

К ПРОБЛЕМЕ ПОДАВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ШУМОВ. АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ НЕРАВНОМЕРНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ

Анотація. У роботі проводиться аналіз проблеми подавлення геометричних шумів у матричному перетворювачі зображень. Розглядається модель матриці з випадковим розташуванням фотоприймальних елементів. Пропонуються процедури та алгоритми, що дозволяють формувати матрицю регулярно розташованих віртуальних фотоприймальних елементів із заданою роздільною здатністю, проводиться їх комп'ютерне моделювання. Результати чисельних експериментів демонструють працездатність запропонованих процедур та алгоритмів, а також вказують на наявність та необхідність пошуку оптимальних умов їх реалізації.

Ключові слова: подавлення геометричних шумів, матриці фотоприймальних елементів, просторова регуляризація, комп'ютерне моделювання.

Аннотация. В работе проводится анализ проблемы подавления геометрических шумов в матричном преобразователе изображений. Рассматривается модель матрицы со случайным расположением фотоприемных элементов. Предлагаются процедуры и алгоритмы, позволяющие формировать матрицу регулярно расположенных виртуальных фотоприемных элементов с заданным разрешением, проводится их компьютерное моделирование. Результаты численных экспериментов демонстрируют работоспособность предложенных процедур и алгоритмов, а также указывают на наличие и необходимость поиска оптимальных условий их реализации.

Ключевые слова: подавление геометрических шумов, матрицы фотоприемных элементов, пространственная регуляризация, компьютерное моделирование.

Abstract. An analysis of the problem of suppression of geometric noises in the matrix image converter is carried out. A model of matrix with randomly placed photoreception elements is considered. Procedures and algorithms allowing us to shape the matrix of regularly placed virtual photoreception elements with given resolution are offered and their computer modeling is performed. Results of numerical experiments confirm workability of the procedures and algorithms offered, as well as show existence and necessity of finding optimal conditions for their implementation.

Keywords: suppression of geometrical noises, matrix photoreception elements, spatial regulation, computer modeling.

1. Введение

Начало третьего тысячелетия ознаменовалось новым витком в развитии информационных технологий. Информация поступает с таких источников и в таких объемах, о которых человечество раньше даже не имело представления. Виды и особенности информации становятся все более разнообразными. Но откуда бы информация ни поступала и какими бы свойствами она не обладала – будь-то исследования, проводимые в космосе, данные, получаемые навигационными системами, изображения, передаваемые видеоустройствами, всегда возникала задача получить максимальную точность сигнала. Но добиться точной регистрации данных невозможно из-за искажения сигнала шумами, которые могут быть обусловлены как внешними возмущениями, так и случайными отклонениями параметров регистрирующих устройств [1].

Особое место в работе с информацией занимают системы регистрации, распознавания и восстановления изображений. Методы обработки изображения могут существенно различаться в зависимости от того, каким путем изображение было получено, какими типами шумов характеризуется. Проблема шумоподавления является одной из самых актуальных и распространенных проблем в области обработки как статичных изображений, так

и динамически меняющейся последовательности сцен. Если сцена регистрируется матричными преобразователями изображений (МПИ), которые потенциально имеют наибольшую эффективность, то в них, помимо временного шума, обычно наблюдается и так называемый «геометрический шум». Этот шум обусловлен разбросом чувствительности и других характеристик фотоприемных элементов (ФПЭ) матрицы, которые также могут меняться во времени, но достаточно медленно. Решение проблемы геометрического шума имеет особое значение для достижения предельных характеристик МПИ ИК-диапазона [2].

