

УДК 621.384.3

Коррекция остаточной неоднородности изображения в тепловизорах второго поколения на основе частотного разложения

И. И. Кремис, Д. А. Толмачев

В работе изложен метод фильтрации остаточной неоднородности изображения в сканирующих тепловизорах на основе частотного разложения, что позволяет получить его главное свойство — нечувствительность к разнообразию сцен наблюдения. Метод не ухудшает параметра МРРТ тепловизоров, отличается простотой реализации и позволяет осуществлять коррекцию изображения в реальном времени.

PACS: 85.60.-q

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

Введение

Наиболее распространенным методом коррекции неоднородности чувствительности фотоприемных устройств (ФПУ) является метод, при котором для выполнения процедуры калибровки приемника применяется два опорных источника. Опорные источники используются для расчёта коэффициентов и компенсации фоновой составляющей (двухточечная коррекция). Недостаток двухточечной коррекции — проявление остаточной неоднородности чувствительности (ОНЧ) фотоприемника в виде «вуали» (для матричных ФПУ) или «полос» (для линейчатых ФПУ) на изображении. Для минимизации ОНЧ необходимо согласовать значения температур опорных источников со сценой наблюдения и обеспечить адекватность рассчитанных коэффициентов кривой чувствительности ФПУ [1, 2].

Однако это не всегда удается при невозможности использования регулируемых и однородных по полю эталонных источников температуры в приборах. Кроме того, имеет место дрейф сигналов фотодиодов КРТ [3, 5, 6, 12, 14, 16], в результате чего может измениться кривая чувствительности и в процесс коррекции вносится ошибка.

Указанные причины зачастую не позволяют выполнить успешную коррекцию, и в большинстве случаев с остаточной неоднородностью на изображении приходится считаться [10].

Источники [1—3, 9, 10, 13, 14] указывают на следующую тенденцию развития методов коррекции неоднородности чувствительности субматричных фотоприемников на основе КРТ.

– Методы, использующие модели чувствительности фотоэлементов, максимально приближенные к реальным, — здесь может использоваться аппроксимация кривой чувствительности кусочно-линейной функцией или полиномом n -й степени с дальнейшим вычислением соответствующих коэффициентов [1, 3, 13, 14]. Указанные методы требуют принципиальных изменений архитектуры разработанных в рамках двухточечной модели коррекции опико-электронных трактов тепловизионных приборов [4, 7].

– Адаптивные или статистические методы — основаны на накоплении статистики изображения с дальнейшим вычислением требуемых коэффициентов [8—11]. Недостаток методов — сцена наблюдения должна быть построена специальным образом. Варианты построения сцен можно предусмотреть, однако это не исключает возможности ухудшения качества изображения при наблюдении быстро меняющихся сцен.

Целью настоящей работы является изложение метода фильтрации остаточной неоднородности чувствительности при реализации процедуры двухточечной коррекции в тепловизорах на базе сканирующих линеек и удовлетворяющего следующим требованиям:

Кремис Игорь Иванович, заведующий отделом.
Толмачев Данил Алексеевич, старший инженер-электроник.
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ».
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика
Лаврентьева, 2/1.
E-mail: ktipm@oesd.ru

Статья поступила в редакцию 12 августа 2016 г.

© Кремис И. И., Толмачев Д. А., 2016

- нечувствительность к разнообразию сцен наблюдения;
- отсутствие ухудшения параметра «минимально разрешаемой разности температур» (MRPT) тепловизора при применении метода;
- простота и возможность реализации метода в рамках существующей оптико-электронной системы обработки сигналов [4, 7], используемой при производстве тепловизоров;
- осуществление процесса фильтрации непрерывно и в реальном времени.

