

УДК 621.384.3

Градиентная коррекция неоднородности фотоприемных устройств с микросканированием

С. И. Жегалов, В. Н. Соляков, В. Г. Фетюхина

Рассмотрен метод коррекции неоднородности фотоприемных устройств инфракрасного диапазона спектра, основанный на определении градиентов сигналов сцены при микросканировании и последующем восстановлении изображения путем суммирования градиентов.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: коррекция, неоднородность, фотоприемное устройство, изображение, градиент, метод.

Введение

Существующие неоднородности матричных фотоприемных устройств (МФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона могут существенно исказить воспроизводимую картину сцены.

В данной работе рассматривается метод коррекции неоднородности фотоприемных устройств (ФПУ) инфракрасного диапазона спектра, основанный на определении градиентов сигналов сцены при микросканировании и последующем восстановлении изображения путем суммирования градиентов.

Общая схема градиентной коррекции неоднородности

Общую схему метода иллюстрирует рис. 1. Микросканер сдвигает сцену относительно элементов ФПУ вверх-вниз, влево-вправо и по диагоналям. Сдвиг осуществляется на полпиксела или пиксел.

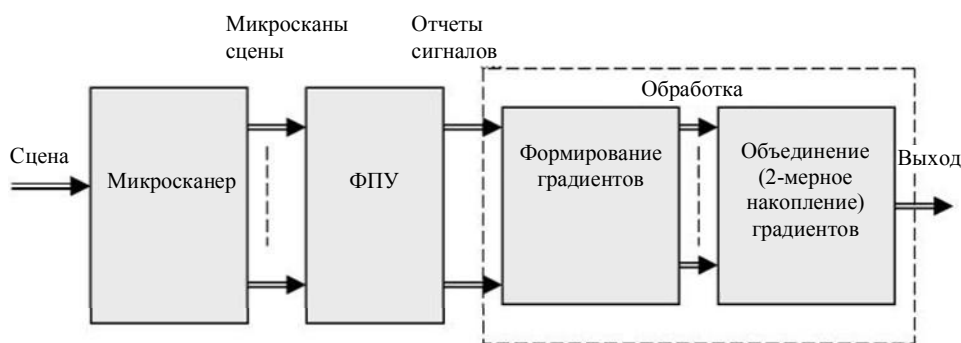


Рис. 1. Общая схема градиентной коррекции неоднородности

Коррекция проводится в блоке обработки и включает формирование разностей сигналов в раз-

личных направлениях (четырёх — по вертикали и горизонтали и четырёх — по диагоналям) и объединение (2-мерное накопление) этих разностей.

Градиенты формируются как попиксельные разности сдвинутых кадров (микросканов). Для определенности один из микросканов полагают основным и из него по очереди вычитают остальные. Для микросканирования по 8-ми направлениям получаются 9 микросканов и, соответственно, 8 кадров градиентов.

Прототипом 2-мерного накопления является алгоритм обхода элементов ФПУ из описания патента на изобретение [1]. Скорректированное значение одного, произвольно выбранного пиксела, принимается равным нулю, а значения остальных последовательно находятся через градиенты, связующие компоненты сигналов соседних элементов.

Основной замысел метода

Каждый пиксел всех градиентов содержит три аддитивные составляющие:

- информационная (градиент потока сцены);
- шум неоднородности (градиент потока сцены, умноженный на отклонение пиксела по чувствительности относительно средней чувствительности пикселей);
- проявление неоднородности по смещению удаляется из градиентов при их формировании — вычитании микросканов друг из друга, это вычитание попиксельное и в каждой разности

Жегалов Станислав Иванович, ведущий научный сотрудник.

Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ.

Фетюхина Владлена Георгиевна, инженер.

ФГУП «НПО "Орион"», ГНЦ РФ.

Россия, 111402, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2011 г.

© Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г., 2011

участвует пара сигналов с одного и того же элемента;

временной шум (разность значений временного шума соседних пикселей).

