

УДК 621.384.3

Обнаружение дефектных элементов фотоприемных устройств по сигналам сцены

С. И. Жегалов, М. Д. Корнеева, В. Г. Морозова, В. Н. Соляков

Рассмотрено обнаружение дефектных элементов фотоприемных устройств по сигналам сцены. Дефекты обнаруживаются с использованием средних сигналов элементов, дисперсий сигналов и дисперсий разностей соседних отсчетов элементов. Коррекция реальных изображений показала работоспособность предлагаемого метода обнаружения дефектов по сцене.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: дефектные элементы, обнаружение, сигнал, дисперсия, сцена.

Введение

В фотоприемных устройствах (ФПУ), как правило, присутствует некоторое число неработающих (по терминологии [1], или неработоспособных — по [2], называемых еще "битыми", "выбитыми", "неисправными", "дефектными" [3, 4]) элементов. Этим элементам соответствуют дефекты изображения в виде темных и светлых точек или полос, мерцающих точек, а также пятен — при группировке дефектов.

Общая схема устранения дефектов состоит из обнаружения дефектных элементов и последующего исправления их сигналов заменой на некоторую функцию сигналов соседних недефектных элементов. Обнаружение дефектных элементов обычно осуществляется в процессе коррекции неоднородности [5]. Исправление дефектов является частью процесса формирования изображения.

При работе по сцене общая схема устранения дефектов "обнаружение + исправление" не меняется. Изменения касаются только методики обнаружения ошибок и обусловлены "неэталонностью" сигнала сцены.

Обнаружение дефектов по сцене при оценке шума элементов и межэлементных связей рассматривалось в работе [6]. Статья развивает подход данный в [6], рассматривая и другие аспекты обнаружения на примере сканирующего ФПУ и матричного ФПУ.

Модель элементов фотоприемного устройства

Выход $S_i(t)$ i -го элемента ФПУ в зависимости от потока $P_i(t)$ на входе в момент t представим (рассматривая двухпараметрическую модель "смещение + усиление") в виде:

$$S_i(t) = A_i P_i(t) + B_i + SH_i(t), \quad (1)$$

где A_i — чувствительность элемента, $A_i > 0$;

B_i — смещение;

$SH_i(t)$ — шум на выходе элемента;

$I \in N$, N — множество элементов ФПУ.

Полагаем, что шум независим с потоком и отсчеты шума независимы между собой.

Отличия чувствительностей A_i и смещений B_i и отклонений $SH_i(t)$ для разных элементов "создают" неоднородность элементов. Диапазон неоднородности определяется разбросом величин A_i и B_i , $i \in N$ относительно их средних значений на множестве N , и отклонениями шума $SH_i(t)$.

Неоднородность сигналов элементов устраняется процедурой коррекции неоднородности, которая исходит из учета связей сигналов элементов с величинами A_i и B_i . В широком смысле дефекты можно считать частью неоднородности.

Порог подразделения элементов на дефектные и недефектные, вообще говоря, неоднозначен, но приближенность определения этого порога катастрофического влияния на формирование изображения не имеет, так как если неоднородность элемента не устраняется собственно процедурой коррекции неоднородности, то элемент подпадает под процедуру коррекции дефектов, и наоборот. Это назовем полной коррекцией.

Жегалов Станислав Иванович, ведущий научный сотрудник.

Корнеева Марина Дамировна, первый заместитель генерального директора.

Морозова Владлена Георгиевна, инженер.

Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.

Статья поступила в редакцию 20 августа 2009 г.

© Жегалов С. И., Корнеева М. Д., Морозова В. Г., Соляков В. Н., 2011

Можно полагать, что для установления порога дефектности достаточно статистических оценок сигналов элементов. При этом целесообразно следовать "осторожной" стратегии установления порогов, завышая дефектность при наличии сомнений в оценках — полнота коррекции в определенных пределах позволяет это делать.

