

**Фильтрация остаточной неоднородности и дефектов изображения
в тепловизорах с использованием микросканирования***И. И. Кремис, Д. А. Толмачев, Р. А. Гладков*

В работе изложен метод фильтрации остаточной неоднородности и дефектов изображения в матричных тепловизорах на основе частотного разложения с использованием микросканирования. Метод не ухудшает пространственное разрешение и РТЭШ тепловизоров. Приведены результаты применения метода в тепловизионных каналах, использующих фотоприемники производства ИФП СО РАН трех типов: КРТ320×256, КРТ384×288, QWIP384×288.

Ключевые слова: остаточная неоднородность, фильтрация, двухточечная коррекция, микросканирование.

Введение

Использование тепловизионных приборов (ТВП) в составе изделий специальной техники определяет их функционирование в условиях низких контрастов инфракрасного излучения объектов, т. е. на пределе температурной разрешающей способности прибора. В этих условиях, одним из основных факторов, определяющих качество тепловизионного изображения, является используемый метод коррекции неоднородности и дефектов (сигнал дефектных фотоэлементов) матричных фотоприемных устройств.

Цель настоящей статьи – изложение метода фильтрации остаточной неоднородности чувствительности (ОНЧ) и дефектов изображения в контексте применения процедуры двухточечной коррекции в матричных тепловизорах с использованием микросканера.

Предварительные обоснования

Наиболее простым и распространенным методом коррекции неоднородности является метод по двум точкам, заключающийся в использовании

двух опорных источников согласованных со сценой наблюдения [1, 2]. Этот метод подразумевает использование кусочно-линейной аппроксимации во всем диапазоне температур, соответствующие коэффициенты записываются однократно при калибровке прибора. Проблема использования двухточечной схемы состоит в допущении применения линейной модели к нелинейной зависимости поток–сигнал фотоэлементов. В этой связи, даже при условии согласованности эталонов со сценой данная схема коррекции формирует ошибку выравнивания, т. н. остаточную неоднородность, проявляющуюся при наблюдении малоконтрастных сцен в виде «вуали» [3]. Кроме того, имеет место дрейф сигналов фотодиодов КРТ [4–6], в результате чего может измениться кривая чувствительности, и, соответственно, в процесс коррекции вносится дополнительная ошибка. Указанные причины зачастую не позволяют выполнить успешную коррекцию, остаточная неоднородность остается на изображении [7].

В дополнение к ОНЧ, в формируемое по двухточечной схеме изображение вносятся искажения, вызванные сигналами от дефектных фотоэлементов (ДЭ), классифицируемых в [4] как дефектные по шуму (в том числе дрейфующие) и дефектные по чувствительности фотоэлементы – темные и светлые пиксели, их кластеры. Для их компенсации распространенным способом, используемым в дополнение к двухточечным схемам коррекции, является способ замещения сигнала ДЭ на сигнал соседних, т. е. рабочих элементов. Использование данного способа в системе обработки сигналов ТВП подразумевает наличие таблиц дефектности, для формирования которых ис-

Кремис Игорь Иванович, заведующий отделом, к.т.н.
Толмачев Данил Алексеевич, старший инженер-электроник.
Гладков Роман Александрович, старший инженер-электроник.
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ».
Россия, 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 2/1.
E-mail: igor21738@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 26 января 2017 г.

© Кремис И. И., Толмачев Д. А., Гладков Р. А., 2017

пользуются статистические методы – по критерию сравнения с пороговым значением выборки кадров эталонной температуры (дефектные по шуму элементы) и разности температурных кадров-эталонов (дефектные по чувствительности элементы) [5]. При этом методы требуют временных затрат на вычисления, замещение ДЭ сигналом соседнего элемента нарушает геометрию объектов изображения. Также приходится учитывать, что, поскольку параметры гибридной сборки ФПУ нестабильны (дрейф сигнала фотоэлементов, чувствительность к циклам криостатирования [4–6]), то требуется непрерывный пересчет таблиц дефектности. Это определяет необходимость использования алгоритмов, способных обнаружить и корректировать ДЭ за период кадровой частоты МФПУ (минимальный период дрейфа сигнала дефектного по шуму элемента [5]), не нарушая при этом геометрию объектов.

