдемо значення інтеграла в знаменнику  $I_d^{II}$ , де розраховується розподіл освітленості зображення точки, не обмеженої радіусом або обмеженої на безкінечності:

$$I_d^{II} = \int_0^{\infty} PSF_d(r) r dr = \int_0^{\infty} \left[ 2 \frac{J_1(ar)}{ar} \right]^2 r dr = \frac{4}{a^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{r} J_1^2(ar) dr.$$

Для обчислення цього інтеграла скористаємося табличним інтегралом 2.12.31.2 [11]:

$$\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} J_{\mu}(cx) J_{\nu}(cx) dx = 2^{\alpha-1} c^{-\alpha} \Gamma \left[ \begin{matrix} 1-\alpha, \frac{\alpha+\nu+\mu}{2} \\ 1+\frac{\mu-\nu-\alpha}{2}, 1+\frac{\nu+\mu-\alpha}{2}, 1+\frac{\nu-\mu-\alpha}{2} \end{matrix} \right],$$

за умови  $\alpha < 1, (\alpha + \mu + \nu) > 0$ .

Спростимо цей інтеграл для відповідності інтегралу, який необхідно розрахувати. Причому  $\alpha = 0$  і  $\mu = \nu = 1$ . У результаті отримаємо

$$I_d^{II} = \frac{4}{a^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{r} J_1^2(ar) dr = \frac{4}{a^2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{2}{a^2}. \quad (9)$$

Далі розв'яжемо інтеграл, який обмежений певним радіусом:

$$I_d^I = \int_0^{r_d} PSF_d(r) r dr = \frac{4}{a^2} \int_0^{r_d} \frac{1}{r} J_1^2(ar) dr,$$

де  $r_d$  – радіус, у якому розраховується відповідна частка енергії випромінювання для ДОС.

Для розрахунку цього інтеграла скористаємося табличним інтегралом 1.8.3.17 [11]:

$$\int_0^x \frac{1}{x} J_n^2(x) dx = \frac{1}{2n} \left[ 1 + J_0^2(x) + J_n^2(x) - 2 \sum_{k=0}^n J_k^2(x) \right],$$

за умови  $n \geq 1$ .

Зробимо заміну  $ar = x$  в інтегралі  $I_d^I$ , і відповідно до табличного інтеграла ми отримаємо результат:

$$I_d^I = \frac{4}{a^2} \int_0^{r_d} \frac{1}{r} J_1^2(ar) dr = \frac{2}{a^2} [1 - J_0^2(ar_d) - J_1^2(ar_d)]. \quad (10)$$

Знайдемо ФКЕ для ДОС, підставивши (9) і (10) у (8):

$$\eta_{oe}^d = \frac{I_d^I}{I_d^{II}} = 1 - J_0^2(ar_d) - J_1^2(ar_d). \quad (11)$$

Отриманий результат (11) також відомий як *формула Релея* [4, 9].

ФКЕ в загальному вигляді для АОС визначається як

$$\eta_{oe}^a = \frac{\int_0^{r_a} PSF_a(r) r dr}{\int_0^{\infty} PSF_a(r) r dr} = \frac{I_a^I}{I_a^{II}}. \quad (12)$$

Спочатку знайдемо значення інтеграла в знаменнику  $I_a^{II}$ :

$$I_a^{II} = \int_0^{\infty} PSF_a(r) r dr = \int_0^{\infty} \exp(-br^2) r dr.$$

Для обчислення цього інтеграла скористаємося табличним інтегралом 2.3.18.2 [12]. У результаті отримаємо

$$I_a^{II} = \int_0^{\infty} r \exp(-br^2) dr = \frac{1}{2b}. \quad (13)$$

Далі розв'яжемо інтеграл, який обмежений певним радіусом:

$$I_a^I = \int_0^{r_a} PSF_a(r) r dr = \int_0^{r_a} r \exp(-br^2) dr,$$

де  $r_a$  – радіус, у якому розраховується відповідна частка енергії випромінювання для АОС.