Традиционный подход к подавлению геометрических шумов МПИ связан с использованием эталонных площадных излучателей [3], дающих достаточно высокую по полю зрения однородность интенсивности излучения. Регистрируются два эталонных изображения с различными интенсивностями, по ним в линейном приближении для каждого ФПЭ вычисляются поправочные коэффициенты (мультипликативные и аддитивные), которые запоминаются в памяти вычислительного устройства и далее используются для цифровой коррекции сигналов сцены. Этот подход не лишен недостатков, связанных со следующим:

- необходимость использования эталонных излучателей (для корректной коррекции как минимум два);
- высокие требования к их однородности по полю зрения;
- необходимость использования в процессе калибровки набора эталонных излучателей, если динамический диапазон сигналов достаточно велик или существенно меняется в пространстве или во времени;
- необходимость периодического повторения процедуры калибровки, если спектральный состав сцены ФПЭ или каналов параллельной передачи и обработки сигналов меняется во времени;
- неадаптивный в целом характер процедуры как к характеристикам регистрируемой в динамике сцены, так и к характеристикам матрицы ФПЭ, которые также могут меняться во времени.

В работах [4–6] исследовался новый подход к подавлению геометрического шума, обеспечивающий его коррекцию в режиме максимально возможной адаптации к условиям измерений – в процессе наблюдения сцены непосредственно по ее сигналам.

Используя двумерное малоамплитудное сканирование со специально подобранным законом, осуществляем смещение матрицы ФПЭ относительно изображения, регистрируем последовательность кадров и производим их оцифровку.

Идея модуляции тех или иных параметров системы (или сигнала) с целью ее идентификации не нова, но, как впервые показано в [2] и подтверждено в численных экспериментах [4, 5], именно двумерное сканирование позволяет решить проблему безэталонного подавления геометрического шума по сигналам сцены.

На момент начала этих работ ни состояние технологии производства матричных ИК-элементов, ни состояние вычислительной техники не позволяли говорить о практическом и, тем более, широком применении предложенного подхода в реальных системах.

Однако за прошедший период вычислительная мощность компьютеров, микропроцессоров и других вычислительных устройств возросла на много порядков, количество ФПЭ матриц увеличилось до нескольких мегапикселей, а размеры ФПЭ уменьшились до дифракционного предела – порядка ~ 10 мкм, что делает весьма актуальной задачу дальнейшего развития процедур и алгоритмов безэталонной калибровки МПИ.

В связи с этим отметим, что в последние годы появился ряд работ, направленных на разработку алгоритмов [6] и практическое применение идеи микросканирования для подавления геометрических шумов в МПИ [7–12].

Тем не менее, проблемы повышения стабильности структуры матриц ФПЭ и одновременно уменьшения динамически меняющегося геометрического шума остаются и даже становятся более актуальными в связи с повышением требований к чувствительности, ко-

личеству пикселей, динамическому диапазону, качеству изображений в целом, созданию многоспектральных МПИ [13] и т.д.

Указанный подход может быть применен к процедурам своеобразной калибровки результатов параллельных измерений в биофизических системах [14], в спортивной метрологии [15], при моделировании экономических, экологических и социальных процессов [16].

Особенностью безэталоной калибровки МПИ по сигналам сцены является требование пространственной периодичности в расположении ФПЭ матрицы. Однако это условие, если иметь ввиду широкий спектр применений обсуждаемого подхода к проблеме адаптивной калибровки многоэлементных параллельных измерений, выполняется далеко не всегда. В частности, отметим, что в силу технологических факторов и природы материалов, из которых изготавливаются ФПЭ, ФПМ характеризуются неоднородностью чувствительности не только по элементам, но и внутри каждого элемента. Это означает, что расположение эффективных центров фоточувствительности приемников может не совпадать с их геометрическими центрами (центрами квадратов). С другой стороны, из-за искажений формируемых изображений оптической системой (особенно широкоформатными камерами) размеры пикселей исходного изображения (сцены) могут не совпадать с размерами элементов матрицы и меняться по полю (например, от центра к краям) либо из-за особенностей системы сканирования, смещения по полю не являются однородными. Кроме того, технологически отработанная структура матриц в виде набора ФПЭ квадратной формы может оказаться не самой эффективной как с точки зрения достижения предельных характеристик МПИ (например, по сравнению с сотовой), так и не самой оптимальной с точки зрения согласования с удобным для реализации законом сканирования [2]. С учетом изложенного выше, было бы интересно разработать подход, позволяющий сформировать виртуальный набор пикселей изображения в плоскости МПИ, имеющих нужный размер, форму и симметрию. Актуальность постановки такой задачи определяется не только особенностями МПИ и процедур подавления геометрического шума по сигналам сцены, но и широтой возможных применений результатов ее решения и анализа в других указанных выше областях [14–16].