Кроме того, следует отметить, что шумящие «дрейфующие» ДЭ по большей части являются чувствительными к тепловому потоку и поддаются коррекции с некоторой ошибкой – по причине повышенного шума [10]. В этой связи можно сделать вывод о целесообразности разработки методов, снижающих флуктуации сигнала шумящих ДЭ и улучшающих общую картину дефектности фотоприемников.

В данной работе для устранения описанных проблем предлагается метод, основанный на избыточности [11] тепловизионного канала, создаваемой элементом микросканирования, и позволяющей расширить спектр решений задач обработки тепловизионного изображения, т. е. в нашем случае – удаления остаточной неоднородности и дефектов изображения.

Изложение метода фильтрации

Визуальная оценка изображения ТВП (в большей степени при движении сцены) показы-

вает раздельное восприятие изображения сцены относительно изображения помехи – ОНЧ и дефектов, и подсказывает простое решение – зафиксировать отпечаток помехи в памяти прибора и вычесть его из изображения в процессе обработки.

Сложность состоит в том, что по причине нестабильности фотоэлементов, отпечаток картины помехи в памяти прибора не соответствует ее отпечатку уже на следующем кадре изображения (в разной степени для разных ФПУ [4, 5]). Кроме того, изменение температурного распределения сцены изменяет рабочую точку на аппроксимирующей кривой фотоэлемента – ошибка непрерывно изменяется при изменении сцены. Это означает необходимость накопления и оценки помехи непрерывно и в реальном времени.

Предлагаемый метод использует соображения, изложенные в [3] применительно к изображениям, формируемым линейчатыми фотоприемниками; в их основе – понимание, что остаточная неоднородность является аддитивной помехой δ с сигналом сцены u , где выполняется соотношение:

$$U = u + \delta \tag{1}$$

результат двухточечной коррекции.

В случае для матричных приемников излучения справедливо выражение:

$$\delta = \xi + \upsilon + \gamma, \tag{2}$$

где ξ – ОНЧ, υ – дефекты по чувствительности, γ – дефекты по шуму.

Аналогично [3], идея метода состоит в том, чтобы, используя в совокупности процессы микросканирования и частотного разложения, обеспечить выделение остаточной неоднородности и ДЭ из исходного изображения.

Структурная схема фильтра, реализующего метод, состоит из двух частей, причем первая часть показана на рис. 1.

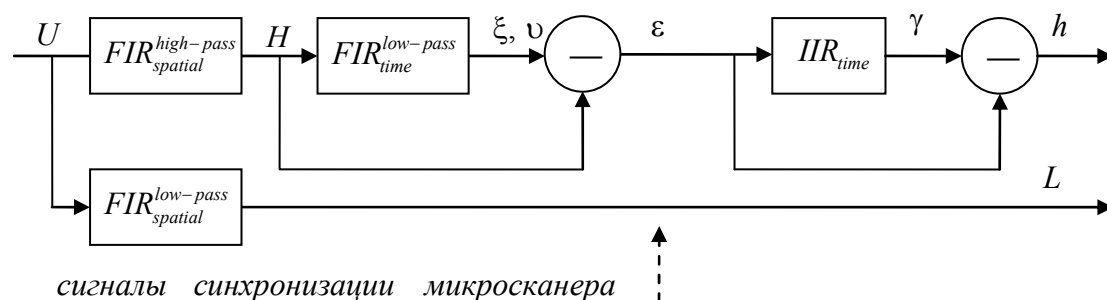


Рис. 1. Структурная схема фильтра. Часть первая.

Здесь $FIR_{spatial}^{low-pass}$ и $FIR_{spatial}^{high-pass}$ – КИХ-фильтры; индекс *low-pass* обозначает высокочастотную (ВЧ), *high-pass* – низкочастотную (НЧ) и *spatial* – пространственную фильтрацию; L – НЧ-составляющая, H – ВЧ-составляющая изображения, они формируются согласно формуле дискретной свертки:

$$Y_{i,j} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} B_{m,n} \cdot X_{i+m-(M-1)/2, j+n-(N-1)/2}, \quad (3)$$

