

ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

УДК 004.932.4

ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ МЕЖКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЕННЫХ АППЛИКАТИВНЫМИ ПОМЕХАМИ

© 2014 г. Е. А. Самойлин, доктор техн. наук; В. В. Шипко, адъюнкт

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, Воронеж

E-mail: shipko.v@bk.ru, es977@mail.ru

Представлены итерационные алгоритмы межканальной градиентной реконструкции сигналов многокомпонентных цифровых изображений, искаженных аппликативными помехами. Полученные результаты численных исследований свидетельствуют о более высокой точности восстановления искаженных элементов многокомпонентных изображений при использовании предложенных алгоритмов по сравнению с известными.

Ключевые слова: многокомпонентные изображения, аппликативные помехи, межканальная градиентная реконструкция, медианная фильтрация.

Коды OCIS: 100.2000

Поступила в редакцию 24.12.2013

Введение

В ходе эволюции средств дистанционного зондирования Земли прослеживается тенденция улучшения спектрального разрешения и расширения диапазонов длин волн, в которых проводится съемка. Переход от панхроматической съемки к мультиспектральной, при которой изображения регистрируются в нескольких спектральных диапазонах видимого, ближнего инфракрасного и инфракрасного излучений, открывает новые возможности анализа характеристик объектов. Также в последние годы активно ведутся разработки гиперспектральной аппаратуры, позволяющей проводить съемку одновременно в сотнях спектральных диапазонов. В этом случае каждая точка земной поверхности (пиксела изображения) сопровождается спектральной характеристикой, которая определяет физико-химические свойства наблюдаемых объектов [1]. При этом требуется создание принципиально новых алгоритмов обработки видеoinформации для решения задач выделения и классификации объектов снимка.

Как известно, цифровая обработка изображений позволяет избавиться от многих характерных помех, которые мешают системам технического зрения выполнять функции распознавания, классификации и анализа, а также улучшить их визуальное восприятие.

Одним из распространенных классов помех являются аппликативные помехи (АП), действие которых проявляется в затенении (затемнении) отдельных участков полезного изображения фрагментами со случайной амплитудой, текстурой и формой. Аппликативные помехи связаны с появлением различного рода неоднородностей, локальных областей аномальных значений, областей закрытия и пораженных участков [2]. В частности, АП могут появляться при сбоях или выходе из строя светочувствительных элементов приемников оптического излучения [3, 4].

Как показано в работе [5], возникающая избыточность при переходе к многокомпонентным (мультиспектральным, гиперспектральным) изображениям открывает новые возможности по восстановлению потерянных

вследствие воздействия помех полезных сигналов изображений. В частности, так как помехи на многокомпонентном изображении, как правило, являются некоррелированными между каналами, то в случае искажения яркости элемента (пиксела) изображения в одном из каналов возможно компенсировать его по амплитуде сигналов соответствующих элементов других каналов.

Между тем дальнейшее повышение точности реконструкции сигналов цифровых изображений может быть достигнуто использованием межканальных градиентных оценок по соседним каналам [6] с применением итеративных процедур межканальной обработки.

Цель работы – повышение точности межканальной реконструкции искаженных АП многокомпонентных цифровых изображений на основе определения межканальных градиентных оценок, а также итеративного применения процедур обработки.

Постановка задачи

Используемая модель исходного оцифрованного по строкам i и столбцам j , l -компонентного изображения Λ в общем случае имеет вид

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda^1 \\ \Lambda^2 \\ \vdots \\ \Lambda^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{i,j}^1 \in [0, \dots, 2^N - 1] \\ \lambda_{i,j}^2 \in [0, \dots, 2^N - 1] \\ \vdots \\ \lambda_{i,j}^l \in [0, \dots, 2^N - 1] \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$, где m , n – количество строк и столбцов изображения соответственно, N – степень квантования яркости изображения Λ .