Целью настоящей работы является разработка комплексной математической и компьютерной модели матричного фотоприемника с нерегулярным расположением физических фотоприемных элементов (ФФПЭ) и разработка подхода, позволяющего алгоритмическими методами формировать матрицу виртуальных фотоприемных элементов (ВФПЭ) с заданной регулярной структурой.

2. Материал и результаты исследования

В данной работе рассматривается компьютерная модель МПИ с нерегулярно расположенными ФФПЭ. На базе компьютерной модели проводится исследование различных вариантов функционирования матрицы, алгоритмов цифровой обработки ее сигналов и определяются оптимальные характеристики матрицы ВФПЭ.

Геометрические приближения модели. С целью упрощения вычислительных процедур и выявления основных особенностей изучаемого подхода использовалась следующая система приближений:

1. ФФПЭ могут иметь различную форму и размеры (в силу различных факторов), однако, с точки зрения простоты реализации, выбираем ФПЭ квадратной формы, с одинаковым размером и ориентацией.

2. Заполняем случайным образом ФПЭ в область поля зрения оптической системы (пространство МПИ).

В контексте данной модели плоскость матрицы ФПЭ представляет собой квадратную площадку заданных размеров, имеющую свою координатную сетку с таким же разре-

шением, как и тестовое изображение (256x256 пикселей). С помощью этой сетки и будет моделироваться размещение приемников, происходит регистрация тестового изображения и другие физические и алгоритмические процедуры.

К алгоритму размещения выдвигаются следующие требования:

- приемники не должны пересекаться;
- приемники должны максимально заполнять плоскость МПИ;
- приемники не должны пересекать заданные границы МПИ.

Предварительные эксперименты показали, что прямое использование генератора случайных чисел для определения случайных координат центра каждого ФПЭ оказалось неэффективным по следующим причинам:

– во-первых, стандартные генераторы случайных чисел работают циклически и имеют хотя и большой, но конечный период повторения, что приводит к генерации одних и тех же координат ФПЭ через каждый цикл и, как показали численные эксперименты, к неполному заполнению пространства МПИ;

– во-вторых, с размещением каждого последующего ФПЭ вероятность найти свободное место в пространстве МПИ уменьшается и, наконец, становится настолько малой, что максимальное заполнение случайным образом, даже в случае «идеального» генератора случайных чисел (ГСЧ), становится практически не осуществимым.

Исходя из вышесказанного, был разработан метод получения координат ФПЭ, позволяющий расположить случайным образом максимальное количество ФПЭ любого размера в плоскости МПИ. Суть разработанного метода состоит в реализации следующей последовательности процедур:

а) в качестве половины стороны квадрата ФФПЭ выбираем четное, относительно небольшое целое число r ; размер тестового эталонного изображения L выбираем равным 256, однако возможно использование изображений и с другим разрешением, кратным 2^n ;

б) создаем 2 матрицы A и B размером $L \times L$. Матрицу A заполняем числами от 1 до 65 536 ($L \times L$) в порядке возрастания, матрицу B – “1”. Первая матрица будет использоваться для вычисления координат размещения ФПЭ, вторая – для определения свободного места в пространстве МПИ;

в) для того, чтобы приемники не размещались за пределами границ матрицы, выполняем следующую процедуру: по краям матрицы B выделяем область в виде рамки шириной r и заполняем ее “0”; программируем условие разрешения размещения центра ФФПЭ: если значение ячейки матрицы B – “1”, то размещать элемент можно, если “0” – то нет. Таким образом, где бы не расположился центр ФФПЭ, он не выйдет за границы плоскости МПИ;

г) из матрицы A выбираем ячейку с наибольшим значением и умножаем его на сгенерированное случайное число $0 \div 1$ (с помощью функции $\text{random}(1)$), получаем номер ячейки в плоскости МПИ, куда можно разместить ФПЭ;