где $Y_{i,j}$ – результат свертки (фильтрации), $B(m,n)$ – матрица, задает ВЧ- или НЧ-ядро свертки и имеет размеры M по горизонтали и N по вертикали, $X_{i,j}$ – входное изображение; U – видеопоток, скорректированный методом двухточечной коррекции; $FIR_{time}^{low-pass}$ – КИХ-фильтр скользящего среднего, индекс *time* обозначает использование фильтрации во временной области – свертка применяется к временным последовательностям пикселей (по кадрам):

$$\xi_t = \sum_{i=0}^P b_i \cdot H_{t-i}, \quad (4)$$

где $P=1000$ – порядок фильтра, сумма коэффициентов b равна единице, t – порядковый номер кадра в бесконечной последовательности; PIR_{time} – временной БИХ-фильтр первого порядка, описывается разностным уравнением:

$$\gamma_t = b_1 \cdot \varepsilon_t - a_1 \cdot \gamma_{t-1}, \quad (5)$$

где $b_1 = 0,5$, $a_1 = -0,5$.

Сигнал синхронизации сканера на рис. 1 означает синхронизацию частоты переключения полей микросканера с частотой импульсов экспозиции фотоприемника.

Логика рассуждений, формирующая механизм фильтрации помехи δ , состоит в следующем.

Выполняется процесс частотного разложения изображения U на две составляющие:

$$U = L + H, \quad (6)$$

при этом в ВЧ-сигнале изображения присутствует аддитивная составляющая помехи [3]:

$$H = h + \delta, \quad (7)$$

где h – «чистая» ВЧ-составляющая сигнала без неравномерности, δ – помеха, которую необходимо выделить из сигнала H для дальнейшей компенсации.

Для разделения сигналов h и δ предлагается использовать элемент микросканирования. В процессе микросканирования один и тот же фотозлемент «просматривает» четыре (n – количество микросканов в цикле микросканирования) разных элемента сцены, сдвинутых на шаг микросканирования. Накопление микросканов позволяет «замылить» границы объектов сцены и исключить их влияние на результат накопления. Или иначе, ВЧ-сигнал сцены усредняется, сигнал неоднородности и дефектов с постоянным уровнем остается неизменным и накапливается – выделяются компоненты ξ и υ выражения (2). Далее полученные компоненты вычитаются из исходного ВЧ-сигнала H , таким образом, исключая из изображения ОНЧ и «слепые» ДЭ.

Для удаления медленно шумящих дефектов используется схема на основе рекурсивного фильтра первого порядка (5). Фильтр применяется к временному потоку пикселей изображения. Выходное значение сигнала непрерывно обновляется с учетом предыдущего значения пикселя. Границы объектов сцены «замываются». Дрейфующие элементы накапливаются, следуя направлению изменения сигнала ε . После вычитания компоненты γ из потока ε исключаются дрейфующие и медленно шумящие (длительностью переходного процесса более одного кадра) элементы, их выбросы, тем самым формируя адекватный общей шумовой картине сигнал.

Визуальная оценка сигнала h и его анализ во временной области (выборка 100 кадров для всех типов используемых ФПУ) показали наличие некоторого количества дефектных элементов ψ , не подвергшихся фильтрации – данные элементы резко изменяют свое значение от кадра к кадру, причем на разное время (пиксели a и b на рис. 2). В результате отклик на выходе фильтра (5) не соответствует реальному значению дефекта – компенсация не выполняется. Таким образом, выражение (2) следует записать в виде:

$$\delta = \xi + \upsilon + \gamma + \psi, \quad (8)$$

а компонент ψ требует применения отдельного алгоритма фильтрации. В данной работе предлагается два способа фильтрации дефектов ψ .

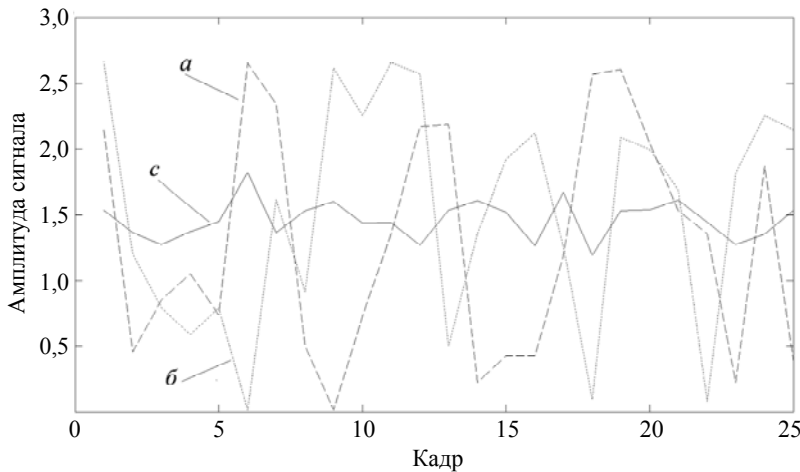


Рис. 2. Сигналы пикселей строки 30 фотоприемника КРТ384×288: а – пиксель 10, б – пиксель 45, с – пиксель 120.

