

УДК 621.384.3

Условия и возможности коррекции неоднородности фотоприемных устройств по сигналам сцены

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

Рассмотрено влияние факторов сцены и обработки на коррекцию неоднородности фотоприемных устройств. Коррелированность сцены, адаптивность обработки, исправление дефектов и микросканирование обеспечивают условия, приближающие возможности методов работы по сцене к коррекции по опорным сигналам.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: коррекция, сцена, фотоприемное устройство, дефект, неоднородность.

Введение

Для коррекции неоднородности фотоприемных устройств (ФПУ) обычно на практике применяется метод двухточечной коррекции по опорным сигналам [1—6].

Необходимость подстройки эталонов под сцену и предположений по сокращению состава оборудования инициируют поиск и разработку методов коррекции по сцене без использования опорных источников или же снижение требований к ним.

Обзор существующих методов показывает, что в основном эти работы предлагают конкретные методы и отражают эксперименты на тестовых или реальных изображениях. Приводятся сопоставления методов, но только по отдельным факторам коррекции. Недостаточно исследовано влияние шумов на качество коррекции.

Из работ методологического плана отметим [7], посвященную возможностям и условиям автокалибровки. Основной ее вывод — выравнивание возможно в ограниченном рядом условий диапазоне, а факторы точности заслуживают специального рассмотрения.

Вывод о сложности анализа точности закономерен, но ограничения можно ослабить, приняв во внимание фактор интервала обработки — число отсчетов сигналов по каждому элементу, используемых в сопоставлении.

Ухудшает оценки возможностей и сведение в [7] задачи коррекции только к выравниванию сигналов пары элементов. Ниже показано, что объединение сигналов множества элементов является средством улучшения коррекции.

Неочевиден вывод об эффективности алгоритма на основе разностей сигналов только при условии большого отношения разностного сигнала к шуму. Условие может быть ослаблено.

Ввиду общности по одному из конкретных объектов исследования с нашей работой — сканирующему ФПУ 4×288 , укажем источники [8—11], в части их адаптивной, в том числе с микросканированием, коррекцией неоднородности.

Цель статьи — анализ влияния факторов сцены и обработки и оценка возможностей коррекции неоднородности ФПУ.

Основные условия коррекции

Согласованные со сценой эталонные сигналы являются по сути наилучшей калибрующей сценой, однородной по элементам ФПУ и во времени.

Первое условие такой калибрующей сцены — согласованность, при калибровке по сцене выполняется по определению. Сигналы, по которым калибруются, они же и корректируются.

Второе условие — однородность, казалось бы, его можно достичь усреднением сигналов на большом интервале по достаточному разнообразию сцен. Поэлементные средние и среднеквадратичные отклонения сигналов принять за оценки смещения и чувствительности элементов и осуществлять корректирование. Такой подход описан в работах [12—16].

Однако этой методике препятствует непредсказуемость реальной сцены, с одной стороны, а с другой — "поджимает" дрейф — нестационарность элементов ФПУ. Нестационарность сцены

Жегалов Станислав Иванович, ведущий научный сотрудник.

Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ.

Фетюхина Владлена Георгиевна, инженер.

ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

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

затягивает сходимость средних, и нет уверенности, что они сойдутся, пока характеристики элементов постоянны.

Возникает задача — как снизить влияние непредсказуемости сцены на коррекцию и сделать это на достаточно коротком интервале.

Коррелированность сцены и оценка связей сигналов соседних элементов

Первое, что способствует решению задачи, — коррелированность реальных сцен. Она позволяет для изменчивой сцены получить оценки относительной чувствительностей соседних элементов.

Эти оценки исследованы в разделе "Парные связи элементов ФПУ" [17] в связи корреляции, изменчивости сигналов сцены и временного шума. И эти результаты [17] в совокупности с данными из [18] позволяют ослабить ограничения [7] на коррекцию по сцене.

Рис. 1 иллюстрирует коррелированность сцены на примере линейки 4×288.

Коррелированность обеспечивает сопоставимость сигналов соседних элементов по изменениям потоков на них, а интервальная обработка усредняет, помимо потокового шума — отличий потоков на соседних элементах, и временной шум [17]. В совокупности сопоставимость потоков и устранение влияния шумов позволяет получить для недефектных элементов достаточно надежные оценки отношений чувствительностей.

Для оценки относительных смещений коррелированности также используются смещения, которые находятся через оценки чувствительностей [17]. Однако для коррекции по смещению это свойство сцены не обязательно, в работах [18, 19] показано, что для корректирования относительные смещения эквивалентно заменяются средними сигналами и добавками микросканирования. И тогда необходимым условием коррекции по смещению будет наличие средних сигналов, а они

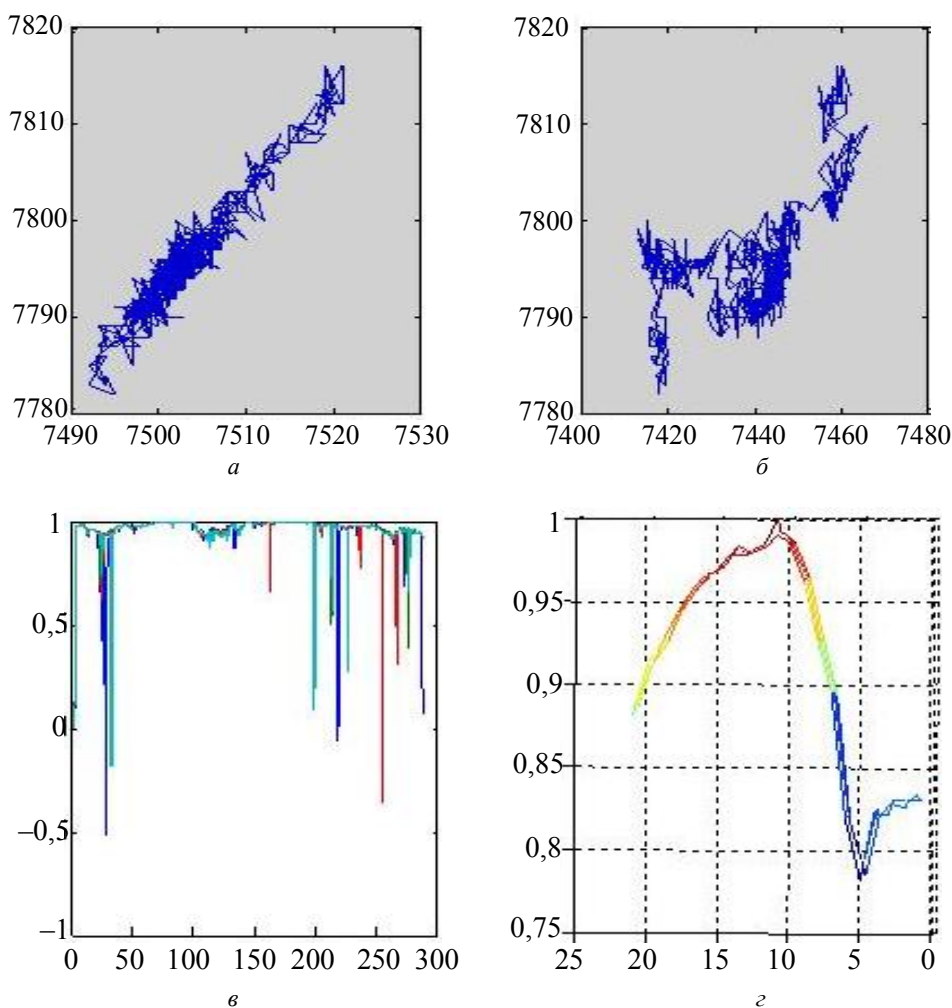


Рис. 1. Коррелированность сигналов сцены:

