

## МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 621.384.326

### АНАЛІЗ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЦИФРОВИХ КАМЕР НА ОСНОВІ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ШУМОВОЇ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ

<sup>1)</sup>Колобродов В.Г., <sup>2)</sup>Шустер Норберт, <sup>1)</sup>Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”, м.Київ, Україна,  
<sup>2)</sup>Vision & Control GmbH, Suhl, Germany

*Запропоновано новий підхід до визначення просторового розділення оптичних та оптико-електронних приладів, що створюють зображення, який ґрунтується на геометричній шумовій смузі пропускання GNBW. Отримано співвідношення, що дозволяють розрахувати класичні розділення, якщо відома геометрична смуга GNBW.*

#### 1. Вступ

В останній час широкого розповсюдження набули цифрові камери, в яких використовуються матричні приймачі випромінювання (МПВ). Це перш за все цифрові фотоапарати, відеокамери з ПЗЗ-приймачами, тепловізори з мікроболометричними та піроелектричними матрицями [1 – 3]. Якість зображення, що створюють цифрові камери, визначається їх просторовою роздільною здатністю. Просторова роздільна здатність це є величина, обернена до подвійної найменшої відстані між двома точками, що формуються роздільно. Існує декілька класичних визначень роздільної здатності, але всі вони стосуються оптичних систем, що створюють зображення [4]. Тому при застосуванні класичного розділення для оцінки якості цифрових камер, де зображення формується оптичними та електронними елементами, виникають певні труднощі. Дана стаття присвячена аналізу роздільної здатності цифрових камер, який ґрунтується на геометричній шумовій смузі пропускання GNBW (Geometrical Noise Bandwidth).

#### 2. Визначення роздільної здатності цифрових камер

Традиційно роздільна здатність оптичних систем, що створюють зображення, характеризується кружком розсіювання в площині зображення [5, 6]. Наприклад, діаметр кружка розсіювання в 135 – мм фотографії становить 30 мкм, а в середньо форматній – до 50 мкм. Роздільна здатність МПВ характеризується кількістю пікселів і чутливою площею приймача. Як пов'язати ці параметри з діаметром кружка розсіювання фотоапарата ?

Для визначення роздільної здатності оптико-електронних приладів (ОЕП) з великим успіхом використовується теорія лінійних систем [7, 8]. Згідно цієї теорії інваріантні елементи ОЕП характеризуються модуляційною передаточною функцією (МПФ). При цьому загальна МПФ ОЕП визначається добутком МПФ окремих його елементів. Для цифрової камери

$$M_{dc}(v_x, v_y) = M_o(v_x, v_y) \cdot M_D(v_x, v_y) \quad (1)$$

де  $M_o(v_x, v_y)$  – МПФ об'єктива;  $M_D(v_x, v_y)$  – МПФ МПВ;

$v_x, v_y$  – просторові частоти в площині зображення (МПВ).

В електронних інформаційних систем для визначення часової роздільної здатності багато років з великим успіхом застосовується ефективна шумова смуга  $\Delta f$ . Якщо на вхід такої системи надходить “білий” шум, то

$$\Delta f = \int_0^{\infty} M_{el}^2(f) df, \quad (2)$$

де  $M_{el}(f)$  – МПФ електронної системи.

По аналогії з формулою (2) геометричну шумову смугу пропускання визначимо як [4, 8]

$$GB = \int_{-\infty-\infty}^{\infty\infty} M_{dc}^2(v_x, v_y) dv_x dv_y. \quad (3)$$

При цьому геометричний шум можна розглядати як кружок розсіювання.

Якщо МПФ  $M_{dc}(v_x, v_y)$  являє собою функцію, що має вісь симетрії, тобто

$M_{dc}(v_x, v_y) = M_{dc}(v_r)$ , де  $v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  – радіус просторової частоти в полярній системі координат, то геометрична шумова смуга визначається як

$$GB = 2\pi \int_0^{\infty} M_{dc}^2(v_r) v_r dv_r. \quad (4)$$

Для встановлення зв'язку геометричної шумової смуги  $GB$  з діаметром кружка розсіювання камери  $D_c$  будемо вважати, що освітленість в межах кружка розсіювання постійна. МПФ такої камери має вигляд [6]

$$M_{dc}(v_r) = \frac{2J_1(\pi \cdot D_c \cdot v_r)}{\pi \cdot D_c \cdot v_r}, \quad (5)$$

де  $J_1$  – функція Бесселя першого порядку.

