

УДК 004.932.4

Метод и алгоритмы межканальной градиентной реконструкции многоспектральных изображений в оптико-электронных комплексах воздушной и космической разведки

Шипко В.В.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия
e-mail: shipko.v@bk.ru*

Аннотация

В статье представлены метод и алгоритмы межканальной градиентной реконструкции многоспектральных цифровых изображений, искаженных аппликативными помехами. Как показали результаты проведенных численных и экспериментальных исследований, предлагаемый метод и его алгоритмическая реализация позволяют получить более высокую точность обнаружения и реконструкции искаженных участков изображения по сравнению с существующими методами обработки. При этом вычислительные затраты разработанных алгоритмов позволяют обрабатывать цветные (3-х каналные) изображения в масштабе времени близком к реальному.

Ключевые слова: цветные цифровые изображения, многоспектральные изображения, аппликативные помехи, импульсные помехи, межканальная градиентная реконструкция, медианная фильтрация.

Введение

Последние тенденции развития оптико-электронных средств разведки как воздушного, так и космического базирования направлены на расширение диапазона длин волн, в которых производится съемка [1, 2], и увеличение спектрального разрешения. Проведение многоканальной съемки позволяет регистрировать изображения в нескольких спектральных диапазонах видимого или инфракрасного излучения. Получаемые таким образом многоспектральные (многокомпонентные) изображения открывают новые возможности анализа характеристик объектов и позволяют повысить точность решения ряда конечных задач (обнаружение, распознавание, классификация объектов и т.д.) [3-6]. Тем не менее, фактором, влияющим на ухудшение качества поступающей разведывательной информации, является возникновение на регистрируемых изображениях аппликативных помех (АП) случайной формы и пространственного положения [7-11].

Как известно аппликативные и как частный случай импульсные помехи (ИП) являются наиболее сложным случаем искажения изображений получаемых оптико-электронными системами воздушной и космической разведки. Появление таких помех возможно в следующих случаях: ошибки квантования или декодирования обусловленные различными критическими условиями функционирования, выход из строя или сбои в одном или нескольких спектральных каналах регистрации изображений, преднамеренное оптико-электронное подавление и многие другие факторы [7-11]. В настоящее время для борьбы с такими помехами на цветных

(многоспектральных) изображениях широко используются векторные ранговые фильтры [12, 13], учитывающие межканальную корреляцию значений яркости элементов каждой компоненты изображения. Однако, такие фильтры не в состоянии всегда достоверно восстановить искаженные значения яркости элементов вследствие своей ограниченности только выборкой элементов скользящего окна, особенно в случае высокой плотности помех. При этом с увеличением спектральных каналов, векторные фильтры становятся вычислительно затратными, что не позволяет их применять в реальных системах технического зрения. Выявлено, что возникающая избыточность при переходе от полутоновых к цветным (многоспектральным) изображениям, открывает новые возможности по реконструкции искаженных помехами значений яркости элементов изображений [15-19].

Целью работы является повышение точности реконструкции многоспектральных цифровых изображений искаженных аппликативными помехами за счет свойства межканальной избыточности многоканальных оптико-электронных комплексов воздушной и космической разведки.

Постановка задачи

Используемая модель исходного оцифрованного по строкам i и столбцам j L -компонентного изображения Λ имеет вид:

$$\Lambda = [\Lambda^1 \quad \Lambda^2 \quad \dots \quad \Lambda^L], \quad (1)$$

где $\Lambda^l = \lambda_{i,j}^l$, l – индекс компоненты, $l=1, \dots, L$, $\lambda_{i,j}^l$ – элементы компоненты l , $\lambda_{i,j}^l \in [0, \dots, 2^N - 1]$; $i=1, \dots, m$, $j=1, \dots, n$; m, n – число строк и столбцов изображения соответственно; N – степень квантования яркости элементов компонент изображения.