Изложение метода фильтрации

Для моделирования в ходе экспериментов, реализации и испытаний алгоритма использовались тепловизионные приборы (ТВП), выполненные на базе охлаждаемых ФПУ диапазона 8—12 мкм и форматом 4×288, которые имеют свою марку и соответствующих производителей, а именно: ФПУ ФЭМ10М производства АО «НПО «Орион» (Россия) и ФПУ PLUTON LW LS5 производства Sofradir (Франция). В тепловизорах применены одинаковые или близкие по своим характеристикам системы электронной обработки сигналов [4, 7], сканирующие устройства и оптические сис-

темы. Обработка тепловизионного изображения осуществляется посредством выполнения операций, реализующих алгоритм двухточечной коррекции [1, 3, 14]:

$$U_{i,j} = (I_{i,j} - F_{i,j})K_{i,j}, \quad (1)$$

где $U_{i,j}$ — сигнал элемента i , строки j после коррекции,

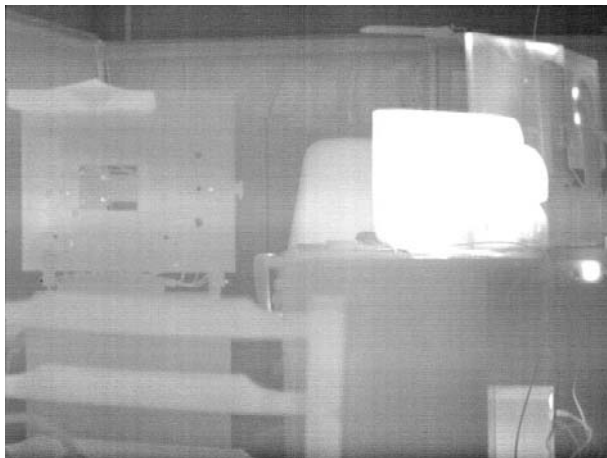
$I_{i,j}$ — сигнал сцены с фотоприемника;

$K_{i,j}$ — коэффициенты коррекции неоднородности по чувствительности фотоэлемента, рассчитываются однократно при калибровке прибора;

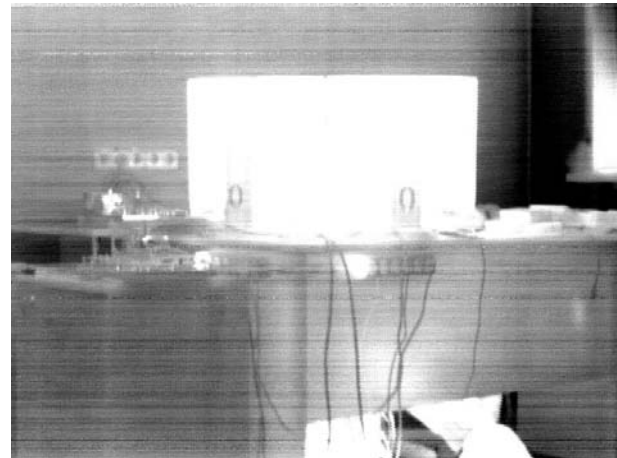
$F_{i,j}$ — сигнал коррекции неоднородности по смещению.

Для получения сигнала $F_{i,j}$ используется опорный источник излучения в виде поверхности с равномерным распределением температуры [7].

При использовании ТВП в режиме двухточечной коррекции в процессе наблюдения за объектами на изображении видны «полосы» (см. рис. 1). Для приемника ФПУ ФЭМ10М помеха остаточной неоднородности выражена в большей степени, чем для ФПУ фирмы Sofradir.



а



б

Рис. 1. Двухточечная коррекция сигналов с ФПУ 4×288: а — фотоприемник PLUTON LW LS5; б — фотоприемник ФЭМ10М.

Изображения на рис. 1 получены при регулировке системы обработки изображения [7], соответствующих максимальному контрасту, что позволяет оценивать возможность применения метода и величину ОНЧ при наличии ярких объектов в сцене.

Предлагаемый нами метод основан на понимании того, что остаточная неоднородность является аддитивной помехой или иначе — ошибкой выравнивания $\delta_{i,j}$, которую необходимо компен-

сировать для получения качественного изображения:

$$U_{i,j} = u_{i,j} + \delta_{i,j}. \quad (2)$$

Ослабление действия помех достигается фильтрацией [20]. Под фильтрацией изображений понимают операцию выделения и/или подавления определённых частот, имеющую своим результатом изображение того же размера, полученное по некоторым правилам из исходного изображения.