Информационная составляющая — градиент потока сцены, строго говоря, меняется от микроскана к микроскану. И эту изменчивость будем трактовать как одну из составляющих шума.

Неоднородность по чувствительности "выгоняется" накоплением градиентов. Структура накопления градиентов настроена на систему сдвигов сцены и в отсутствие шумов дает истинное значение сцены. Для неизменной сцены понятие истинного значения очевидно, для меняющейся — ее среднее по микросканам.

В присутствие шумов накопление градиентов дает сумму истинного значения сцены и сумму шумов. Но так как шумы в целом не согласованы с системой сдвигов (значит, и с системой накопления), то результат их накопления случаен, и по мере удаления от начального элемента накопления значимость шумов убывает в сравнении с истинным значением сцены.

Отметим, что изначально в градиенте шум соизмерим с градиентом информационной составляющей. И то, и другое на практике составляют единицы отсчета АЦП (аналого-цифрового преобразователя). Но при просмотре градиентов на экране содержание сцены все же угадывается. Это объясняется ее коррелированностью и несвязностью с шумом.

Обоснование замысла

Градиент сигнала $dS_{n,m/n+,m+}(t)$ элемента ФПУ (n, m) в направлении соседнего элемента $(n+, m+)$ равен разности отсчета $S_{n,m}(t)$ основного микроскана и отсчета (n, m) -элемента $S_{n,m/n+,m+}(t)$ для микроскана, соответствующего сдвигу сцены в направлении $(n-, m-)$, когда элемент сцены $(n+, m+)$ попадает на элемент ФПУ (n, m) ,

$$dS_{n,m/n+,m+}(t) = dS_{n,m}(t) - S_{n,m/n+,m+}(t). \quad (1)$$

Параметр t — время, каждому отсчету соответствует набор микросканов и один выходной кадр. Так как каждый выходной кадр связан со своим набором микросканов, то параметр t из анализа можно опустить.

Перепишем (1), исходя из модели сигнала элемента:

$$S_{n,m} = A_{n,m} \cdot P_{n,m} + B_{n,m} + SH_{n,m},$$

где $A_{n,m}$ — чувствительность элемента;

$P_{n,m}$ — поток на элементе;

$B_{n,m}$ — смещение элемента;

$SH_{n,m}$ — шум элемента.

Получаем:

$$dS_{n,m/n+,m+} = A_{n,m} \cdot (P_{n,m} - P_{n+,m+}) + SH_{n,m} - SH_{n,m/n+,m+} = A_{n,m} \cdot dP_{n,m/n+,m+} + A_{n,m} \cdot dP_{n+,m+}(\tau) + dSH_{n,m/n+,m+}, \quad (2)$$

где $dP_{n,m/n+,m+} = P_{n,m} - P_{n+,m+}$ — градиент потока на элементе (n, m) в направлении соседнего элемента $(n+, m+)$, а $dP_{n+,m+}(\tau)$ — изменение потока основного микроскана на элементе $(n+, m+)$ за период τ , после которого участок сцены $(n+, m+)$ попадает на элемент (n, m) .

Потоки $P_{n,m}$ и $P_{n+,m+}$ одномоментные, соответствуют отсчету одного и того же микроскана, основного.

Далее, представим чувствительности $A_{n,m}$ элементов в виде

$$A_{n,m} = A_0 + dA_{n,m},$$

где A_0 — среднее по элементам; $dA_{n,m}$ — неоднородность элемента по чувствительности.

Тогда (2) можно представить в виде

$$dS_{n,m/n+,m+} = A_0 \cdot dP_{n,m/n+,m+} + A_{n,m} \cdot dP_{n,m/n+,m+} + A_{n,m} \cdot dP_{n+,m+}(\tau) + dSH_{n,m/n+,m+} = A_0 \cdot dP_{n,m/n+,m+} + dE_{n,m/n+,m+}, \quad (3)$$

в виде суммы информационной и шумовой частей. Последняя содержит проявление геометрического и временного шума.