Модель L -компонентного изображения, искаженного воздействием АП, описывается выражением:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}^1 \quad \mathbf{X}^2 \quad \dots \quad \mathbf{X}^L], \quad (2)$$

где каждая компонента $\mathbf{X}^l = x_{i,j}^l$ содержит АП в соответствии с выражением:

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

Здесь p_h^l – вероятность появления помехи $h_{i,j}^l$ в ячейке с координатой (i, j) ; $h_{i,j}^l$ – случайные значения искаженных элементов в компонентах изображения с неизвестными законами распределения яркости и пространственного положения.

Математическая постановка задачи реконструкции многокомпонентных изображений состоит в нахождении оператора реконструкции $F_{\hat{\Lambda}}$ искаженного изображения \mathbf{X} , позволяющего сформировать такую оценку $\hat{\Lambda}$ изображения, которая была бы наиболее близка к ее истинным значениям Λ :

$$F_{\hat{\Lambda}}[\mathbf{X}, \hat{\mathbf{H}}] = \hat{\Lambda}, \quad \|\hat{\Lambda} - \Lambda\| \rightarrow \min_{U1}, \quad (4)$$

где $U1$ – набор управляющих параметров оператора реконструкции, $U1 = [A, B, S, Q, D]$; A – набор искаженных помехами компонент i, j -того элемента изображения, $A \subset [1, \dots, L]$, B – набор неискаженных помехами компонент i, j -того элемента изображения, $B \subset [1, \dots, L]$, $A \notin B \forall [1, \dots, L]$; S – параметр определяющий горизонтальные размеры апертуры (окна фильтра), $S \in [1, \dots, \frac{m}{2}]$; Q – параметр определяющий вертикальные размеры апертуры, $Q \in [1, \dots, \frac{n}{2}]$; D – набор неискаженных элементов в окрестности i, j -того элемента апертуры, $D \in [1, \dots, (2S + 1)(2Q + 1) - 1]$; $\hat{\mathbf{H}}$ – бинарные матрицы оценок с элементами $\hat{h}_{i,j}^l \in [0, 1]$, указывающих на пространственное положение АП в L -компонентах изображения \mathbf{X} , наиболее близкие к истинному положению помех $\tilde{\mathbf{H}}$, $\hat{\mathbf{H}} = F_{\hat{\mathbf{H}}}[\mathbf{X}]$, $\|\hat{\mathbf{H}} - \tilde{\mathbf{H}}\| \rightarrow \min_{U2}$; $F_{\hat{\mathbf{H}}}$ – оператор обнаружения АП; $U2$ – набор управляющих параметров оператора обнаружения, $U2 = [S, Q, P]$; P – порог принятия решения о наличии АП в координате изображения; $\|\dots\|$ – векторная норма.

Метод межканальной градиентной реконструкции

Как показали исследования, справедливо предположение о наличии локальной зависимости между составляющими градиента отдельных компонент:

$$\left(\lambda_{i,j}^1 - \lambda_{I,J}^1\right) \approx \left(\lambda_{i,j}^2 - \lambda_{I,J}^2\right) \approx \dots \approx \left(\lambda_{i,j}^L - \lambda_{I,J}^L\right), \quad (5)$$

где I, J – координаты любого (случайного) элемента изображения в скользящем окне (апертуре) с центром i, j (за исключением i, j -того элемента) в соответствующих компонентах.

Обозначим $g_{I,J}^l = \lambda_{i,j}^l - \lambda_{I,J}^l$ и будем называть апертурным градиентом компоненты l .