Частным случаем АП являются импульсные помехи [5]. Модель l -компонентного изображения, искаженного воздействием импульсных АП, описывается выражением

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{i,j}^1 & x_{i,j}^2 & \dots & x_{i,j}^l \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

где каждый канал $x_{i,j}^1, \dots, x_{i,j}^l$ выражения (2) содержит АП

$$x_{i,j}^{1, \dots, l} = \begin{cases} \lambda_{i,j}^{1, \dots, l} & \text{с вероятностью } p(\lambda) \\ h_{i,j}^{1, \dots, l} & \text{с вероятностью } p(h) = 1 - p(\lambda) \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь $p(\lambda)$ – вероятность появления полезного сигнала $\lambda_{i,j}^{1, \dots, l}$ в ячейке с координатой (i, j) , $p(h)$ – вероятность появления помехи $h_{i,j}^{1, \dots, l}$

в ячейке с координатой (i, j) , которая не зависит ни от наличия помех в других координатах, ни от исходного сигнала, ни от наличия помех в соседних каналах; $h_{i,j}^{1, \dots, l}$ – независимые случайные значения искаженных элементов в спектральных каналах изображения с неизвестным законом распределения, соответствующие интервалу квантования (1)

$$h_{i,j}^{1, \dots, l} = \text{rnd}[0, \dots, 2^N - 1]. \quad (4)$$

Требуется разработать алгоритм реконструкции зашумленного изображения \mathbf{X} , позволяющий сформировать оценку $\hat{\Lambda}$, наиболее близкую к ее истинным значениям

$$\|\hat{\Lambda} - \Lambda\| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\|\dots\|$ – векторная норма.

Как известно, цветные RGB-компонентные изображения являются частным случаем мультиспектральных изображений, поэтому рассмотрим разработанные алгоритмы межканальной градиентной реконструкции (МГР) [6] в комбинации с медианной фильтрацией (МФ) [7] и итеративным их применением для случая трехкомпонентного цифрового изображения с компонентами R (красный), G (зеленый) и B (синий), которое в соответствии с выражением (2) будет иметь вид

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{i,j}^R & x_{i,j}^G & x_{i,j}^B \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Введем понятие градиентов $g_{i\pm p, j\pm q}^R$, $g_{i\pm p, j\pm q}^G$, $g_{i\pm p, j\pm q}^B$ цветовых каналов R, G и B, описывающихся, соответственно, выражениями [6]

$$\begin{aligned} g_{i\pm p, j\pm q}^R &= \lambda_{i,j}^R - \lambda_{i\pm p, j\pm q}^R, \\ g_{i\pm p, j\pm q}^G &= \lambda_{i,j}^G - \lambda_{i\pm p, j\pm q}^G, \\ g_{i\pm p, j\pm q}^B &= \lambda_{i,j}^B - \lambda_{i\pm p, j\pm q}^B, \end{aligned} \quad (7)$$

где $p = (0, \dots, P)$, $q = (0, \dots, Q)$ – параметры апертуры по i и j соответственно.

Примем допущение о том, что градиенты соответствующих координат компонент R, G, B приблизительно равны $g_{i\pm p, j\pm q}^R \approx g_{i\pm p, j\pm q}^G \approx g_{i\pm p, j\pm q}^B$.

Для упрощения дальнейшего изложения введем следующие обозначения. Пусть a – оцениваемая компонента, $a = (R \vee G \vee B)$, b , c – компоненты, по которым осуществляется оценка, $b = (R \vee G \vee B)$, $c = (R \vee G \vee B)$, при этом $b \neq a$, $c \neq a$, b , символ \vee обозначает логическую операцию “ИЛИ”.