д) по полученному в п. г) номеру ячейки определяем ее значение из матрицы B . Если оно равняется “1”, тогда приемник можно размещать на плоскости МПИ, иначе повторяем пункт в). Если условие размещения выполняется, тогда полученную ячейку выбираем как центр квадрата ФПЭ;

е) чтобы приемники не пересекались, вокруг центра каждого вновь вводимого ФПЭ рисуем квадрат со стороной, в два раза больше заданной. В матрице B всю область, которая поглощается удвоенным квадратом, заполняем нулями. Данная процедура автоматически исключает пересечение ФПЭ, допуская при этом их максимальное сближение;

е) проводим перенумеровку свободных центров квадратов ФПЭ по матрице A , исключая из возможных центров те точки, которые принадлежат к области уже размещенных квадратов удвоенного размера;

ж) повторяем пункты г)–е) до тех пор, пока в матрице B не останется ни одной “1”.

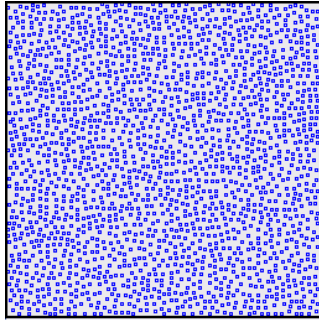


Рис. 1. Матрица случайно размещенных ФПЭ. Размер матрицы 256x256, размер ФПЭ – 4x4

Результаты моделирования матрицы физических ФПЭ по указанному алгоритму для нескольких случайных реализаций приведены в табл. 1. Одна из реализаций матрицы ФПЭ отражена на рис. 1.

Таблица 1. Моделирование матрицы ФФПЭ

№ реализации	Размер ФФПЭ	Количество ФФПЭ	Доля занятой площади, %
1	4x4	2034	49,6
2	4x4	2065	50,4
3	4x4	2059	50,26
4	4x4	2048	50
Среднее		2051	50,065

Математические модели формирования сигналов физических и виртуальных ФПЭ. Будем считать, что связь между сигналом (i, j) ФФПЭ U_{ij} и интенсивностью падающего на него излучения I_{ij} выражается соотношением

$$U_{ij} = a_{ij} \cdot I_{ij} + b_{ij} + e_{ij}, \quad (1)$$

где a_{ij} и b_{ij} – коэффициенты линейного преобразования (мультипликативный коэффициент a_{ij} определяет чувствительность данного ФФПЭ, аддитивный коэффициент b_{ij} – уровень отсчета сигнала), e_{ij} – шум – независимая реализация случайного гауссовского процесса с нулевым средним и заданной дисперсией. В данной работе мы считаем e_{ij} пренебрежительно малым. В простейшем случае, с целью учета влияния только геометрических факторов, можно считать, что $a_{ij} = 1$ и $b_{ij} = 0$. В общем случае все коэффициенты a_{ij} и b_{ij} могут задаваться в соответствии с той или иной моделью («изображения» матриц $[a_{ij}]$ и $[b_{ij}]$ могут быть следствием реализаций тех или иных случайных процессов как независимых, так и коррелированных, или отображением какого-то реального изображения, учитывать пространственные неоднородности технологии изготовления матрицы и т.д.).

Рассмотрим процесс формирования сигналов ВФПЭ.

Задаем размер ВФПЭ в виде $d = 2^n$ при условии, что

$$2r \leq d \leq L. \quad (2)$$

Исходя из условия (2), величины L и выбранного ранее размера ФФПЭ – $2r$, рассматриваем 3 варианта разбиения плоскости МПИ на квадратные ячейки: 1) 16x16; 2) 32x32; 3) 64x64 (рис. 2 для одного из разбиений). В зависимости от расположения ФФПЭ относительно границ ячеек, относим каждый ФФПЭ к одному из 3-х возможных типов:

- приемник располагается в 1-ой ячейке;
- приемник располагается в 2-х ячейках;
- приемник располагается в 4-х ячейках.

Зависимость распределения ФФПЭ по типам для 3-х вариантов разбиения приведена в табл. 2.