На рисунке 1 представлены рассчитанные нормированные распределения

$$F(\Delta) = \frac{\Delta_{i,j}}{mn} \quad \text{суммарных градиентных ошибок} \quad \Delta_{i\pm s, j\pm q}^{RG} = \left| g_{i\pm s, j\pm q}^R - g_{i\pm s, j\pm q}^G \right|,$$

$$\Delta_{i\pm s, j\pm q}^{RB} = \left| g_{i\pm s, j\pm q}^R - g_{i\pm s, j\pm q}^B \right|, \quad \Delta_{i\pm s, j\pm q}^{GB} = \left| g_{i\pm s, j\pm q}^G - g_{i\pm s, j\pm q}^B \right| \quad \text{между } R, G \text{ и } B \text{ компонентами}$$

цветного изображения, по всем 8-ми направлениям апертуры 3×3 ($S=1, Q=1$) [19]:

$$\Delta_{i,j} = \frac{\sum_{s=0}^S \sum_{q=0}^Q \left(\Delta_{i\pm s, j\pm q}^{RG} + \Delta_{i\pm s, j\pm q}^{RB} + \Delta_{i\pm s, j\pm q}^{GB} \right)}{3((2S+1)(2Q+1)-1)}. \quad (6)$$

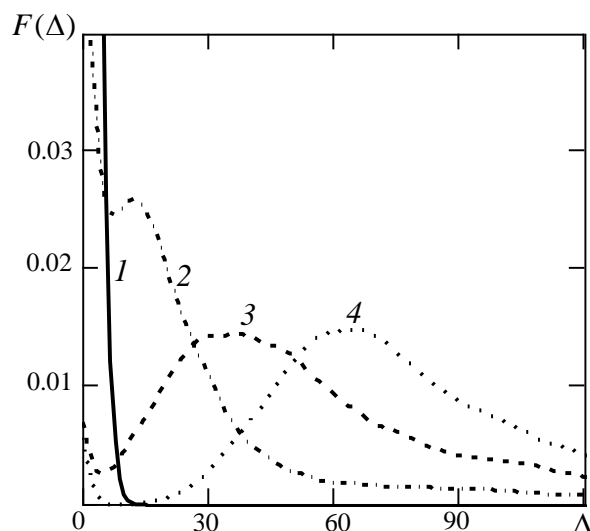


Рис. 1. Плотность распределения межканальных градиентных ошибок

Результаты представленные на рисунке 1 усреднены по множеству цветных *RGB*-компонентных изображений из различных баз изображений. На рисунке 1 кривая 1 – для неискаженных компонент изображения; кривая 2 – при наличии ИП с равномерными законами распределения по яркости и пространству изображения в одной из компонент с вероятностью $p_h = 0,1$; кривая 3 – при $p_h = 0,5$; кривая 4 – при $p_h = 0,8$. Видно, что градиентные ошибки для неискаженных компонент в большинстве случаев группируются на интервале $\Delta = 0, \dots, 7$, при этом в случае искажения одной из компонент с ростом частоты помех происходит смещение центра распределения градиентных ошибок в сторону увеличения.

Тогда межканальная градиентная реконструкция (МГР) любой компоненты $a \in A$ по любой компоненте $b \in B$ скользящей апертурой с параметрами $s = (0, \dots, S)$ по i и $q = (0, \dots, Q)$ по j предполагает вычисление апертурных градиентов компоненты b по D^b элементам:

$$g_{i\pm s, j\pm q}^b = \lambda_{i,j}^b - \lambda_{i\pm s, j\pm q}^b, \quad s, q \neq 0. \quad (7)$$

Оценки i, j -того элемента компоненты a по компоненте b ($a \rightarrow b$) рассчитываются следующим образом:

$$\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a \rightarrow b} \right)_{t^{a \rightarrow b}} = \lambda_{i\pm s, j\pm q}^a + g_{i\pm s, j\pm q}^b, \quad (8)$$

где $t^{a \rightarrow b}$ – индекс оценки компоненты a по компоненте b ; $t^{a \rightarrow b} = 1, \dots, (2S+1)(2Q+1) - 1$.