Алгоритмы межканальной градиентной реконструкции искаженных сигналов

1. Алгоритм поэтапного комбинирования МГР и МФ

Шаг 1. Оценивается пространственное положение АП в каждом канале. Для обнаружения АП могут быть использованы самые разнообразные методы и алгоритмы [8, 9]. Эти обнаружители формируют бинарные матрицы оценок положения искаженных сигналов каждой компоненты. Так оценка $\hat{h}_{i,j}^{a,b,c} = 1$ означает наличие АП в координате i, j компонент R, G и B, а $\hat{h}_{i,j}^{a,b,c} = 0$ – отсутствие помехи, т.е. формируется вектор

$$\hat{\mathbf{H}}\mathbf{1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}\mathbf{1}^R \\ \hat{\mathbf{H}}\mathbf{1}^G \\ \hat{\mathbf{H}}\mathbf{1}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{i,j}^R = [0 \vee 1] \\ \hat{h}_{i,j}^G = [0 \vee 1] \\ \hat{h}_{i,j}^B = [0 \vee 1] \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Шаг 2. По значениям незашумленных элементов в апертуре изображения $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^a = 0 \wedge \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^b = 0$ формируются $z^{a(b)} = (2P + 1)(2Q + 1) - 1 - \varepsilon^{a(b)}$ градиентов (где $\varepsilon^{a(b)}$ – число, соответствующее помеховым совпадениям $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^a = 1 \vee \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^b = 1$) и по значениям незашумленных элементов $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^a = 0 \wedge \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^c = 0$ формируются $z^{a(c)} = (2P + 1)(2Q + 1) - 1 - \varepsilon^{a(c)}$ градиентов (где $\varepsilon^{a(c)}$ – число, соответствующее помеховым совпадениям $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^c = 1 \vee \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^a = 1$) за исключением центрального элемента.

При этом межканальные градиентные оценки сбойного элемента одной компоненты по двум соседним можно определить из следующих выражений:

$$\begin{aligned} (\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)})_{t^{a(b)}} &= x_{i\pm p, j\pm q}^a + g_{i\pm p, j\pm q}^b, \\ (\hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)})_{t^{a(c)}} &= x_{i\pm p, j\pm q}^a + g_{i\pm p, j\pm q}^c, \quad p, q \neq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $t^{a(b)}, t^{a(c)}$ – индексы оценок из общего количества оценок по компонентам, $t^{a(b)} = 1, \dots, z^{a(b)}$, $t^{a(c)} = 1, \dots, z^{a(c)}$. В выражении (9) переменные p и q одновременно не равны нулю.

Общая межканальная оценка сбойной компоненты по двум соседним примет следующий вид:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^a = \begin{cases} x_{i,j}^a & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^a = 0) \vee (\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 1) \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 1) \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 0) \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{a(b,c)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 0) \end{cases}. \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь} \quad \hat{\lambda}_{i,j}^{a(b,c)} &= \text{med} \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)} \right)_t^{a(b)}, \left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)} \right)_t^{a(c)} \right], \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)} &= \text{med} \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)} \right)_t^{a(b)} \right], \quad \hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)} = \text{med} \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)} \right)_t^{a(c)} \right], \end{aligned}$$

$\text{med}[\dots]$ – оператор вычисления медианы.

Шаг 3. Аналогично шагу 1 формируются бинарные матрицы $\hat{h}_{i,j}^{a,b,c}$ обнаруженных АП в каждом цветовом канале. В основном это помехи, совпадающие по своему пространственному положению на изображении во всех цветовых каналах (выполнение условия $\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 1$). В случае наличия коррелированных между каналами АП могут успешно применяться процедуры ранговой обработки [7, 9, 10].

Шаг 4. Осуществляется восстановление изображения в локализованных на предыдущем шаге участках с наличием помех. Для восстановления выбраны ранговые процедуры на основе порядковых статистик, в частности МФ по всем элементам апертуры, а также МФ по выборке неискаженных элементов апертуры фильтра [7] (исключены значения помех, определяемые по $\hat{h}_{i,j}^{a,b,c}$)

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_{i,j}^{a,b,c} &= \\ &= \begin{cases} \left[\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q \hat{\lambda}_{i\pm p, j\pm q}^{a,b,c} w_{i\pm p, j\pm q}^{a,b,c} \right]_{\substack{w_{i=i^*, j=j^*}=1 \\ w_{i \neq i^*, j \neq j^*}=0}}, & \text{при } \hat{h}_{i,j}^{a,b,c} = 1, \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{a,b,c} & \text{при } \hat{h}_{i,j}^{a,b,c} = 0 \end{cases}, \quad (11) \end{aligned}$$

где $w_{i\pm p, j\pm q}^{a,b,c}$ – весовые коэффициенты фильтра, i^*, j^* – индексы, соответствующие координатам медианного элемента в апертуре.