Существует работа [8], где авторами использовался метод фильтрация полос в частотной области, основанный на использовании преобразования Фурье. Здесь для компенсации полос выполняется преобразование изображения в частотную область, выделение и подавление областей частот, соответствующих помехам, с использованием частотных фильтров, выполнение обратного преобразования скорректированного фурье-образа в пространственную область.

Результаты, изложенные в статье [8], показали эффективность предложенного метода, однако его использование требует регулярности картины шума. При несоответствии необходимых, т.е. требующих расчета весовых и статистических параметров возможно ухудшение картины — изменение яркости, размытие результирующего изображения. Также из работ [17—19] следует, что реализация метода [8] потребует увеличения вычислительной мощности процессора и/или логической емкости, используемых в [4, 7] программируемых матриц.

Исходя из (2) и на основании результатов работ [8] и [15], для компенсации ошибки выравнивания было предложено использовать возможности фильтрации в частотной области. При этом для выполнения коррекции компонент спектра воспользоваться частотным разложением изображения на две полосы с использованием пространственных фильтров:

$$U_{i,j} = L_{i,j} + H_{i,j}, \quad (3)$$

где $L_{i,j}$ — низкочастотная (НЧ) составляющая изображения, содержит значения яркости сцены и формируется согласно формуле дискретной свертки:

$$L_{i,j} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h(m,n) U_{i+m-(M-1)/2, j+n-(N-1)/2}, \quad (4)$$

здесь $h(m, n)$ — матрица, задает двумерный сглаживающий массив и имеет размеры M по горизонтали и N по вертикали,

$H_{i,j}$ — высокочастотная (ВЧ) составляющая изображения, содержит значения формирующие резкость границ объектов, вычисляется по формуле:

$$H_{i,j} = U_{i,j} - L_{i,j}. \quad (5)$$

При этом в ВЧ сигнале изображения присутствует аддитивная составляющая помехи:

$$H_{i,j} = h_{i,j} + \delta_{i,j}, \quad (6)$$

где $h_{i,j}$ — «чистая» ВЧ составляющая сигнала без неравномерности, $\delta_{i,j}$ — ошибка выравнивания, которую необходимо выделить из сигнала $H_{i,j}$ для дальнейшей компенсации.

Структурная схема фильтра, реализующего предложенный метод, показана на рис. 2.

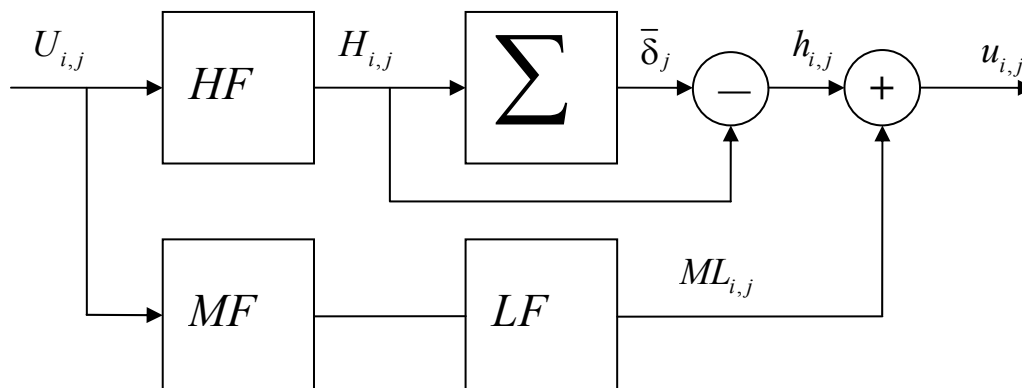


Рис. 2. Структурная схема фильтра остаточной неоднородности.

Использованные на рис. 2 обозначения соответствуют следующим величинам: $U_{i,j}$ — скорректированный методом двухточечной коррекции массив изображения, $H_{i,j}$ — массив сигналов после ВЧ-фильтрации пространственным фильтром маской 3×3 элемента, $\bar{\delta}_j$ — ошибка неоднородности, накопленная для каждой строки изображения,

$u_{i,j}$ — скорректированный по остаточной неоднородности массив изображения, $ML_{i,j}$ — массив сигналов после медианной и НЧ-фильтрации пространственными фильтрами маской 3×3 элемента.