Для подтверждения работоспособности метода, во-первых, покажем, что суммирование градиентов складывает их информационные части в искомый поток, а во-вторых — что шумы, складываясь, свое влияние уменьшают, и найдем условия, при которых это происходит.

Первое условие основывается на том, что множество информационных частей микросканов $\{A_0 \cdot dP_{n,m/n+,m+}\}_{n,m \in NM, n+,m+ \in \{n+,m+\}}$, где NM — множество элементов ФПУ, $\{n+, m+\}$ — множество микросканов при последовательном суммировании градиентов — от элемента к элементу, начиная с некоторого произвольно выбранного "нулевого" — всегда дает в результате искомый поток для всех элементов, смещенный на величину потока нулевого элемента. Поскольку смещение одинаково для всех элементов ФПУ, то это не меняет информационной сущности изображения.

Второе условие — уменьшение влияния шума — основывается на несвязности процессов указанных

трех шумовых компонент между собой и несвязностью шумов с информационной составляющей.

Отметим, что в методе присутствует еще один существенный фактор, а именно, порядок обхода элементов ФПУ при суммировании градиентов (алгоритм накопления), определяющий характер результата.

Простейшие стратегии — переход от одного элемента к одному соседнему (по одной связи) — не позволяют уменьшить влияние шума. Только стратегии двумерного плана — от двух и более элементов (по нескольким связям) к одному последующему — позволяют уменьшать влияние шума.

Рис. 2 иллюстрирует направления и межэлементные связи микросканирования.

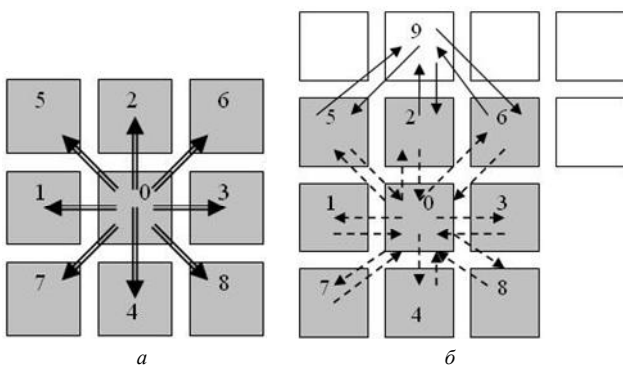


Рис. 2. а — пример направлений сканирования и порядок обхода окрестности нулевого элемента; б — межэлементные связи микросканирования

На рис. 2, а показаны направления микросканирования при сдвиге на один пиксел (возможно и на полпиксела) — по горизонтали, вертикали и диагональные. Здесь же иллюстрируется порядок обхода элементов в окрестности нулевого. Скорректированный сигнал нулевого полагается равным нулю, далее первый элемент определяется по нулевому и связям первого с нулевым элементом и т. д.

Рис. 2, б иллюстрирует связи микросканирования — межэлементные потоковые соотношения, которые могут быть использованы в методе. Так, например, у первого элемента с нулевым две связи — одну обеспечивает сдвиг микросканирования влево, другую — вправо.

Если число направлений сдвигов примем за V — объем микросканирования, то число связей элемента будет в два раза больше, для симметричных систем микросканирования — влево-вправо, вверх-вниз и т. п.

Реально же для определения элемента на основании определенных предыдущих в среднем может быть использовано до половины связей. Эта граница — половина — исходит из того, что определяемый в текущий момент элемент находится на

границе множества определенных и неопределенных элементов. Рис. 2, б иллюстрирует эту ситуацию на примере определения 9 элемента.