Шаг 5. После восстановления изображение k -ой итерации оценивается по евклидовой метрике с изображением на $(k-1)$ -ой итерации

$$E_k = \left[\sum_{l=1}^3 (\hat{\Lambda}_k^l - \hat{\Lambda}_{k-1}^l)^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{l=1}^3 (\hat{\Lambda}_k^l)^2 \right]^{-1/2}, \quad (12)$$

где $\hat{\Lambda}_k^l$ – изображение l -канала на k -ой итерации, $\hat{\Lambda}_{k-1}^l$ – изображение l канала на $(k-1)$ -ой итерации.

Если выполняется условие $E > \Delta$, то принимается решение о повторении процедур обнаружения и восстановления (шаги 1–5), где Δ – порог остановки. В случае выполнения условия $E < \Delta$ цикл останавливается.

2. Алгоритм совместного комбинирования МГР и МФ

Шаги 1 и 2 аналогичны алгоритму 1 за исключением того, что на шаге 2 при коррелированной помехе во всех каналах (выполнение условия $\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 1$) осуществляется МФ согласно системе (11).

Шаг 3 аналогичен шагу 5 алгоритма 1.

Результаты численных исследований

Для проведения численных исследований перед обработкой изображение целенаправленно подвергалось воздействию нижнемодальных импульсных АП в диапазоне вероятности их появления $p(h) = 0, \dots, 0,9$. В качестве меры различия изображений Λ и $\hat{\Lambda}$, т.е. ошибки восстановления, выбрано нормированное евклидово расстояние, вычисляемое в каждом цветовом канале [11]

$$E^{R,G,B} = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^{R,G,B} - \lambda_{i,j}^{R,G,B})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j}^{R,G,B})^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Реконструкция сбойных сигналов по градиентам от соседних каналов выполнялась по одной (случайной) оценке из всей выборки межканальных оценок по компонентам. Численные

исследования представлены на примере обработки тестового цветного RGB-компонентного изображения “Лена” с параметрами $m \times n = 320 \times 320$, $N = 8$.

На рис. 1 представлены зависимости критерия (13) в R-канале для приведенных итерационных комбинированных алгоритмов реконструкции на основе межканальной избыточности, а также итерационных пространственно-избирательных ранговых алгоритмов восстановления [7, 9] скользящей апертурой размером 3×3 ($P = 1$, $Q = 1$) при независимой, равнозначной вероятности наличия помех в каждом цветовом канале. На рис. 1, 3 кривая 1 – зашумленное изображение, 2 – МФ, 3 – МФ по выборке неискаженных элементов в апертуре, 4 – алгоритм 1 в комбинации с МФ, 5 – алгоритм 1 в комбинации с МФ по выборке неискаженных элементов, 6 – алгоритм 2 в комбинации с МФ, 7 – алгоритм 2 в комбинации с МФ по выборке неискаженных элементов. Из рис. 1 видно, что наиболее эффективным является первый алгоритм в поэтапной комбинации с МФ по выборке неискаженных элементов в апертуре фильтра.

На рис. 2 для качественного сравнения работы алгоритмов приведены результаты обработки цветного цифрового изображения “Лена” с вероятностью наличия нижнемодальных АП $p(h) = 0,7$ в каждом цветовом канале.