Соответствующая приведенной структурной схеме формула для расчета выходного, т.е. скорректированного изображения имеет вид:

$$u_{i,j} = ML_{i,j} + \left(H_{i,j} - \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N H_{i,j} \right). \quad (7)$$

Компенсация ошибки неоднородности происходит следующим образом. Входное изображение $U_{i,j}$ раскладывается на две составляющие — ВЧ и НЧ (см. рис. 3).

Помеха неоднородности (рис. 1 и рис. 3) проявляется в виде квазипериодических изменений интенсивности пикселей только вдоль одной оси координат. Отсюда следует идея выделения помехи из изображения посредством накопления с усреднением, а именно, полученный массив высокочастотной составляющей поступает на сумматор для накопления среднего значения по строке. Тем самым вычисляются средние уровни «полос» $\bar{\delta}_j$, на которые необходимо сместить значения пиксе-

лей соответствующей строки (см. далее рис. 4, а). Здесь величина ошибки $\delta_{i,j}$ рассчитывается аналогично [11] с той разницей, что вычисление среднего значения по строке осуществляется в ВЧ-области, тем самым исключая влияние распределения яркостей изображения на статистические параметры строк результирующего изображения:

$$\bar{\delta}_j = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N H_{i,j}, \quad (8)$$

где $N+1$ — количество элементов в строке изображения.

Далее получаем ВЧ-массив $h_{i,j}$ — разность ВЧ-составляющей изображения и ошибки выравнивания, скорректированный по неоднородности и без характерных «полос» помехи (см. рис. 4, б).

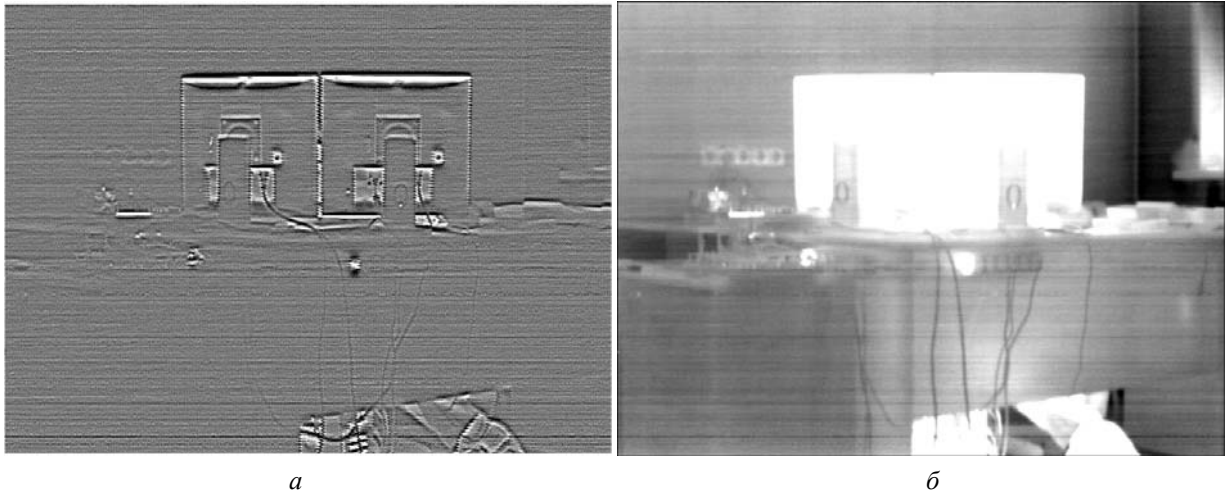


Рис. 3. Разделение изображения на две составляющие: а — ВЧ-составляющая изображения; б — НЧ-составляющая изображения.

