
МІКРОЕЛЕКТРОННА ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК 621.383.72

ОЦІНКА ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЗЗ-МАТРИЦЬ

*Дяченко С.М., к.т.н., доцент, Неуймін О.С., аспірант
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

ПЗЗ–матриці (пристрої з зарядовим зв’язком, які виконують функцію перетворення світла в електричний сигнал) [1] розвиваються швидкими темпами та вже давно проникли в різні галузі науки та техніки, що можна підтвердити широким застосуванням їх в цифрових сканерах, копіювальних пристроях, високоякісних професійних фотоапаратах, системах технічного зору, системах формування зображення високої чіткості, військовій, аерокосмічній апаратурі та ін. Більшість фірм виробників не надають детальних характеристик на їхню продукцію, тому існує потреба в кількісній та якісній оцінці характеристик ПЗЗ-матриць.

В статті приводяться теоретичні та практичні результати дослідження важливих характеристик, а саме неоднорідності елементів, частотно-контрастної характеристики сучасних фотоприймачів КС73125МР [2], ІСХ404АК [3] фірм Samsung та Sony відповідно.

Вплив неоднорідності елементів на вихідний сигнал ПЗЗ-матриць

Основні похибки в зображенні об’єктів за допомогою ПЗЗ-матриць викликані нерівномірністю вихідного сигналу при рівномірному освітлені фоточутливих елементів. Нерівномірність проявляється у появі значних коливань вихідного сигналу.

Головними причинами виникнення неоднорідності рівня сигналів в каналах є розкид параметрів елементів матриці один відносно одного. Розвиток технологій виготовлення фотоприймачів дозволяє понизити розкид параметрів елементів, однак створити матричний фотоприймач, в якому неоднорідність параметрів елементів буде усунена повністю, неможливо.

Тому необхідно вміти оцінювати неоднорідність елементів та зменшувати її вплив на результуюче зображення. Досить часто зустрічаються дефектні елементи в матрицях, амплітуда сигналу від яких значно більша за середнє значення сигналу по всій матриці.

За допомогою осцилографа спостерігався вихідний сигнал ПЗЗ-матриць. Було виявлено, що обидва досліджувані зразки мають «биті» пікселі. На рис. 1 зображена осцилограма одного рядка (для кращого візуального сприйняття) ПЗЗ-матриці ІСХ404АК, на якій чітко видно результат дефектних елементів – високий рівень сигналу в лівій частині осцилогра-

ми. Сигнал був знятий при повній ізоляції матриці від світла. При цьому на темних зображеннях, що були сформовані камерами на основі цих фотоприймачів, спостерігалися яскраві точки.

Оскільки неоднорідності фіксовані по координатах, то за допомогою обробки вихідного сигналу їх вплив можна усунути. Одним з простих методів корекції неоднорідності є запам'ятовування сигналів зі всіх пікселів при деякому рівномірному освітленні матриці і використання їх як коефіцієнтів корекції при наступних експозиціях. Для усунення впливу дефектних елементів віднімають отримане зображення від зображення, що отримане при повній відсутності освітлення матриці або замінюють сигнал з дефектного елемента на сигнал одного з сусідніх елементів [4]. При реалізації систем формування зображення на ПЗЗ-матрицях дані методи реалізуються в цифрових сигнальних процесорах.

Оскільки в досліджуваних камерах на основі ПЗЗ-матриць відсутні сигнальні процесори, які зменшують вплив неоднорідностей, то один з вище наведених методів виконувався за допомогою персонального комп'ютера. Отримувалися зображення при повній відсутності освітлення матриць, після цього отримувалися звичайні зображення і в програмному пакеті ImageJ [5] від звичайних зображень віднімалися темні кадри. Таким чином досягається значне покращення звичайних зображень.