Интерпретируем модель (1) по отношению к свойствам элементов:

малые и большие значения A_i "объясняют" (термин взят из математической статистики) низкую и высокую, соответственно, чувствительность элементов;

аналогично малым и большим B_i соответствуют низкое и высокое смещение;

высокие отклонения шума $SH_i(t)$ соответствуют сильно шумящим элементам;

значения средних значений и вариаций потоков $P_i(t)$ отличаются по элементам, но с увеличением интервала усреднения различия уменьшаются.

Тогда задачу обнаружения дефектов можно сформулировать так: по отсчетам сигналов $S_i(t)$ необходимо оценить величины A_i , B_i и характеристики процессов $SH_i(t)$ и $P_i(t)$ и определить пороги обнаружения.

Прямые оценки искомым величин невозможны — возможно получение только косвенных оценок, например, отношений чувствительностей и смещений соседних элементов [6], а также неразрывных от чувствительности оценок потоков.

Среди косвенных используем наиболее простые, стандартные статистические оценки исходных сигналов — средние и дисперсии (отклонения), исследуем их зависимость от интересующих нас величин A_i , B_i и характеристик процессов $SH_i(t)$ и $P_i(t)$, и затем устанавливаем пороги обнаружения.

Стандартные оценки сигналов

Средние значения сигналов

$$\bar{S}_i(t) = A_i \bar{P}_i(t) + B_i + S \bar{H}_i(t), \quad i \in N, \quad (2)$$

средний шум $S \bar{H}_i(t)$ с увеличением интервала усреднения T стремится к нулю и слагаемым $S \bar{H}_i(t)$ можно пренебречь.

Дисперсия сигналов

$$\sigma_{S_i}^2 = A_i^2 \sigma_{P_i}^2 + \sigma_{SH_i}^2 = \sigma_{SP_i}^2 + \sigma_{SH_i}^2, \quad (3)$$

где $\sigma_{P_i}^2$ — дисперсия потока;

$\sigma_{SH_i}^2$ — дисперсия шума;

$\sigma_{SP_i}^2$ — обусловленная потоком часть дисперсии сигнала.

Заметим, что вместо дисперсий при конечном интервале T нужно говорить об ее оценке. Но так как везде и будут рассматриваться только оценки, то для сокращения "оценку" будем опускать.

Автоковариация сигналов соседних отсчетов элемента

$$\begin{aligned} \sigma_{S1_i}^2 &= \frac{1}{T-1} \sum_{t=2}^T [S_i(t) - \bar{S}_i(t)] \cdot [S_i(t-1) - \bar{S}_i(t)] = \\ &= A_i^2 \sigma_{P_i}^2 (1) = A_i^2 \sigma_{P_i}^2 - A_i^2 \sigma_{dP_i}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sigma_{P_i}^2 (1)$ — автоковариация потока элемента (со сдвигом во времени на один отсчет);

$\sigma_{dP_i}^2$ — дисперсия разности соседних (по времени) потоков элемента.

Дисперсия разности соседних по времени отсчетов элемента

$$\begin{aligned} \sigma_{dS_i}^2 &= \frac{1}{T-1} \sum_{t=2}^T [S_i(t) - S_i(t-1)]^2 = \\ &= 2\sigma_{SH_i}^2 + 2A_i^2 [\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_i}^2 (1)] = 2\sigma_{SH_i}^2 + A_i^2 \sigma_{dP_i}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

На рис. 1, а–г представлены примеры стандартных оценок для линейки 4×288 сканирующего ФПУ. По горизонтали — элементы линейки, графики получены совмещением четырех 288-точечных графиков, соответствующих четырем рядам линейки. Единица измерения по вертикали — один отсчет АЦП.