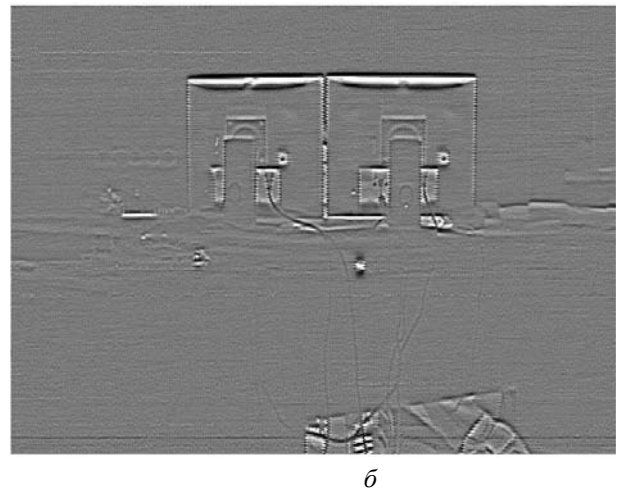
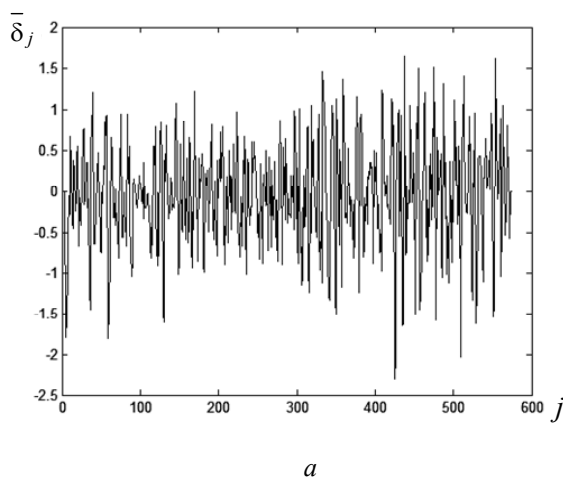


Рис. 4. Процесс коррекции: а — ошибка выравнивания строк изображения; б — разность ВЧ составляющей изображения и ошибки выравнивания.

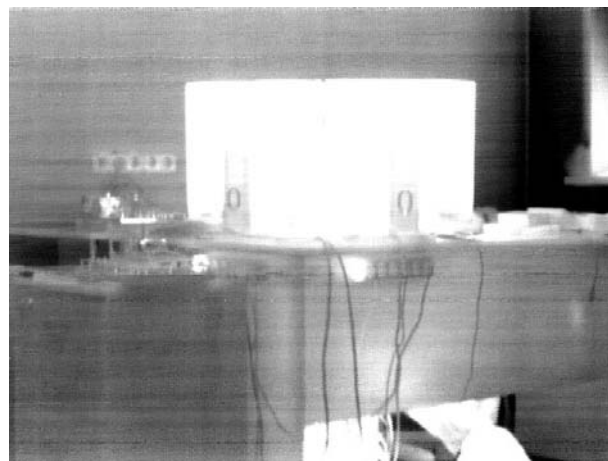
После НЧ-фильтрации изображения $U_{i,j}$ результирующее изображение $L_{i,j}$ содержит некоторую величину помехи. Наличие помехи в НЧ-сигнале говорит о несоответствии маски ВЧ-фильтра ее размерам. Величина помехи в данном случае зависит от степени неоднородности чувствительности ФПУ. Как показал эксперимент, в этом случае для ее подавления следует использовать маску фильтра, соответствующую периоду неоднородности приемника — ее можно оценить по столбцу изображения. И чем больше неоднородность приемника, тем больше маска. Однако увеличение размеров маски оказывает влияние на баланс частотных составляющих сигнала при формировании скорректированного изображения, что ухудшает чувствительность метода к сцене.

При высокой неоднородности ФПУ предложено, не увеличивая размеров маски ФНЧ, использовать дополнительный медианный фильтр, что позволит более эффективно фильтровать помеху [15] и не нарушать распределения яркости по изображению. Результат последовательного применения двух фильтров, т.е. медианного, а затем низкочастотного позволяет получить низкочастотную составляющую $ML_{i,j}$ исходного изображения уже без помехи, что демонстрирует рис. 5, а.

