

УДК 519.6

АДАПТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ «ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО» ШУМА НА НЕРЕГУЛЯРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЧНОЙ СТРУКТУРЕ

В. М. Сапцин, В. А. Моспан, С. О. Домбровский

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

Рассматривая сетчатку глаза как нерегулярную, нестационарную, матричную структуру, изложен альтернативный традиционному алгоритм подавления «геометрического» шума матричных фотоприемных элементов, обеспечивающий его коррекцию в режиме максимально возможной адаптации. С целью получения информации о текущих параметрах фотоприемных элементов непосредственно в процессе наблюдения над объектом предложено использовать быстрое, контролируемое, двумерное, малоамплитудное сканирование матрицы фотоприемных элементов относительно изображения.

Ключевые слова: матрица фотоприемных элементов (ФПЭ), «геометрический» шум, изображение, пиксель.

ADAPTSVE SUPPRESSION OF GEOMETRIK NOISE ON AN IRREGULAR NONSTATIONARY PHOTODETEKTOR MATRIX STRUCTURE

V. M. Sapsin, V. A. Mospan, S. O. Dombrowskyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, 39600, Kremenchug, Ukraine. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

Considering the retina of the eye as an irregular, nonstationary matrix structure, there was presented an alternative to traditional algorithms algorithm of suppression of the "geometric" noise of matrix photodetecting elements, which provides its correction at the maximum possible adaptation mode. It's proposed to use fast controlled two-dimensional lowamplitude scan of photodetecting elements matrix regarding the image in order to obtain information on current parameters of photodetecting elements directly in the process of observing the object.

Key words: matrix of photodetecting elements (PDE), "geometric" noise, an image, pixel.

АДАПТИВНЕ ПРИГНІЧЕННЯ «ГЕОМЕТРИЧНОГО» ШУМУ НА НЕРЕГУЛЯРНІЙ НЕСТАЦІОНАРНІЙ ФОТОПРИЙМАЛЬНІЙ МАТРИЧНІЙ СТРУКТУРІ

В. М. Сапцин, В. А. Моспан, С. О. Домбровский

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

Розглядаючи сітківку ока як нерегулярну, нестационарну, матричну структуру, наведений альтернативний традиційному алгоритм подавлення «геометричного» шуму матричних фотоприймальних елементів, що забезпечує його корекцію в режимі максимально можливої адаптації. З метою отримання інформації про поточні параметри фотоприймальних елементів безпосередньо в процесі спостереження за об'єктом запропоновано використання швидкого, контрольованого, двовимірного, малоамплітудного сканування матриці фотоприймальних елементів відносно зображення.

Ключові слова: матриця фотоприймальних елементів (ФПЕ), «геометричний» шум, зображення, піксель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Проблемы подавления или компенсации шумов многоэлементных оптических преобразователей являются актуальными в связи с широким распространением этих устройств во всех отраслях деятельности человека. Кроме того, используя аналоги, решаются вопросы, связанные с использованием зрительной системы человека и животных, рассматривающие сетчатку глаза как нерегулярную, нестационарную матричную структуру [1].

Создание матричных преобразователей изображений с широким спектром, большим динамическим диапазоном, предельным пространственно-временным разрешением и высокой чувствительностью, способных длительное время сохранять высокие метрологические качества, связано с рядом проблем. Одной из проблем является наличие так называемого «геометрического» шума, представляющего собой фиксированные отклонения значения выходного сигнала разных каналов матричного фотоприемного элемента (ФПЭ), вызванного одинаковым входным воздействием. Целью коррекции геометрического шума является получение от каждого

пикселя ФПЭ сигнала одного и того же уровня при условии их равномерной освещенности.

Традиционные процедуры подавления «геометрического» шума, основанные на предварительной регистрации изображений, однородных по полю тестовых излучателей, которые затем используются для вычисления коэффициентов и цифровой коррекции чувствительности ФПЭ, не решают в полной мере указанную выше проблему. Причин этому может быть несколько: неоднородность облучения при калибровке, уход значений параметров приемников за время, прошедшее после окончания последней калибровки, нестабильностью параметров ФПЭ, трудностями создания однородных по полю тестовых излучателей, вариациями спектрального состава и интенсивности излучения исследуемых изображений по сравнению с тестовыми [2].