Выражение (8) позволяет сформировать выборку значений оценок реконструируемой компоненты с некоторой плотностью распределения. Поэтому конечной оценкой может являться оператор $M[\dots]$, вычисляющий числовые характеристики распределения оценок (квантиль, медиана, мода, минимум, максимум, среднее значение):

$$\hat{\lambda}_{i,j}^a = M \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a \rightarrow (\dots)} \right)_{t^{a \rightarrow (\dots)}} \right]. \quad (9)$$

Проведены исследования точностных характеристик МГР цветных *RGB*-компонентных изображений, искаженных АП с различными законами распределения яркости, для частного случая, когда АП присутствуют в одной из спектральных

компонент. Исследования проводились для пространственно-инвариантного (без предварительного обнаружения АП) и для пространственно-избирательного (с предварительным обнаружением АП) подходов. В качестве критерия различия изображений Λ^a и $\hat{\Lambda}^a$, т.е. ошибки реконструкции элементов в компоненте a выбрана среднеквадратическая ошибка (СКО):

$$\sigma^a = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^a - \lambda_{i,j}^a)^2}. \quad (10)$$

На рисунке 2 представлены зависимости СКО (10) от вероятности появления импульсных АП с равномерным законом распределения яркости, где кривая 1 – искаженное изображение, 2 – медианная фильтрация (МФ) с апертурой 3×3 , 3 – МФ с апертурой 5×5 , 4 – МФ с апертурой 7×7 , 5 – МГР апертурой 3×3 , 6 – МГР апертурой 5×5 , 7 – МГР апертурой 7×7 , 8 – МГР апертурой 3×3 по неискаженным элементам в апертуре, 9 – МГР апертурой 5×5 по неискаженным элементам в апертуре.

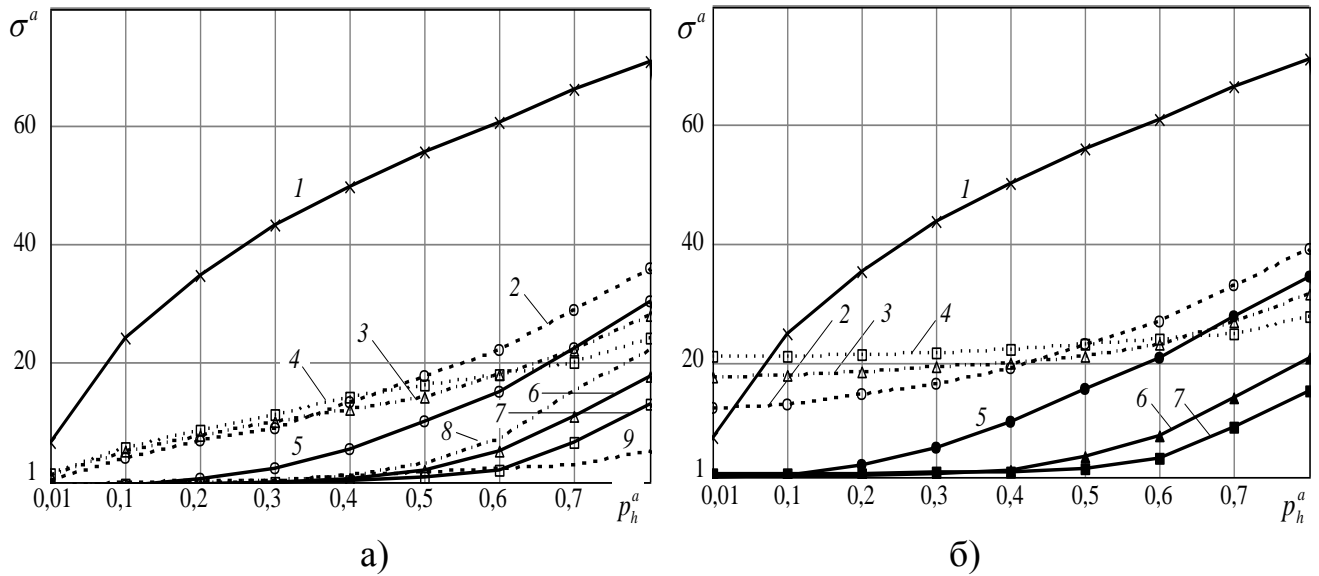


Рис. 2. Ошибки реконструкции: (а) – пространственно-избирательный подход,
(б) – пространственно-инвариантный подход