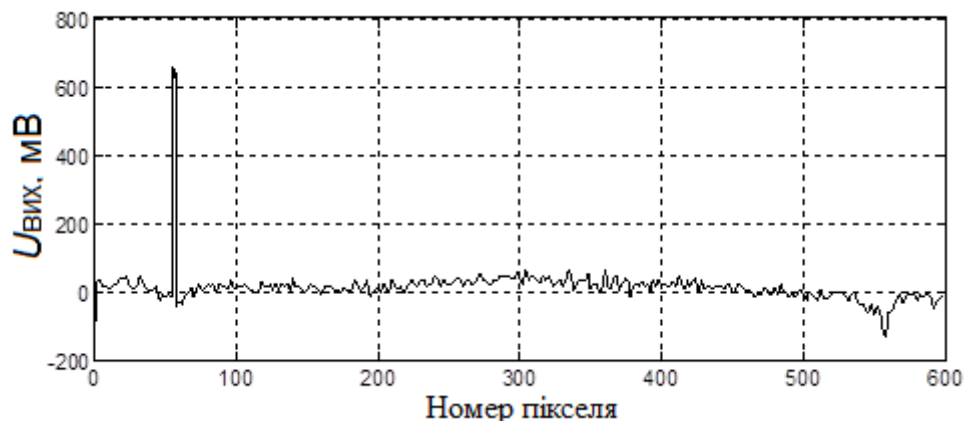


Рис.1. Осцилограма рядка ПЗЗ-матриці

Дослідження частотно-контрастних характеристик

Частотно-контрастна характеристика визначає якість відтворення зображення системою формування зображення і дає найбільш повну інформацію про властивості системи, характеризуючи її можливості адекватно передавати будь-які по розміру деталі об'єкта.

Контраст - різниця яскравості між світлими та темними ділянками зображення, а також здатність фотографічного матеріалу або оптичної системи відтворювати цю різницю.

Частотно-контрастну характеристику зазвичай отримують за допомогою спеціальної штрихової решітки (міри), вимірюючи відносну амплітуду

вихідного сигналу ПЗЗ-матриці від просторової частоти міри, тобто кількості перепадів світлого і темного на одиницю довжини [6]. На рис. 2 показано приклад такої міри для вимірювання ЧКХ в рядку. При певній просторовій частоті контраст експериментально визначається за наступною формулою:

$$ЧКХ_{\text{експ.}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}$$

де U_{max} , U_{min} - максимальне та мінімальне значення вихідного сигналу відповідно.

При дослідженні ЧКХ ПЗЗ-матриць ICX404AK та KC73125MP міра відображалася на екрані монітора Samsung SyncMaster 710N та проектувалася на ПЗЗ-матрицю. Даний метод має важливі переваги: легке та швидке створення мір різної просторової частоти і конфігурації (використовувалася програма Quick MTF [7]); монітор забезпечує рівномірне освітлення по всій площі екрану; технічні засоби монітора дозволяють з дуже високою точністю регулювати яскравість; за допомогою монітора можна без використання світлофільтрів отримати освітлення будь-якого кольору, причому з можливістю вибору необхідного відтінку. Недоліком є те, що монітор - дискретний пристрій, тобто має обмежену роздільну здатність. Даний монітор здатний відображати 3.79 ліній на мм (розмір пікселя $0.264 \times 0.264 \text{ мм}^2$). Проте, розміщуючи матрицю на певній відстані від монітора (рис. 3), можна досягти значно більшої частоти ліній в площині матриці.

Формули перерахунку кількості ліній по вертикалі та горизонталі для матриці формату 1/3" наступні:

$$N_{\text{в}} = \frac{4.8 F}{l f}, \quad N_{\text{г}} = \frac{3.6 F}{h f}$$

де F – відстань від об'єкта до лінзи, f – фокусна відстань, l та h – ширина однієї лінії по вертикалі та горизонталі відповідно. Наприклад, при $F = 200 \text{ мм}$, $f = 5 \text{ мм}$, $l = 1 \text{ мм}$ на матрицю можна спроектувати 192 лінії по вертикалі.