В работах [3–5] исследовался новый подход к подавлению «геометрического» шума, обеспечивающий его коррекцию в режиме максимально возможной адаптации к условиям измерений и потенциально свободный от упомянутых выше недостатков. С целью получения информации о текущих па-

раметрах ФПЭ непосредственно в процессе наблюдения над объектом и только по его результатам было предложено использовать быстрое контролируемое двумерное малоамплитудное сканирование матрицы ФПЭ относительно изображения исследуемого объекта и соответствующую цифровую обработку регистрируемой при этом последовательности его смещенных изображений.

Подобное сканирование осуществляется и в процессе функционирования человеческого глаза, который можно рассматривать как созданный природой и непревзойденный по совокупности характеристик биологический аналог матричного преобразователя изображений с числом ФПЭ $\sim 10^8$, динамическим диапазоном $\sim 10^{10}$, предельной чувствительностью, ограничиваемой квантовой природой излучения, со способностью быстро адаптироваться к меняющимся условиям наблюдений [6].

Число ФПЭ в современных матрицах достигает $\sim 10^6 - 10^7$, поэтому практическая реализация методов адаптивной коррекции «геометрического» шума, основанных на использовании мало-амплитудного двумерного сканирования, требует разработки взаимно согласованных и эффективных алгоритмов сканирования и алгоритмов цифровой обработки последовательности регистрируемых изображений.

В связи с вышеизложенным целью данной работы является использование подходов и принципов решения проблемы адаптивного подавления геометрических шумов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Изложим альтернативный традиционному [3] алгоритм приближенного определения точки минимума функционала, основанный на иерархии процедур, включающих локальную минимизацию с рекурсией на перемещающемся по матрице шаблоне, с удвоением его линейного пространственного масштаба и соответствующими усреднениями при переходе к следующему уровню иерархии. Алгоритм позволяет построить ряд из M возрастающих по точности решений, в котором первыми восстанавливаются наиболее высокочастотные пространственные гармоники «геометрического» шума, последними – низкочастотные.

1. Для изолированной ячейки из четырех ФПЭ, с шаблоном $(h_{ij}, h_{i,j+1}, h_{i+1,j}, h_{i+1,j+1})$, в предположении, что h_{ij} известно, классическим методом МНК находим:

$$h_{i,j+1} = h_{ij} + \frac{V_{ij}(a_{ij}^{-1} + b_{i+1,j}^{-1} + a_{i,j+1}^{-1}) + (V_{i+1,j} + U_{ij} - U_{i,j+1})b_{ij}^{-1}}{a_{ij}^{-1} + a_{i,j+1}^{-1} + b_{ij}^{-1} + b_{i+1,j}^{-1}}; \quad (1)$$

$$h_{i+1,j} = h_{ij} + \frac{U_{ij}(b_{ij}^{-1} + a_{i,j+1}^{-1} + b_{i+1,j}^{-1}) + (V_{ij} + U_{i,j+1} - V_{i+1,j})a_{ij}^{-1}}{a_{ij}^{-1} + a_{i,j+1}^{-1} + b_{ij}^{-1} + b_{i+1,j}^{-1}}.$$

2. Полагая $i=1, j=1, h_{11}=0$ и используя (1), вычисляем h_{12} и h_{21} .

3. При $i=1, j=2$ и $i=2, j=1$, используя (1), находим h_{13}, h'_{22} и h''_{22}, h_{31} соответственно. Полагаем $h_{22} = (h'_{22}a_{12} + h''_{22}b_{21}) / (a_{12} + b_{21})$.

4. Используя полученные значения h_{13}, h_{22}, h_{31} (аналогично п. 3), находим следующий диагональный ряд значений $h_{14}, h_{23}, h_{32}, h_{41}$, и т.д., вплоть до h_{NN} , в результате получаем матрицу h – коэффициентов, которую обозначим как $H1$.