Для розрахунку цього інтеграла скористаємося табличним інтегралом 1.3.3.7 [12]:

$$\int_0^x x \exp(-ax^2) dx = -\frac{1}{2a} e^{-ax^2}.$$

Інтегралі ідентичні, тому одразу можемо записати результат:

$$I_a^I = \frac{1}{2b} [1 - \exp(-br_a^2)]. \quad (14)$$

Знайдемо ФКЕ для АОС, підставивши (13) і (14) в (12):

$$\eta_{oe}^a = \frac{I_a^I}{I_a^{II}} = 1 - \exp(-br_a^2). \quad (15)$$

**Взаємозв'язок між ФРТ ДОС і АОС.** Ми отримали дві ФКЕ для ДОС  $\eta_{oe}^d$  (11) і АОС  $\eta_{oe}^a$  (15). Якщо ці ФКЕ прирівняти між собою:  $\eta_{oe}^a = \eta_{oe}^d$ , то ми отримуємо рівняння, яке відображатиме залежність деякого параметра однієї ОС від параметра іншої ОС. При цьому повинна виконуватись умова, що через кожну із ОС, які розглядаються, пропускається однакова кількість енергії. В результаті із (11) і (15) отримуємо

$$\exp(-br_a^2) = J_0^2(ar_d) + J_1^2(ar_d). \quad (16)$$

Радіус кружка розсіювання є основним параметром, що впливає на вигляд ФРТ, яка своєю чергою характеризує якість формування ОС зображення в площині МПВ [1]. Тому розв'язок цього рівняння показує умови, за яких значення кількості енергії, сформованої ФРТ з відповідними  $r_i$ , будуть рівними.

Виразимо з (16)  $r_a$  і зробимо заміну згідно з (4) і (5), а також врахуємо загальний випадок з використанням  $h_{PSF}$ :

$$r_a = r_o \sqrt{\frac{1}{\ln(h_{PSF})} \ln \left[ J_0^2 \left( \pi \frac{D_p}{\lambda f'_o} r_d \right) + J_1^2 \left( \pi \frac{D_p}{\lambda f'_o} r_d \right) \right]}. \quad (17)$$

Отримана формула показує залежність  $r_a$  від  $r_d$  за наперед заданого значення  $r_o = \text{const}$ , яке своєю чергою впливає на ФРТ, формуючи при цьому відповідний її вигляд. Дифракційна межа просторового розділення ОС [2], яка формує зображення, визначається радіусом кружка Ейрі  $r_E$ . Тому для того щоб АОС була дифракційно обмеженою, необхідно, щоб у межах, значення яких рівне  $r_E$ , було сфокусовано 83,8 % всієї енергії [4, 8], що відповідає умовам ДОС.

Отже, якщо в отриманій вище формулі (17) зробити заміну  $r_d = r_E$ , то це означатиме, що ми задали відповідну частку енергії, яка зосереджена в радіусі першого дифракційного мінімуму. Маємо

$$r_a = r_o \sqrt{\frac{1}{\ln(h_{PSF})} \ln \left[ J_0^2 \left( \pi \frac{D_p}{\lambda f'_o} r_E \right) + J_1^2 \left( \pi \frac{D_p}{\lambda f'_o} r_E \right) \right]},$$

причому перший дифракційний мінімум визначається як [3, 4]

$$r_E = 1,22\lambda \frac{f'_o}{D_p}.$$

Після підстановки  $r_a$  набуває вигляду

$$r_a = r_o \sqrt{\frac{1}{\ln(h_{PSF})} \ln \left[ J_0^2(1,22\pi) + J_1^2(1,22\pi) \right]} = r_o \sqrt{\frac{-1,82}{\ln(h_{PSF})}}. \quad (18)$$

Вибравши рівень  $h_{PSF} = e^{-0,5} \approx 0,607$ , на якому визначається  $r_o$ , отримуємо

$$r_a = 1,91 \cdot r_o. \quad (19)$$

Формула (19) визначає частку енергії в АОС, що сфокусована на МПВ, яка відповідає частці енергії, зосередженої в межах першого дифракційного мінімуму  $r_E$  ДОС. Отже, задавши значення межі  $r_a = r_E$  в АОС, отримуємо мінімальний радіус кружка розсіювання  $r_{o, \min}$ , при якому АОС вважають дифракційно обмеженою.