- a* — зависимость сигналов пары соседних элементов (близка к линейной, измерения — в отсчетах АЦП);
- б* — зависимость сигналов пары удаленных элементов (не связаны);
- в* — корреляция сигналов соседних элементов вдоль линейки (близка к 1, выбросы на дефектах);
- г* — корреляция в окрестности одного элемента (около 1 — с соседними элементами, далее убывает)

существуют всегда, даже когда сцена случайна. Но средние могут быть смещены (статистически, здесь не путать со смещением из-за неоднородности) относительно искомым значений смещения вследствие разных по элементам средних потоков сцены. Это смещение статистическое и компенсируется корректурой микросканирования.

Условия определения корректирующих коэффициентов по чувствительности

Второе условие, необходимое в задаче коррекции по чувствительности, как обеспечить сопоставимость любого элемента с любым, имея в распоряжении отношения чувствительностей соседних элементов.

Идея авторов [8—11] заключается в том, что корректирующие коэффициенты по чувствительности элементов определяются по цепочке, начиная с некоторого (назовем нулевым) элемента, для которого коэффициент полагается равным 1. Коэффициент каждого последующего элемента определяется из предыдущего по отношению чувствительностей рекуррентным способом.

Возможность этого основывается на относительности представления изображения — без потери информации значения всех его пикселей могут быть умножены на любую константу, и ко всем пикселям может быть добавлена также любая константа.

Слабое место — в цепочечности, ошибка произведения относительных чувствительностей по мере движения по цепочке экспоненциально растет. И даже, если каждая из относительных чувствительностей определена с малой ошибкой, например 1 %, то через 50 элементов цепочки погрешность достигнет 1,64; через 100 — 2,7; через 150 — 4,45.

Можно снизить погрешность, если увеличить множество путей (цепочек) из нулевого в любой другой элемент и усреднить результат по множеству.

Однако возможных путей экспоненциально много, и прямолинейный перебор возможен только теоретически. Тем не менее, экспоненциальный перебор реализуется не обходом всех путей, а с результатом, эквивалентным перебору всех путей.

Идея в том (поясним это на примере матрицы), что устанавливаются корректирующие коэффициенты нулевого элемента, затем — связанные с ним элементы периметра 3×3 -квадрата, далее — периметра элементов 5×5 -квадрата и т. д., до охвата всех элементов матрицы.

Точное описание алгоритма приведено в [20]. Объем вычислений пропорционален всего лишь числу связей соседних элементов, $2N \times M$ — для матрицы из $N \times M$ элементов.

При продвижении от нулевого элемента на каждом из отрезков длины 2 (две связи между элементами отрезка) число путей не менее чем удваивается, и, наоборот, при продвижении от любого элемента к нулевому отрезки длиной 2 соединяют этот любой элемент не менее чем с двумя другими элементами, т. е. число путей из нулевого в любой не менее экспоненты $2^{\lfloor l/2 \rfloor}$, где $\lfloor l/2 \rfloor$ — целая часть полудлины пути.

Для независимых ошибок оценка погрешности для алгоритма составляет 2ρ — для матрицы, где ρ — погрешность на пути длиной l , между соседними элементами, т. е. погрешность не зависит от размера матрицы. Для линейки 4×288 погрешность выше, $\frac{17}{4}\rho$. Объясняется это меньшей, в сравнении с матрицей, возможностью ветвления алгоритма.

Эти оценки по существу отличаются от данных работы [21], где по результатам моделирования указывается, что ошибка растет с увеличением размера матрицы. В работе [21] показано ветвление путей, но оно не экспоненциально. Но следует отметить, что ветвление противодействует только независимой составляющей в погрешностях относительных чувствительностей, например обусловленной временным шумом. Погрешность потоковой составляющей, зависимой для коррелированной сцены, не устраняется. Снизить эту погрешность можно введением ограничивающих порогов для формируемых алгоритмом корректирующих коэффициентов.

В коррекции по чувствительности имеется еще один фактор, и также ставящий ее в зависимость от сцены, — не на всех элементах на интервале калибровки сцена меняется, т. е. часть элементов корректируется только по смещению. Поясним на примерах.

Рис. 2, *a* иллюстрирует состояние элементов 128×128 -матрицы, определенное на интервале в 300 кадров. Светлое — 2-элементы, на которых имеются достаточные для определения относительных чувствительностей изменения сцены, серые — достаточных изменений нет, l -элементы — способны к коррекции только по смещению, черные — обнаруженные дефекты.

Алгоритм определения корректирующих коэффициентов по чувствительности действует только на светлом пространстве. В силу непрерывности алгоритма все корректируемые по чувствительности элементы должны быть связаны между собой, часть элементов светлого пространства выпадает из 2-коррекции и переходит в множество корректируемых по смещению.

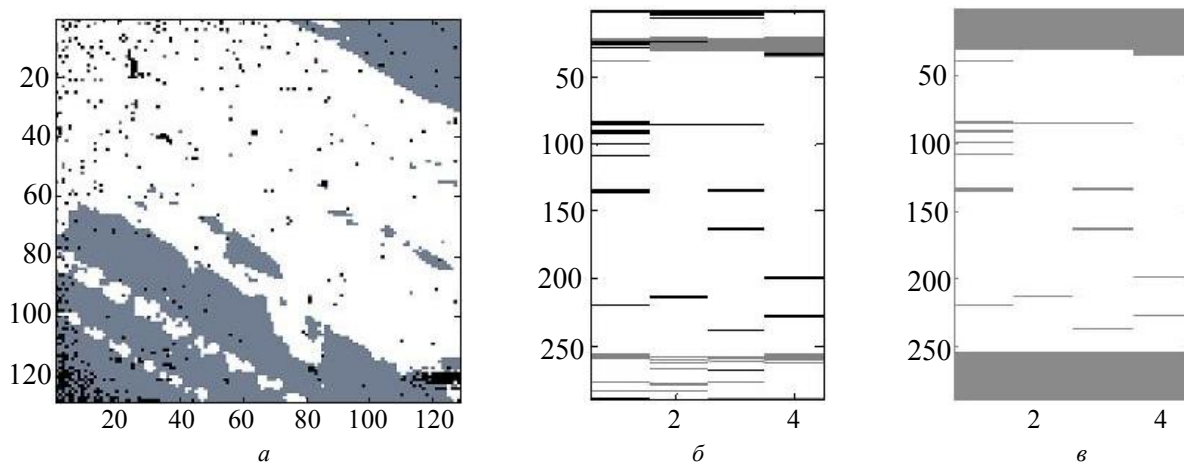


Рис. 2. Состояние элементов матрицы и линейки:

a — матрица; *б* — линейка до формирования корректирующих коэффициентов; *в* — линейка после формирования

Более чувствительна к этому фактору линейка. На рис. 2, *a* показаны 2-, 1-элементы (серая область) и дефектные элементы (черные точки). При формировании корректирующих коэффициентов часть 2-элементов перешла в 1-элементы (см. рис. 2, *б*, *в*). Туда же перешли дефектные элементы — для них существует оценка смещения и их можно корректировать по смещению.