5. Повторяем процедуры, аналогичные (1-4), выбирая в качестве начального приближения $h_{1N}=0, h_{NN}=0, h_{N1}=0$, соответственно получаем матрицы $H2, H3, H4$. Матрицу

$$[h_{ij}^{(0)}] = 0,25(H1 + H2 + H3 + H4)$$

рассматриваем как нулевое приближение для h – коэффициентов. Обозначим совокупность процедур 1-5 над исходными матрицами

$$[U_{ij}] \equiv [U_{ij}^{(0)}], [V_{ij}] \equiv [V_{ij}^{(0)}], [a_{ij}] \equiv [a_{ij}^{(0)}], [b_{ij}] \equiv [b_{ij}^{(0)}]$$

$$\text{символом } \hat{K}: \hat{K}([U_{ij}^{(0)}], [V_{ij}^{(0)}], [a_{ij}^{(0)}], [b_{ij}^{(0)}]) = [h_{ij}^{(0)}]. \quad (2)$$

6. Если провести коррекцию изображений $[A_{ij}], [B_{ij}], [A'_{ij}], [C_{ij}]$, используя $[h_{ij}^{(0)}]$:

$$A_{ij}^{\%} = A_{ij} - h_{ij}^{(0)}, B_{ij} = B_{ij} - h_{ij}^{(0)}, A'_{ij} = A'_{ij} - h_{ij}^{(0)}, C_{ij} = C_{ij} - h_{ij}^{(0)},$$

и найти новые разностные значения $U_{ij}^{\%1}, V_{ij}^{\%1}$, то получим соотношения:

$$U_{ij}^{\%1} \equiv A_{i+1,j}^{\%} - B_{ij}^{\%} \equiv U_{ij}^{(0)} + (h_{i+1,j}^{(0)} - h_{ij}^{(0)}); \quad 1 \leq i \leq N-1; \quad 1 \leq j \leq N; \quad (3)$$

$$V_{ij}^{\%1} \equiv A_{i,j+1}^{\%} - C_{ij}^{\%} \equiv V_{ij}^{(0)} + (h_{i,j+1}^{(0)} - h_{ij}^{(0)}); \quad 1 \leq i \leq N; \quad 1 \leq j \leq N-1.$$

Используя матрицы $[U_{ij}^{(0)}], [V_{ij}^{(0)}], [h_{ij}^{(0)}]$, из (3) находим матрицы $[U_{ij}^{\%1}]$ и $[V_{ij}^{\%1}]$.

7. Рассматриваем матрицу ФПЭ размером $N/2 \times N/2$, в которой роль новых «усредненных» ФПЭ играют четверки ФПЭ шаблона предыдущей матрицы. Для новой матрицы вычисляем усредненные разностные значения $U_{ij}^{(1)}, V_{ij}^{(1)}$ и соответствующие им весовые множители $a_{ij}^{(1)}, b_{ij}^{(1)}$ по формулам:

$$U_{ij}^{(1)} = \sum_{k=1}^2 \frac{a_{2i,2j-2+k}^{(0)} U_{2i,2j-2+k}^{(1)}}{a_{2i,2j-1}^{(0)} + a_{2i,2j}^{(0)}}; \quad a_{ij}^{(1)} = \sum_{k=1}^2 a_{2i,2j-2+k}^{(0)}; \quad 1 \leq i \leq \frac{N}{2} - 1; \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{2}; \quad (4)$$

$$V_{ij}^{(1)} = \sum_{k=2}^2 \frac{b_{2i-2+k,2j}^{(0)} V_{2i-2+k,2j}^{(1)}}{b_{2i-1,2j}^{(0)} + b_{2i,2j}^{(0)}}; \quad b_{ij}^{(1)} = \sum_{k=1}^2 b_{2i-2+k,2j}^{(0)};$$

$$1 \leq i \leq \frac{N}{2}; \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{2} - 1.$$

8. Применяем процедуру (2) к полученным матрицам $[U_{ij}^{(1)}], [V_{ij}^{(1)}], [a_{ij}^{(1)}], [b_{ij}^{(1)}]$:

$$\hat{K}([U_{ij}^{(1)}], [V_{ij}^{(1)}], [a_{ij}^{(1)}], [b_{ij}^{(1)}]) = [h_{ij}^{(1)}].$$

Совокупность процедур (6-8), в результате которых из матриц

$$[U_{ij}^{(k-1)}], [V_{ij}^{(k-1)}], [a_{ij}^{(k-1)}], [b_{ij}^{(k-1)}], [h_{ij}^{(k-1)}]$$