Рис. 3 показывает дополнительное преимущество межканальной обработки по устранению помех сбойной цветовой компоненты при

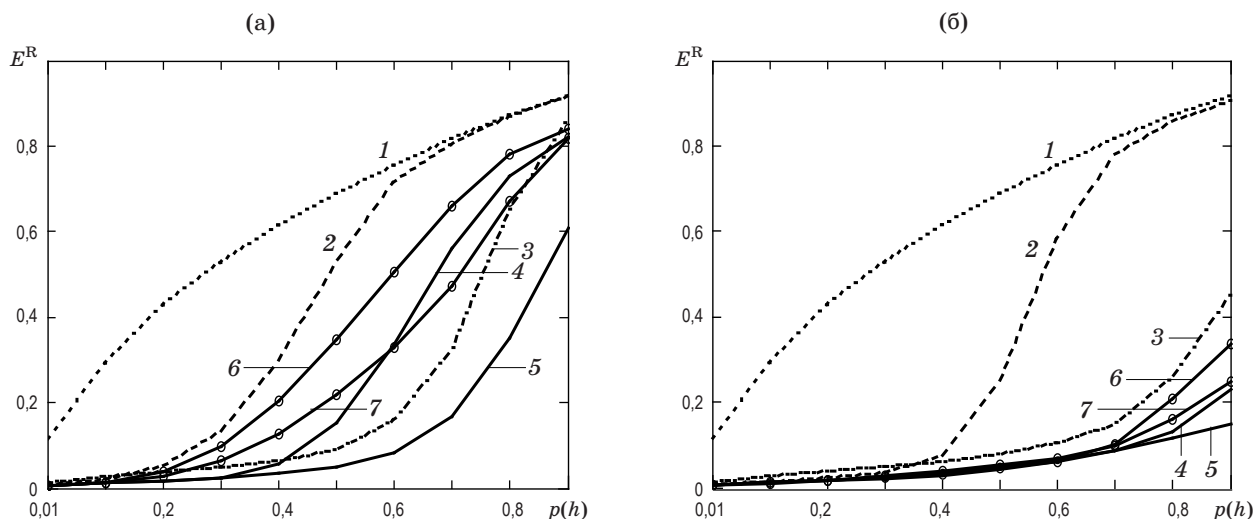


Рис. 1. Ошибка восстановления R-компоненты при наличии помех в каждом цветовом канале. а – первая итерация, б – шестая итерация.



Рис. 2. Результаты реконструкции цветного изображения. а – искаженное АП изображение, б – обработка с помощью алгоритма 1 при МФ по всем элементам апертуры, в – обработка с помощью алгоритма 1 при МФ по выборке неискаженных элементов апертуры, г – обработка с помощью алгоритма 2 при МФ по всем элементам апертуры, д – обработка с помощью алгоритма 2 при МФ по выборке неискаженных элементов апертуры, е – итерационная МФ по всем элементам апертуры [10], ж – итерационная МФ по выборке неискаженных элементов апертуры.