Конечно, если на элементе малые изменения сцены, и он корректируется только по смещению, погрешность будет невелика. Однако в корректируемые только по смещению попадают и 2-элементы, а для них погрешность корректирования увеличивается.

Погрешность для линейки иллюстрируется на выходном изображении рис. 3, *a*, сверху заметна полоса, сделанная заметной подбором контраста.

Для сравнения на рис. 3, *б* приведено изображение при нормальном контрасте.

В целом, условия для определения корректирующих коэффициентов по чувствительности включают следующее:

- коррелированность сцены;
- интервальность оценки относительных чувствительностей соседних элементов по типу [17];
- использование для определения корректирующих коэффициентов экспоненциального алгоритма [20].

Фактором, ставящим коррекцию по чувствительности в зависимость от сцены, является неоднородность изменчивости сигнала сцены по элементам ФПУ. Адаптация под эту неоднородность улучшает коррекцию, но полностью зависимость не устраняет.

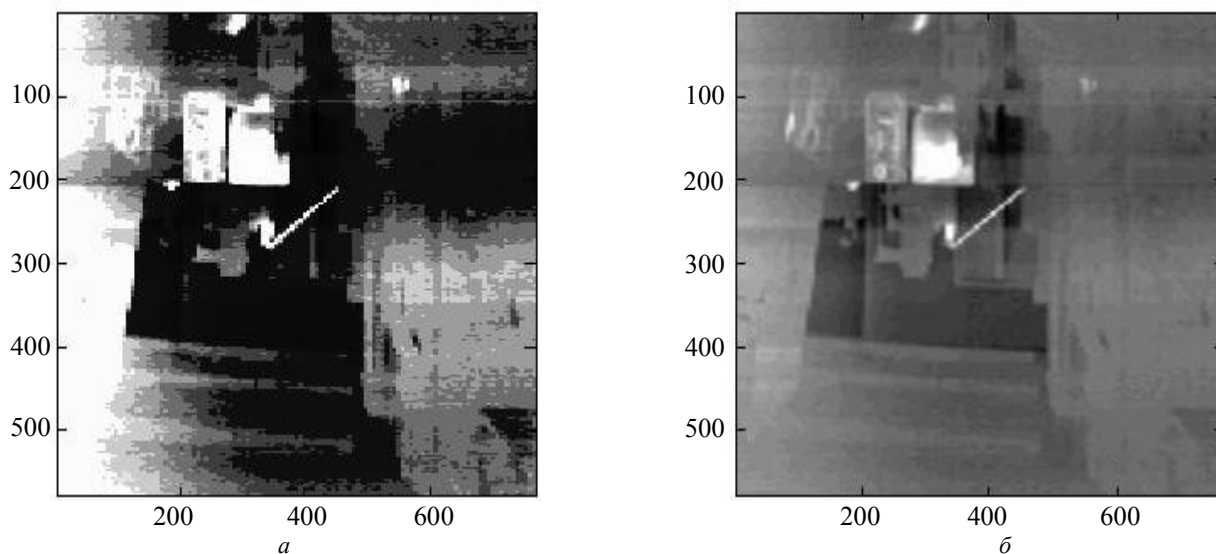


Рис. 3. Иллюстрация погрешности по чувствительности выходного изображения ФПУ 4×288:

a — при подборе контраста; *б* — при нормальном контрасте

Влияние дефектов на коррекцию неоднородности

Общая схема устранения дефектов по сцене такая же, как и при работе по опорным сигналам [22] — обнаружение + исправление.

Для обнаружения используются поэлементные средние и дисперсии сигналов [23]. Дисперсии сигналов элементов подразделяются по факторам сцены, временного шума и дефектов. И потоки, временной шум и собственно неоднородность отделяются от проявлений дефектов. По оставшейся дисперсии (проявлениям дефектов) строятся гистограммы, находятся пороги браковки и определяются дефектные элементы.

Методика одинакова для дефектов по чувствительности, смещению и шуму. Общий состав дефектов объединяет указанные типы. Методика аналогична для сканирующих ФПУ и матричных.

Оценим влияние количества дефектов на коррекцию неоднородности по чувствительности.

Для матрицы каждый дефект бракует не более 4 оценок отношений с соседними элементами. Если Pr_{df} — доля дефектных элементов, то при относительно малых Pr_{df} долю дефектных связей оценим в $4Pr_{df}$ от общего числа межэлементных соседних связей в $2M \times N - 2(M+N)$.

Вероятность того, что наугад выбранный путь длиной l бездефектный, равна $(1 - 4Pr_{df})^l = e^{-C_1 \cdot l}$, где $C_1 = -\ln(1 - 4Pr_{df})$.

Число путей длины l , проходящих в среднем через элемент, пропорционально $e^{l/2}$. И, если $C_1 < [l]/2$, то через элемент будет все равно проходить экспоненциально большое число бездефектных путей.

Свяжем неравенством долю дефектов Pr_{df} с длиной пути

$$Pr_{df} < \frac{1 - e^{-l/2}}{4}.$$

С увеличением длины $Pr_{df} < \frac{1}{4}$, т. е. алгоритм допускает до четвертой части дефектных элементов, и при этом число бездефектных путей будет экспоненциально большим — доля в четверть дефектных элементов является границей эффективного применения алгоритма и существенно ниже доли дефектных элементов на практике (несколько процентов).

Следует учитывать, что оценки исходят из посыла равномерного распределения дефектов, на практике возможны неравномерности. Поэтому

доля в 1/4 должна быть скорректирована в сторону уменьшения, в большей степени — для линейки.

Другой ограничительный фактор по дефектам следует из общего подхода к исправлению дефектов — на основании ближайших недефектных, число которых должно быть достаточным для надежного исправления.

Хотя в коррекции по сцене это маловажно, дефекты можно исправлять и по оценкам смещения, т. е. рассматривать как неоднородности.

Анализ и моделирование [19] исправления дефектов показывают, что они не влияют критическим образом на коррекцию неоднородности, по причине удовлетворительной обнаруживаемости и избирательности методики коррекции дефектов.