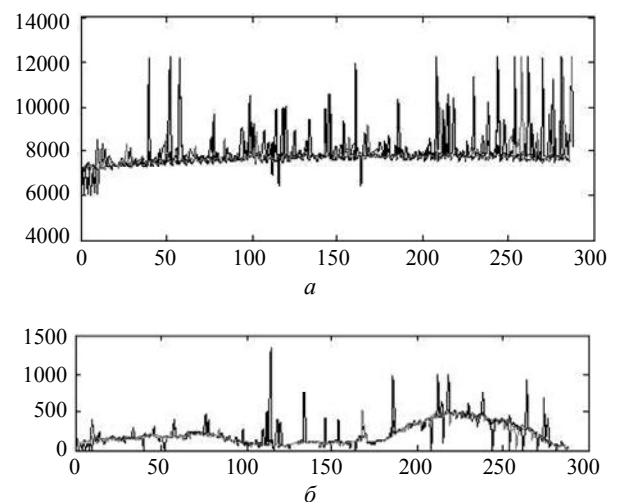


Рис. 1. Стандартные статистические оценки:

а — среднее сигналов элементов линейки — $[\bar{S}_i(t)]_{i \in N}$;
б — дисперсия сигналов элементов линейки — $[\sigma_{S_i}^2]_{i \in N}$;

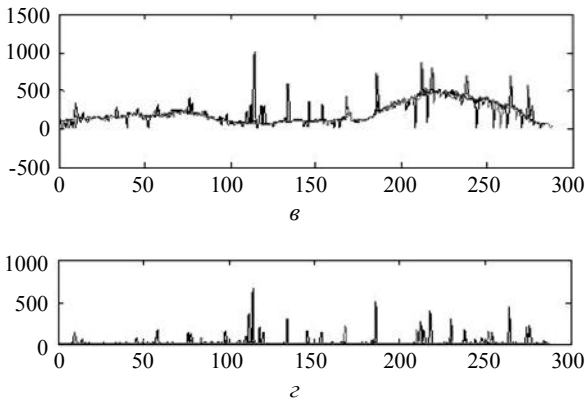


Рис. 1. Окончание.

ϵ — 1-дисперсия сигналов элементов линейки — $[\sigma_{S1_i}^2]_{i \in N}$;
 ζ — дисперсия разности соседних отсчетов элементов линейки — $[\sigma_{dS_i}^2]_{i \in N}$

Оценивание дефектов по дисперсиям сигналов

Отметим явную корреляцию дисперсий рис. 1, б и в — и там и там присутствует дисперсия потоков (одинаковый тренд графиков), и хотя в дисперсии сигнала присутствует дисперсия ошибки, а в 1-дисперсии — нет, но отклонения на рис. 1, б и в от тренда коррелируют с рис. 1, з, где основной составляющей является дисперсия ошибки. Поэтому напрашивается гипотеза о взаимосвязи — в рамках модели (1) — дисперсии ошибок с отклонениями чувствительности.

Из (3)—(5) величины $\sigma_{SP_i}^2 = A_i^2 \sigma_{P_i}^2$, $\sigma_{SH_i}^2$ и $\sigma_{dSP_i}^2 = A_i^2 \sigma_{dP_i}^2$, которые "ближе" к искомым характеристикам, можно выразить через вычисленные оценки:

$$\begin{aligned} \sigma_{SH_i}^2 &= \sigma_{S1_i}^2 + \sigma_{dS_i}^2 - \sigma_{S_i}^2; \\ A_i^2 \sigma_{P_i}^2 &= 2\sigma_{S_i}^2 - \sigma_{S1_i}^2 - \sigma_{dS_i}^2; \\ A_i^2 \sigma_{dP_i}^2 &= 2\sigma_{S_i}^2 - 2\sigma_{S1_i}^2 - \sigma_{dS_i}^2. \end{aligned}$$

На рис. 2, а показаны величины $A_i^2 \sigma_{dP_i}^2$. В выражениях (4) и (5) они существенно меньше других слагаемых и ими можно пренебречь в сравнении с другими дисперсиями.

Тогда в качестве дисперсии шума $\sigma_{SH_i}^2$ можно взять половину выражения (5), а 1-дисперсия равна $\sigma_{S1_i}^2 \approx A_i^2 \sigma_{P_i}^2$.

