

УДК 621.384.3

ТЕСТУВАННЯ РОЗДІЛЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЦИФРОВИХ ФОТОКАМЕР

*Дейко А.В., Колобродов В.Г., Кучугура І.О., Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

Запропоновано визначити просторову розділювальну здатність цифрової фотокамери новим методом, який дає змогу досить точно зробити вимірювання і не потребує спеціального обладнання, а самі вимірювання займають декілька хвилин.

Ключові слова: просторова розділювальна здатність; модуляційна передаточна функція.

Вступ

Використання цифрових камер стало невід’ємною частиною сучасного життя. Передумовою вибору цифрової камери є отримання якісного цифрового зображення, яке визначається розділювальною здатністю камери. Перелік наведених в паспортах характеристик цифрових камер, в основному, декларує можливості, які в свою чергу можуть бути не реалізовані. Єдиного підходу до вимірювання розділювальної здатності цифрової фотокамери не існує [1 - 11]. Використовуються великогабаритні установки та складні обчислення, які займають багато часу. У статті представлено огляд сучасних методів вимірювання розділювальної здатності цифрової камери та запропоновано новий метод.

Постановка задачі

У статті описано розроблений новий метод вимірювання розділювальної здатності цифрової камери, який би не потребував спеціального обладнання і був досить доступним. Це надасть змогу пересічному громадянину, який не має спеціальних знань, вмінь і навичок, професійно підійти до вибору камери.

Просторова розділювальна здатність цифрової камери характеризує можливість розділяти мінімальні розміри об’єктів і їх елементів. У загальному випадку вона обмежується дифракцією оптичної системи (ОС), розмірами чутливої площадки (пікселя), кроком матричного приймача випромінювання (МПВ), шириною частотної смуги пропускання електронного тракту. Розділювальну здатність ОС оцінює критерій Релея або функція розсіювання точки ФРТ.

Об’єктивною (у сенсі незалежності від людини) характеристикою розділювальної здатності знімальної системи є залежність її *чутливості* від *просторової частоти* (відносної чутливості, нормованого значення на нульовій просторовій частоті). Цю характеристику фахівці у галузі радіотехніки називають модуляційно-частотною характеристикою, а оптики – модуляційною передаточною функцією (МПФ). МПФ (Modulation transfer function) повністю характеризує властивості оптичного приладу розділяти деталі різних розмірів у його полі зору. Тобто, чим більше дрібних деталей здатна передати камера, тим вище її просторове розділення.

Методи вимірювання розділювальної здатності цифрових камер

Традиційні методи вимірювання можна умовно розділити на два основних види

[1-11]. Перший підхід заснований на прямому вимірі контрасту (або модуляції), другий - на вимірі апертурної характеристики пікселя ПЗЗ.

Вимірювання МПФ. Метод заснований на прямому вимірі контрасту (або модуляції) від набору мір різної просторової частоти. У наборі присутні ґратки різної орієнтації та з різним періодом пари (прозорих і непрозорих смужок). Спостерігаючи камерою набір таких мір через коліматор з відомою фокусною відстанню, ми можемо виміряти модуляцію від кожної, наявної в наборі мір. Просторова частота $\nu_{X_{tp}}$ на фотоприймачі визначається через відношення фокусних відстаней об'єктива камери f'_o і коліматора f'_c , а також відстань між двома непрозорими смужками X_{tp}

$$\nu_{X_{tp}} = \frac{1}{X_{tp}} \frac{f'_o}{f'_c} \text{ [пар ліній / мм]}. \quad (1)$$

Строгі виміри вимагають синусоїдального закону зміни пропускання ґратки міри від 100% прозорого до повністю непрозорого. Таку міру є мірою абсолютного контрасту. Реальні міри мають зазвичай близький до прямокутного закон світлопропускання приблизно від 95% прозорого до 5% непрозорого. Це більш технологічно й має цілком достатню точність для більшості застосувань.