Тоді (19) перепишемо як

$$r_{o, \min} = \frac{r_E}{1,91} = 0,64\lambda \frac{f'_o}{D_p}. \quad (20)$$

На рис. 1 зображено графік двох функцій ДОС і АОС з такими параметрами:  $\lambda = 10$  [мкм],  $f'_o = 50$  [мм] і  $D_p = 50$  [мм]. Крива ДОС є нормованою, а крива АОС – нормованою відносно ДОС. Припустимо, що ОС ідеальні, де ніяких втрат потужності потоку не відбувається, тобто на площину МПВ падає однакова кількість енергії для обох ОС. Форма ФРТ ДОС і АОС – різна, а отже, і площа під ними буде різною, за умови якщо освітленості  $E_o$  і межі  $r_i$  будуть однаковими. Тобто якщо фізично пропускати через АОС і ДОС однакову кількість енергії

(без урахування інших втрат), освітленості  $E_0$  різнитимуться між собою. Математично за однаково нормованих кривих графік АОС займає більшу площу, отже, його амплітуда повинна бути менша в  $\eta_{\text{amp}}$  разів:

$$\eta_{\text{amp}} = \frac{\int_0^{\infty} PSF_d(r) r dr}{\int_0^{\infty} PSF_a(r) r dr} = \frac{I_d^{\text{II}}}{I_a^{\text{II}}} = \frac{4b}{a^2} = 2,012. \quad (21)$$

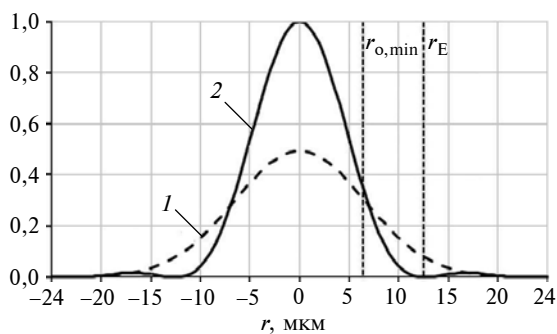


Рис. 1. Графіки нормованих ФРТ для ДОС і АОС (відносно ДОС): 1 –  $PSF_a(r)$ ; 2 –  $PSF_d(r)$

Тому освітленість  $E_0$  для ДОС більша за АОС в  $\eta_{\text{amp}} \approx 2$  рази, при цьому виконується умова  $\eta_{\text{oe}}^a = \eta_{\text{oe}}^d = 83,8 \%$ . Результат показаний на рис. 2.

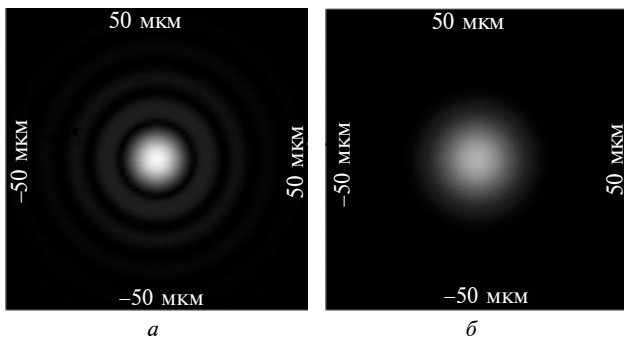


Рис. 2. Розподіл освітленості зображення точки, яка сформувалася в площині МПВ дифракційно обмеженим і абераційним об'єктивами: а – ДОС; б – АОС

Оскільки в деяких джерелах  $r_o$  визначають на рівні, відмінному від 0,607, як згадувалося вище, то доцільно записати формулу (20), яка визначає  $r_{o,\text{min}}$  залежно від вибору рівня  $h_{PSF}$ :

$$r_{o,\text{min}} = r_E \sqrt{-0,55 \cdot \ln(h_{PSF})}. \quad (22)$$

## Висновки

Оскільки існує велика кількість апроксимацій ФРТ для АОС, то було запропоновано розглядати ФРТ у вигляді функції Гауса (2). Крім цього, була отримана формула (3), яка узагальнює всі формули різних авторів з відповідно різними умовно вибраними рівнями  $h_{PSF}$ , на яких визначають  $r_o$  для ФРТ АОС.

