Метод комплексної корекції геометричного шуму в матричних фотоприймальних пристроях

Ольхова Ю.О.

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, e-mail: juva404@rambler.ru

Анотація. Розглянутий новий метод комплексної корекції геометричного шуму у сканувальних матричних фотоприймальних пристроях без застосування еталонних випромінювачів.

Запропонований метод, згідно із запропонованою класифікацією за джерелами виникнення геометричного шуму, дозволяє досягти високої точності відновлення зображень.

1. Вступ

Обробляючи статичні зображення та відео, отримані за допомогою матричних фотоприймальних пристроїв (МФПП), ми зіштовхуємося з шумами, що спотворюють реальний сигнал. Найбільше спотворення реального сигналу приходиться на так званий "геометричний шум", характерний для всіх МФПП, незалежно від технологічних процесів і архітектури пристроїв. Умовно він поділяється на два типи:

- обумовлений розташуванням ефективних центрів фоточутливості площадок, які не співпадають з їх геометричними центрами;

- обумовлений неоднорідною чутливістю МФПП, пов'язаною з технологічними факторами і природою матеріалів, з яких виготовляються фотоприймальні елементи (ФПЕ).

Для забезпечення ефективності автоматизованого управління обробкою відеоінформації в оптикоелектронних системах (ОЕС) виникає необхідність розробки методу комплексної корекції геометричного шуму обох типів:

 пригнічення геометричного шуму першого типу вимагає розробки методу формування віртуального матричного фотоприймача із заданою регулярною структурою;

 для корекції геометричного шуму другого типу використовуються сигнали еталонних джерел випромінювання або сигнали сцени, отримані за рахунок мікросканування.

Однак, дані методи характеризуються ресурсомісткістю та складністю обчислювальних алгоритмів, крім того, реалізація цих методів можлива лише за умови регулярної структури матриці ФПЕ.

2. Мета роботи

Метою роботи стала розробка та реалізація двох вищезазначених пунктів у вигляді якісно нового методу комплексної корекції геометричного шуму, який дозволяє суттєво підвищити якість відновлення зображення.

3. Матеріали і результати дослідження

3.1. Метод корекції геометричного шуму 1-го типу

Особливістю безеталонної калібровки МФПП за сигналами сцени є вимога просторової періодичності у розташуванні ФПЕ матриці. Однак, в силу технологічних факторів та природи матеріалів, з яких виготовляються ФПЕ, фотоприймальна матриця (ФПМ) характеризується неоднорідністю чутливості не тільки по елементах, але й всередині кожного елемента і, як наслідок, розташування ефективних центрів фоточутливості площадок не співпадає з їх геометричними центрами. З іншої сторони, через спотворення сформованих зображень оптичною системою (особливо широкоформатними камерами) розміри пікселей вихідного зображення (сцени) можуть не співпадати з розмірами елементів матриці та змінюватись по полю (наприклад, від центру до країв), або через особливості системи сканування, зміщення по полю не є однорідним.

Для виконання вимоги просторової періодичності ФПМ сформована матриця віртуальних фотоприймальних елементів (ВФПЕ) із заданою регулярною структурою за наступним алгоритмом [1]:



1. Розроблено імітаційну (математичну) модель матричного фотоприймача з випадково розміщеними ФФПЕ, принцип розташування яких відповідає наступній системі вимог (рис. 1):

– ФФПЕ не повинні перетинатись;

 – ФФПЕ повинні максимально заповнювати площину матриці;

 – ФФПЕ не повинні перетинати задані межі площини матриці.

Сформований (*i*, *j*)-м ФФПЕ відеосигнал U_{ij} визначається лінійною залежністю:

$$U_{ij} = a_{ij} \cdot I_{ij} + b_{ij} + e_{ij}, \quad 1 \le i, j \le N , \qquad (1)$$

де: I_{ii} – інтенсивність випромінювання, що потрапляє

на (i, j)-й ФФПЕ ($I_{ij} \ge 0$);

 a_{ij} – чутливість (i, j)-го ФФПЕ ($0 \le a_{ij} \le 1$);

 b_{ij} – адитивна складова відеосигналу ($b_{ij} \ge 0$);

 e_{ij} – шум – незалежна реалізація випадкового гауссівського процесу з середнім нульовим та заданою дисперсією ($-1 \le e_{ii} \le 1$);

 $N \times N$ – розмір матриці (N = 128).