Малость дисперсии, обусловленной изменением потока от отсчета к отсчету, объясняется гладкостью потокового тренда (тренд можно проследить на рис. 1, б или в) и малостью потоковой

составляющей — корень квадратный из потоковой дисперсии составляет 10—15 ед.

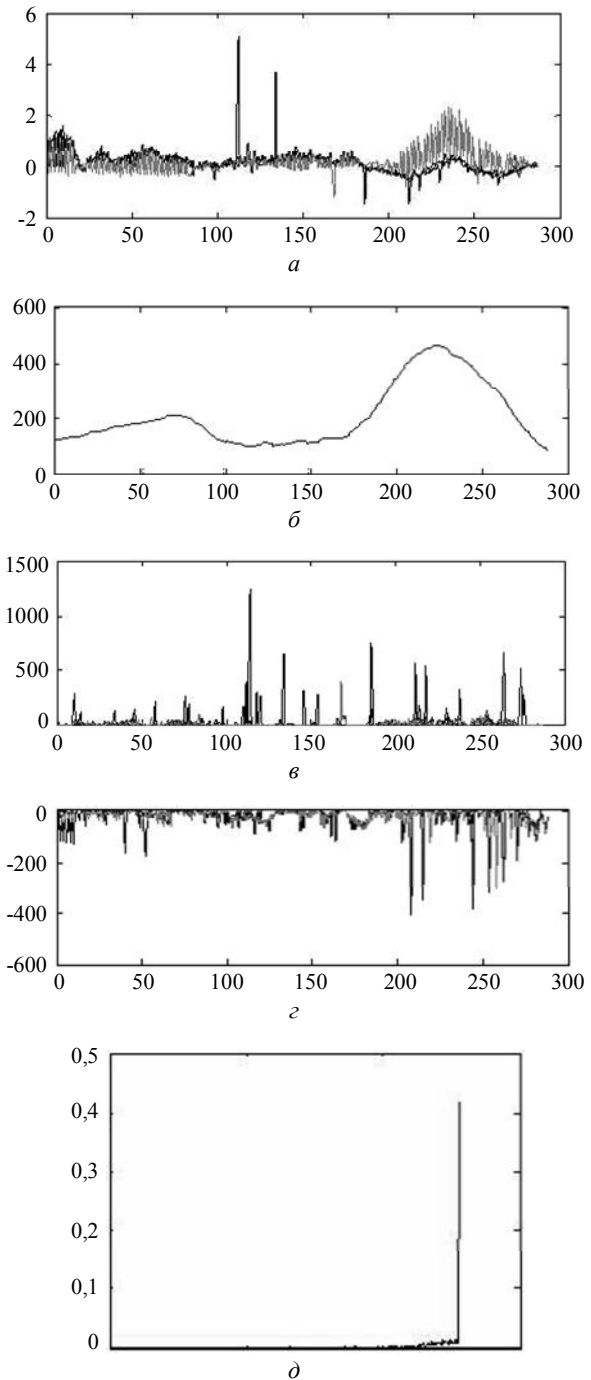


Рис. 2. Обработка дисперсий:

а — часть дисперсии разности соседних отсчетов сигналов элементов линейки, обусловленная изменением потоков от отсчета к отсчету — $[A_i^2 \sigma_{dP_i}^2]_{i \in N}$; б — потоковый тренд дисперсии сигналов элементов линейки; в — верхние отклонения дисперсии сигналов элементов от потокового тренда; з — нижние отклонения дисперсии сигналов элементов; д — гистограмма отклонений

Изъяв из-за малости выборку $[A_i^2 \sigma_{dP_i}^2]_{i \in N}$, рассмотрим связь оставшихся в анализе дисперсии шума и дисперсии сигнала.

Удаляем из дисперсии сигнала потоковую составляющую — оцениваем потоковый тренд, пропустив дисперсию сигнала через скользящее усредняющее (30,4)-окно (результат усреднения см. на рис. 2, б), вычитаем из дисперсии сигнала тренд.