Модуляція (контраст) визначається як

$$M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (2)$$

де L_{\max} та L_{\min} – максимальна й мінімальна яскравості у зображенні синусоїдальної міри на екрані дисплея камери.

Уявимо серію зображень, отриману однією камерою. На першому кадрі одна чорна смуга, на другому дві, на третьому шість і так далі. Починаючи з певної кількості ліній на знімках почнуть зливатися і, зрештою, зіллються повністю, досягши нульового контрасту (рис. 1).

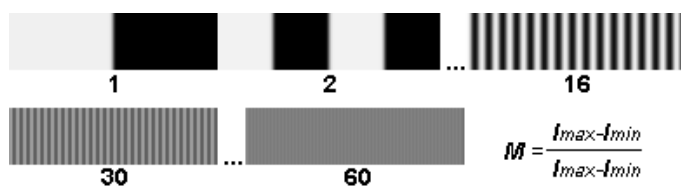


Рис.1. Зображення міри на екрані дисплея камери

По осі абсцис відкладають просторову частоту в [парах ліній / мм], а по осі ординат – контраст. Отже, очевидна залежність контрасту від просторової частоти ліній. За певних обмежень, ця залежність і є модуляційною передаточною функцією, яка плавно падає від одиниці до нуля при збільшенні просторової частоти.

Відомо, що для просторово-інваріантних систем внесок окремих складових у результуючу МПФ системи визначається через добуток МПФ цих складових [12]. У випадку камери на ПЗЗ двома основними складовими є:

- 1) МПФ об'єктива $M_o(\nu_x, \nu_y)$;

2) МПФ матричного приймача випромінювання $M_D(v_x, v_y)$, що, у свою чергу, складається з:

- МПФ накопичення $M_{D_s}(v_x, v_y)$;
- МПФ неефективності переносу зарядів у ПЗЗ $M_{D_{ef}}(v_x, v_y)$;
- МПФ так званої бічної дифузії зарядів (проникнення зарядів з даного пікселя в сусідні) $M_{D_d}(v_x, v_y)$.

МПФ накопичення обумовлена дискретністю й геометрією пікселя фотоприймача ПЗЗ. Цю складову вимірювати не потрібно, так як геометрія пікселя ПЗЗ відома з високою точністю. МПФ цієї складової для прямокутного пікселя розраховується за формулою [12]:

$$M_{D_s}(v_x, v_y) = \text{sinc}(V_D v_x) \cdot \text{sinc}(W_D v_y), \quad (3)$$

де V_D, W_D – розмір чутливої площадки; v_x, v_y – просторові частоти в площині МПВ. Для прикладу, на рис.2 наведемо МПФ накопичення для двох різних ПЗЗ.