Визначено ФКЕ для кожної ОС, що дало змогу встановити взаємозв'язок між радіусами кружків розсіювання об'єктивів ДОС і АОС, який визначається співвідношенням (22), причому  $r_{o,\text{min}} \leq r_o$ . З аналізу умови, де через кожену із ОС пропускається однакова кількість потоку енергії (без урахування інших втрат), було визначено, що максимуми освітленості  $E_0$  різнитимуться між собою. В результаті за такої умови максимум освітленості  $E_0$  ДОС більший, ніж АОС, у  $\eta_{\text{amp}} \approx 2$  рази. Практичний результат продемонстровано на рис. 2.

Встановлений взаємозв'язок ФРТ абераційного і дифракційного об'єктивів матричних тепловізорів дасть змогу проаналізувати ОС і вибрати більш дешевий ІЧ-об'єктив з більшими аберациями без істотного погіршення якості отриманого зображення. Спираючись на отримані в роботі результати, подальші дослідження ми спрямуємо на визначення впливу радіуса кружка розсіювання об'єктива на роздільну здатність тепловізора та функцію ймовірності розпізнавання, яка використовується для визначення максимальної дальності розпізнавання.

## Список літератури

1. Kolobrodov V.G., Tymchyk G.S., Nguen Q.A. The problems of designing coherent spectrum analyzers // Proc. SPIE. – 2013. – 9066. – P. 90660Z-1–90660Z-7.
2. Kolobrodov V.G., Tymchyk G.S., Kolobrodov M.S. The diffraction limit of an optical spectrum analyzer // Proc. SPIE. – 2015. – 9809. – P. 98090F-1–98090F-7.

3. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.
4. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С. Дифракційна теорія оптичних систем. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 148 с.
5. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1983. – 696 с.
6. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы “смотрящего типа”. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
7. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
8. Vollmerhausen R.H., Reago D., Driggers R.G. Analysis and evaluation of sampled imaging systems. – Washington: SPIE Press, 2010. – 304 p. doi:10.1117/3.853462
9. Грей Э., Мэтьюз Г.Б. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1953. – 371 с.
10. Колобродов В.Г., Протасов В.Г., Піронер Я.М. Функція розсіювання точки телевізійної системи спостереження з матричним приймачем випромінювання // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2003. – № 4. – С. 103–108.
11. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.Ю. Интегралы и ряды. Специальные функции. – 2-е изд., исправ. – М.: Физматлит, 2003. – 664 с.
12. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.Ю. Интегралы и ряды. Элементарные функции. – 2-е изд., исправ. – М.: Физматлит, 2002. – 632 с.

### References

1. V.G. Kolobrodov *et al.*, “The problems of designing coherent spectrum analyzers”, *Proc. SPIE*, vol. 9066, pp. 90660Z-1–90660N-7, 2013.
2. V.G. Kolobrodov *et al.*, “The diffraction limit of an optical spectrum analyzer”, *Proc. SPIE*, vol. 9809, pp. 98090F-1–98090F-7, 2015.
3. V.G. Kolobrodov and M.I. Lykholyt, *Design of Thermal Imaging and Television Observation Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2007 (in Ukrainian).
4. V.G. Kolobrodov and G.S. Tymchyk, *The Diffraction Theory of Optical Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2011 (in Ukrainian).
5. M.M. Miroshnikov, *Theoretical Basis of Optoelectronic Devices*, 2nd ed. Leningrad, Mashinostroenie, 1983 (in Russian).
6. V.V. Tarasov and Y.G. Yakushenkov, *Infrared Systems of Watching Type*. Moscow, Russia: Logos, 2004 (in Russian).
7. Y.G. Yakushenkov, *Theory and Calculation of Optoelectronic Devices*, 5th ed. Moscow, Russia: Logos, 2004 (in Russian).
8. R.H. Vollmerhausen *et al.*, *Analysis and Evaluation of Sampled Imaging Systems*. Washington: SPIE Press, 2010. doi:10.1117/3.853462
9. E. Grey and G.B. Mathews, *Bessel Functions and Their Application to Physics and Mechanics*. Moscow, USSR: Izdatel'stvo Inostrannoj Literatury, 1953 (in Russian).
10. V.G. Kolobrodov *et al.*, “The point scattering function of the observation television system with matrix radiation detector”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 4, pp. 103–108, 2003 (in Ukrainian).
11. A.P. Prudnikov *et al.*, *Integrals and Series. Special Functions*, 2nd ed. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2003 (in Russian).
12. A.P. Prudnikov *et al.*, *Integrals and Series. Elementary Functions*, 2nd ed. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2002 (in Russian).