Исходя из пояснений и определений, выпишем формулу корректирования каждого последующего (n, m) элемента на основании уже определенных элементов, лежащих в окрестности определяемого (это множество обозначим $\{n+, m+\}^K$), а число связей этих элементов с (n, m) -элементом — через $V_{n,m}^K$,

$$S_{n,m}^K = \frac{1}{V_{n,m}^K} \cdot \sum_{\{n+, m+\}^K} S_{n+, m+}^K + \frac{1}{2} \cdot (dS_{n,m/n+, m+} - dS_{n+, m+/n, m}). \quad (4)$$

При симметрии микросканирования число связей $V_{n,m}^K$ в два раза больше числа элементов в множестве $\{n+, m+\}^K$.

Добавив к (4) установку для нулевого элемента $S_{n_0, m_0}^K = 0$, получаем общее правило коррекции.

Общее в том смысле, что не зафиксировано правило обхода элементов.

Рассмотрим, как суммирование градиентов складывает их информационные части в искомый поток.

Учитывая рекуррентность корректирования, достаточно доказать, что применение (4) для текущего элемента при условии, что предшествующие определены правильно (со смещением на величину потока нулевого элемента), дает правильный результат и для текущего.

Подставив (3) в (4), получаем, что

$$\begin{aligned} S_{n,m}^K &= \frac{1}{V_{n,m}^K} \cdot \sum_{\{n+, m+\}^K} S_{n+, m+}^K + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot (dP_{n,m/n+, m+} - dP_{n+, m+/n, m}) + \\ &+ \frac{1}{V_{n,m}^K} \cdot \sum_{\{n+, m+\}^K} E_{n+, m+}^K + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot (dE_{n,m/n+, m+} - dE_{n+, m+/n, m}) = \\ &= A_0 \cdot (P_{n,m}^K - P_{n_0, m_0}^K) + E_{n,m}^K, \end{aligned} \quad (5)$$

где P_{n_0, m_0}^K — поток основного скана на нулевом элементе; $E_{n, m}^K$ — ошибка корректирования (n, m) — пиксела изображения; $E_{n+, m+}^K$ — ошибки корректирования предшествующих текущему пикселов.

Применяя последовательно аналогичные рассуждения по цепочкам от элементов $\{n+, m+\}$ до нулевого элемента, получаем, что поток нулевого элемента равен нулю, а именно это мы и полагаем

на начальном шаге корректирования, принимая скорректированный сигнал нулевого элемента равным нулю.

Второй аспект — оценивание ошибки корректирования, рассмотрим, предполагая независимость трех составляющих шума (3) между собой и от информационной составляющей.

Тогда формула для дисперсии ошибки корректирования текущего пиксела, исходя из (5), имеет вид

$$\sigma^2(E_{n,m}^K) = \frac{1}{(V_{n,m}^K)^2} \cdot \sum_{\{n+,m+\}^K} \sigma^2(E_{n+,m+}^K) + \frac{1}{4} \cdot [\sigma^2(dE_{n,m/n+,m+}) - \sigma^2(dE_{n+,m+/n,m})], \quad (6)$$

т. е. дисперсия (ошибка) текущего пиксела состоит из суммы $V_{n,m}^K$ дисперсий предшествующих пикселов, деленной на $(V_{n,m}^K)^2$. Вклад суммы ошибок предшествующих элементов в ошибку текущего элемента, в среднем, в $V_{n,m}^K$ раз меньше ошибки предшествующего.

Определим вклад в ошибку $\sigma^2(E_{n,m}^K)$ второй составляющей:

$$\frac{1}{4 \cdot (V_{n,m}^K)^2} \cdot \sum_{\{n+,m+\}^K} [\sigma^2(dE_{n,m/n+,m+}) - \sigma^2(dE_{n+,m+/n,m})]. \quad (7)$$

Она порождается, собственно, на текущем элементе. Ошибку оценим, разбив каждую из дисперсий $\sigma^2(dE_{n,m/n+,m+})$ и $\sigma^2(dE_{n+,m+/n,m})$ на четыре. Первая равна

$$\sigma^2(dE_{n,m/n+,m+}) = \sigma^2(A_{n,m} \cdot dP_{n,m/n+,m+}) + \sigma^2(A_{n,m} \cdot dP_{n+,m+}(\tau)) + 2 \cdot \sigma^2(SH_{n,m}).$$

Вторая расписывается аналогично.