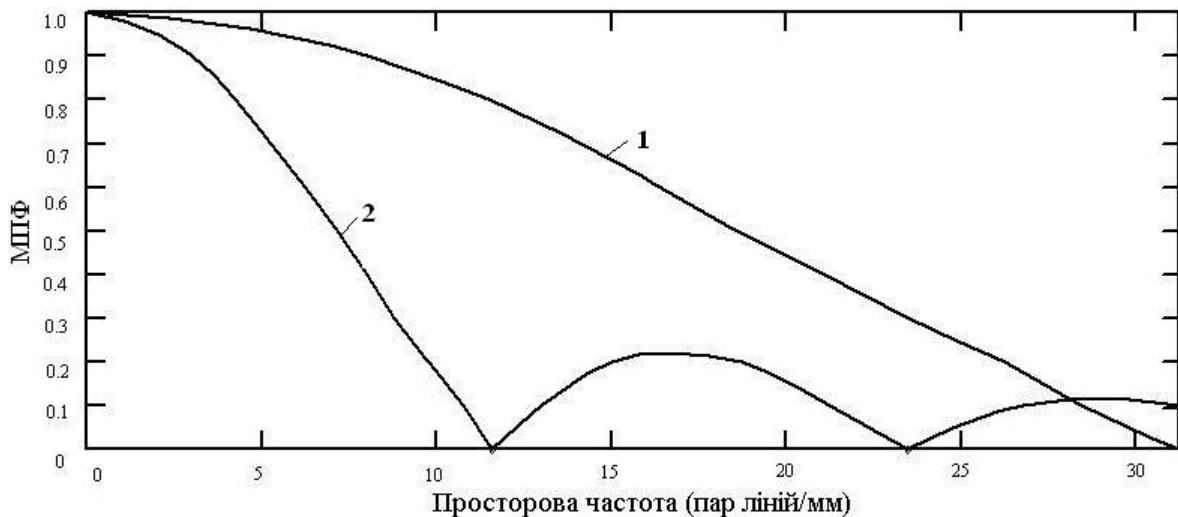


Рис.2. Модуляційна передаточна функція МПВ, який має пікселі з періодом V_D : 1 – 31,25 мкм; 2 – 82,33 мкм

Вимірювання апертурної характеристики. Другий спосіб заснований на вимірі апертурної характеристики пікселя ПЗЗ. Потім, якщо необхідно, через пряме перетворення Фур'є, по апертурній характеристиці можна обчислити МПФ. За допомогою оптики, що має кращу функцію розсіювання точки, ніж вимірюваний ПЗЗ, проектують світлову пляму в 5-10 разів меншу розміру пікселя. Пляму переміщують по пікселю із кроком, що рівний діаметру плями, та вимірюють на кожному кроці вихідний сигнал із цього пікселя. Нормують до максимуму й знаходять апертурну характеристику.

Розглянуті методи виміру характеристик розділення модифікуються залежно від необхідної точності, оперативності процесу виміру, а також від економічної можливості використання сучасних апаратних і програмних засобів. Основною ознакою таких комп'ютеризованих методів для переходу від просторової характеристики до

спектральної та навпаки є відтворення зображення в якій-небудь площині перпендикулярній до оптичної осі об'єктива через пряме й зворотне перетворення Фур'є.

Зйомка похилого краю. Цей спосіб заснований на аналізі знімка похилого краю. Ця методика описана стандартом ISO 12233 [13] і застосовується, відповідно до цього стандарту, у додатку Quick MTF. Цей підхід на відміну від інших вимагає мінімальних підготувань і ґрунтується на аналізі зображень, або частіше їхніх фрагментів, таких, як наприклад на рис.4. Тобто для побудови МПФ не обов'язково знімати лінії. Аналіз переходу від темної частини до світлої також може дати досить інформації про розділення і не тільки.



Рис.4. Знімки похилого краю

Вимір відбувається в три етапи:

1. Вимірювання функції розсіювання краю або функції профілю краю.
2. Обчислення функції розсіювання лінії.
3. Обчислення модуляційної передаточної функції.

Новий метод вимірювання МПФ

Нами запропоновано новий метод вимірювання модуляційної передаточної функції цифрової камери, який не потребує спеціального обладнання і навичок. Він ідеально підійде фотолюбителям, людям, які займаються виготовленням та продажем цифрових фотокамер, та тим, хто хоче придбати собі камеру. Достатньо сфотографувати вимірюваною камерою спеціальну міру, і знімок передати до персонального комп'ютера зі спеціальною програмою, яка побудує вже готову МПФ. В якості міри будемо використовувати зірку Сіменса [14], яку зображено на рис. 5. Вона містить не одну просторову частоту, що зазвичай використовують в аналогічних вимірюваннях, а набір просторових частот.