Фактор микросканирования

Коррекция с микросканированием исследована в работе [18] и обоснована способами, изложенными в [24—26]. Ниже покажем, как работает на улучшение коррекции корректура $\hat{\Delta B}_i^K$ из [18]. Запишем:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta B}_i^K &= \sum_{j=2}^{i-1} \hat{A}_j^K \cdot [\bar{S}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{S}_j(\tau/T_{j,j-1})] = \\ &= \sum_{j=2}^{i-1} (1 + \varepsilon_{1,j}) \cdot A_1 \cdot [\bar{P}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{P}_j(\tau/T_{j,j-1})] = \\ &= \sum_{j=2}^{i-1} A_1 \cdot [\bar{P}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{P}_j(\tau/T_{j,j-1})] + \\ &+ \sum_{j=2}^{i-1} \varepsilon_{1,j} \cdot A_1 \cdot [\bar{P}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{P}_j(\tau/T_{j,j-1})]. \end{aligned}$$

Сумма потоков в первой сумме правой части равна:

$$\begin{aligned} &\bar{P}_2(\tau/T_{2,3}) - \bar{P}_2(\tau/T_{2,1}) + \bar{P}_3(\tau/T_{3,4}) - \bar{P}_2(\tau/T_{3,2}) + \dots + \\ &+ \bar{P}_{i-1}(\tau/T_{i-1,i}) - \bar{P}_{i-1}(\tau/T_{i-1,i-2}) = \\ &= -\bar{P}_2(\tau/T_{2,1}) + \bar{P}_{i-1}(\tau/T_{i-1,i}) \approx \bar{P}_i(t) - \bar{P}_1(t), \end{aligned}$$

так как

$$\begin{aligned} &\bar{P}_2(\tau/T_{2,3}) - \bar{P}_2(\tau/T_{3,2}) = 0, \dots, \\ &\bar{P}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{P}_j(\tau/T_{j+1,j}) = 0, \dots \end{aligned}$$

вследствие совпадения потоков в выборках $T_{j,j+1}$ и $T_{j+1,j}$, а $-\bar{P}_2(\tau/T_{2,1}) = -\bar{P}_1(\tau/T_{1,2}) \approx -\bar{P}_1(t)$ и $\bar{P}_{i-1}(\tau/T_{i-1,i}) = \bar{P}_i(\tau/T_{i,i-1}) \approx \bar{P}_i(t)$ — также из-за потокового совпадения выборок и несущественной разности для элемента между средним потоком по полной выборке и средним по одной из поставительных выборок.

$$\text{Сумма } \sum_{j=2}^{i-1} \varepsilon_{1,j} A_1 [\bar{P}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{P}_j(\tau/T_{j,j-1})] \approx 0,$$

за счет малости ошибки $\varepsilon_{1,j}$ и градиентов на элементе $\bar{P}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{P}_j(\tau/T_{j,j-1})$.

Тогда корректура $\Delta \hat{B}_i^K \approx A_1 \cdot [\bar{P}_i(t) - \bar{P}_1(t)]$, и в формуле корректирования $S_i^K(t) = \Delta S_i(t) \cdot \hat{A}_i^K + \Delta \hat{B}_i^K$ она компенсирует составляющую $-A_1 \cdot [\bar{P}_i(t) - \bar{P}_1(t)]$, смещающую результат корректирования $\Delta S_i(t) \cdot \hat{A}_i^K$ относительно истинного.

Ближайший аналог, исследующий микросканирование для линейки 4×288 со сдвигом сканера на половину элемента, рассмотрен в работах [8—11]. Аналог не использует линейную аппроксимацию градиента [18] и, как следствие, авторы приходят к избыточному решению — ввести помимо двух еще полукадр со сдвигом на элемент. Естественно, такой сдвиг обеспечивает наилучшую сопоставимость сигналов соседних элементов, но к подобному результату можно прийти [18] через аппроксимацию и соответствующее изменение выборок без избыточного третьего полукадра.

Отметим метод коллектива авторов [27—31], использующий естественное сканирование сцены относительно элементов ФПУ. Идею проиллюстрируем с помощью рис. 4 и обобщим постановку метода.

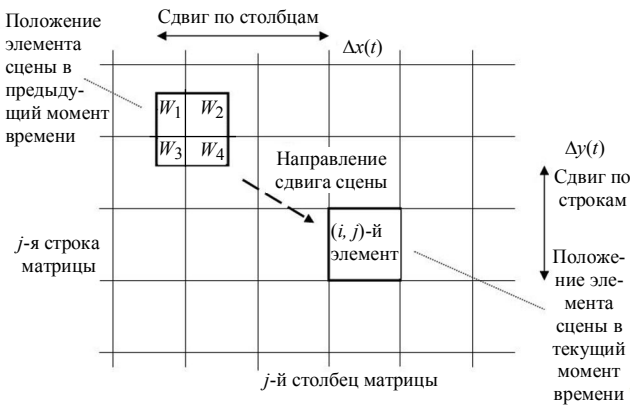


Рис. 4. Сдвиг элемента сцены по элементам матрицы

Попадающий в момент t на (i, j) -й элемент матрицы элемент сцены — поток $P_{i,j}(t)$ в предыдущий момент $t-1$ воздействовал на элементы матрицы, соответствующие сдвигу сцены относительно матрицы на $\Delta x(t)$ по горизонтали и $\Delta y(t)$ по вертикали.

Величина сдвига соседних изображений нестабилизированного (на руках) тепловизора составляет в среднем 1—3 пикселя. Иногда возникают всплески до 10 и более пикселей.

Строго говоря, за время между соседними отсчетами может произойти и поворот сцены отно-

сительно матрицы и увеличение/уменьшение потока за счет изменения наблюдаемого объекта либо приближения/уменьшения к нему, но эти факторы менее значимы и не учитываются.

Поток $P_{i,j}(t)$ элемента (i, j) может быть сопоставлен со взвешенной суммой с весами $w_1(t)$, $w_2(t)$, $w_3(t)$, $w_4(t)$ соответствующих моменту $t-1$ потоков 4 элементов — $(t-1)$ -предшественников:

$$\begin{aligned} &(i - \Delta n(t), j - \Delta m(t))\text{-го элемента,} \\ &(i - \Delta n(t) - 1, j - \Delta m(t))\text{-го,} \\ &(i - \Delta n(t), j - \Delta m(t) - 1)\text{-го,} \\ &(i - \Delta n(t) - 1, j - \Delta m(t) - 1)\text{-го,} \end{aligned}$$

где $\Delta m(t)$ и $\Delta n(t)$ — целочисленная (в единицах размера элементов матрицы) часть сдвигов $\Delta x(t)$ по горизонтали и $\Delta y(t)$ по вертикали. Веса также определяются по сдвигам $\Delta x(t)$ и $\Delta y(t)$, сумма весов равна 1,

$$w_1(t) + w_2(t) + w_3(t) + w_4(t) = 1.$$

Исходя из равенства потока $P_{i,j}(t)$ взвешенной сумме потоков $(t-1)$ -предшественников и учитывая, что скорректированные сигналы разных элементов должны быть равны при одинаковых потоках на входе, приходим к возможности приравнивания скорректированных сигналов (i, j) -элемента $S_{i,j}^K(t)$,

$$S_{i,j}^K(t) = S_{i,j}(t) A_{i,j}^K + B_{i,j}^K,$$

где $A_{i,j}^K$ и $B_{i,j}^K$ — искомые корректирующие коэффициенты, и взвешенных сумм $S_{i,j/t-1}^K(t-1)$ сигналов $(t-1)$ -предшественников,

$$\begin{aligned} S_{i,j/t-1}^K(t) = &w_1(t) S_{i,j/t-1,1}^K(t-1) + \\ &+ w_2(t) S_{i,j/t-1,2}^K(t-1) + w_3(t) S_{i,j/t-1,3}^K(t-1) + \\ &+ w_4(t) S_{i,j/t-1,4}^K(t-1), \end{aligned}$$

где скорректированные сигналы $(t-1)$ -предшественников $S_{i,j/t-1,k}^K(t-1)$, $k = 1, 2, 3, 4$ равны

$$S_{i,j/t-1,k}^K(t-1) = S_{i,j/t-1,k}(t-1) A_{i,j/t-1,k}^K + B_{i,j/t-1,k}^K.$$

Общее условие приравнивания запишем в виде суммы квадратов разностей скорректированных сигналов сопоставляемых элементов — суммирование по элементам и по времени.