Способ первый. Временной аналог способа, предложенного в [8] для пространственной области, не требующий привязки к шагу микросканирования, показан на рис. 3. Фильтрация ψ осуществляется следующим образом.

Т. к. привязка к шагу сканера не осуществляется, микросканы к одной координате сцены не сводятся (один участок сцены проецируется на разные пиксели микросканов). Следовательно, вывод результирующего изображения должен осуществляться с прореживанием на n – индекс t/n на рис. 3 обозначает прореживание на количество микросканов в цикле микросканирования. Элементы схемы $Mem1_{time}$ и $Mem2_{time}$ обозначают память, осуществляющую прореживание потоков h и L на n , $\alpha_{t/n}$ и $\beta_{t/n}$ соответственно представляет их прореженные потоки. Элемент $Mem3_{time}$ осуществляет задержку потока $\alpha_{t/n}$ на 1, 2 и 3 периода t/n (для простоты рассматривается только задержка на 1 период). Потоки $\alpha_{t/n}$ и $\alpha_{t/n-1}$ сравниваются компаратором $Comp_{time}$ с заданным порогом, при его превышении элемент считается дефектным, формируется поток $\gamma_{t/n}$, который вычитается из потока $\alpha_{t/n}$, осуществляя, таким образом, фильтрацию дефектов ψ . Отфильтрованный ВЧ-поток $\theta_{t/n}$ складывается с потоком $\beta_{t/n}$, формируя в результате поток $u_{t/n}$, скоррек-

тированный по остаточной неоднородности и дефектам массив изображения.

Способ второй. Требует привязки к шагу микросканирования и взаимной юстировки микросканера и матрицы – направление сканирования должно совпадать с направлением строк и столбцов МФПУ. Схема фильтрации потока ψ показана на рис. 4. Фильтрация ψ осуществляется следующим образом.

Потоки h и L , сформированные по схеме рисунка 1, складываются, образуя поток ϑ . Исходя из величины шага микросканера, микросканы потока ϑ сводятся к одной координате сцены – программно вводятся поправки на шаг микросканирования и его направление, один участок сцены проецируется на один и тот же пиксель микросканов. Далее, каждый кадр потока ϑ последовательно записывается в области памяти $Mem1$ – $Mem4$, каждый новый кадр переписывает последний. При этом области, которые не записываются, считаются попиксельно в медианный фильтр Med . На выходе фильтра Med формируется поток u . Каждый пиксель изображения u – это результат временной медианной фильтрации из соответствующих пикселей трех предыдущих кадров. Поэтому в данном способе скорость потока u равна скорости входного потока U , или иначе – частота кадров потока u равна частоте кадров входного потока U .

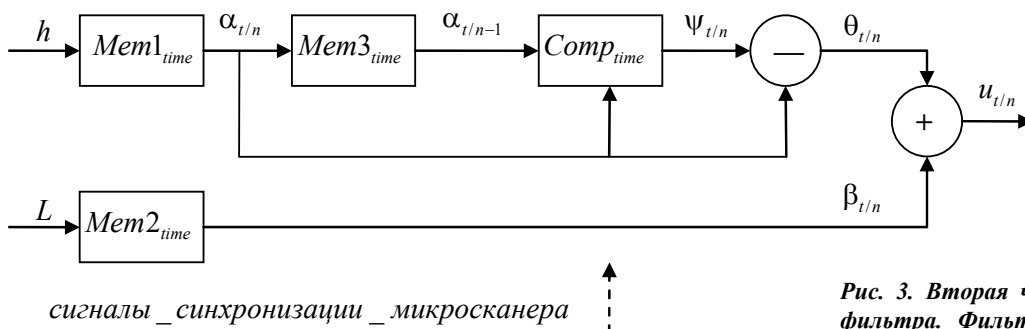


Рис. 3. Вторая часть структурной схемы фильтра. Фильтрация потока ψ . Способ первый.