2. Для формування ефективної матриці ВФПЕ площина матриці представлена квадратною площадкою заданих розмірів, яка має координатну сітку з такою ж роздільною здатністю, як і тестове зображення. Залежно від розташування ФФПЕ відносно квадратів віртуальної сітки, кожен ФФПЕ відноситься до одного з трьох можливих типів (рис. 2-3):

- ФФПЕ розташовується в 1-му квадраті (F1);

- ФФПЕ розташовується у 2-х квадратах (*F2*, *F3*);

- ФФПЕ розташовується у 4-х квадратах (F4).

Опираючись на рис. 3, були введені наступні позначення: 1) інтенсивність випромінювання квадратів ВФПЕ 1, 2, 3, 4 – *I1, I2, I3, I4* відповідно;

2) коефіцієнти перетворення для ФФПЕ F1 - a1 та b1; для ФФПЕ F2 - a2 та b2; для ФФПЕ F3 - a3 та b3; для ФФПЕ F4 - a4 і b4;

3) площа ФФПЕ *F1*, що потрапив до квадрату 1 повністю – *S11*; площа ФФПЕ *F2*, що потрапив до квадратів 1 та 2 – *S21* і *S22* відповідно; площа ФФПЕ *F3*, що потрапив до квадратів 1 и 3 – *S31* та *S33*; площа ФФПЕ *F4*, що потрапив у квадрати 1, 2, 3, 4 – *S41*, *S42*, *S43* и *S44* відповідно. Площа кожного ФФПЕ дорівнює 1;

3. Сигнал ВФПЕ 1 формується як лінійна комбінація сигналів всіх ФФПЕ, що входять до його складу відповідно до співвідношення:

$$U = U1 + k2 \cdot U2 + k2 \cdot U3 + k4 \cdot U4 , \qquad (2)$$

$$U1 = S1 \cdot I1 \cdot a1 + b1,$$

$$U2 = [(S21 \cdot I1 + S22 \cdot I2) \cdot a2 + b2] \cdot S21$$
(4)

$$U2 = [(S21 \cdot I1 + S22 \cdot I2) \cdot a2 + b2] \cdot S21,$$
(4)

 $U3 = [(S31 \cdot I1 + S32 \cdot I3) \cdot a3 + b3] \cdot S31,$ (5)

 $U4 = [(S41 \cdot I1 + S42 \cdot I2 + S43 \cdot I3 + S44 \cdot I4) \cdot a4 + b4] \cdot S41,(6)$ де $1 \ge k2 \ge 0$, $1 \ge k4 \ge 0$ –вагові множники, що дозволяють регулювати вклад елементів 2-го та 3-го типів у формування сигналів ВФПЕ.

Структура виразів (2-6) дозволяє у явному вигляді виділити адитивну складову \tilde{b} :

 $\tilde{b} = b1 + k2 \cdot b2 \cdot S21 + k2 \cdot b3 \cdot S31 + k4 \cdot b4 \cdot S41$. (7) Коефіцієнт чутливості \tilde{a} моделюється виразом:

 $\widetilde{a} = a1 \cdot S11 + k2 \cdot a2 \cdot S21 + k2 \cdot a3 \cdot S31 + k4 \cdot a4 \cdot S41 \,. \tag{8}$

4. Відновлена усереднена інтенсивність випромінювання, зареєстрована ВФПЕ, визначається виразом:

$$\widetilde{I} = \frac{\widetilde{U} - \widetilde{b}}{\widetilde{a}},\tag{9}$$

де \tilde{I} – ефективна інтенсивність випромінювання;

 \tilde{U} , \tilde{b} и \tilde{a} – отримані ефективні значення для кожної квадратної чарунки.