Програма сканує отриманий знімок по спіралі Архімеда. Рівняння спіралі Архімеда у [полярних координатах](#) має вигляд

$$r(\varphi) = a + b\varphi. \quad (5)$$

Зміни параметру a призводять до повороту спіралі, тобто в нашому випадку він на вимірі не впливає, а параметру b — відстані між витками, яка є константою для конкретної спіралі. У нашому випадку від параметра b залежить скільки витків спіралі буде використовуватися в виборці сигналу із зображення.

Розподіл сигналу вздовж лінії сканування являється затухаючою синусоїдою із спадаючим періодом (рис.6). В ідеальній системі вона описується функцією

$$f(x) = \sin\left(\frac{x^2}{b^2}\right) \cdot e^{-x}, \quad (6)$$

де b - параметр спіралі Архімеда, який задається в програмі, мм^{-1} .

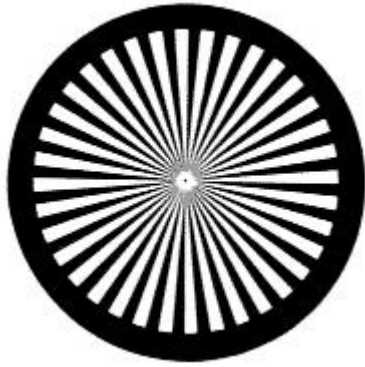


Рис.5. Зірка Сіменса

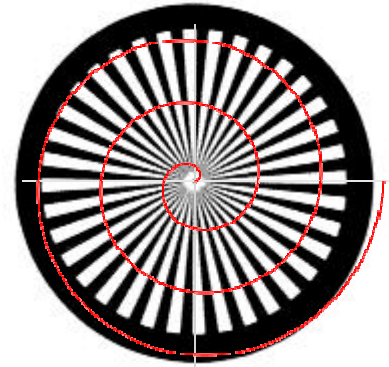


Рис.6. Траєкторія сканування

У нашому випадку значення знімаються з файлу відзнятої міри у форматі BMP (*bitmap*-формат). В одному пікселі (точці) такого монохромного зображення міститься 1 біт інформації, де абсолютно чорному кольору відповідає число рівне 255, а абсолютно білому – 0. Числу 128 відповідає сірий колір, тобто відсутність переваги чи білого, чи чорного кольору, а значить і контрасту.

Програма знаходить контраст, взявши різницю між максимумом та мінімумом функції на кожному періоді синусоїди за формулою

$$M = \frac{f_{\max}(x) - f_{\min}(x)}{f_{\max}(x) + f_{\min}(x)}, \quad (7)$$

де $x \in (x_n; x_{n+1})$.

З рис.7 видно, що на нульовій просторовій частоті $M = \frac{255 - 0}{255 + 0} = 1$, тобто на МПФ нульовій просторовій частоті повинен відповідати контраст рівний одиниці.