$(k-1)$ -го приближения, получают соответствующие «усредненные» матрицы k -го приближения (с

уменьшенным в два раза базовым размером), обозначим символом \hat{G} :

$$\hat{G}([U_{ij}^{(k-1)}], [V_{ij}^{(k-1)}], [a_{ij}^{(k-1)}], [b_{ij}^{(k-1)}], [h_{ij}^{(k-1)}]) = \quad (5)$$

$$= ([U_{ij}^{(k)}], [V_{ij}^{(k)}], [a_{ij}^{(k)}], [b_{ij}^{(k)}], [h_{ij}^{(k)}]).$$

9. Используя матрицу $[h_{ij}^{(1)}]$ как исходную и последовательно применяя процедуру (14) при $k = 2, 3, \dots, (M-1)$, находим матрицы $[h_{ij}^{(2)}], [h_{ij}^{(3)}], \dots, [h_{ij}^{(M-1)}]$ с размерами $(N/4 \times N/4), (N/8 \times N/8), \dots, (2 \times 2)$ соответственно.

10. Восстановленная матрица h – коэффициентов в K –м приближении определяется как сумма матриц:

$$[h_{ij}^{(K)}] = [h_{ij}^{(0)}] + \hat{G}([h_{ij}^{(1)}]) + \hat{G}^2([h_{ij}^{(2)}]) + \dots + \hat{G}^K([h_{ij}^{(K)}]); \quad K \leq M-1. \quad (6)$$

где \hat{G} – оператор двукратного увеличения размера квадратной матрицы $[x_{ij}]$ с линейной интерполяцией нулевого порядка:

$$[y_{ij}] = \hat{G}([x_{ij}]); \quad y_{2i-1, 2j-1} = y_{2i-1, 2j} = y_{2i, 2j-1} = y_{2i, 2j} = x_{ij}. \quad (7)$$

При $K = M-1$ получаем восстановленную с максимально возможной в рамках данного алгоритма точностью матрицу h – коэффициентов

$$[h_{ij}^{(M-1)}] \equiv [h_{ij}^{(0)}].$$

Общее число арифметических операций алгоритма $\sim 100N^2$, т.е. линейно зависит от числа ФПЭ, что особенно существенно при больших N . При этом, как показали результаты компьютерного моделирования, среднеквадратичная погрешность h – коэффициентов, восстановленных данным алгоритмом, $(\langle (h_{ij}^{(0)} - h_{ij})^2 \rangle_{ij})^{1/2}$, не более чем на 10%, превышает погрешность восстановления по методу МНК с итерационным решением системы уравнений.

Структура алгоритма 1-10 позволяет для систем реального времени в конвейерном режиме вести параллельную обработку регистрируемых изображений с использованием матрицы процессоров, общим числом вплоть до $\sim N^2$, каждый из которых выполняет операции алгоритма для определенной группы приемников.

Используя разработанный алгоритм как базовый, можно разработать алгоритм восстановления для различных иерархий двумерного сканирования, что позволяет повысить точность восстановления изображения и характеристики матричных ФПЭ.

Результаты соответствующих экспериментов приведены на рис. 1, 2.



Рисунок 1 – Образцы тестовых изображений: 1 – один из кадров, снятых матрицей ФПЭ при различных смещениях; 2 – изображение, восстановленное по разработанному алгоритму из последовательных кадров, снятых со смещением; 3 – матрица восстановленных характеристик ФПЭ (коэффициент h_{ij})