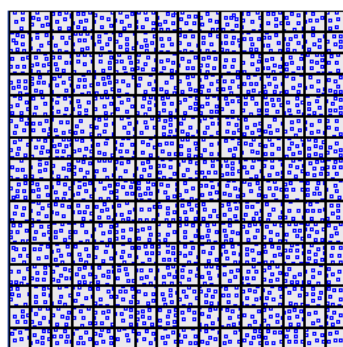


Рис. 2. Эффективная матрица виртуальных ФПЭ с разбиением на 16x16 квадратов и физическими ФПЭ 4x4 пикселя

Таблица 2. Распределение ФФПЭ

№ эксп.	Кол-во ВФПЭ	Размер ФФПЭ	Кол-во ФФПЭ	Кол-во ФФПЭ, попавш. в 1 ВФПЭ	Кол-во ФФПЭ, попавш. в 2 ВФПЭ	Кол-во ФФПЭ, попавш. в 3 ВФПЭ
1	16x16	4x4	2048	1619	405	24
2	32x32	4x4	2048	1202	733	113
3	64x64	4x4	2048	529	1030	489

Отметим, что фактическое предельное разрешение (по числу пикселей) матрицы ВФПЭ в принципе не может превышать числа ФФПЭ. Если отбросить ФФПЭ 2-го и 3-го типов, то для 3-го варианта разбиения предельное разрешение будет определяться не количеством ВФПЭ (64x64), а количеством ФФПЭ 1-го типа – 529 ($529 < 4096$), в то время как

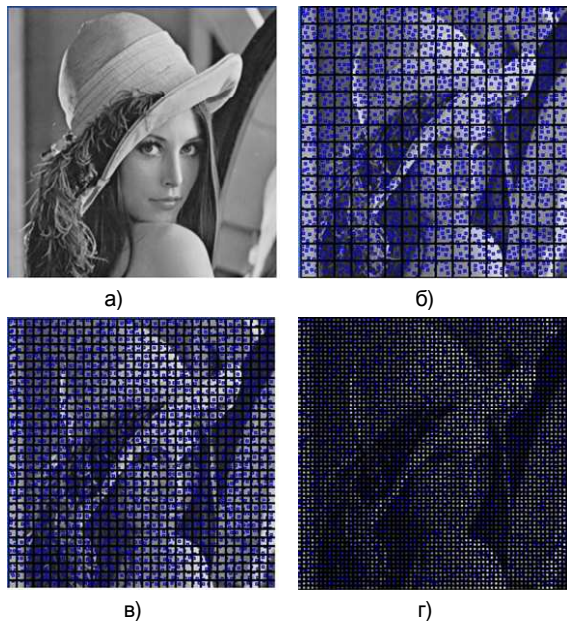


Рис. 3. Дискретизированное тестовое изображение

числу ВФПЭ, и приведено усреднение интенсивности сигнала в пределах этих ячеек. Ограничимся детальным рассмотрением 2-го случая. Дискретизированное тестовое изображение с усреднением для случаев разбиения 16x16, 32x32 и 64x64 приведено на рис. 3, а их статистические характеристики – в табл. 3.

Таблица 3. Статистические характеристики эталонных тестовых изображений

Изображение	МО	D	СКО
Эталонное (рис. 4 а)	139,5	2529,1	50,3
Эталонное усредненное 16x16	116,3	1626,4	40,3
Эталонное усредненное 32x32	116,3	1944,8	44,1
Эталонное усредненное 64x64	116,2	2197,9	46,9

Опираясь на рис. 4, введем следующие упрощенные обозначения:

- 1) интенсивности излучений ячеек 1, 2, 3, 4 – I_1, I_2, I_3, I_4 соответственно;
- 2) Коэффициенты преобразования для физического приемника F1 – a_1 и b_1 ; для приемника F2 – a_2 и b_2 ; для приемника F3 – a_3 и b_3 ; для приемника F4 – a_4 и b_4 ;

- 3) площадь приемника F1, попавшего в ячейку 1 полностью – S_{11} ; площади приемника F2, попавшего в ячейки 1 и 2 – S_{21} и S_{22} соответственно; площади приемника F3, попавшего в ячейки 1 и 3 – S_{31} и S_{33} ; площади приемника F4, попавшего в ячейки 1, 2, 3, 4 –

для вариантов разбиения 1 и 2 ситуация обратная ($1619 > 256$ и $1202 > 1024$). Таким образом, отметим, что для достижения наилучшего качества функционирования МПИ с виртуальными ФПЭ необходимы учет ФФПЭ 2-го и 3-го типов, оптимизация по разбиению на ВФПЭ и соответствующий выбор алгоритма формирования выходного изображения.