Таким образом, имеем 8 шумовых компонент, деленных на $4 \cdot (V_{n,m}^K)^2$. Даже если $V_{n,m}^K = 2$, то происходит уменьшение дисперсии, обусловленной текущим элементом, в 4 раза.

Анализируя совокупную дисперсию ошибки элемента, приходим к выводу, что, начиная с

$V_{n,m}^K = 2$, ошибка корректирования будет уменьшаться и это уменьшение по дисперсии будет стремиться к $1/V_{n,m}^K$ (по величине скорректированного сигнала — к $1/\sqrt{V_{n,m}^K}$).

В случае же $V_{n,m}^K = 1$ и при последовательном переходе по одной связи от одного предшествующего элемента к текущему ошибка, наоборот, будет возрастать — по дисперсии пропорционально длине пути обхода, по величине — как квадратный корень из длины.

Результаты полунатурного моделирования

Выполнено полунатурное численное моделирование, при котором бралась реальная тепловизионная сцена, а шумы и неоднородности моделировались.

Сцена сдвигается по направлениям микросканирования. Все микросканы сцены — основной и полученные сдвигом — пропускаются через модель матричного ФПУ с неоднородностью по чувствительности и смещению и временным шумом. Разности основного и сдвиговых отсчетов микросканоов дают градиенты по соответствующим сдвигам направлениям.

Далее градиенты объединяются (накапливаются) и результат накопления считается скорректированным изображением.

Результаты представлены для параметров: среднее квадратическое на пиксел отклонение временного шума равно 1,5; среднее квадратическое на пиксел отклонение исходной сцены равно 14.

Отношение первого ко второму характеризует отношение "шум/сигнал". Оно порядка 10 и принято на основе измерения реальных данных ФПУ формата 4×288 , где отношение 1,5/13.

Среднее квадратическое по элементам неоднородность по чувствительности принята равной 0,1. Добавлялся тренд чувствительности, в среднем по элементам, равный 0,3. Среднее квадратическое на элемент отклонение смещения бралось равным 1000.

Результаты представлены на рис. 3.

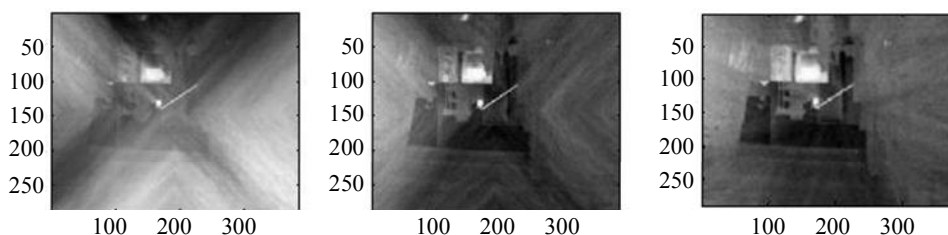


Рис. 3. Зависимость коррекции от числа направлений градиентов, соответственно, 2N-коррекция, 4N-коррекция, 8N-коррекция

При моделировании установлено, что результаты корректирования с увеличением числа направлений микросканирования последовательно улучшаются (см. рис. 2).

На рис. 4 показан результат для 8-кратного повторения 8N-микросканирования. Опыт показал, что повтор микросканиваний эффективнее 8-кратного повтора процедуры накопления (каждое новое накопление начинается с разных элементов кадра). Это справедливо только для примененного алгоритма накопления и подкрепляет сомнения в оптимальности данного конкретного алгоритма.

Второй кадр на рис. 4 иллюстрирует потенциальные свойства метода, правда, в отсутствие временного шума.