На рисунке 3 представлена зависимость СКО при пространственно инвариантной МГР и МФ от параметров, определяющих размер апертуры (S, Q), где обозначено 1 – МФ неискаженного изображения, 2 – МФ при $p_h^a = 0,3$, 3 – МФ при $p_h^a = 0,5$, 4 – МФ при $p_h^a = 0,8$, 5 – МГР неискаженного изображения, 6 – МГР при $p_h^a = 0,3$, 7 – МГР при $p_h^a = 0,5$, 8 – МГР при $p_h^a = 0,8$. Очевидно, что с ростом частоты появления АП требуется все больший размер апертуры для МГР, т.к. с увеличением размера апертуры, возрастает и количество возможных оценок искаженного элемента цветовой компоненты изображения, что в последствии приведет к более качественному визуальному эффекту. При этом сама зависимость в случае искаженного изображения является экстремальной (через минимум). Между тем, для традиционной МФ при увеличении апертуры вносятся все большие дополнительные искажения.

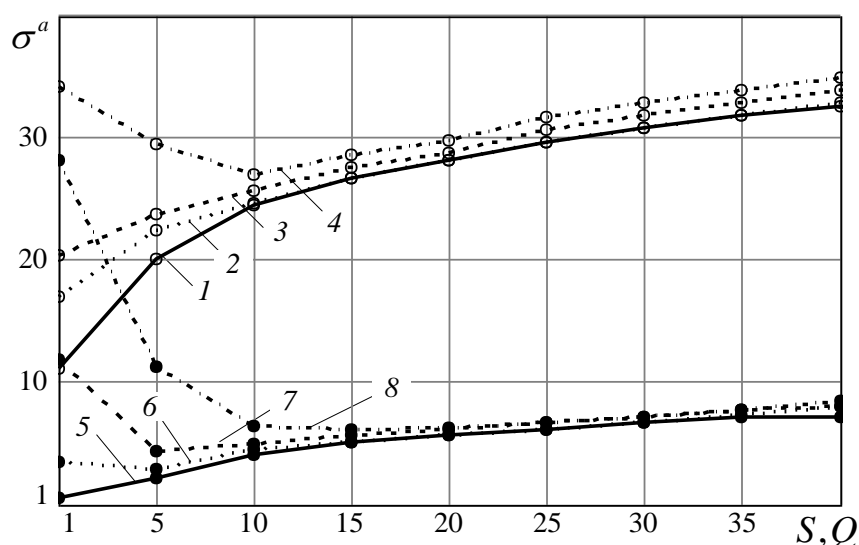


Рис. 3. Зависимость ошибки реконструкции от параметров размера апертуры

На рисунке 4 для визуального сравнения представлены результаты обработки одной из спектральных компонент изображения с вероятностью наличия помех $p_h = 0,4$, при условии отсутствия помех в соседних компонентах.

Исследования показали, что процедуры пространственной избирательности повышают точность реконструкции. Исключение искаженных элементов из выборки межканальных градиентных оценок также способствует повышению эффективности работы МГР. Поэтому целесообразно использовать именно пространственно-избирательный подход при построении алгоритмов МГР. Как показали исследования [15], при реконструкции изображений искаженных АП с различными законами яркостного распределения, ошибки МГР являются сопоставимыми. Таким образом, МГР является достаточно универсальной к

отклонениям таких параметров помех, как закон их распределения и частота появления.