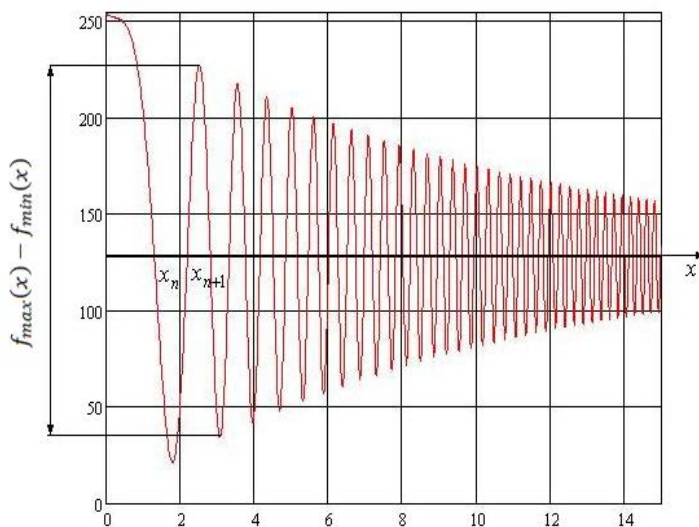


Рис.7. Вихідний сигнал при скануванні зірки Сіменса

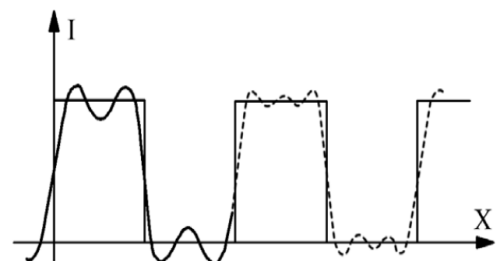


Рис.8. Зображення прямокутної міри

Просторову частоту програма розраховує за формулою:

$$v_n = \frac{1}{X_n}, \quad (8)$$

де $X_n = x_{n+1} - x_n$ – період функції.

Значення точок x_i знайдемо із рівняння (6):

$$\sin\left(\frac{x^2}{b^2}\right) \cdot e^{-x} = 0, \quad \sin\left(\frac{x^2}{b^2}\right) = 0, \quad x = b\sqrt{\pi n}, n \in Z. \quad (9)$$

Тобто після елементарних розрахунків ми отримаємо двовимірну матрицю контрастів і відповідних їм частот, при чому дискретність вимірювання можна задати яку нам потрібно, змінивши лише параметр b спіралі Архімеда. Зображення прямокутної міри представляє собою суму елементарних синусоїд з частотами, кратними $2n+1$, де n – номер гармоніки. На рис.8 показана сума нульової і першої гармонік, а також нульової, першої та другої.

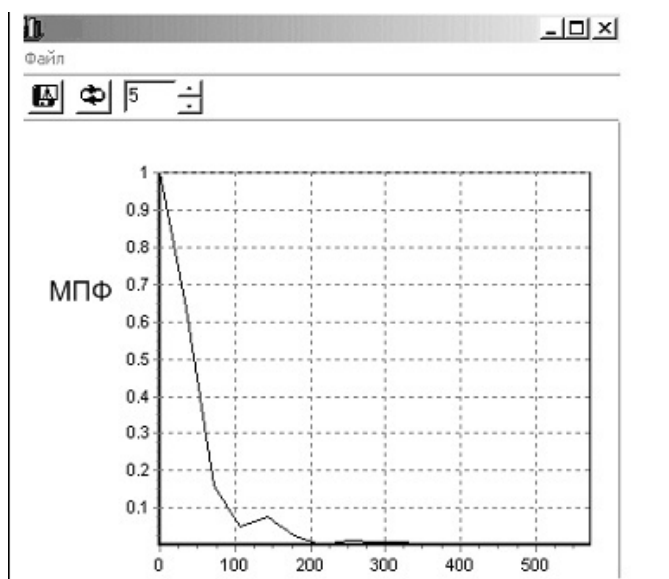
Існує декілька способів виділення потрібної гармоніки з сумарного зображення: фільтрація з допомогою електронного фільтра, оптична фільтрація з використанням перетворення Фур'є, математичний перерахунок контрасту зображення прямокутної міри в контраст зображення синусоїдальної міри за формулою Колтмена. У даному випадку використовується останній спосіб.

Формула Колтмена має вигляд

$$\dot{I}'_{\text{нєі}}(v) = \frac{4}{\pi} \left[\dot{I}'_{\text{іδ}}(v) + \dot{I}'_{\text{іδ}}(3v) + \dot{I}'_{\text{іδ}}(5v) + \dots \right], \quad (10)$$

де $\dot{I}'_{\text{нєі}}(v)$ – контраст зображення синусоїдальної міри з частотою v ; $\dot{I}'_{\text{іδ}}(v)$ – контраст зображення прямокутної міри з частотою v .