Після підстановки (5) в (4) маємо

$$GB = 2\pi \int_0^{\infty} \left[ \frac{2J_1(\pi \cdot D_c \cdot v_r)}{\pi \cdot D_c \cdot v_r} \right]^2 v_r dv_r = \frac{4}{\pi \cdot D_c^2}. \quad (6)$$

При розрахунку останнього інтегралу використано табличний інтеграл

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{x} J_n^2(cx) dx = \frac{1}{2}. \quad (7)$$

З виразу (6) маємо 
$$D_c = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot GB}}. \quad (8)$$

### **3. Приклади розрахунку кружків розсіювання**

#### **3.1. Камера з фотоплівкою**

Сучасні фотоапарати і цифрові камери використовують високоякісні об'єктиви, роздільна здатність яких обмежена дифракцією світла на вхідній зіниці. МПФ дифракційно обмежених об'єктивів описується функцією [6]

$$M_o(v_r) = \begin{cases} 1 - a \cdot v_r, & \text{при } 0 \leq v_r \leq a^{-1}; \\ 0 & \text{в інших випадках,} \end{cases} \quad (9)$$

де  $a = 1,218 \cdot \lambda \cdot k$ ;  $k$  – діафрагмове число об'єктива.

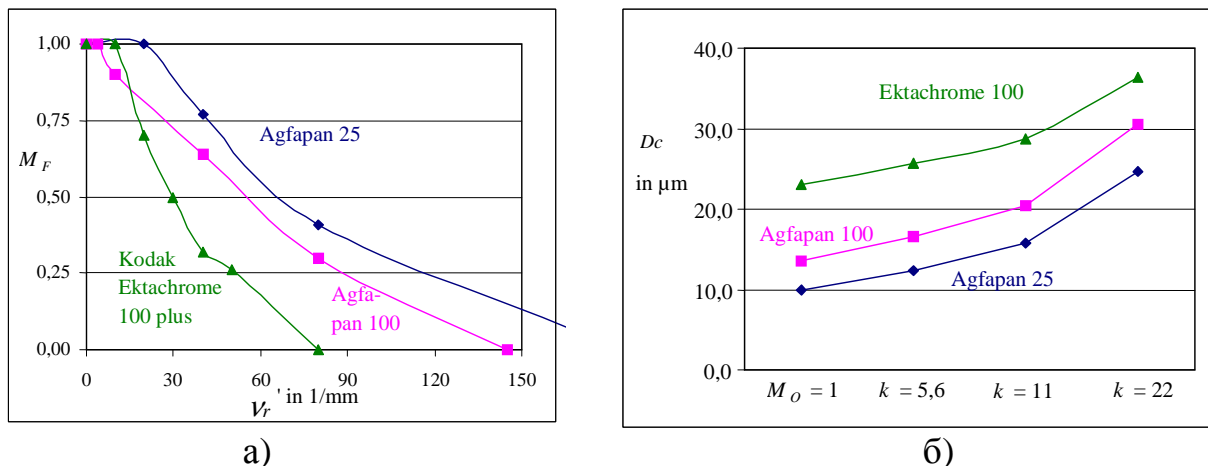
Так як МПФ (9) є осесиметрична функція, то для знаходження геометричної шумової смуги використаємо формулу (4)

$$GB = 2\pi \int_0^{a^{-1}} (1 - a \cdot v_r)^2 v_r dv_r = 0,353 \cdot \left( \frac{1}{\lambda \cdot k} \right)^2. \quad (10)$$

Діаметр результуючого кружка розсіювання фотоапарата, в якому використовується фотоплівка з МПФ  $M_f(v_r)$ , може бути розрахований за (8) як

$$D_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{\int_0^{\infty} M_o^2(v_r) \cdot M_f^2(v_r) \cdot v_r \cdot dv_r}}. \quad (11)$$

Результати розрахунків за формулою (11) для різних фотоплівок наведені на рис. 1.



а) – МПФ фотоплівок, б) – кружок розсіювання камери

Рисунок 1 - Концепція геометричної шумової смуги для камери з фотоплівкою

### 3.2. Камера з монохромним МПВ

В таких камерах як МПВ можуть використовуватися ПЗЗ (монохромні відеокамери), а також мікроболометричні та піроелектричні матриці (тепловізори), які мають періодичну структуру пікселів (рис. 2), що призводить до проблеми вибірки. Фундаментальним параметром вибірки є частота Найквіста

$$v_{Na} = \frac{1}{2p'}, \quad (12)$$

де  $p'$  – період матричної структури приймача (відстань між сусідніми пікселями).