В данной работе предлагается алгоритм формирования сигналов ВФПЭ, детали которого поясняют рис. 3 и приводимые ниже расчетные формулы. Так как разрешение МПИ с ВФПЭ не может превышать числа ячеек разбиения, то для анализа особенностей его функционирования использовались 2 типа тестовых изображений: 1) исходное «аналоговое» «Lenna», размером 256x256; 2) тестовое «Lenna», в котором исходное изображение разбито на число ячеек, равное

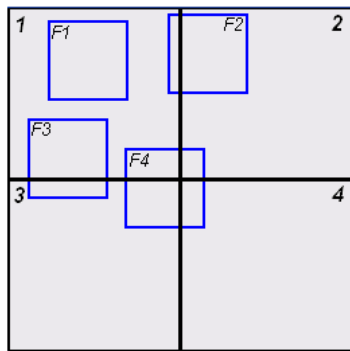


Рис. 4. Примеры расположения физических ФПЭ относительно эффективных ячеек

$S41, S42, S43$ и $S44$ соответственно. Площадь каждого приемника равна 1;

4) сигнал ВФПЭ 1 (левая верхняя ячейка на рис. 3), который включает ФФПЭ всех 3-х типов, формируется как линейная комбинация сигналов этих приемников в соответствии с соотношением

$$\tilde{U} = U1 + k2 \cdot U3 + k2 \cdot U3 + k4 \cdot U4, \quad (3)$$

$$U1 = S1 \cdot I1 \cdot a1 + b1, \quad (4)$$

$$U2 = \frac{(S21 \cdot I1 + S22 \cdot I2) \cdot a2 + b2}{S21 + S22} \cdot S21,$$

где $S21 + S22 = 1$, следовательно, получаем

$$U2 = [(S21 \cdot I1 + S22 \cdot I2) \cdot a2 + b2] \cdot S21, \quad (5)$$

$$U3 = [(S31 \cdot I1 + S32 \cdot I3) \cdot a3 + b3] \cdot S31, \quad (6)$$

$$U4 = [(S41 \cdot I1 + S42 \cdot I2 + S43 \cdot I3 + S44 \cdot I4) \cdot a4 + b4] \cdot S41, \quad (7)$$

где $1 \geq k2 \geq 0, 1 \geq k4 \geq 0$ – весовые множители, позволяющие регулировать вклад элементов 2-го и 3-го типов в формирование сигналов ВФПЭ. Структура выражений (4-7) позволяет в явном виде выделить аддитивную составляющую \tilde{b} :

$$\tilde{b} = b1 + k2 \cdot b2 \cdot S21 + k2 \cdot b3 \cdot S31 + k4 \cdot b4 \cdot S41. \quad (8)$$

Поскольку в данной работе не ставится задача восстановления характеристик ВФПЭ по сигналам сцены с использованием микросканирования, то мультипликативный коэффициент ВФПЭ моделируется выражением

$$\tilde{a} = a1 \cdot S11 + k2 \cdot a2 \cdot S21 + k2 \cdot a3 \cdot S31 + k4 \cdot a4 \cdot S41. \quad (9)$$

В таком случае восстановленная усредненная интенсивность излучения регистрируемого ВФПЭ будет определяться выражением

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{U} - \tilde{b}}{\tilde{a}}, \quad (10)$$

где \tilde{I} – эффективная интенсивность излучения;

\tilde{U}, \tilde{b} и \tilde{a} – полученные эффективные значения для каждой квадратной ячейки.

Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение. В численных экспериментах моделировались процессы регистрации сигналов сцены ФФПЭ с использованием соотношения (1), формировались сигналы ВФПЭ с соотношением (3), произведено восстановление полученных изображений (10), изучались их статистические характеристики, проводился сравнительный анализ исходного и восстановленного изображений (дисперсия и СКО). Результаты эксперимента отражены в табл. 4 и проиллюстрированы на рис. 5.