Рисунок 3 – Приклад розташування ФФПЕ відносно віртуальних ефективних

3.2. Метод корекції геометричного шуму 2-го типу

Рисунок 1 – Матриця

випадково розміщених ФФПЕ

Суть методу полягає у використанні двовимірного мікросканування та спеціального фрактального алгоритму цифрової обробки послідовності зображень.

Комп'ютерна модель МФПП є квадратною матрицею фотоприймальних елементів (ФПЕ) з числом елементів у рядку (стовпці) $N=2^{M}$. Сканування з подальшою реєстрацією зображень, отриманих приймальною камерою, моделюється відповідно до лінійної залежності

$$A_{ij} = g_{ij} \cdot I_{ij} + h_{ij} + w_{ij} \cdot e_{ij}(t) , \qquad (10)$$

причому, невідповідність між вхідним сигналом зображення I_{ii} , що подається на матрицю, і вихідним

сигналом A_{ij} обумовлюється як неідентичністю ФПЕ матриці, (неоднорідністю чутливості g_{ij} і рівнів відліку сигналу h_{ij}), так і випадковим шумом $e_{ij}(t)$.

У реальних ситуаціях g_{ij} та h_{ij} залежать від часу, проте, якщо тривалість циклу калібрувальних вимірів досить мала, то їх змінами можна знехтувати. В якості миттєвих значень шуму $e_{ij}(t)$ використані незалежні реалізації випадкового гаусівського процесу з середнім значенням (C3) $\bar{e} \equiv [e_{ij}]_{ij} = 0$, коефіцієнтом кореляції $K_e = 0$ і заданим середньоквадратичним відхиленням (CKB) $[e^{2}_{ij}]_{ij}^{0.5} \equiv \delta$. Матриця коефіцієнтів $[w_{ij}]$ з $w_{ij} > 0$ і



дисперсією $[w^2_{ij}]_{ij} = 1$ моделює можливий розкид індивідуальних шумових характеристик ФПЕ.

Двовимірне мікросканування матриці ФПЕ здійснюється дискретно на піксель вниз-вгору і піксель вправо-вліво відносно початкового положення з досить малими проміжками часу. При цьому реєструються кадри: $(F_{0,0})_{...} \equiv A_{...} = I_{...} + h_{...} + e_{...}(t_{..})$:

$$\begin{aligned} &(F_{0,0})_{ij} = A_{ij} - I_{ij} + h_{ij} + e_{ij}(t_1), \\ &(F_{1,0})_{ij} \equiv B_{ij} = I_{i+1,j} + h_{ij} + e_{ij}(t_2); \\ &(F_{0,0})_{ij} \equiv A'_{ij} = I_{ij} + h_{ij} + e_{ij}(t_3); \\ &(F_{0,1})_{ij} \equiv C_{ij} = I_{i,j+1} + h_{ij} + e_{ij}(t_4); \quad 1 \le i, j \le N, \end{aligned}$$

які відносяться до одного циклу сканування, але враховуючи при цьому, що випадкові величини $e_{ij}(t_1)$, $e_{ij}(t_2)$, $e_{ij}(t_3)$, $e_{ij}(t_4)$ не корельовані і мають нульові середні, а матриці $[I_{ij}]$, $[h_{ij}]$ впродовж циклу сканування залишаються незмінними.

Невідомі величини $[I_{ij}]$, $[h_{ij}]$ відновлюються за допомогою системи рівнянь:

$$\begin{cases} I_{ij} + h_{ij} = A_{ij}; \\ I_{i+1, j} + h_{ij} = B_{ij}; \\ I_{ij} + h_{ij} = A'_{ij}; \\ I_{i, j+1} + h_{ij} = C_{ij}; & 1 \le i, j \le N \end{cases}$$

у якій число рівнянь $(4N^2)$ істотно перевищує число невідомих (2N(N+1)), при цьому погрішності правих частин роблять її некоректною [3].