В результате, при сложении сигналов $h_{i,j}$ и $ML_{i,j}$, из которых с использованием пространственной фильтрации сигналов удалены «полосы», получаем скорректированное по остаточной неоднородности изображение $u_{i,j}$, представленное на рис. 5, б.



а



б

Рис. 5. Дополнительная фильтрация изображения: а — изображение после применения медианной и НЧ-фильтрации; б — результат коррекции остаточной неоднородности изображения с ФПУ ФЭМ10М.

Аппаратная реализация метода

Разработанный метод коррекции неоднородности реализован в тепловизорах (описанных выше) в виде фильтра, программно встроенного в ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) модуля ЦОС (цифровой обработки сигнала) [7] и входящего в систему визуализации [4]. В модуле используется ПЛИС семейства Cyclone III EP3C120F780I7 фирмы Altera. Для создания сумматора строк потребовалось 600 логических ячеек Logic Cells, 27000 для низкочастотной и медианной фильтрации и 13500 ячеек для высокочастотной фильтрации, что в сумме составляет 34 % от общего объема логики ПЛИС. Объем используемой внутренней памяти ПЛИС составляет 8 % от общего объема.

Обработка осуществляется в реальном времени, т.е. применяется к каждому полю ТВ-изображения, где частота смены полей — 50 Гц. В про-

цессе функционирования фильтр не требует подстройки параметров к текущей сцене и нечувствителен к распределению интенсивности сигнала по полю изображения. Реализация метода не потребовала каких-либо конструктивных изменений в платах системы цифровой обработки сигналов приборов. Программный код фильтра для ПЛИС идентичен при использовании с разными (приведенными выше) фотоприемниками. Для данных ТВП значение МРРТ на частоте $0,44 \text{ мрад}^{-1}$ составило 0,36 К. Измерения показали, что применение алгоритма коррекции остаточной неоднородности не ухудшает величину МРРТ приборов.

Заключение

По результатам проведенной работы получен простой и эффективный метод коррекции, позволяющий устранить остаточный геометрический

шум тепловизионного изображения для тепловизоров на базе линейчатых ФПУ. Простота реализации метода обусловлена использованием пространственных фильтров и простых вычислительных операций, эффективность — отсутствием потерь в показателе МРРТ и устранение остаточного шума неоднородности в изображении ТВП при любых распределениях интенсивностей объектов сцены.

Применение метода в ТВП на базе ФПУ PLUTON LW LS5 позволяет практически полностью удалить «полосатую» структуру из изображения. Для ТВП на базе ФПУ ФЭМ10М наблюдается полная или частичная компенсация «полосатой структуры», качество изображения визуально сравнимо с изображением прибора на линейке PLUTON LW LS5 в режиме двухточечный коррекции, без фильтрации ОНЧ.

Дальнейшее развитие работы может быть направлено на постановку задачи синтеза оптимального фильтра [20, 21], что особенно актуально при применении метода в тепловизорах на базе отечественных фотоприемников с достаточно высокой неоднородностью фоточувствительности [5].

Под оптимальностью фильтра здесь понимается синтез комбинации фильтров для получения качественной, т.е. без «полос», низкочастотной составляющей изображения или других способов ее формирования при выполнении критерия оптимизации, а именно, максимума отношения сигнал/шум. Это позволит выработать в общем виде метод фильтрации остаточной неоднородности изображений для ТВП, использующих перспективные линейчатые фотоприемники.