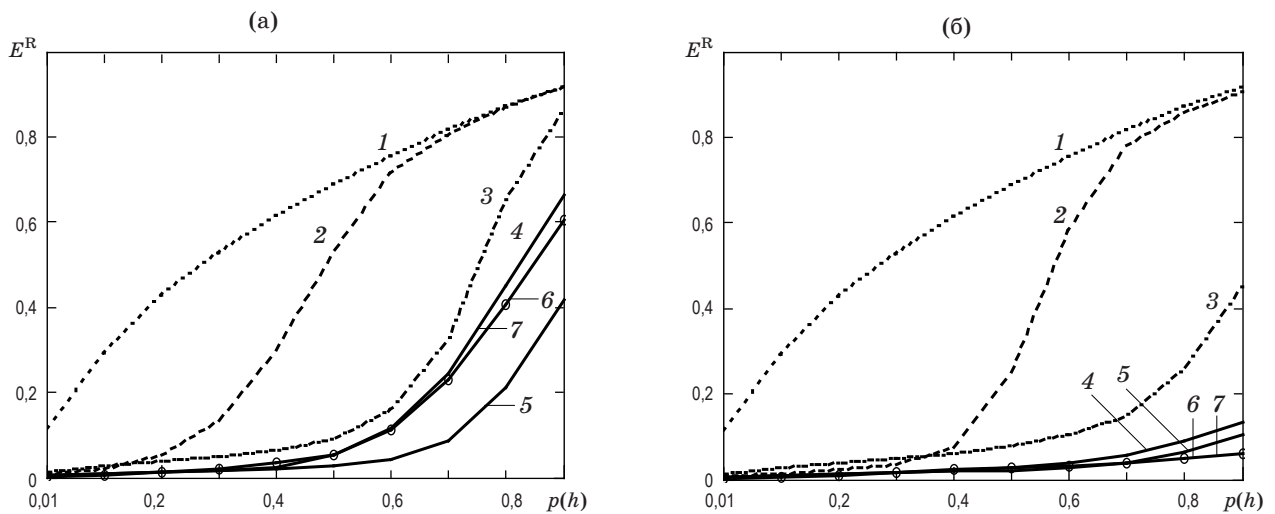


Рис. 3. Ошибка восстановления R-компоненты при отсутствии помех в G- и B-каналах. а – первая итерация, б – шестая итерация.