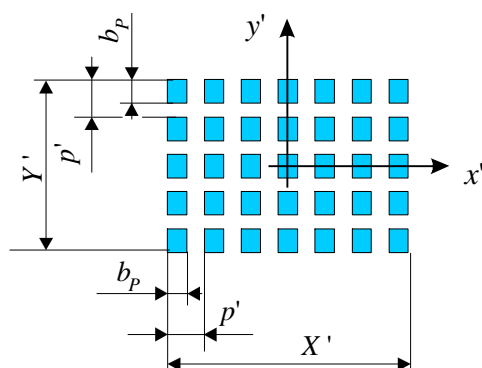


Рисунок 2 - Спрощена геометрія класичного цифрового приладу відображення з  $7 \times 5$  пікселями, площею відображення  $X' \times Y'$  та площею чутливого елемента пікселя  $b_p^2$

Об'єкти, що мають періодичну яскравість в площині зображення з періодом  $g' > 2p'$  реєструються МПВ з різними втратами контрасту. Для об'єктів у вигляді періодичної ґратки з періодом  $g' < 2p'$  МПФ генерує псевдоструктури, які називаються картинами Моєра (Moire).

Частота Найквіста для об'єктів з діагональною орієнтацією зменшується до величини

$$v_{Nd} = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{Na} \quad (13)$$

так як відстань між пікселями у діагональному напрямку в  $\sqrt{2}$  більша, ніж у горизонтальному (вертикальному) напрямку.

Із-за проблеми вибірки для МПВ як границі інтегрування у виразі (3) обирається частота Найквіста. Границя інтегрування буде найбільшою для об'єктів з осью орієнтацією уздовж осей  $x$  або  $y$  і найменшою для об'єктів з діагональною орієнтацією.

Двомірна МПФ квадратного пікселя

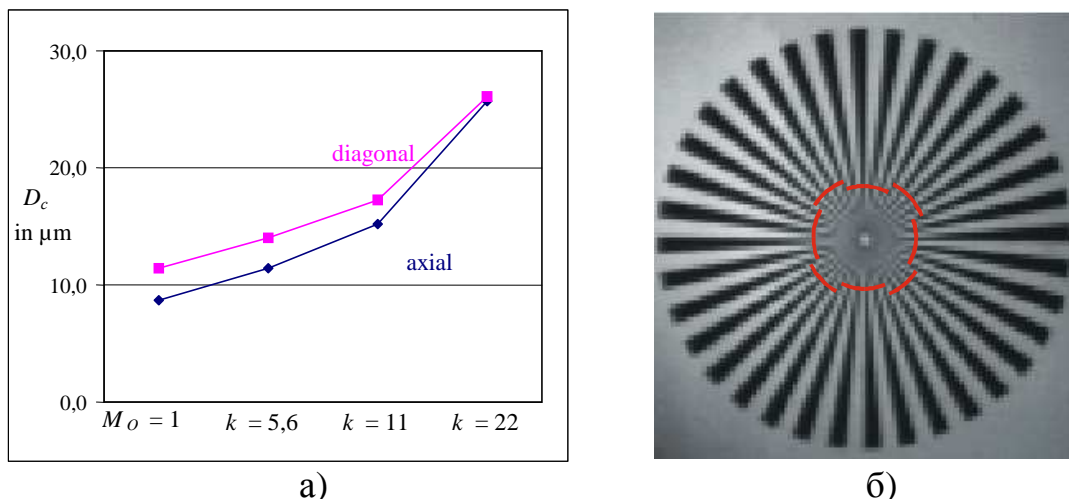
$$M_D(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi \cdot b_p \cdot v_x)}{\pi \cdot b_p \cdot v_x} \frac{\sin(\pi \cdot b_p \cdot v_y)}{\pi \cdot b_p \cdot v_y}, \quad (14)$$

де  $b_p$  – сторона чутливої площадки.

Результати розрахунків діаметра кружка розсіювання цифрової камери, яка має 1,3 млн. пікселів, за формулою (8) з урахуванням формул (4), (9) і (14) наведені рис. 3 зліва. Спостерігається відмінність у кружках розсіювання уздовж осей від діагонального напрямку. При збільшенні кружка розсіювання об'єктива за рахунок збільшення діафрагмового числа відмінність уздовж різних напрямків зменшується. На наш погляд, діаметр кружка розсіювання таких цифрових камер доцільно характеризувати середньою величиною для осевого і діагонального напрямків.