Коррекция реальных данных

Рис. 5 иллюстрирует улучшение на примере реальных данных: коррекция по двум направлениям (вправо-вниз), по четырем (вертикали и горизонтали) и восьми — с учетом и диагональных направлений.

При этом использован только один сдвиг микросканера — вниз, все 8 направлений градиентов сформированы из пары микросканов. Диагональные градиенты получены суммированием пар горизонтальных и вертикальных, а градиенты "вверх" получались просто взятием со знаком минус градиентов "вниз", а влево — с минусом

"вправо". Непосредственно из сигналов получаются только градиенты "вниз" и "вправо".

Если первый фактор — улучшение коррекции с увеличением числа используемых микросканов — достаточно прозрачен, то второй — улучшение при использовании "псевдосканов", получаемых из пары исходных микросканов, — неочевиден.

Объяснение может быть следующим.

Хотя в псевдосканах используются одни и те же данные, увеличение объема комбинирования в алгоритме накопления оставляет без изменения информационную составляющую, а влияние шумов снижается, так как дополнительные комбинации шумов не повторяют тех, которые были бы при использовании только пары микросканов.

Опыты показали чувствительность накопления к помехе вертикальной направленности. Рассмотрим этот вопрос.

Процедура накопления градиентов содержит вертикальную и горизонтальную составляющие и через первую чувствительна к вертикальному шуму.

На рис. 6 (первый кадр) представлен результат коррекции кадра с ФПУ формата 4×288. При коррекции использованы 8 направлений градиентов, оцененные по двум исходным нескорректированным кадрам. Дефекты специально не исправлялись, но становятся незаметными. "Исправляет" их вертикальная составляющая алгоритма накопления градиентов.

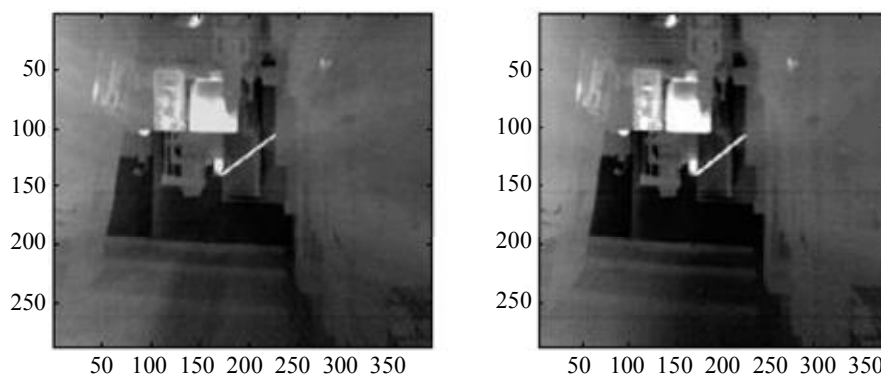


Рис. 4. 8-кратное повторение 8N-микросканирования — 8×9 микросканов (первый кадр) и коррекция неоднородности в отсутствие временного шума, корреляция с исходной сценой равна 0,973

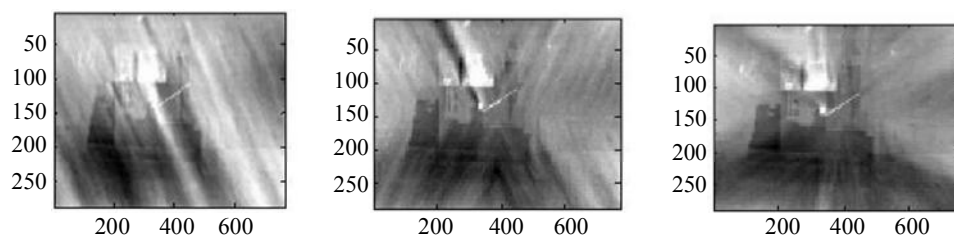


Рис. 5. Зависимость коррекции реальных данных от числа направлений градиентов, соответственно, 2N-коррекция, 4N-коррекция, 8N-коррекция