Требуется найти минимум,

$$\begin{aligned} \min_{t \in T_H \text{ по времени}} \sum_{i,j \text{ по элементам}} [S_{i,j}(t) \times \\ \times A_{i,j}^K + B_{i,j}^K - \sum_{k=1,2,3,4} w_k(t) \times \\ \times [S_{i,j/t-1,k}(t) \cdot A_{i,j/t-1,k}^K + B_{i,j/t-1,k}^K]]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

на множествах корректирующих коэффициентов по чувствительности $\{A_{i,j}^K\}_{i,j \in NM}$ и смещению $\{B_{i,j}^K\}_{i,j \in NM}$, $i, j \in NM$ — множество всех элементов.

Квадратичная форма (1) при дифференцировании по параметрам — корректирующим коэффициентам, дает систему линейных уравнений относительно этих коэффициентов.

Характерная черта системы — число независимых уравнений меньше числа неизвестных, и часть коэффициентов должна быть определена, например, калибровкой по опорным сигналам. Число таких элементов зависит от структуры элементов-предшественников. Минимально может быть равным одному, например, из четырех предшественников оставлять только ближайшего. В этом случае корректирующие коэффициенты одного элемента могут устанавливаться произвольно, а коэффициенты остальных последовательно находятся по связям предшественников.

Описанный подход опирается на измерение сдвигов сцены, которые определяются изменением направления поля зрения ФПУ. Этот процесс нерегулярный, и по этому признаку движение сцены назовем нерегулярным микросканированием.

В отличие от регулярного [18], которое помимо вытекающей из регулярности устойчивости оценок позволяет увеличить вдвое разрешающую способность ФПУ.

В принципе оба типа микросканирования могут быть объединены. Однако этому препятствуют нестабильность эффекта от нерегулярного микросканирования и сложность такого объединения.

Добавим, что оба типа микросканирования малоприемлимы для улучшения коррекции по чувствительности. Причина — в неустойчивости поведения градиентов сигнала, получаемых от микросканирования, в мультипликативных процедурах определения корректирующих коэффициентов по чувствительности.

Использование обратной связи

Подход к коррекции с обратной связью изложен в работах [32, 33].

Обратная связь [34] — это использование выходящих, скорректированных сигналов при определении корректирующих коэффициентов. Это адаптивная коррекция с обратной связью.

В отсутствие обратной связи коррекция по сцене также адаптивная, по признаку — корректируемые сигналы являются и источником получения корректирующих коэффициентов, но адаптивная — без обратной связи.

Следующее пояснение касается нейронного подхода [32, 33]. Он в достаточной мере может

быть объяснен линейным адаптивным фильтром [34], решаемым методом градиентного поиска без нейронной терминологии.

Рассмотрим сигнал $S_{i,j}(t)$ элемента (i, j) матрицы, предполагая и изменения во времени корректирующие коэффициенты он имеет вид [32, 33],

$$S_{i,j}(t) = A_{i,j}(t)P_{i,j}(t) + B_{i,j}(t),$$

$i, j \in NM$ — множество элементов матрицы.

Скорректированный сигнал записывается в виде

$$S_{i,j}^K(t) = A_{i,j}^K(t)S_{i,j}(t) + B_{i,j}^K(t),$$

где $A_{i,j}^K(t)$ и $B_{i,j}^K(t)$ — корректирующие коэффициенты по чувствительности и смещению на момент t .

Рекуррентные формулы (термин "рекуррентный" берем из работы [33]) получения текущих значений коэффициентов имеют вид:

$$A_{i,j}^K(t) = A_{i,j}^K(t-1) - K_0 \frac{dE_{i,j}(t)}{dA_{i,j}^K(t)}$$

и

$$B_{i,j}^K(t) = B_{i,j}^K(t-1) - K_0 \frac{dE_{i,j}(t)}{dB_{i,j}^K(t)}, \quad i, j \in NM,$$

где K_0 — параметр, называемый коэффициентом обучения, устанавливается заранее на основании исследования сходимости процесса коррекции, $0 \leq K_0 \leq 1$;

$A_{i,j}^K(t-1)$ и $B_{i,j}^K(t-1)$ — определенные предыдущие значения корректирующих коэффициентов. Начальные значения корректирующих коэффициентов для определенности можно положить равными 1 для всех коэффициентов матрицы по чувствительности, 0 — по смещению.

$\frac{dE_{i,j}(t)}{dA_{i,j}^K(t)}$ и $\frac{dE_{i,j}(t)}{dB_{i,j}^K(t)}$ — градиенты ошибки — ча-

стные производные суммы квадратов $E_{i,j}(t)$ разностей скорректированных значений сигнала элемента (i, j) , и взвешенной суммы скорректированных сигналов его 4 соседних элементов: $(i-1, j)$ -го, $(i, j-1)$ -го, $(i+1, j)$ -го, $(i, j+1)$ -го,

$$\begin{aligned} E_{i,j}(t) &= \sum_{\tau=1}^{T_H} e_{i,j}^2(t-\tau+1) = \\ &= \frac{1}{T_H} \sum_{\tau=1}^{T_H} [S_{i,j}^K(t-\tau+1) - \frac{1}{4} [S_{i-1,j}^K(t-\tau+1) + \\ &+ S_{i,j-1}^K(t-\tau+1) + S_{i+1,j}^K(t-\tau+1) + S_{i,j+1}^K(t-\tau+1)]]^2. \end{aligned}$$

Определенные по методу наискорейшего спуска градиенты задают направление и величину оче-

редного изменения текущих значений корректирующих коэффициентов,

$$\frac{dE_{i,j}(t)}{dA_{i,j}^K(t)} = -2\bar{e}_{i,j}(t)\bar{S}_{i,j}(t)$$

и $\frac{dE_{i,j}(t)}{dB_{i,j}^K(t)} = -2\bar{e}_{i,j}(t), \quad i, j \in NM,$

где $\bar{e}_{i,j}(t) = \bar{S}_{i,j}^K(t) - \frac{1}{4}[\bar{S}_{i-1,j}^K(t) + \bar{S}_{i,j-1}^K(t) + \bar{S}_{i+1,j}^K(t) + \bar{S}_{i,j+1}^K(t)]$ — разность средних скорректированных сигналов: элемента (i, j) и соседних элементов;

$\bar{S}_{i,j}(t)$ — средний сигнал элемента (i, j) .

Коэффициент K_0 обычно малая величина, порядка 0,01. С его ростом увеличиваются шаговые приращения корректирующих коэффициентов, что в принципе способствует сходимости определяемых коэффициентов к искомым. Но наличие шумов, неравенства потоков на соседних элементах и отклонения реальных сигналов от моделей вынуждают для обеспечения устойчивости процесса и сходимости уменьшать коэффициент.

Анализ методов с обратной связью весьма сложен и ненадежен, поэтому рассмотрим частные случаи, чтобы получить хотя бы некоторые оценки.

Минимальное число шагов, за которое можно найти искомые коэффициенты, равно одному, если все потоки одинаковы по элементам и заранее известно, что неоднородны тогда по элементам только смещения и смещения во времени не меняются.