Результати вимірювання ЧКХ матриць ICX404AK та KC73125MP по вертикалі та горизонталі приведені на рис.4. На графіках контраст приво-



Рис. 2. Міра

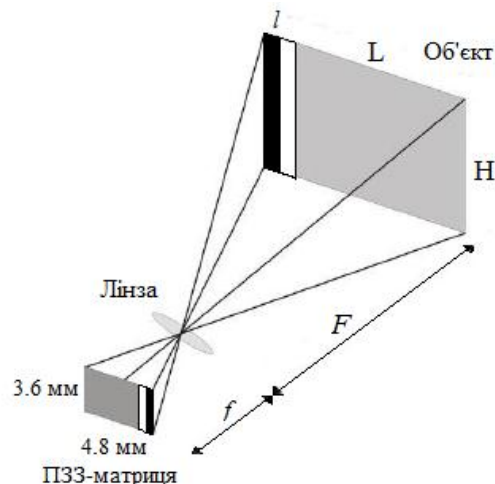


Рис. 3. Проектування міри на ПЗЗ-матрицю

диться у відносних величинах для порівняння, частота визначається у кількості пар ліній на міліметр (пл/мм). Для порівняння з експериментальними даними також розраховано теоретичне значення ЧКХ.

Розрахунок теоретичних кривих проводився за формулами [8]. Оскільки вигляд ЧКХ будь-якого фотоприймача визначається трьома факторами: розмірами і кроком фоточутливих елементів ($ЧКХ_r$ – геометрична ЧКХ), ефективністю перенесення зарядів ($ЧКХ_n$ – ЧКХ перенесення), дифузією зарядів, що генеруються довгохвильовими фотонами ($ЧКХ_d$ – ЧКХ дифузії), то загальна ЧКХ визначається наступним чином:

$$ЧКХ = ЧКХ_r ЧКХ_n ЧКХ_d,$$

$$ЧКХ_r = \frac{\sin\left(\frac{f}{f_{max}} \frac{\pi \Delta x}{2p}\right)}{\frac{f}{f_{max}} \frac{\pi \Delta x}{2p}}, \quad ЧКХ_d = \frac{1 - \frac{\exp(-\alpha x_d)}{1 + \alpha L_K}}{1 - \frac{\exp(-\alpha x_d)}{1 + \alpha L_n}}, \quad L_K = \sqrt{\frac{1}{L_n^{-2} + (2\pi f)^2}},$$

$$ЧКХ_n = \exp\left\{-n\varepsilon \left[1 - \cos\left(\frac{\pi f}{f_{max}}\right)\right]\right\},$$

де $x_d = 20$ мкм - товщина збідненої області чарунки ПЗЗ, $L_n = 100$ мкм - дифузійна довжина електронів (зазвичай знаходиться між 50мкм та 200мкм), $\alpha = 3000$ см⁻¹ - коефіцієнт поглинання хвилі в кремнію для денного світла, f – просторова частота, $f_{max} = 1/2p$, $\varepsilon = 10^{-3}$ – неефективність перенесення одного зарядового пакету.

Для ЧКХ по вертикалі $\Delta x = 9.6$ мкм - розмір елементів, що розташовані з кроком $p = 11$ мкм, кількість перенесень $n = 492 * 4 = 1968$ (піксель складається з 4 заслонів).

Для ЧКХ по горизонталі $\Delta x = 7.5$ мкм - розмір елементів, що розташовані з кроком $p = 7.5$ мкм, кількість перенесень $n = 510 * 2 = 1020$ (піксель складається з 2 заслонів).

Параметри фотоприймачів взяті з джерел [2, 3, 8].

При розрахунку теоретичної ЧКХ з використанням вище наведених параметрів виявлено, що результуюча ЧКХ майже не залежить від ЧКХ дифузії і залежить від ЧКХ перенесення та геометричної ЧКХ, тобто від розмірів світлочутливих елементів.