Результат вычитания ограничиваем снизу, получаем верхние отклонения (см. рис. 2, в), коэффициент корреляции которых с дисперсией шума (в качестве нее берем дисперсию разности соседних отсчетов) составляет более 0,91 — весьма надежный результат.

Продлав то же самое с 1-дисперсией сигналов элементов, получаем корреляцию ее верхних отклонений с дисперсией шума, равную 0,84.

Таким образом, верхние отклонения и дисперсии сигналов и 1-дисперсии сильно связаны с дисперсией шума, т. е. существует некоторый процесс, связно проявляющийся в дисперсиях модели и превосходящий полезный сигнал (потоковый тренд) и достаточно "редкий" — только несколько процентов элементов существенно реагируют на него.

Эти элементы назовем дефектными по шуму, и они могут быть найдены либо из дисперсии шума, либо из верхних отклонений дисперсии сигнала фильтрованием через порог.

Нижние отклонения дисперсии сигналов элементов (см. рис. 2, г) от шума не зависят — корреляция меньше 0,1. Рассматривая эти отклонения на рис. 1, б, видно, что они соответствуют снижению дисперсии к нулю, что похоже на снижение чувствительности. Эти элементы назовем дефектными нечувствительными.

Из рис. 2, г очевидна схема выделения дефектов — построить гистограмму отклонений (см. рис. 2, д) — оценку плотности распределения значений отклонений, по гистограмме найти, например, 5%-ный уровень отклонений, и элементы с отклонениями меньше этого уровня отнести к дефектным по нечувствительности.

Субъективным в методике является процентность уровня; здесь для иллюстрации мы взяли часто применяющийся в матстатистике 5%-ный уровень. Уровень может уточняться на основании дополнительной информации, но всегда остается субъективным,

Анализ дефектов по средним значениям сигналов элементов

Исследуем тренд среднего сигналов (см. рис. 1, а) по длине линейки. Его оценим усредняющим скользящим по линейке окном, вычтем из среднего сигналов и получаем отклонения средних (рис. 3, а).

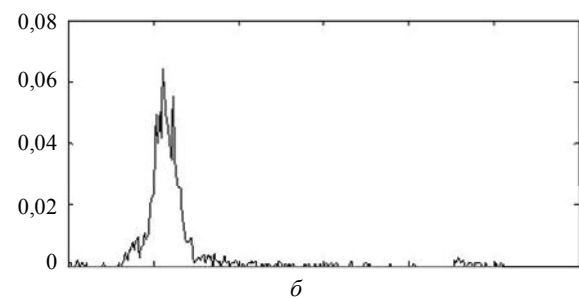
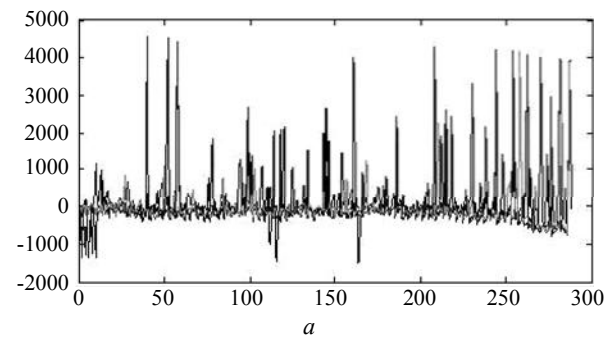


Рис. 3. Обработка средних сигналов:
а — отклонения средних сигналов элементов;
б — гистограмма отклонений средних сигналов

Далее находим гистограмму отклонений (см. рис. 3, б) и с ее помощью по заданному проценту дефектов находим пороги — сверху и снизу.

Эти дефекты назовем дефектами смещения.

Общее множество дефектов линейки получается объединением множеств дефектов по шуму, нечувствительности и дефектов смещения.

Практическая оценка дефектов линейки 4×288

На рис. 4, а показана карта дефектов линейки, полученная на основании реальной сцены. Дефекты приведены по рядам (четыре ряда). На рис. 4, б приведены соответствующие рядам линейки четыре кадра — со скорректированной неоднородностью, но без исправления по дефектам.