Тогда $\bar{e}_{i,j}(t)$ для начальных условий все $A_{i,j}^K(0) = 1$ и $B_{i,j}^K(0) = 0$ имеют вид

$$\bar{e}_{i,j}(t) = \bar{S}_{i,j}(t) - \frac{1}{4}[\bar{S}_{i-1,j}(t) + \bar{S}_{i,j-1}(t) + \bar{S}_{i+1,j}(t) + \bar{S}_{i,j+1}(t)] = A \cdot \bar{P}(t) + B_{i,j} - A \cdot \bar{P}(t) - B_{i,j}^c = B_{i,j} - B_{i,j}^c,$$

где $B_{i,j}^c$ — среднее смещение соседей элемента (i, j) ;

$\bar{P}(t)$ — одинаковый для всех элементов средний поток.

Из одинаковости потока можно изменить множество соседей — соседями для каждого элемента назначить все элементы, тогда все $B_{i,j}^c = B^c$ и корректирующие коэффициенты по смещению равны

$$B_{i,j}^K(1) = -K_0 \cdot \bar{e}_{i,j}(t) = -K_0(B_{i,j}^c - B^c),$$

$$A_{i,j}^K(1) = 1,$$

где $\bar{e}_{i,j}(t) = \bar{S}_{i,j}(t) - \frac{1}{NM} \sum_{i,j \in NM} \bar{S}_{i,j}(t)$, а величина

K_0 может быть любой ввиду инвариантности коррекции к общему для всех элементов сдвигу по смещению. Если $K_0 = 1$, то среднее смещение скорректированных сигналов совпадет со средним некорректированных.

Градиент по чувствительности, хотя по определению допущений коррекция чувствительности не нужна, равен градиенту по смещению, умноженному на средний сигнал элемента, т. е. значения разнятся от элемента к элементу. Для "правильной" теории подходящим был бы результат о постоянстве градиента по чувствительности, если предположено, что чувствительности всех элементов одинаковы.

Объяснение в том, что адаптивный метод коррекции — это применение общего адаптивного метода, на базе процедуры минимизации скорейшего спуска, к задаче коррекции. И общий подход не учитывает особенностей задачи коррекции.

Коррекция же в один шаг только чувствительности, в предположении неоднородности по чувствительности и одинаковости смещения всех элементов и также одинаковости потоков не получается. Нет и аналогии градиента чувствительности со статистическим параметром среднеквадратичного отклонения. Этот параметр в статистических методах содержит оценку чувствительности.

В градиенте адаптивного метода оценивание чувствительности в явном виде не просматривается, и остается предполагать, что оценивание происходит только за счет значительного числа итераций.

Оценку времени сходимости проиллюстрируем с помощью матричного устройства 128×128 . Эксперимент заключается в следующем.

Определяем среднеквадратичное отклонение средних сигналов элементов, которое является мерой неоднородности элементов ФПУ, в основном по смещению.

Для 300 кадров сцены, по которой определялись средние по элементам сигналы, это отклонение равно 1524 (по нескорректированным кадрам).

Эта сцена корректировалась методом временной фильтрации (статистическим методом) с коррекцией только по смещению, и по скорректированным сигналам определялось среднее по матрице отклонение сигналов элементов от сигналов соседних 8 элементов (в окне 3×3), которое составило порядка 20 ед. Этот показатель можно считать верхней границей неоднородности в скорректированном сигнале, так как он включает также и временной шум и изменения искомой сцены.

Далее, в адаптивной коррекции снижение неоднородности на каждом шаге не может в лучшем случае превышать снижения неоднородности усреднением сигнала в скользящем по кадру 3×3 -окне.

Тогда можно предположить, что число итераций, в последовательности применений процедуры усреднения кадра в скользящем 3×3 -окне, которые снижают неоднородность в $1514/20 \approx 75$ раз, является минимумом шагов адаптивной коррекции.

В скользящем 3×3 -окне до уровня в 20 ед. неоднородность снижается за 8 последовательных усреднений кадра. Это и есть нижняя граница числа итераций. На практике коэффициент обучения 0,01, и практическая скорость адаптации на два порядка меньше максимальной, т. е. понадобится более 800 итераций. Однако повторимся, гарантий сходимости в общем случае нет.

Для альтернативы — для коррекции без обратной связи вопрос устойчивости не стоит, требуется только ответить, но вопрос уже скорее технический: как часто или через какой интервал нужна перекалибровка для отработки дрейфа характеристик элементов.

Простое решение — непрерывная перекалибровка, вплоть до получения новых коэффициентов при каждом новом кадре, позволит отработать любой дрейф. Плата за это — необходимо хранить текущие кадры в объеме интервала калибровки.

К адаптивным с обратной связью относится и метод коррекции с использованием фильтра Калмана [35]. Метод улучшает решение, но проблемы со сходимостью остаются.

В целом, применение методов обратной связи для коррекции неоднородности по сцене нецелесообразно. Эти методы привносят неустойчивость решения, которая ввиду сложности надежно не может быть оценена.

Альтернатива — методы без обратной связи гарантированы по сходимости и проще для анализа.

Нелинейная коррекция

Вопросы коррекции нелинейности и неоднородности исследовались в работах [36, 37]. Схема коррекции соответствует трехпараметрической — полиномиальной модели элемента.

Как и двухточечная трехпараметрическая коррекция основывается на сопоставлении сигналов пар элементов. Объединение попарных связей также использует приведение всех элементов ФПУ к одному или к некоторому усредненному элементу.

В нелинейной коррекции одинаковость приведенных сигналов элементов имеет два содержания, которым соответствуют два способа приведения: по сигналам и по потокам. Приведение по

потокам соответствует коррекции неоднородности и нелинейности элементов; приведение по сигналам — коррекции неоднородности, без устранения нелинейности характеристик.

Для трехпараметрической коррекции найдены нелинейные (четырёхпараметрические) функции приведения по сигналам и по потокам. Исследованы условия одновременной коррекции неоднородности и нелинейности — необходимы полный квадрат подкоренных выражений функций относительно извлекаемого потока и наличие неоднородности характеристик элементов.

Сложность систем нелинейных уравнений побудила перейти к линеаризованному методу решения [38], для которого проведено моделирование [39] вариантов коррекции по опорным источникам.

Линеаризованная коррекция по опорным сигналам рассматривалась и в работах [40, 41].

К нелинейным методам можно отнести трехточечную коррекцию [42], где для ФПУ с болометрической матрицей для рядов температур опорного источника и рабочей температуры матрицы составлены таблицы значений сигналов элементов ФПУ. В процессе работы по температуре входной сцены и по рабочей температуре матрицы для коррекции используются соответствующие этим температурам таблицы.

Нелинейная коррекция методически в целом обоснована, но из-за сложности рекомендовать можно только линеаризованные методы.

Условия и возможности коррекции

Совокупность факторов коррекции по сцене иллюстрируется на рис. 5, для наглядности в привязке к обобщенной схеме коррекции.

Подлежащими коррекции — мешающими факторами являются неоднородность, дефекты и нелинейность элементов ФПУ.

Коррелированность сцены, микросканирование и обработку в целом рассматриваем как условия для коррекции по чувствительности, смещению, исправлению дефектов и коррекции нелинейности.