Спад ЧКХ до нуля визнається розмірами світлочутливих елементів. Якщо міра проектується на матрицю так, що на кожний світлочутливий елемент попадають однакові за площею білі та чорні смуги, то заряди, накопичені у всіх елементах, будуть однаковими і вихідний сигнал не буде промодульований по амплітуді, тобто контраст дорівнює нулю. Якщо ж на кожний елемент буде проектуватися тільки чорна або біла смуга, то в цьому випадку модуляція амплітуди вихідного сигналу буде максимальною.

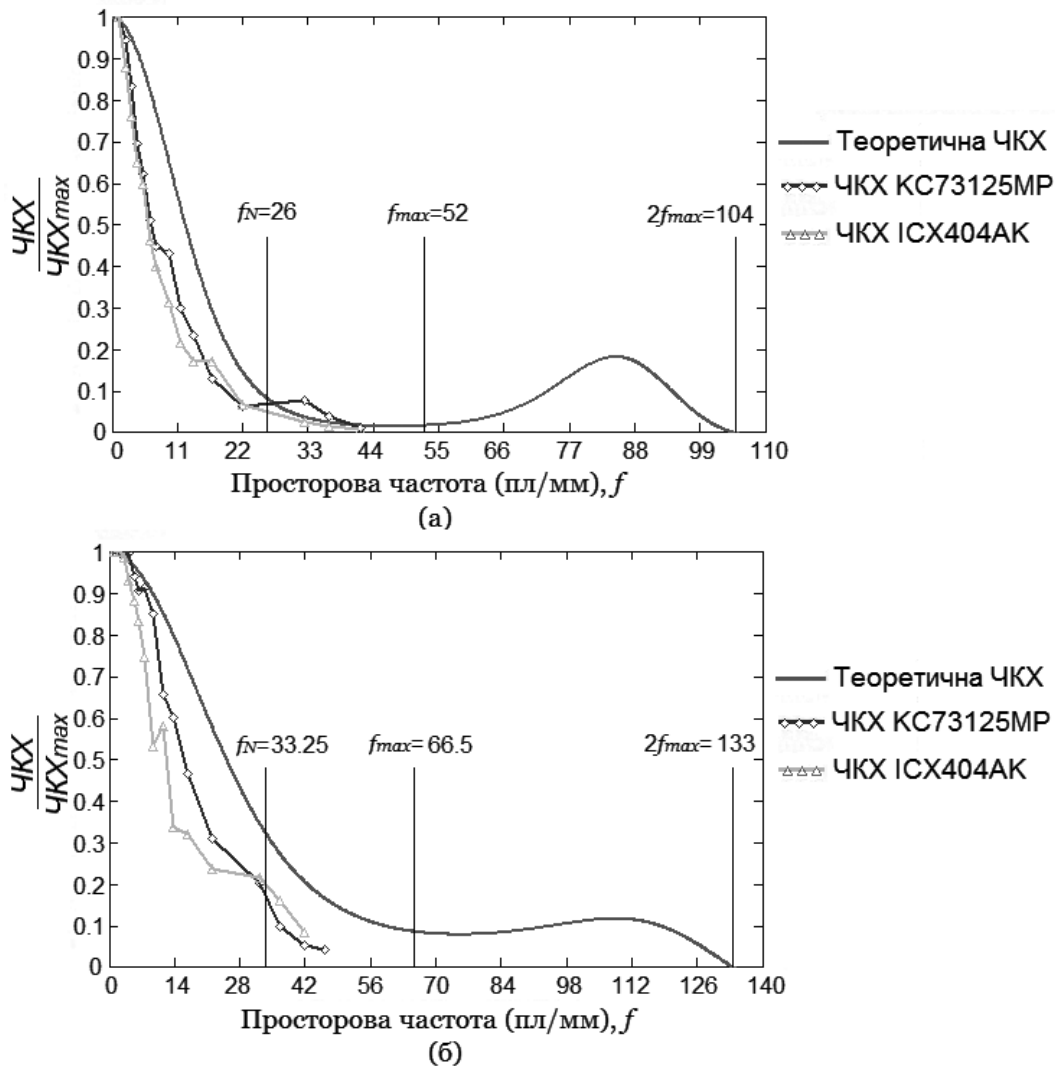


Рис. 4. Експериментальні та теоретичні ЧКХ по вертикалі (а) і по горизонталі (б)

При дослідженні загальної ЧКХ та окремих складових виявлено, що спад ЧКХ зумовлений в основному перенесенням заряду. При перенесенні заряди розтікаються в сусідні чарунки, тим самим зменшуючи контраст. Найгірший випадок, коли просторова частота стає рівною частоті Найквіста f_N (тобто половині максимальної просторової частоти, при якій крок міри дорівнює кроку фото чутливих елементів), тоді у всіх чарунках ПЗЗ-регістра майже однакова кількість заряду. Зростання ЧКХ на високих просторових частотах пояснюється тим, що деякі електрони забираються з одного зарядового пакету і додаються до інших через їх взаємодію з поверхневими пастиками.

ЧКХ по горизонталі краща за ЧКХ по вертикалі, оскільки розміри фоточутливого елемента по горизонталі менші ніж по вертикалі та число перенесень заряду у горизонтальному регістрі значно менше ніж у вертикальних. З рисунка видно, що теоретичні ЧКХ трохи відрізняються від експериментальних, це пояснюється тим, що при обчисленні теоретичної ЧКХ

були враховані втрати при перенесенні зарядових пакетів, які відрізняються від істинного значення, так як в документаціях на ПЗЗ-матриці не вказується ефективності перенесення заряду. Також при розрахунку теоретичної кривої не враховується те, що зарядові пакети проходять різні відстані перш ніж вони досягнуть виходу. Зарядові пакети які знаходяться ближче до виходу зазнають меншого впливу від процесу перенесення.