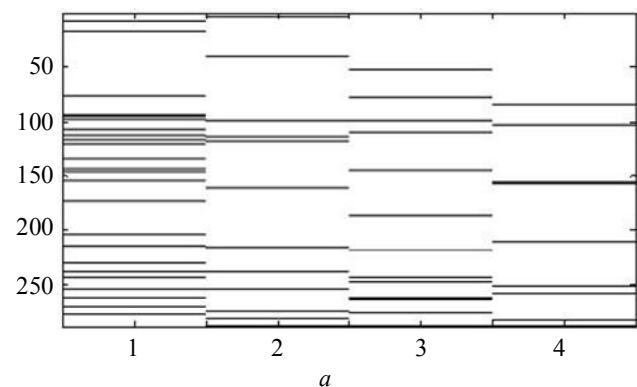


Рис. 4. Оценка дефектов линейки 4×288:
а — карта обнаруженных дефектов линейки;

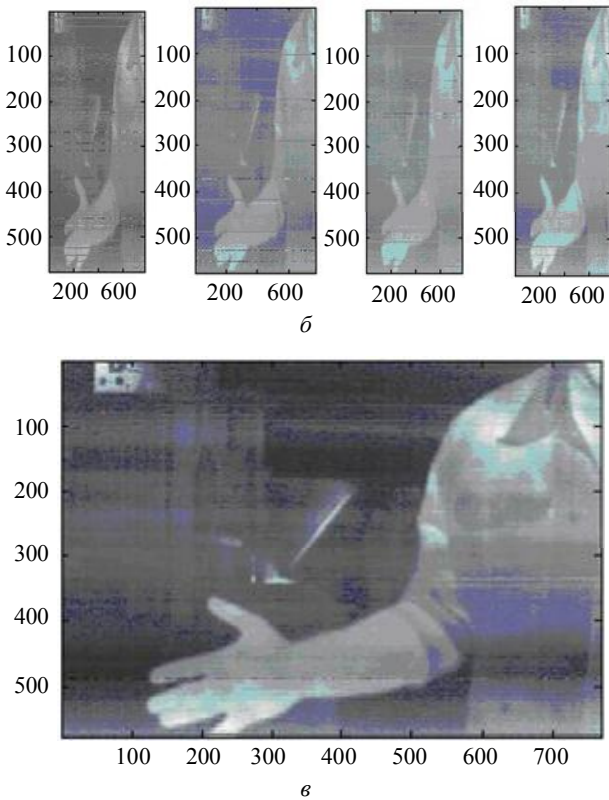


Рис. 4. Окончание.

б — соответствующие рядам линейки 4 кадра; в — выходной кадр сканирующего 4×288 ФПУ

Из сопоставления карты и кадров видна "дефектность" соответствующих обнаруженным дефектам строк. Так, наиболее "дефектный" первый кадр, и в первом ряду по карте дефектов наибольшее число. Наименее дефектов сигнала — в четвертом кадре. Размерность кадров по вертикали в 2 раза больше длины линейки — кадр образуется из двух полукадров формата 288×768.

Методика обнаружения дефектов в программе обработки реальных сцен в целом соответствует изложенной выше, но упрощена — не вычитаются тренды, а пороги настроены без построения гистограмм. Для обработки средних значений исключение тренда не так важно, он относительно невелик в сравнении с отклонениями. При обработке дисперсий, хотя тренд и значительнее, но результат в целом получается удовлетворительный.

Невключение тренда в обработку позволяет избежать выяснения подходящих размеров окон усреднения — так или иначе в подборе окон существует субъективный фактор, что в числе прочего снижает автоматичность выявления дефектов. Плата за это — увеличение риска пропуска дефектов в выходное изображение.

Выходное изображение строится на основании комбинирования строк четырех кадров с заменой дефектных строк. Выходной кадр приведен на рис. 4, в. В нижней части кадра видна "пропущенная" дефектная строка.