Таблица 4. Результаты моделирования восстановления сцены с помощью МПИ

№ п/п	Разбиение ВФПЭ	Структура тест. изобр.	k1	k2	k4	a	b	D	СКО
1	16x16	16x16	1	1	1	1	0	4,84	2,2
2	16x16	16x16	1	0,5	0,25	1	0	1,64	1,28
3	16x16	16x16	1	0	0	1	0	0	0
4	16x16	256x256	1	1	1	1	0	55,5	7,45

5	16x16	256x256	1	0,5	0,25	1	0	30,94	5,56
6	16x16	256x256	1	0	0	1	0	28,34	5,32
7	32x32	32x32	1	1	1	1	0	25,9	5,08
8	32x32	32x32	1	0,5	0,25	1	0	19,9	4,47
9	32x32	32x32	1	0	0	1	0	270,6	16,45
10	32x32	256x256	1	1	1	1	0	703,9	26,5
11	32x32	256x256	1	0,5	0,25	1	0	442,4	21,03
12	32x32	256x256	1	0	0	1	0	329,8	18,2
13	64x64	64x64	1	1	1	1	0	656,9	25,6
14	64x64	64x64	1	0,5	0,25	1	0	657,5	25,6
15	64x64	64x64	1	0	0	1	0	1000	31,6
16	64x64	256x256	1	1	1	1	0	1794	42,35
17	64x64	256x256	1	0,5	0,25	1	0	1797	42,39
18	64x64	256x256	1	0	0	1	0	972,9	31,19



Рис. 5. Примеры восстановленных изображений: а) МПИ с разбиением 32x32 ВФПЭ и структурой тестового изображения 32x32; б) МПИ с разбиением 32x32 ВФПЭ и структурой тестового изображения 256x256; в) МПИ с разбиением 16x16 ВФПЭ и структурой тестового изображения 16x16; г) МПИ с разбиением 64x64 ВФПЭ и структурой тестового изображения 64x64

3. Выводы

Анализ существующих подходов к подавлению геометрических шумов в матричном преобразователе изображений высветил их ограниченные возможности и показал необходимость разработки нового методологического, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего получить изображение более высокого качества.

Результаты данной работы представлены ниже:

- предложены процедуры и алгоритмы формирования регулярной матрицы ВФПЭ из случайно расположенных ФФПЭ;
- проведено компьютерное моделирование процедур регистрации и восстановления

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. Наилучшее качество восстановления достигается для изображения со структурой 32x32 при матрице ВФПЭ 32x32 ячейки (рис. 5 а).

2. Высокочастотная пространственная составляющая исходного изображения с характерным масштабом, меньшим размера ВФПЭ, ухудшает качество восстановленного изображения (рис. 5 а и 5 б);

3. Уменьшение вклада ФФПЭ 2-го и 3-го типов в формирование сигнала ВФПЭ может, в зависимости от структуры тестового изображения, как улучшать, так и ухудшать качество восстановленного изображения (например, характер изменения СКО в группах строчек [1,2,3], [7,8,9] и [13,14,15] или рис. 5 г).

4. Для более детального уточнения условий оптимальности функционирования регуляризованного МПИ с матрицей ВФПЭ требуется дальнейшее исследование с использованием тестовых изображений и МПИ с более высоким разрешением до мегапикселя и более.

изображений, полученных регулярной матрицей ВФПЭ;

- приведены результаты численных и компьютерных экспериментов;
- показано наличие оптимальных условий функционирования матрицы ВФПЭ.