Для того щоб характеризувати фотоприймачі, визначають значення ЧКХ на половині максимальної просторової частоти f_{max} . Це пов'язано з тим, що згідно з теоремою Найквіста, приймач передає без спотворення просторові частоти, які не перевищують половини максимальної. Проектування на матрицю більш високих просторових частот призводить до появи хибних зображень. Отже, на частоті 26 пар ліній на міліметр ЧКХ по вертикалі рівна 0.05 для ICX404AK та 0.06 для KC73125MP; на частоті 33 пл/мм ЧКХ по горизонталі рівна 0.20 для ICX404AK та 0.18 для KC73125MP. З чого можна зробити висновок, що якість передачі зображення обох матриць майже однакова.

Необхідно підкреслити, що отримання частотно-контрастних характеристик ПЗЗ-матриць є важливим результатом, що дає можливість оцінювати якість відтворення зображення, і чим повільніше спадає графік ЧКХ тим краща ПЗЗ-матриця.

Отримані результати в процесі виконання роботи не є максимально точними, а тому є необхідність у покращенні їх кількісної оцінки. Наприклад, для збільшення точності вимірювання ЧКХ необхідно використовувати обладнання, яке включає в себе лазер, розширювач та розділювач лазерного променя для формування просторової решітки, яка проектується на фотоприймач [6]. Перевагами даного методу є зміна просторової частоти в широких межах та проведення вимірювання без оптичної системи, яка також вносить свій вклад в експериментально визначену ЧКХ.

Висновки

1. Оскільки неоднорідність елементів ПЗЗ-матриць фіксована по координатам, то для зменшення її впливу результуюче зображення використовувався метод віднімання темного кадру. Результати показали ефективність даного способу.

2. Приведений метод формування міри на екрані монітора має значні переваги та може використовуватися для отримання ЧКХ фотоприймачів.