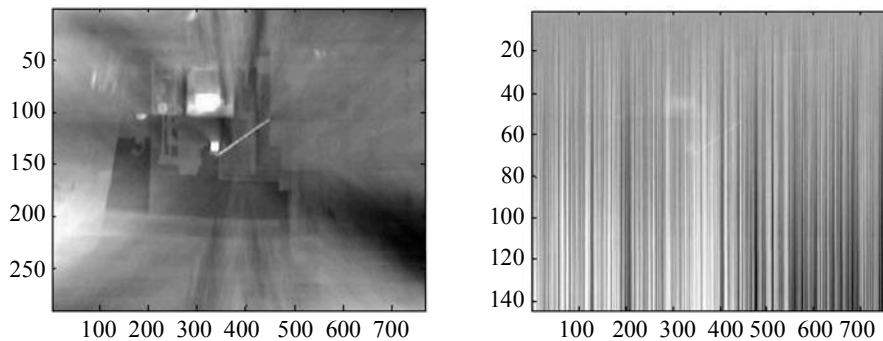


Рис. 6. Результат коррекции кадра с ФПУ формата 4×288 и "Занавес", полученный вертикальным накоплением градиента "вниз"

Заметны: слева-внизу — светлая область радиальной направленности, справа-внизу — темная область той же радиальной направленности и несколько меньших областей также радиальной направленности.

Наиболее контрастные области радиальной направленности — следствие чувствительности градиентного метода коррекции к помехе (назовем ее вертикальной); ее проявление ассоциируется с вертикальными струями либо с занавесом (см. рис. 5, второй кадр).

"Занавес" слева-внизу светлее, а справа-внизу — темнее. Это тенденция в целом по кадру. Просматриваются тенденции и меньшего периода. Одновременно иллюстрируется, что одномерное накопление приводит к превышению шума (в десятки раз выше) информационной составляющей.

Отметим, что сам по себе градиентный метод "мажет" и без этой вертикальной помехи: это показывают результаты полунатурных экспериментов, но слабее. С вертикальной помехой "мажет" сильнее.

Коррекция по опорным источникам нечувствительна к этой помехе, так как помеха рассредоточенная и мала в каждом пикселе, а коррекция по-пиксельная.

Градиентный метод — накопительный, и так как помеха по вертикали имеет одинаковый знак, то результат ее накопления растет.

С другой стороны, за счет горизонтального накопления значение помехи сглаживается, но этого недостаточно.

Выводы

1. Моделирование и предварительный анализ показывают, что градиентный метод корректирует неоднородность по смещению, чувствительности и проявление дефектов. Градиентный метод можно считать коррекцией по сцене (так же как [2] и подобные методы).

2. Метод обеспечивает улучшение качества коррекции с увеличением объема микросканирования и обработки.

3. Обнаруженное улучшение коррекции с увеличением объема обработки при фиксированном объеме микросканирования свидетельствует о возможности улучшения алгоритма обработки.

4. Эта возможность подтверждена использованием псевдосканов. Также можно учитывать не только разности микросканов с основным, но и разности между любыми микросканами.

5. Реализация метода достигается простыми операциями — через вычитание микросканов и суммирование градиентов.

Литература

1. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Филачев А. М. Способ коррекции неоднородности матричных фотоприемных устройств, патент 2298884 РФ. 2007.

2. Соляков В. Н., Жегалов С. И. и др. // Прикладная физика. 2008. № 1. С. 56.

Gradient non-uniformity correction method for the FPA with microscanning

S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, V. G. Fetyukhina

Orion Research-and-Production Association,
46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

New non-uniformity correction method for infrared detectors is presented. This method is based on calculation of scene signals gradients, which were taken during microscanning process. Gradient summation method is applied for further image reconstruction.

PACS: 85.60.-q

Keywords: correction, non-uniformity, photodetector, image, rgradient, method.

Bibliography — 2 references.

Received April 22, 2011

* * *