Полученные результаты не только подтвердили практическую значимость предлагаемого подхода, но и обозначили сферу дальнейших исследований:

- использование безэталонного адаптивного подхода к подавлению геометрических шумов;
- применение нейросетевого аппарата для организации параллельной обработки информации;
- усовершенствование программного обеспечения, позволяющего выполнять гибкую настройку всех параметров системы в процессе моделирования.
- возможность обработки изображений в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райх В.В. Информационная безопасность. Концептуальные, правовые, организационные и технические аспекты / В.В. Райх, В.А. Тихонов. – М.: Гелиос АРВ, 2006. – 528 с.
2. Сапцин В.М. К проблеме выравнивания фоточувствительности приемных элементов в тепловизорах с многоэлементными матричными ИК-фотопреобразователями / Сапцин В.М. – М., 1989. – 35 с. – (Препринт / ФИАН, №72).
3. Spatial noise in staring IR focal plane arrays / D.A. Scribner, M.R. Krueger, K. Sarkady [et al.] // Proc. SPIE. – 1989. – Vol. 930. – P. 56 – 63.
4. Kober V.I. New method of digital modulative adaptive autocalibration of IR-imaging devices / V.I. Kober, V.M. Sapsin, V.P. Vavilov // Eurotherm Seminar № 27 QIRT'92, (Chatenay-Malabry, France, July 7-9, 1992). – Paris: EETI, 1992. – P. 3 – 7.
5. Сапцин В.М. Численное моделирование и оптимизация модуляционной автокалибровки матричных ИК-преобразователей / Сапцин В.М., Ганжа В.Л. – Мн., 1993. – 48 с. – (Препринт / АНК ИТМО АНБ, № 7).
6. Сапцин В.М. Цифровая идентификация параметров матричных преобразователей изображений / В.М. Сапцин, В.П. Ляшенко // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2005): Тези доп., (Дніпропетровськ, листопад 2005). – Дніпропетровськ, 2005. – С. 158 – 159.
7. Математическое моделирование коррекции неоднородности сканирующих многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены / В.Г. Морозова, С.И. Жегалов, В.Н. Соляков [и др.] // 19-я междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2006. – С. 140 – 141.
8. Лебедев Д.Г. Моделирование адаптивного выравнивания параметров линейки фотоприемника с использованием микросканирования / Д.Г. Лебедев, К.Т. Лыонг // Информационные процессы. – 2007. – Т. 7, № 2. – С. 124 – 137.
9. Соляков В.Н. Коррекция по сигналам сцены неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств с микросканированием / В.Н. Соляков, В.Г. Морозова, С.И. Жегалов // 20-я междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2008. – С. 197 – 198.
10. Метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены / В.Н. Соляков, С.И. Жегалов, Л.Д. Сагинов [и др.] // Прикладная физика. – 2008. – № 1. – С. 60 – 71.
11. Соляков В.Н. Метод коррекции неоднородности по сигналам сцены многоэлементных фотоприемных устройств с микросканированием / В.Н. Соляков, С.И. Жегалов, В.Г. Морозова // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 99 – 106.
12. Соляков В.Н. Результаты практического моделирования коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены / В.Н. Соляков, С.И. Жегалов, В.Г. Морозова // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 107 – 112.
13. Соляков В.Н. Исследования долговременной стабильности параметров двухточечной коррекции формирователя сигналов изображения на базе МФПУ формата 256x256 элементов / В.Н. Соляков, М.В. Кортиков // ПФ. – 2010. – № 1. – С. 58 – 61.

14. Сапцин В.М. О роли движений глаза в формировании изображений зрительной системой человека / В.М. Сапцин, В.А. Мосьпан, А.И. Кириленко // VIII Всеукр. наук.-техн. конф. «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: Тези наук. доп. – Кременчук: КДУ імені М. Остроградського, 2009. – С. 255.
15. Сапцин В.М. Принцип невизначеності та проблема вимірності у спортивних змаганнях / В.М. Сапцин, А.Т. Ципов'яз // Матеріали II-ої Всеукр. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми фізичного виховання, спорту та валеології»: зб. наук. праць. – Кременчук: КДПУ, 2009. – С. 122 – 127.
16. Сапцин В.М. Проблема измеримости и принцип локальности в моделировании экономических, экологических и социальных процессов / В.М. Сапцин, И.И. Киба, О.М. Марткович // X Міжнар. наук.-практ. конф. «Біосферно-ноосферні ідеї В.І. Вернадського та еколого-економічні проблеми розвитку регіонів». – Кременчук: КДПУ, 2008. – С. 86.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2010