Коррелированность сцены, оценка и объединение связей соседних элементов необходимы для коррекции по чувствительности.

В обработке необходимым условием является статистичность — накопление на интервале средних и дисперсий сигналов с последующим их использованием в определении корректирующих коэффициентов.

Исправление дефектов обеспечивается средствами коррекции неоднородности в сочетании с избирательностью обнаружения.

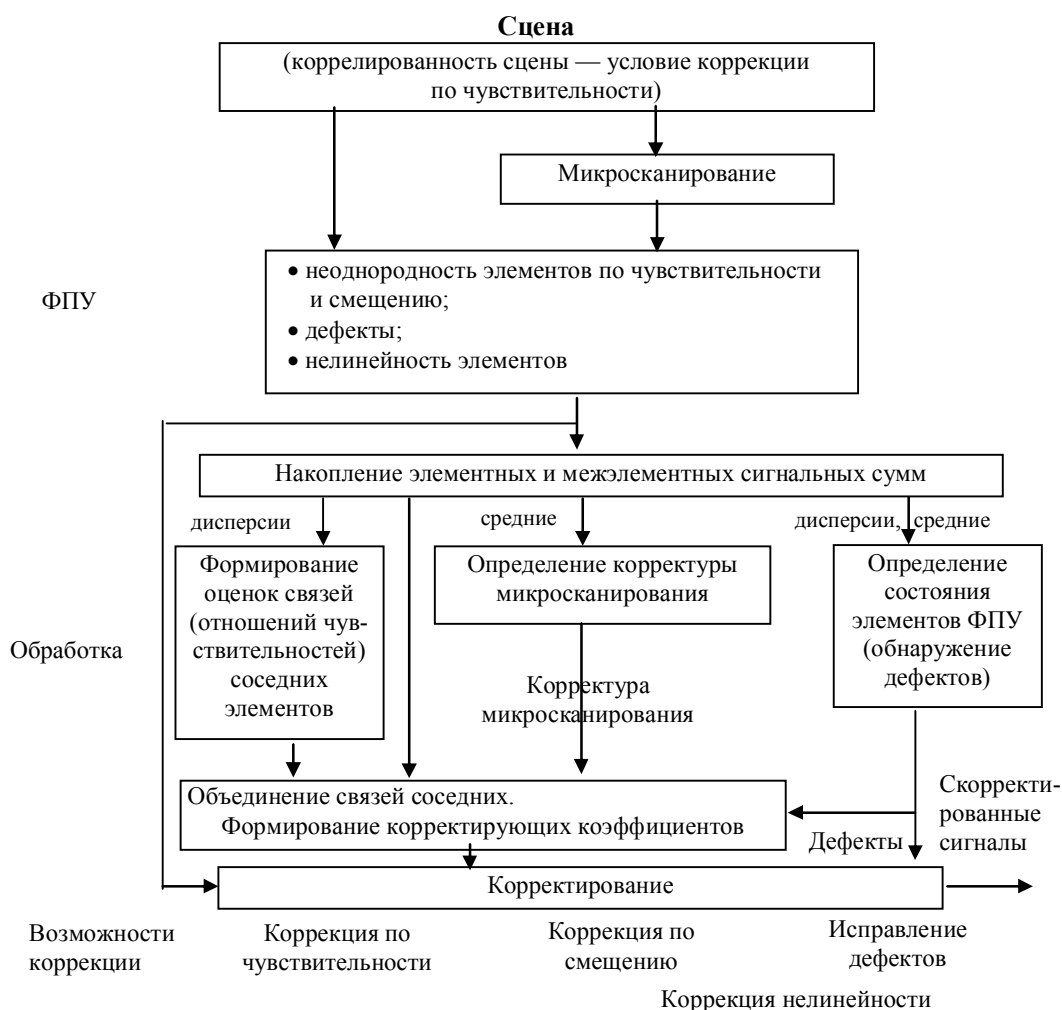


Рис. 5. Условия и возможности коррекции неоднородности ФПУ по сцене

Микросканирование позволяет получить корректуру по смещению, обеспечивающую корректирование без статистического смещения.

Из-за неустойчивости градиентов сцены при обработке приращений сигналов улучшение по чувствительности микросканирование не дает.

Нелинейная коррекция направлена на увеличение диапазона коррекции элементов и осуществляется по одинаковой, двухточечной схеме.

Коррекция по сцене позволяет выдавать новые решения с каждым отсчетом матрицы или линейки и естественным образом отрабатывает изменения характеристик элементов во времени.

Использование обратной связи в коррекции по сцене подстраивает алгоритм одновременно и под дрейф характеристик элементов. Однако применение обратной связи нецелесообразно, так как то же самое достигается и прямыми методами, за счет высокой частоты перекалибровки и без присущей обратной связи неустойчивости решения.

Необходимым для оценки возможностей и практической применимости является использование компьютерной модели коррекции неоднородности [43, 44]. Необходимость предопределена

сложностью — коррекция по сцене является многофакторной обратной задачей, адаптивной и разнообразной по методам решения.

Практическая цель модели — настройка реальной обработки данных.

Основные критерии — сопоставление методов коррекции по сцене между собой и с работой по опорным сигналам.

Для настройки самой модели и для ее использования необходимы также имитационный и полунатурный режимы модели.

Для воспроизведения соответствующей реальным устройствам потоковой обработки последовательность модельных операций привязывается ко времени.

Определяемые с помощью модели объемы памяти и вычислительных операций дают оценку практической реализации методов коррекции.

Заключение

Рассмотренное влияние факторов сцены и обработки на коррекцию неоднородности ФПУ позволяет сделать вывод, что коррелированность сцен

ны, адаптивность обработки, исправление дефектов и микросканирование обеспечивают условия, приближающие возможности методов работы по сцене к коррекции по опорным сигналам.