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. Борзов С. М., Козик В. И., Феоктистов А. С. // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 12.
4. Патент № 98311. Российская Федерация. Заявл. 27.04.2010. Оpubл. 10.10.2010.
5. Кремис И. И. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 91.
6. Кремис И. И. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2010. Т. 11. № 2. С. 59.
7. Патент № 2423016. Российская Федерация. Заявл. 22.12.2009. Оpubл. 27.06.2011.
8. Гусев В. Ю., Крапивенко А. В. // Труды МАИ. Выпуск № 50.
9. Лебедев Д. Г., Лыонг К. Т. // Информационные процессы. 2007. Т. 7. № 3. С. 369.
10. Лебедев Д. Г., Лыонг К. Т. // Информационные процессы. 2007. Т. 7. № 2. С. 124.
11. Патент РФ № 2113065. Оpubл. 10.06.98.
12. Балиев Д. Л., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 57.
13. Соляков В. Н., Жегалов С. И., Морозова В. Г. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 81.
14. Брондз Д. С., Харитонова Е. Н. // Журнал радиоэлектроники. 2008. № 11.
15. Кремис И. И. // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 108.
16. Бехтин Ю. С., Медведев А. С. / Тез. Докл. МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». — Рязань: РГРТА. 2002.
17. Николаев А. Н. // Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. Выпуск 17.
18. Мистюков В., Володин П., Каутанов В. // Компоненты и технологии. 2000. № 4.
19. Мушкаев С. В. // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 2(5).
20. Лихошерстный А. Ю. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2009. Т. 11. № 9-1. С. 64.
21. Жиликов Е. Г. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия История. Политология. Экономика. Информатика. 2013. № 22. С. 165.

Filtration of the residual inhomogeneity in the image of the second generation imagers based on frequency decomposition

I. I. Kremis and D. A. Tolmachev

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics
of the Siberian Branch of The Russian Academy of Sciences
«Technological Design Institute of Applied Microelectronics»
(NB ISP SB RAS TDIAM)
8 Nikolaeva str., Novosibirsk, 630090, Russia
Email: ktipm@oesd.ru

Received August 12, 2016

The method of image residual heterogeneity filtration in scanning thermal imagers based on frequency decomposition was presented in this paper. Its main feature is insensitivity towards the diversity of ob-

served scenes. The method does not deteriorate MRTD index of thermographic cameras. It is simple to implement and it allows to correct an image in real time.

PACS: 85.60.-q

Keywords: model, residual heterogeneity, filtration, two-point correction.

REFERENCES

1. S. M. Borzov, V. I. Kozik, and O. I. Potaturjin, *Izvest. Vuzov, Priborostr.* **52** (6), (2009).
2. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and V. G. Fetyukhina, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 80 (2011).
3. S. M. Borzov, V. I. Kozik, and A. S. Feoktistov, *Izvest. Vuzov, Priborostr.* **56** (12), (2013).
4. RF Patent No. 98311. April 27, 2010.
5. I. I. Kremis, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 91 (2010).
6. I. I. Kremis, *Naukoemkii Tekhnologii* **11** (2), 59 (2010).
7. RF Patent No. 2423016. December 22, 2009.
8. V. Yu. Gusev and A. V. Krapivenko, *Trudy MAI*, No. 50.
9. D. G. Lebedev and K. T. Lyong, *Inform. Protses.* **7**, 369 (2007).
10. D. G. Lebedev and K. T. Lyong, *Inform. Protses.* **7**, 124 (2007).
11. RF Patent No. 2113065. June 10, 1998.
12. D. L. Baliev and K. O. Boltar, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 57 (2015).
13. V. N. Solyakov, S. I. Zhegalov, and V. G. Morozova, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 81 (2010).
14. D. S. Brondz and E. N. Kharitonova, *Zhurn. Radioelektr.*, No. 11, (2008).
15. I. I. Kremis, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 108 (2010).
16. Yu. S. Bekhtin and A. S. Medvedev, in *Proc. Conf. Probl. Communic. Work. Inform.* (RFRTA, Ryazan', 2002).
17. A. N. Nikolaev, *Komp. Tekhnol., Upravl., Radioelektr.*, No. 17.
18. V. Mistyukov, P. Volodin, and V. Kantanov, *Kompon., Tekhnolog.*, No. 4, (2000).
19. S. V. Mushkaev, *Obrazov. Resursy Tekhnolog.*, No. 2(5), (2014).
20. A. Yu. Likhosherstnyi, *Nauch. Vedom. Belgor. Uniiver. Ser. Informatika* **11** (9-1), 64 (2009).
21. E. G. Zhikyakov, *Nauch. Vedom. Belgor. Uniiver. Ser. Informatika*, No.22, 165 (2013).