За отриманими даними відбувається побудова графіку МПФ (рис. 9). Вихідними даними програми є таблиця відповідних контрастів і частот, які користувач



може задати сам (за замовчуванням $v_x = 10 \text{ мм}^{-1}$), та МПФ. Для звичайного користувача достатньо буде лише порівняти числові значення. Професіонали ж зможуть більш детально дослідити функцію по графіку, а саме як камера передає контраст на кожній частоті, де є локальні "завали" характеристики, граничну частоту, яка розрізняється, та ін.

Рис. 9. МПФ вимірюваної камери

Висновки

У статті детально розглянуто традиційні методи вимірювання роздільної здатності цифрових камер, які умовно можна розділити на 2 види.

Перший підхід заснований на прямому вимірі контрасту (або модуляції) від набору мір різної просторової частоти. Проаналізувавши дану методику, було виявлено низку недоліків. По-перше, потрібно використовувати цілий набір мір, по-друге, потрібна спеціальна установка, де проводяться вимірювання. Тобто вимірювання можна проводити лише в лабораторії і вони займають багато часу.

Другий традиційний спосіб заснований на вимірі апертурної характеристики пікселя ПЗЗ. Основним його недоліком є те, що потрібно виконувати низку надскладних перетворень і так, як і в першому методі, потрібне спеціальне обладнання, яке є лише у вимірювальній лабораторії.

Проаналізувавши детально кожен з методів, нами було запропоновано новий метод вимірювання просторової роздільної здатності за допомогою зірки Сіменса. У порівнянні з розглянутими методами, запропонований метод має багато переваг. По-перше, не потрібно використовувати цілий набір мір. Також не потрібно робити складні математичні перетворення, такі як перетворення Фур'є. Метод не вимагає використання додаткового обладнання, а точність залишається на тому ж рівні, що і з використанням коліматорів, при цьому час вимірювання скорочується в десятки разів. А найголовнішою перевагою є те, що результатом вимірювань є не набір дискретних значень, а реальна МПФ.

У майбутньому планується удосконалити метод, а саме створити лабораторну установку, за допомогою якої можна буде покращити точність вимірювання роздільної здатності в 3-5 разів.

Література

1. Еськова Л.М., Гаврилин Д.В. Компьютерные методы контроля оптики. Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму. СПб. СПб ГУ ИТМО. 2004. – 89 с.
2. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. - Л.: Машиностроение, 1984. – 68 с.
3. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. Учебное пособие. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2003. – 91 с.
4. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 3. Функциональная схема прибора оптических измерений. Типовые узлы. Оптические измерения геометрических параметров. Учебное пособие. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2003. – 68 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
6. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
7. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1980. – 208 с.
8. ОСТ-3-4046-85. Объективы. Методы измерения функции передачи модуляции.
9. ОСТ-3-2635-82. Устройство для измерения функции передачи модуляции. Метод проверки.
10. Мальцев М.Д., Каракулина Г.А. Прикладная оптика и оптические измерения. – М.: Машиностроение.; 1968. – 472 с.

11. Оптический производственный контроль. Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. – 396 с.
12. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 363 с.
13. Стандарт ISO 12233:2000. Фотография. Электронные фотокамеры. Измерение разрешающей способности
14. www.jvcproeuropa.com

А. В. Дейко, В. Г. Колобродов, И. О. Кучугура

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

ТЕСТИРОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ ФОТОКАМЕР

Предложено определить пространственную разрешающую способность цифровой фотокамеры новым методом, который дает возможность достаточно точно выполнить измерения и не требует специального оборудования. Сами измерения занимают несколько минут.

Ключевые слова: пространственная разрешающая способность; модуляционная передаточная функция.

A.V. Deiko, V.G. Kolobrodov, I.O. Kuchugura

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

TESTING THE RESOLUTION OF DIGITAL CAMERAS

A new method of determination of the spatial resolution of a digital camera is proposed, which allows a fairly accurate measurements and do not require special equipment. The measurements themselves take several minutes.

Keywords: spatial resolution; modulation transfer function.

*Надійшла до редакції
12 травня 2010 року*