3. Результуюча ЧКХ майже не залежить від ЧКХ дифузії і залежить від ЧКХ перенесення та геометричної ЧКХ. Матриці ICX404AK та KC73125MP мають однакову якість передачі ч/б зображення.

Література

1. Неуймін О.С. ПЗЗ-матриці / Неуймін О.С., Дяченко С.М. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратуробудування.– 2010.– Вип. 41.– с.186 – 188.

2. KC73125MP - 1/3 Inch CCD Image Sensor For EIA Camer / [Samsung Electronics]. – Product DATASHEET. – 18 p.
3. ICX404AK - Diagonal 6mm (Type 1/3) CCD Image Sensor for NTSC Color Video Cameras / [Sony Corporation]. – Product DATASHEET. – 22 p.
4. Reinhart C. C., Bhat M. S., Standley D. Automatic bad pixel correction in image sensors // US Patent 7034874. – 2006.
5. ImageJ. Image Processing and Analysis in Java. [Online] // National Institutes of Health. - Available from: <http://rsbweb.nih.gov/ij/index.html> (viewed 2011).
6. Hu J. Measurement of modulation transfer function of charge-coupled devices using frequency-variable sine grating patterns / Jiasheng Hu, Min Song, Yi Sun, Yefang Li // Applied Optical Engineering. – 1999. – Vol. 38. – No.7. – pp.1200–1204.
7. Quick MTF - приложение для тестирования изображений. [Электронный ресурс] // Quick MTF. – Текст. Программа. - 2011. – Режим доступа: <http://ru.quickmtf.com/>.
8. Holst G. C. Ccd Arrays, Cameras and Displays / Gerald C. Holst. – SPIE-International Society for Optical Engine, 1998. – 402 p. – ISBN 081-942-853-1.

Неуймін О.С., Дяченко С.М. Оцінка основних характеристик ПЗЗ-матриць. Розглянуто вплив неоднорідності елементів ПЗЗ-матриць на вихідний сигнал та способи її усунення. За допомогою комп'ютерного програмного забезпечення ImageJ реалізовувався метод віднімання темного кадру, який дав позитивні результати у покращенні зображення. Запропоновано спосіб формування міри на екрані монітору для експериментального вимірювання частотно-контрастної характеристики ПЗЗ-матриць. Представлено практичні та теоретичні результати дослідження ЧКХ. Наведено пояснення до отриманих результатів.

Ключові слова: ПЗЗ-матриця, неоднорідність, дефектні пікселі, частотно-контрастна характеристика, віднімання темного кадру, міра.

Неуймин А.С., Дяченко С.М. Оценка основных характеристик ПЗС-матриц. Рассмотрено влияние неоднородности элементов ПЗС-матриц на выходной сигнал и способы ее устранения. С помощью компьютерного программного обеспечения ImageJ реализовывался метод вычитания темного кадра, который дал положительные результаты в улучшении изображения. Предложен способ формирования меры на экране монитора для экспериментального измерения частотно-контрастной характеристики ПЗС-матриц. Представлены практические и теоретические результаты исследования ЧКХ. Приведены объяснения полученным результатам.

Ключевые слова: ПЗС-матрица, неоднородность, дефектные пиксели, частотно-контрастная характеристика, вычитание темного кадра, мера.

Neuimin O.S., Diachenko S.M. An assessment of the main CCD characteristics. The influence of nonuniformity of the CCD elements on the output signal and how to fix it are considered. Using computer software ImageJ technique of the dark frame subtraction is implemented, which provides positive results in improved image. A method of forming test pattern on the computer monitor for the experimental measurement of modulation transfer function of CCD is proposed. Provides practical and theoretical results MTF. An explanation of the obtained results are presented.

Key words: CCD, nonuniformity, defect pixels, Modulation Transfer Function, dark frame subtraction, test pattern.