Теоретичні розрахунки були підтверджені експериментальними дослідженнями роздільної здатності цифрової камери. В якості тест-об'єкта було використано зірку компанії Siemens. На рис. 3 справа зображена така зірка, де видно

дуги, які відповідають діаметру кружка розсіювання уздовж певних напрямків. Для якісного сприйняття зображення необхідно, щоб максимальний діаметр кружка розсіювання цифрової камери був менший за діаметр кружка, що відповідає зоровому розділенню.



а) - розрахунок для різних МПФ об'єктива; б) - зображення тест-об'єкта у вигляді зірки Siemens, яке отримане монохромною ПЗЗ-камерою при  $k = 8$

Рисунок 3 - Кружок розсіювання монохромної цифрової камери з 2/3'' ПЗЗ-матрицею, яка має 1,3 млн. пікселів розміром 6,7 мкм

Для підвищення роздільної здатності цифрових камер використовується мікросканування матриці в напрямках  $x'$  і  $y'$  з кроком в половину пікселя. Кількість пікселів, які формують зображення у кожному напрямку, подвоюється після чотирьох кроків. Мікросканування здійснюється, як правило, п'єзоелектричним пристроєм.

### 3.3. Камера з Fuji Super CCD

Фірма Honeycomb запропонувала нову просторову структуру ПЗЗ-матриці, яка отримала назву Fuji Super CCD. Принципова відмінність такої матриці від класичних ПЗЗ-матриць полягає в оригінальній геометричній формі пікселів та їх взаємному розташуванні. Чутливі площадки пікселів мають восьмикутну форму і підвищений коефіцієнт заповнення (рис. 4). В першому наближенні таку чутливу площадку можна розглядати як круг з радіусом  $r_D$ . Тоді МПФ піксела Fuji Super CCD має вигляд (5)

$$M_D(v_r) = \frac{2J_1(2\pi \cdot r_D \cdot v_r)}{2\pi \cdot r_D \cdot v_r}. \quad (15)$$

Для розрахунку шумової смуги  $GB$  необхідно визначити частоту Найквіста.

Із рис. 4 видно, що осьові пікселі розташовані на відстані в  $\sqrt{2}$  більшій, ніж діагональні. Тому частота Найквіста в діагональному напрямку  $\nu_{Nd}$  буде в  $\sqrt{2}$  більшою, ніж в осьовому напрямку  $\nu_{Na}$ , тобто

$$\nu_{Nd} = \sqrt{2}\nu_{Na} = \sqrt{2} \frac{1}{2p'}. \quad (16)$$

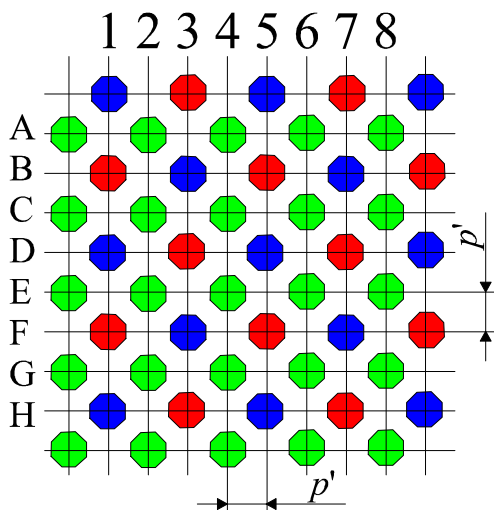
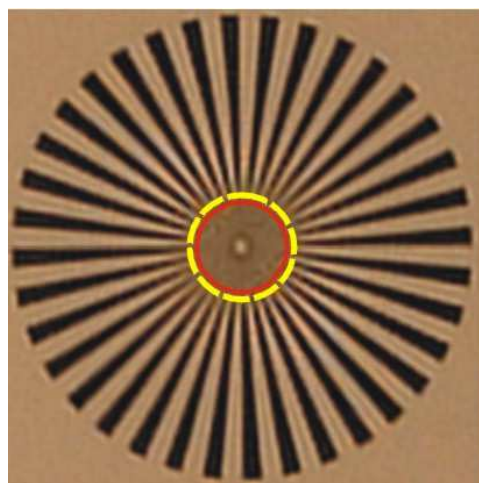
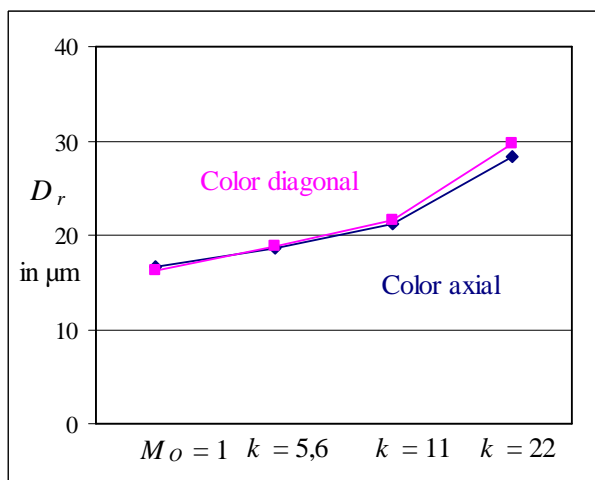