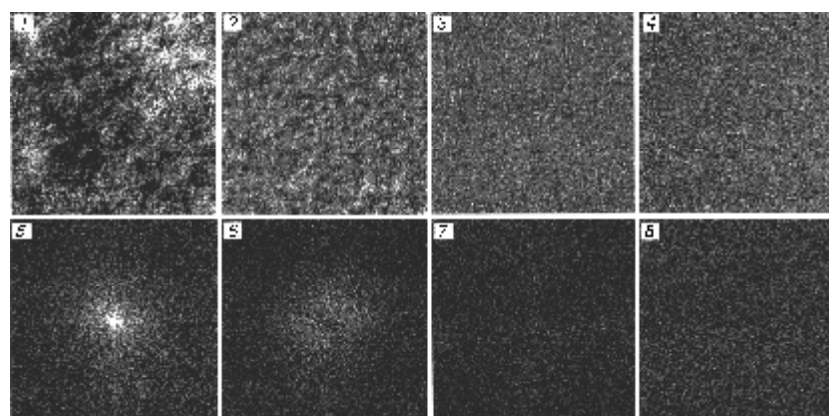


Рисунок 2 – Погрешности восстановления h – коэффициентов: 1 – остаточные шумы (погрешности) восстановления изображения, полученных в результате использования двумерного сканирования на 1 пиксель; 2 – сканирования на 1 и на 8 пикселей; 3 – сканирования на 1,2,4,8,16,32,64 пикселей; 4 – матрица исходных (некоррелированных) шумов ФПЭ; 5 – 8 – их пространственные Фурье-спектры соответственно

ВЫВОДЫ. Разработана математическая модель сканирующего дискретного матричного преобразования изображений с адаптивной цифровой коррекцией аддитивных коэффициентов преобразова-

ния ФПЭ. Для их восстановления разработан экономичный алгоритм решения некорректной переопределенной системы линейных уравнений специального вида с $N^2 = 2^{2M}$ неизвестными, включающий $\sim 100N^2$ операций, допускающий распараллеливание вычислений на $\sim N^2$ процессоров. Эффективность процедур и алгоритмов подтверждена компьютерным моделированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапцин В.М., Мосьпан В.А., Кириленко А.И. О роли движения глаза в формировании изображений зрительной системы человека // VIII Всеукраинская научно-техническая конференция «Физические процессы и поля технических и биологических объектов», ноябрь 2009, г. Кременчуг. – С. 255.
2. Пат. 4876453 США. Method and apparatus for calibrating and imaging sensor / Wirick Michael P. Hughes Aircraft Co. – № 830788. Опубл. 24.10.89, НКИ 250/332.
3. Сапцин В.М. К проблеме выравнивания фоточувствительности приемных элементов в тепловизорах с многоэлементными матричными ИК-фотопреобразователями. – М., 1989. – 35 с. – (Препринт / ФИАН, № 72).
4. Сапцин В.М., Ганжа В.Л. Численное моделирование и оптимизация модуляционной автокалибровки матричных ИК-преобразователей. – Мн., 1993. – 48 с. – (Препринт / АНК ИТМО АНБ, № 7).
5. Сапцин В.М., Ляшенко В.П. Цифровая идентификация параметров матричных преобразователей изображений // Междунар. конф. MPZIS-2005, ноябрь 2005, г. Днепропетровск. – С. 158–159.

6. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в зрении. – М.: Наука, 1965. – 250 с.

REFERENCES

1. Saptsin VM, Mospan VA, Kirilenko AI The role of eye movements in the formation of images of human visual system // VIII All-Ukrainian scientific-technical konferentsyya "physical processes and fields tehniceskikh and Bilol-gichesikh objects", November 2009, s. Kremenchug. – P. 255 [in Russian].
2. Pat. 4876453 USA. Method and apparatus for calibrating and imaging sensor / Wirick Michael P. Hughes Aircraft Co. – № 830788. Publ. 10/24/1989, NKI 250/332.
3. Saptsin V.M. The problem of alignment of the photosensitivity of receiving elements in the imager with multielement matrix infrared photoelectric converters. – M., 1989. – 35 p. – (Preprint FIAN, № 72) [in Russian].
4. Saptsin V.M., Ganja V.L. Numerical simulation and optimization of the modulation calibration of the matrix IR – converters. – Moscow., 1993. – 48 p. – (Preprint / ANK ITMO ANB, № 7) [in Russian].
5. Saptsin VM Liashenko VP Digital identification of the parameters of matrix transducers Image // Int. Conf. MPZIS-2005, November 2005, s. Dnipropetrovsk. – P. 158–159 [in Ukrainian].
6. Yarbus A.L. The role of eye movements in eyesight. – Moscow: Nauka (Science), 1965. – 250 p. [in Russian].

Стаття надійшла 14.04.2011.
Рекомендована до друку
к.т.н., проф. Луговим А.В.