Литература

1. *Perry David L., Dereniak Eustase L.* Linear theory of non-uniformity correction in infrared staring sensors//Optical engineering. 1993. V. 32. No. 8. P. 1854.
2. *Cheung Lizzie, Dereniak Eustase L., Perry David L.* Computer simulation of spatial nonuniformity correction in a staring sensor//Proc. of SPIE. 1988. V. 972.
3. *Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И.* Тепловизор на основе "смотрящей" матрицы из $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ формата 128×128//Прикладная физика. 1999. № 2. С. 50.
4. *Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Медведев А. С., Храпунов М. Л., Борисов Ю. И.* Тепловизионная камера на основе неохлаждаемых микроболометрических ФПУ//Там же. 2003. № 2. С. 102.
5. *Lingbin Kong, Xinjian Yi, Dianhong Wang, Dunfan Ye, Sihai Chen.* IFPRA real-time nonuniformity correction using the FPGA technology//Proc. of SPIE. V. 5065. P. 54.
6. *Солина Н. И.* Выравнивание чувствительности и исправление геометрического шума в тепловизионных изображениях методом двухточечной коррекции//Информационные технологии моделирования и управления: Международ. сб. научн. тр./Под ред. д-ра техн. наук, проф. О. Я. Кравца. Вып. 15. — г. Воронеж: Изд-во "Научная книга", 2004.
7. *Раковский Ю. Н.* Возможность и условия адаптивного выравнивания каналов оптико-электронной аппаратуры с многоэлементным фотосканированием по сигналам наблюдаемой сцене//Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 1. С. 36.
8. *Льонг К. Т.* Методы и алгоритмы эффективного управления обработкой видеосоциальной информации в оптоэлектронных устройствах. Дис. на соиск. канд. техн. наук. — М., 2007.
9. *Лебедев Д. Г., Льонг К. Т.* Моделирование адаптивного выравнивания параметров линейки фотоприемников с использованием микросканирования//Информационные процессы. 2007. Т. 7. № 3. С. 369.
10. *Лебедев Д. Г., Льонг К. Т.* Фильтрация остаточного геометрического и аппаратурного шумов сканирующей матрицы ИК-диапазона с микросканированием // Там же. № 2. С. 124.
11. *Лебедев Д. Г., Льонг К. Т.* Методы эффективного управления обработкой видеосоциальной информации в оптоэлектронных устройствах, направленные на устранение геометрического шума//Тез. докл. Междунар. конф. по фундаментальным проблемам системной безопасности. — М., 2007.
12. Пат. 2113065 РФ. Способ выравнивания неравномерной чувствительности фотоприемников сканирующих линеек тепловизоров/В. М. Белоконов, Е. В. Дегтярев, И. В. Рудый, И. А. Малышев, В. А. Павлова, В. В. Тетерин, О. В. Демеш, В. Ф. Кабанов. Опубл. 10.06.98. Бюл. № 16.
13. *Павлова В. А. и др.* Иконический подход к решению проблемы коррекции неоднородностей чувствительности многоэлементных МФПУ в сканирующих тепловизорах//Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2.
14. *Venkateswarlu R., Er M. H., Gan Y. H., Fong Y. C.* Non-uniformity compensation for IR focal plane array sensors//Proc. of SPIE. V. 3061.
15. *John G. Harris, Yu-Mihg Chiahg.* Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint: Analog and digital implementations //Ibid. V. 306. P. 895.
16. *John G. Harris, Yu-Mihg Chiahg.* Minimizing the "Ghosting" artifact in scene-based nonuniformity correction//Ibid. V. 3377. P. 106.
17. *Соляков В. Н., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Филачев А. М., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Свиридов А. Н.* Метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцене//Прикладная физика. 2008. № 1. С. 60.
18. *Соляков В. Н., Жегалов С. И., Морозова В. Г.* Метод коррекции неоднородности по сигналам сцене многоэлементных фотоприемных устройств с микросканированием//Там же. 2009. № 5. С. 99.
19. *Соляков В. Н., Жегалов С. И., Морозова В. Г.* Результаты практического моделирования коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцене // Там же. С. 107.
20. *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 на изобретение 2298884, Госреестр изобретений РФ, 2007.
21. *Соловьев В. И., Анисимов И. Ю.* Оценка качества выравнивания каналов тепловизионных приемников при использовании метода микросканирования//Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 6.
22. *Болтарь К. О., Грачев Р. В., Полунеев В. В.* Определение дефектных элементов матричных тепловизионных фотоприемников в процедуре двухточечной коррекции// Прикладная физика. 2009. № 1. С. 81.
23. *Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г.* Обнаружение дефектных элементов фотоприемных устройств по сигналам сцене//Тез. докл. 21-й Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., 2010.
24. *Бурлаков И. Д., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Свиридов А. Н., Соляков В. Н., Филачев А. М.* Способ коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств со сканированием, патент на изобретение 2297728, Госреестр изобретений РФ, 2007.
25. *Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Филачев А. М.* Способ коррекции неоднородности матричных фотоприемных устройств с микросканированием, патент на изобретение 2349053, Госреестр изобретений РФ, 2009.
26. *Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Филачев А. М.* Способ коррекции неоднородности сканирующих многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцене, патент на изобретение 2347324, Госреестр изобретений РФ, 2009.
27. *Bradley M. Ratliff, Majeed M. Hayat, Russel C. Hardie.* Radiometrically-calibrated scene-based nonuniformity correction for infrared array sensors//Proc. of SPIE. 2001. V. 4372. P. 114.
28. *Bradley M. Ratliff, Majeed M. Hayat, Scott Tyo.* Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal-plane arrays // Ibid. 2003. V. 4820. P. 359.
29. *Bradley M. Ratliff, Majeed M. Hayat, Scott Tyo.* Algorithm for radiometrically-accurate nonuniformity correction with arbitrary scene motion // Ibid. V. 5076. P. 82.
30. *Majeed M. Hayat, Bradley M. Ratliff, J. Scott Tyo, Kamil Agi.* Generalized algebraic algorithm for scene-based nonuniformity correction //Ibid. 2004. V. 5556. P. 122.
31. *Rakesh Kumar, J. Scott Tyo, Bradley M. Ratliff.* Motion-based nonuniformity correction in dofp polarimeters // Ibid. 2007. V. 6682.
32. *Scribner D., Sarkady K., Calufield J., Kruer M., Katz G., Gridley C.* Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques//Ibid. 1993. V. 1308. P. 224.
33. *Sergio N. Torres, Esteban M. Vera, Rodrigo A. Reeves, Sergio K. Sobarzo.* Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays//Ibid. 2003. V. 5076.

34. Уиндрю Б., Стернз С. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989.

35. Sergio N., Torres, Majeed M. Hayat, Ernest E. Armstrong and Brian Yasuda. A Kalman-Filtering approach for non-uniformity correction in focal_plane array sensors//Proc. of SPIE. 2000. V. 4030.

36. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Морозова В. Г. Трехточечная коррекция неоднородности тепловизионных фотоприемных устройств//Тез. докл. 20-й Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., 2008.

37. Морозова В. Г. Методы трехпараметрической коррекции неоднородности сигналов многоэлементных фотоприемных устройств//Тр. 52-й Науч. конф. МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук". Часть 5 "Физическая и квантовая электроника", Москва—Долгопрудный, ноябрь 2009.

38. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. Метод линеаризованной трехточечной коррекции неоднородности фотоприемных устройств// Прикладная физика, 2010. № 4. С. 110.

39. Жегалов С. И., Соляков В. Н. Моделирование трехточечной коррекции неоднородности фотоприемных устройств // Тез. докл. 21-й Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., 2010.

40. Shulz M., Caldwell L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays // Proc. of SPIE. V. 2470. P. 200.

41. Isoz Wilhelm, Svensson Thomas, Renhorn Ingmar. Non-uniformity correction of infrared focal plane arrays // Ibid. 2005. V. 5783. P. 949.

42. Демидов В. М. Методы и средства цифровой коррекции изображения в оптико-электронных системах визуализации. Канд. дис. — М., 2008.

43. Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Жегалов С. И., Морозова В. Г. Математическое моделирование коррекции неоднородности матричных фотоприемных устройств по сигналам сцены // Тез. докл. 19-й Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., 2006.

44. Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Жегалов С. И., Морозова В. Г. Математическое моделирование коррекции неоднородности сканирующих многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены // Там же.

Conditions and capabilities of FPA nonuniformity scene based correction

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

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

Influence of factors of a scene and processing on FPA non-uniformity correction is considered. Correlation of scene, adaptability of processing, correction of defects and microscanning provide the conditions approaching capabilities of scene based methods to correction on basic signals.

PACS: 85.60.-q

Keywords: correction, scene, photodetector, defect, non-uniformity.

Bibliography — 44 references.

Received November 22, 2010