Рисунок 4 - Спрощена геометрія матриці Fuji Super CCD

На рис. 5 представлені результати розрахунку діаметра кружка розсіювання камери з Fuji Super CCD. На том же рисунку справа показано зображення тестової зірки компанії Siemens, яке отримане за допомогою цієї камери. Головна перевага такої камери перед класичними камерами з МПВ прямокутної растрової структури полягає в тому, що у цій камері роздільна здатність є симетричною, тобто не залежить від напрямку.



а)

б)

а) - розрахунок для різних МПФ об'єктива; б) - зображення тест-об'єкта у вигляді зірки Siemens, яке отримане камерою Fuji FinePix S1 Pro-camera при  $k = 8$ .

Рисунок 5. Кружок розсіювання цифрової камери з приймачем Fuji Super CCD, який має 6 млн. пікселів розміром 7,3 мкм

## Висновки

1. Запропонована геометрична шумова смуга пропускання – новий параметр для оцінки роздільної здатності цифрових камер. Теоретичні і експериментальні дослідження підтвердили ефективність застосування цього параметру

для подальших досліджень оцінки якості зображення в оптичних та оптико-електронних системах.

2. Діаметр кружка розсіювання цифрової камери однозначно визначається геометричною шумовою смугою за формулою (8).
3. Порівняння камер, що використовують фотоплівку, з цифровими камерами, свідчить про те, що при кількості пікселів в кадрі більшому 4 млн., цифрові камери не поступаються фотокамерам.

#### **Література**

1. Надеждин Н.Я. Знакомьтесь, цифровые фотоаппараты. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 304 с.
2. Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М.: Радио и связь, 1992. – 400 с.
3. Хребтов И.А., Маляров В.Г. Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения // Оптический журнал, 1997. - №6. – С. 3 – 17.
4. Колобродов В.Г., Шустер Н. Геометрична шумова смуга пропускання – новий критерій для визначення роздільної здатності оптичних та оптико-електронних приладів // Вісті НТУУ «КПІ», 2003. – №2. – С. 110 – 112.
5. Бетенски Э., Хонкинс Р., Шеннон Р. и др. Проектирование оптических систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 432 с.
6. Колобродов В.Г., Шустер Норберт. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування). – Київ: Друк. ДККП “Тираж”. – 1999. – 340 с.
7. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. – Л.: Машиностроение, 1989. – 387 с.
8. Schuster N. Optical systems for high resolution digital still cameras // Design and Engineering of Optical Systems . Proc. SPIE, No 3737. – 1999. – P. 202 – 213.

<p>Колобродов В.Г., Шустер Н. <b>Анализ разрешающей способности цифровых камер на основе геометрической шумовой полосы пропускания</b></p> <p>Исследована разрешающая способность цифровых камер на основе геометрической шумовой полосы пропускания GNBW. Рассчитана зависимость диаметра кружка рассеяния камеры с фотоплёнкой, монохромным и цветным ПЗС-приемниками от диафрагменного числа объектива. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения геометрической полосы GNBW для оценки качества изображения в цифровых камерах.</p>	<p>Kolobrodov V.G. , Schuster N. <b>Analyze of the Digital Cameras Resolution by the Geometrical Noise Bandwidth</b></p> <p>The digital cameras resolution was investigated metrical Noise Bandwidth GNBW. The depended resulting diameter of the confusion circle of cam film, monochrome and color CCD from the F-number objective was calculated. The effective applied GNBW for the analyze of image quality in digital was corroborated by the experimental investigation</p>
---	--

*Надійшла до редакції  
16 травня 2003 року*