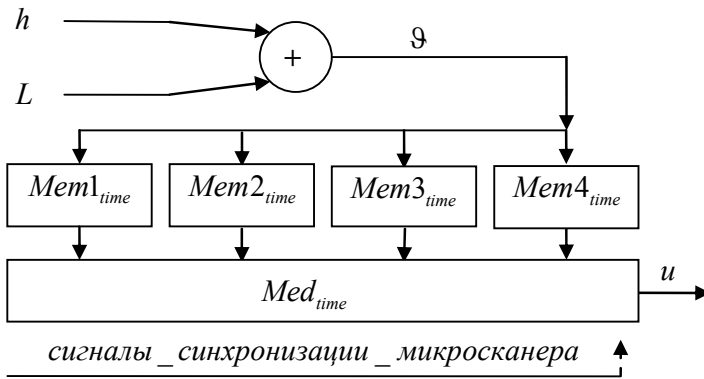


Рис. 4. Вторая часть структурной схемы фильтра. Фильтрация потока ψ . Способ второй.

Реализация и результаты применения фильтра

Реализация метода коррекции состоит из трех частей, рассмотренных далее.

1. Система визуализации [9], где формируется скорректированный по двухточечной схеме поток U .

2. Специально разработанная плата размером 120×120 мм, содержащая ПЛИС семейства Cyclone III EP3C120F780I7 (фильтр занимает 30 % объема ПЛИС) и микросхемы памяти общим объемом 6 Мбайт. Порядок фильтров и их коэффициенты подбирались экспериментально на основе оценки формируемых потоков.

3. Программный модуль, исполняемый на ПК и реализующий фильтрацию потока ψ согласно схеме рис. 3 в реальном времени (поток ψ передается в ПК посредством интерфейса USB2.0).

Метод коррекции был опробован в тепловизионных каналах на базе фотоприемников: KPT320 \times 256, KPT384 \times 288 и QWIP384 \times 288 с шагом фоточувствительных элементов 30, 25 и 25 мкм соответственно. Частота кадров потока U в каналах составляет 50 Гц. В каналах использовался микросканер на основе смещения оптического компонента с шагом микроперемещения 150 мкм.

Результаты последовательного включения модулей фильтра показаны в таблице, где ω – угловая пространственная частота миры в мрад^{-1} ; η – количество дефектных элементов в %. Параметры фильтра для разных фотоприемников не изменялись. Для оценки разности температур, эквивалентной шуму (РТЭШ), и дефектности изображений, формируемых потоками ε и h , данные потоки суммировались с НЧ-оставляющей L .

Таблица

Результаты последовательного включения модулей фильтра

Поток	Изм. параметр	KPT384 \times 288	QWIP384 \times 288	KPT320 \times 256
U	η ; СКО; РТЭШ, ω	4,3;1,8;0,094;0,491	0,4;1,7;0,098;0,491	3,0;2,1;0,096;0,41
ε	η ; СКО; РТЭШ	1,1;1,8;0,094	0,1;1,7;0,098	0,7;2,0;0,092
h	η ; СКО; РТЭШ	0,5;1,5;0,079	0,1;1,5;0,087	0,4;1,6;0,069
u_n	η ; СКО; РТЭШ; ω	0,0;1,0;0,053;0,491	0,0;1,3;0,075;0,491	0,0;1,2;0,052;0,41
u	η ; СКО; РТЭШ; ω	0,0;1,1;0,058;0,491	0,0;1,3;0,075;0,491	0,0;1,1;0,048;0,41
u , ψ заменен на U	η ; СКО	0,4;1,4	0,0;1,2	0,2;1,3

Влияние фильтра на пространственное разрешение оценивалось с использованием набора мир, соответствующих предельным значениям пространственных частот каналов.

Исследование влияния шага микросканирования на эффективность удаления ОНЧ, РТЭШ и дефектность не проводилось.

Измерения показали: применение фильтра не ухудшает пространственного разрешения каналов, для РТЭШ имеет место улучшение параметра

в связи со снижением уровня временного и геометрического шумов канала.