Так же как и для линейки дисперсии от изменений потока соседних отсчетов $[A_i^2 \sigma_{dP_i}^2]_{i \in N}$ для матрицы значительно меньше других дисперсий. В качестве меры сопоставления берем среднеэлементную по матрице дисперсию — для $[A_i^2 \sigma_{dP_i}^2]_{i \in N}$ оценка, полученная из стандартных дисперсий с использованием формулы $A_i^2 \sigma_{dP_i}^2 = 2\sigma_{S_i}^2 - 2\sigma_{S1_i}^2 - \sigma_{dS_i}^2$, дает среднюю оценку в -31. Отрицательную величину создает погрешность вычислений, незначительная на фоне средних дисперсий. Например, средняя по дисперсиям $[\sigma_{S_i}^2]_{i \in N}$ равна порядка 40000.

Так же как и для линейки сильная корреляция между разностью дисперсий и 1-дисперсией сигнала и дисперсией шума оценивается коэффициентом корреляции $\rho([\sigma_{S_i}^2 - \sigma_{S1_i}^2]_{i \in N}, [\sigma_{dS_i}^2]_{i \in N})$, равным 0,99. И так же, как и для линейчатого ФПУ, уменьшаются корреляция дисперсии сигнала и шума (0,68) и 1-дисперсии и шума (0,45).

Корреляция верхних отклонений дисперсии сигналов элементов и дисперсии шума составляет 0,73 — достаточно высокая, но ниже в сравнении с линейкой, где она составила 0,91. Корреляция нижних отклонений составила 0,28 в сравнении с менее чем 0,1 для линейки. Подобная картина, но с меньшими уровнями корреляции, и для связи 1-дисперсии с шумом.

В целом, структура статистических связей дисперсий сигнала с дисперсией шума для матрицы подобна связям линейки, но с уменьшенными значениями коэффициентов корреляции.

Это позволяет классифицировать дефекты матрицы так же, как и линейки: дефекты по шуму; дефекты по нечувствительности; дефекты по смещению, а множество дефектов матрицы получать объединением этих трех множеств. Соответственно, и методика действий по обнаружению дефектов аналогична. Отличие в том, что снижение корреляции верхних отклонений дисперсии сигналов с дисперсией шума побуждает к выделению дефектов шума как по отклонениям дисперсии шума, так и по верхним отклонениям дисперсии сигнала, и объединению этих двух множеств в дефекты шума.

На рис. 5, а приведен один кадр исходного нескорректированного изображения с матрицы. На рис. 5, б — карта оценки состояния элементов матрицы: темные точки идентифицируют дефекты, серые и белые области показывают способность элементов к 1- или 2-коррекции неоднородности [6]. На рис. 5, в показан скорректированный кадр, на котором можно видеть отдельные "пропущенные" дефекты.