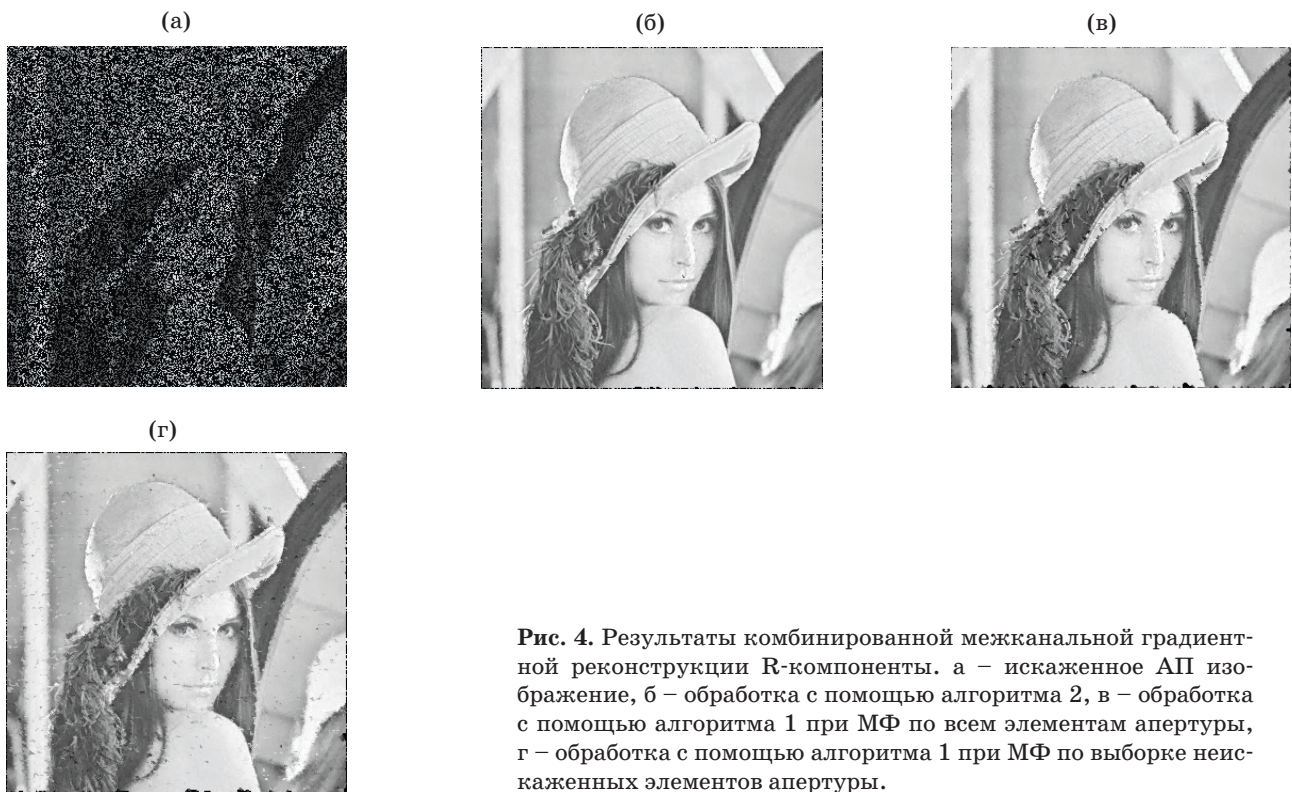


Рис. 4. Результаты комбинированной межканальной градиентной реконструкции R-компоненты. а – искаженное АП изображение, б – обработка с помощью алгоритма 2, в – обработка с помощью алгоритма 1 при МФ по всем элементам апертуры, г – обработка с помощью алгоритма 1 при МФ по выборке неискаженных элементов апертуры.

условии отсутствия помех в соседних каналах. В этом случае точность реконструкции сбойного канала с помощью алгоритма 2 выше, чем у всех остальных алгоритмов. Этот эффект достигается вследствие исключения процедур ранговой (медианной) обработки, вносящих дополнительные искажения [6], при отсутствии коррелированных между каналами АП (невыполнение условия $\hat{h}_{i,j}^a = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^b = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^c = 1$). На рис. 4 представлены результаты обработки R-канала цветного изображения «Лена» с вероятностью наличия в нем нижнемодальных импульсных АП $p(h) = 0,8$ при отсутствии помех в G- и B-каналах.

Заключение

Таким образом, при условии наличия помех в каждом канале многокомпонентного изображения целесообразно использовать алгоритм МГР

* * * * *

в поэтапной комбинации с МФ по выборке неискаженных элементов в апертуре фильтра, а при наличии помех в одном из соседних каналов – алгоритм совместного комбинирования МГР с МФ. Также необходимо отметить, что если для многокомпонентных цветных RGB-изображений значения межканальной корреляции достигают 0,8–0,9, то для гиперспектральных изображений эти значения в соседних каналах могут приближаться к единице, свидетельствуя об избыточности таких данных и целесообразности использования этого свойства при фильтрации [12]. Поэтому предложенные алгоритмы межканальной градиентной реконструкции многокомпонентных изображений могут быть использованы в различных системах технического зрения для восстановления амплитуды искаженных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремеев В.В., Макаренко А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Повышение четкости отображения объектов на данных гиперспектральной съемки земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 35–39.

2. Калинин П.В., Сирота А.А. Моделирование аппликативных искажений с различной степенью прозрачности и случайной формой // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 1. С. 28–33.
3. Козирацкий Ю.Л., Юхно П.М. Синтез оптических помех // Радиотехника. 2000. № 10. С. 52–59.
4. Якушенко Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.
5. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Метод межканальной компенсации импульсных помех в задачах восстановления многокомпонентных цифровых изображений // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 10. С. 53–59.
6. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Метод межканальной градиентной реконструкции искаженных сигналов цветных цифровых изображений // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 13–16.
7. Самойлин Е.А. Алгоритмы восстановления цифровых оптических изображений, искаженных импульсными шумами // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 50–55.
8. Самойлин Е.А. Алгоритмы оценивания импульсного шума в задачах цифровой фильтрации оптических изображений // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 42–46.
9. Самойлин Е.А., Шипко В.В., Трифионов П.А. Итерационный алгоритм восстановления цифровых изображений с адаптивным обнаружением импульсных помех // Мат. XIX Междунар. науч. конф. «Радиолокация навигация связь». Т. 1. Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2013. С. 182–189.
10. Воскобойников Ю.Е., Белявцев В.Г. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97–105.
11. Самойлин Е.А. Критерии оценивания качества фильтрации импульсных шумов на изображениях // Автометрия. 2006. Т. 42. № 4. С. 25–35.
12. Lukin V. Processing of multichannel RS data for environment monitoring // Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security. Trento, (Italy): Springer Netherlands, July 2009. P. 129–138.