На рис. 5 приведены изображения, полученные в канале на базе KPT384 \times 288 до и после применения фильтрации. Рисунок позволяет оценить эффективность применения фильтра при наблюдении за статическим объектом, а именно, из изображения на рис. 5, а полностью удалены ОНЧ и дефекты.

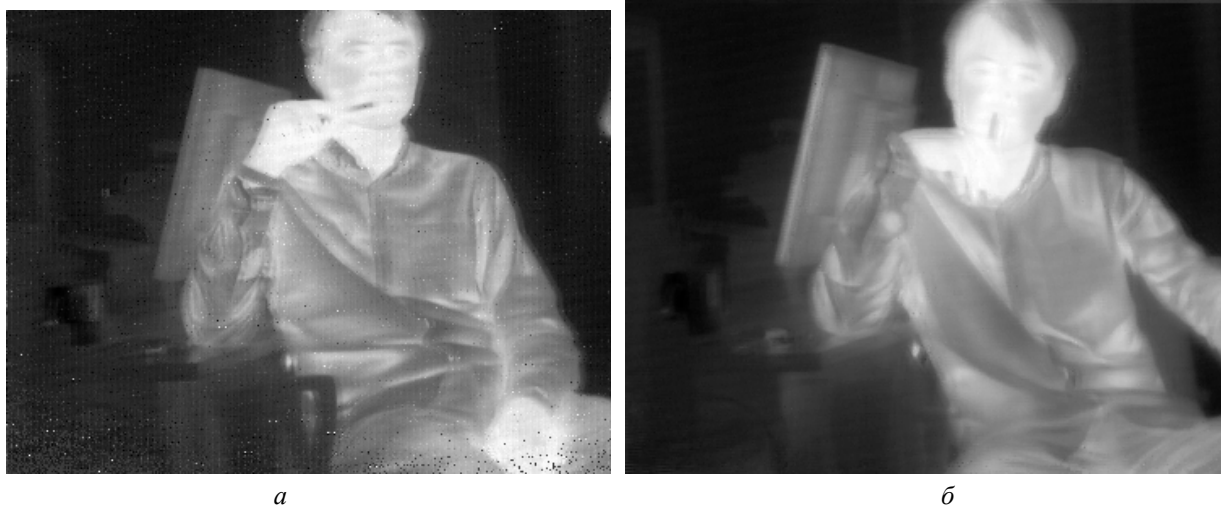


Рис. 5. Результаты фильтрации: а – исходное изображение; б – изображение после фильтрации.

Апробация фильтра при наблюдении за движущимися объектами показала эффективность удаления ОНЧ и дефектов υ и γ : проблемы их компенсации возникают при резкой смене температуры сцены, т. к. фильтру (4) необходимо обновить выборку P .

Использование предложенных схем удаления ψ позволяет обеспечить 100%-бездефектное изображение статических сцен, при этом:

- схема по рис. 3: обнуляет сигнал дефекта – элемент сцены утрачивается, обновляет поток u с частотой 12,5 Гц, требует настройки порога компаратора под уровень СКО шума фона, иначе пропускает дефекты;

- схема по рис. 4: замещает сигнал дефекта сигналом медианы микроскано – элемент сцены восстанавливается; обеспечивает частоту кадров потока u равной 50 Гц, однако реальная частота формирования потока u составляет также 12,5 Гц (пиксели текущего кадра формируются на основе четырех предыдущих – их количество зависит от размера медианы).

Обеим схемам присущ общий недостаток, обусловленный большим временем принятия решения компаратора или медианы. При этом на движущихся объектах дефектность проявляется, в виде следа из-за смещения объекта при движении и воспринимаемого алгоритмом как дефектность пикселей. Исправление недостатка предполагается повышением частоты потока U до 200 Гц (и более), что позволит обеспечить частоту потока u_{in} 50 Гц для схемы рисунка 3. При этом для потока u рисунка 4 следует использовать накопление по четырем кадрам, получая в итоге 50 Гц на выходе накопителя при увеличении показателя сигнал/шум.