В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФУНКЦІЙ РОЗСІЮВАННЯ ТОЧКИ АБЕРАЦІЙНОГО І ДИФРАКЦІЙНО ОБМЕЖЕНОГО ОБ'ЄКТИВІВ МАТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

**Проблематика.** Тепловізори набули широкого застосування в багатьох сферах, але пріоритетним є їх використання для військових потреб, де основна задача зосереджена на виявленні і розпізнаванні об'єктів у складних погодних умовах. Якість тепловізійного зображення оцінюють модуляційною передавальною функцією (МПФ), яку отримують через перетворення Фур'є від функції розсіювання точки (ФРТ).

**Мета дослідження.** Отримати співвідношення, яке б встановлювало взаємозв'язок між ФРТ абераційного і дифракційно обмеженого об'єктивів матричних тепловізорів.

**Методика реалізації.** Як ФРТ абераційно обмеженого об'єктива було запропоновано розглядати апроксимацію ФРТ у вигляді функції Гауса.

**Результати дослідження.** На основі аналізу функцій концентрації енергії встановлено взаємозв'язок між ФРТ для абераційного і дифракційно обмеженого об'єктивів. При цьому було отримано формулу, яка узагальнює всі формули з відповідно різними умовно вибраними рівнями, на яких визначають радіус кружка розсіювання ФРТ абераційної оптичної системи (АОС).

**Висновки.** Аналіз отриманого взаємозв'язку для ФРТ абераційного і дифракційно обмеженого об'єктивів показав, що максимуми освітленості отриманих ФРТ різняться між собою в 2 рази за умови, коли радіус кружка розсіювання АОС мінімальний. Отримано формулу для розрахунку мінімального радіуса кружка розсіювання, при якому АОС вважають дифракційно обмеженою.

**Ключові слова:** тепловізор; модуляційна передавальна функція; функція розсіювання точки; радіус кружка розсіювання об'єктива.

В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пинчук

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ ФУНКЦИЙ РАССЕЙНИЯ ТОЧКИ АБЕРРАЦИОННОГО И ДИФРАКЦИОННО ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕКТИВОВ МАТРИЧНЫХ ТЕПЛОВИЗОРОВ

**Проблематика.** Тепловизоры нашли широкое применение во многих областях, но приоритетным является их использование для военных нужд, где основная задача сосредоточена на выявлении и распознавании объектов в сложных погодных условиях. Качество тепловизионного изображения оценивают модуляционной передаточной функцией (МПФ), которую получают путем преобразования Фурье от функции рассеяния точки (ФРТ).

**Цель исследования.** Получить соотношение, которое бы устанавливало взаимосвязь между ФРТ аберационного и дифракционно ограниченного объективов матричных тепловизоров.

**Методика реализации.** В качестве ФРТ аберационно ограниченного объектива было предложено рассматривать аппроксимацию ФРТ в виде функции Гаусса.

**Результаты исследования.** На основе анализа функций концентрации энергии установлена взаимосвязь между ФРТ для аберационного и дифракционно ограниченного объективов. При этом была получена формула, которая обобщает все формулы с соответственно различными условно выбранными уровнями, на которых определяют радиус кружка рассеяния ФРТ аберационной оптической системы (АОС).

**Выводы.** Анализ полученной взаимосвязи для ФРТ аберационного и дифракционно ограниченного объективов показал, что максимумы освещенности полученных ФРТ отличаются между собой в 2 раза при условии, когда радиус кружка рассеяния АОС минимальный. Получена формула для расчета минимального радиуса кружка рассеяния, при котором АОС считают дифракционно ограниченной.

**Ключевые слова:** тепловізор; модуляційна передаточна функція; функція розсіювання точки; радіус кружка розсіювання об'єктива.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського"

Надійшла до редакції  
20 червня 2016 року