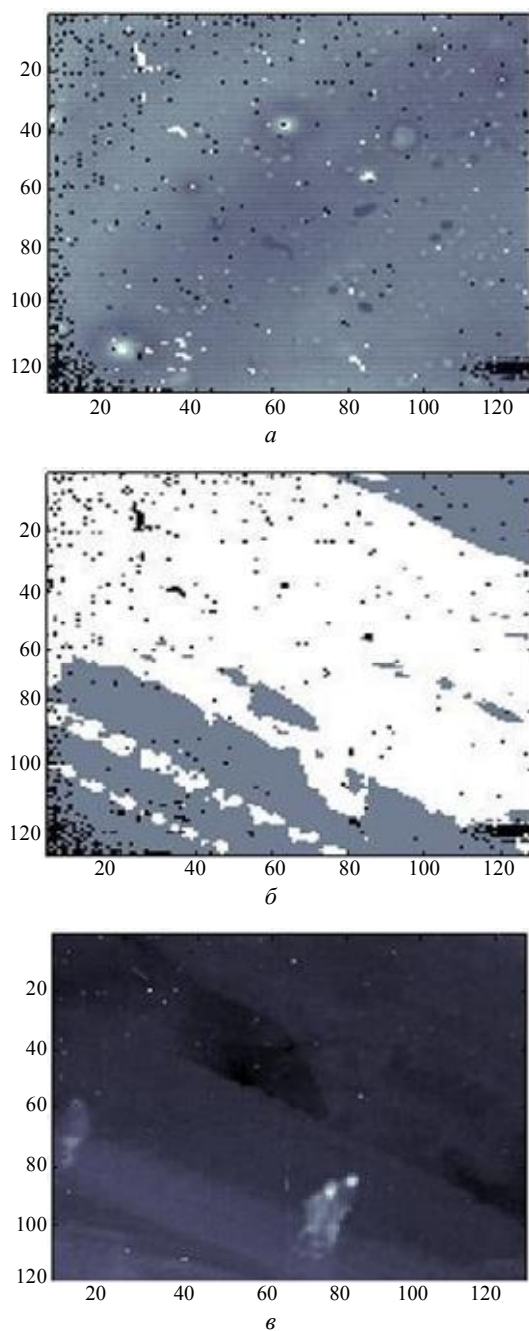


Рис. 5. Оценка дефектов матричного 128x128 ФПУ:
a — кадр исходного нескорректированного изображения с матрицы; *б* — карта оценки состояния элементов матрицы; *в* — скорректированный кадр

Как и для линейки использовалась процедура обнаружения дефектов с упрощениями — без удаления трендов и без использования гистограмм.

Выводы

1. Установлена высокая корреляция верхних отклонений дисперсии сигналов элементов с дисперсией шума. Этим отклонениям поставлены в соответствие дефекты по шуму, которые могут быть определены либо по дисперсии шума, либо по верхним отклонениям дисперсии сигнала. Для матричного ФПУ корреляция несколько меньше, поэтому дефекты по шуму получаются объединением дефектов из верхних отклонений и из дисперсии шума.

2. Нижним отклонениям дисперсии сигналов элементов ставятся в соответствие дефекты по нечувствительности. Отклонениям средних сигналов элементов соответствуют дефекты по смещению.

3. Общее множество дефектов линейки получается объединением множеств дефектов по шуму, нечувствительности и дефектов смещения.

4. Коррекция реальных изображений показала работоспособность разработанного метода обнаружения дефектов по сцене.

Литература

1. Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И. Тепловизор на основе "смотрящей" матрицы из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ формата 128x28// Прикладная физика. 1999. № 2. С. 46.
2. Соловьев В. И., Анисимов И. Ю. Оценка качества выравнивания каналов тепловизионных приемников при использовании метода микросканирования// Оптический журнал 2005. Т. 72. № 6.
3. Солина Н. И. Алгоритм функции калибровки оцифрованных сигналов для улучшения качества изображения// Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и систем искусственного интеллекта, Матер. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. — Вологда: ВоГТУ, 2003.
4. Солина Н. И. Выравнивание чувствительности и исправление геометрического шума в тепловизионных изображениях методом двухточечной коррекции// Информационные технологии моделирования и управления: Международ. сб. науч. тр./ Под ред. д-ра техн. наук, проф. О. Я. Кравца. — Воронеж: Изд-во "Научная книга", 2004. Вып. 15.
5. Болтарь К. О., Грачев Р. В., Полунеев В. В. Определение дефектных элементов матричных тепловизионных фотоприемников в процедуре двухточечной коррекции// Прикладная физика. 2009. № 1. С. 87.
6. 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 сцены// Там же. 2008. № 1. С. 96.

Detection of defective elements for focal plane arrays on scene signals

S. I. Zhegalov, M. D. Korneeva, V. G. Morozova, V. N. Solyakov

Orion Research-and-Production Association, 46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

Scene based detection of defective elements for focal plane arrays is considered. Defects are found out with use of average signals of elements, dispersions of signals and dispersions of differences of the next readout of elements. Correction of real images has shown serviceability of an offered method.

PACS: 85.60.-q

Keywords: defective units, detection, signal, dispersion, scene.

Bibliography — 6 references.

Received August 20, 2009