Заключение

По результатам работы получен эффективный метод фильтрации остаточного геометрического шума и дефектов для тепловизоров на базе матричных фотоприемников. Эффективность метода обусловлена тем, что:

- метод не использует таблиц дефектности фотоприемника и осуществляет фильтрацию дефектов и остаточной неоднородности по сигналам сцены в реальном времени;

- метод не требует подстройки параметров фильтра к текущей сцене и нечувствителен к распределению интенсивности сигнала по сцене;

- метод восстанавливает сигналы дрейфующих фотоэлементов, тем самым снижая общую дефектность приемника – сигналы пикселей становятся адекватными сцене;

- метод не ухудшает пространственное разрешение и величину РТЭШ приборов.

Применение метода в тепловизионных каналах на базе КРТ320×256, КРТ384×288 и QWIP384×288 позволило полностью удалить остаточную неоднородность и дефекты из изображения.

Метод фильтрации потока ψ по рис. 4 представляется более перспективным для использования в ТВП (подбор порогов не требуется, сигналы дефектов ψ восстанавливаются, возможность суммирования задает перспективу улучшения РТЭШ), однако он требует разработки специальной методики юстировки связки микросканер–фотоприемник, что может в дальнейшем являться одним из направлений развития метода.

В данной работе не затрагивались вопросы влияния шага микроперемещения, параметров и структуры фильтров на эффективность подавле-

ния ОНЧ и дефектов фотоприемника, что также требует их отдельного изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И. // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 6.
2. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 80.
3. Кремис И. И., Толмачев Д. А. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 109.
4. Кремис И. И. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 91.
5. Кремис И. И. // Научно-технические технологии. 2010. № 2. Т. 11. С. 59.
6. Балиев Д. Л., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 57.

7. Лебедев Д. Г., Лыонг К. Т. // Информационные процессы. 2007. № 2. Т. 7. С. 124.

8. Пат. № 2412554. Российская Федерация, МПК H04N5/335. Способ компенсации дефектных фоточувствительных элементов многоэлементного фотоприемника. Кремис И. И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН – № 2010102391/09; заявл. 25.01.2010; опубл. 20.02.2011.

9. Пат. № 98311. Российская Федерация, МПК H04N5/33. Электронная система визуализации инфракрасного изображения для матричных тепловизоров. Кремис И. И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН – №2010116724/09; заявл. 27.04.2010; опубл. 10.10.2010.

10. Кремис И. И. // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 108.

11. Глушков В. М., Амосов Н. М., Артеменко И. А. Энциклопедия кибернетики. Том 1. – Киев, 1974.

PACS: 85.60.-q

Filtration of the residual inhomogeneity and image defects in thermal imager using microscanning

I. I. Kremis and D. A. Tolmachev

Technological Design Institute of Applied Microelectronics – Novosibirsk Branch
of the Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS
8 Nikolaeva str., Novosibirsk, 630090, Russia
Email: ktipm@oesd.ru

Received January 26, 2017

Consideration is given to a method of filtering the residual inhomogeneity and defects in the image matrix imagers based on the frequency decomposition with using of microscanning. The method does not degrade the spatial resolution and the thermal RTAS. The results of applying the method in different types of thermal imaging photodetectors of ISP SB RAS production are presented.

Keywords: residual inhomogeneity, filtration, point-to-point correction, microscanning, thermal imaging.

REFERENCES

1. S. M. Borzov, V. I. Kozik, and O. I. Potaturkin, *Izvest. Vuzov, Priborostr.*, **52** (6), (2009).
2. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and V. G. Fetyukhina, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 80 (2011).
3. I. I. Kremis and D. A. Tolmachev, *Prikl. Fiz.* No. 6, 109 (2016).
4. I. I. Kremis, *Prikl. Fiz.* No. 4, 91 (2010).
5. I. I. Kremis, *Naukoemkii Tekhnologii* **11** (2), 59 (2010).
6. D. L. Baliev and K. O. Boltar, *Prikl. Fiz.* No. 3, 57 (2015).
7. D. L. Lebedev and K. T. Lyong, *Inform. Protses.* **7**, 124 (2007).
8. RF Patent No. 2412554. February 20, 2011.
9. RF Patent No. 98311. October 10, 2010.
10. I. I. Kremis, *Prikl. Fiz.* No. 1, 108 (2010).
11. V. M. Glushkov, N. M. Amosov, and I. A. Artemenko, *Encyclopaedia of Cybernetics*. Vol. 1. (Kiev, 1974) [in Russian].