Виключаючи з (12) всі I_{ij} , отримуємо також перевизначену і некоректну систему 2N(N-1) рівнянь для визначення N^2 невідомих h -коефіцієнтів:

$$\begin{cases} h_{i+1,j} - h_{ij} = A_{i+1,j} - B_{ij} \equiv U_{ij}; & 1 \le i \le N - 1; & 1 \le j \le N; \\ h_{i,j+1} - h_{ij} = A'_{i,j+1} - C_{ij} \equiv V_{ij}; & 1 \le i \le N; & 1 \le j \le N - 1, \end{cases}$$
(13)

яку слід доповнити однією з умов нормування, наприклад: $h_{i'i'} = 0$ для фіксованого (*i'j'*) -го ФПЕ, або

$$[h_{ij}]_{ij} \equiv N^{-2} \sum_{i,j=1}^{N} h_{ij} = 0$$
(14)

Система (13) за додаткової умови (14) у даній роботі вирішується фрактальним алгоритмом [2,3].

До переваг наведеного алгоритму слід віднести:

1. алгоритм побудований на наборі шаблонів, кожен з яких відповідає за певні групи ФПЕ. Застосування шаблонів дозволяє виконувати всі операції у циклі;

2. шаблонна структура алгоритму дозволяє для систем реального часу у конвеєрному режимі проводити паралельну обробку зареєстрованих зображень з використанням матриці процесорів, загальне число яких може досягати $\sim N^2$;

3. загальне число арифметичних операцій алгоритму $\sim 100N^2$ тобто лінійно залежить від числа ФПЕ.

3.3. Метод комплексної корекції геометричного шуму 1-го та 2-го типів

Реалізація методу комплексної корекції представлена на рис.4.



Рисунок 4 – Схематичне зображення етапів комплексної корекції геометричного шуму

Проведено комп'ютерне моделювання процедур корекції геометричного шуму з урахуванням коефіцієнтів вкладу 2-го та 3-го типів у формування сигналів ВФПЕ. Отримані результати представлено на рис. 5.

4. Висновки

Вперше запропоновано класифікацію геометричного шуму за джерелами його виникнення, та метод комплексної корекції, який дозволяє досягти високої точності відновлення зображень з широким динамічним діапазоном.

Ефективність методу підтверджена спеціально розробленим пакетом програмних модулів (Delphi 7) на наборі тестових зображень.

Актуальність розглянутої задачі визначає перспективність та подальші розробки в даному напрямку.



Рисунок 5 – Приклади відновлення зображень:

a),г),є) відновлені зображення для матриці 128х128 ВФПЕ з k2=1, k4=1: k2=1, k4=0; k2=0, k4=0 відповідно після корекції геометричного шуму 1-го типу; б)д)ж) відновлені після корекції геометричного шуму 2-го типу; в),е),з) похибки відновлення $\{\partial_{ij}\} \equiv \{I_{ij} - I_{ij}\}$. Контраст кадру (в),е),з) порівняно (а),г),є) збільшено в 30, 10, 30 разів відповідно.

5. Література

1. Сапцин B.M. К проблеме подавления геометрических шумов. Алгоритм пространственной расположенных регуляризации неравномерно фотоприемных элементов матрицы / В.М.Сапцин, Ю.А. Ольховая, А.А. Глебов // Математичні машини та системи - 2011. - № 2. - C. 143-152.

2. Ольхова Ю.О. Алгоритм корекції геометричного скануючих матричних фотоприймаючих шуму в Вісник львівської політехніки, розділ пристроях. «Комп'ютерні системи та інформаційні технології» - 2011. - №2(718). - C. 179-186.

3. Ольховая Ю.А. Метод коррекции геометрического шума в сканирующих матричных фотоприемных устройствах по сигналам сцены. Вісник Кременчуцького університету Михайла національного імені Остроградського - 2012. - №2(79). - С. 152-156.

4. Ольховая Ю.А. Коррекция неоднородной чувствительности сканирующих матричных в фотоприемных устройствах / Ю.А. Ольховая // «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (MPZIS-2011): IX Міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 листопада, тези допов. - м. Дніпропетровськ, 2011. - С. 204-205.