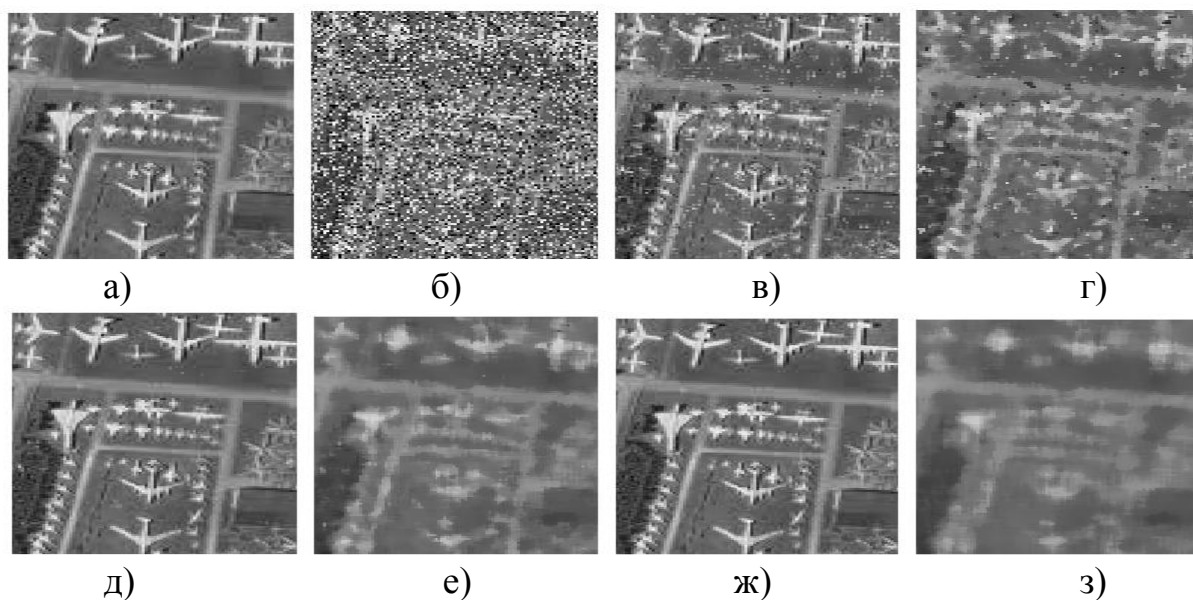


Рис. 4. Результаты реконструкции a -компоненты изображения: (а) – исходное изображение, (б) – искаженное изображение, (в) – МГР апертурой 3×3 , (г) – МФ апертурой 3×3 , (д) – МГР апертурой 5×5 , (е) – МФ апертурой 5×5 , (ж) – МГР апертурой 7×7 , (з) – МФ апертурой 7×7

Алгоритм межканального градиентного обнаружения аппликативных помех

Разработанный алгоритм межканального градиентного обнаружения АП на многокомпонентных изображениях основанный на использовании свойства межканальной избыточности предполагает следующую последовательность вычислений [19].

На 1-м шаге обработки в каждой компоненте вычисляются $(2S + 1)(2Q + 1) - 1$ апертурных градиента в направлении от центрального элемента апертурной (i, j) до

каждого из остальных ее элементов в пределах окрестности $i \pm s, j \pm q$:

$$g_{i \pm s, j \pm q}^l = x_{i, j}^l - x_{i \pm s, j \pm q}^l. \quad (11)$$

Шаг 2. Вычисляется набор невязок (градиентных ошибок) апертурных градиентов между всеми возможными парами компонент:

$$\Delta_{i \pm s, j \pm q}^{lr} = |g_{i \pm s, j \pm q}^l - g_{i \pm s, j \pm q}^r|, \quad (12)$$

где $r \in [1, \dots, L]$, $r \neq l$.

На 3-м шаге обработки на основе значений градиентных ошибок (12) осуществляется определение элементов, подозрительных на помехи. Так, в случае если взаимная градиентная ошибка каких-либо двух компонент превышает некоторое пороговое значение, то принимается предварительное решение о наличии помехи в i, j -той координате этих компонентах. С этой целью вначале формируются бинарные оценки градиентных ошибок по каждому направлению:

$$\hat{h}_{i \pm s, j \pm q}^{lr} = \begin{cases} 1, & \Delta_{i \pm s, j \pm q}^{lr} > P1, \\ 0, & \Delta_{i \pm s, j \pm q}^{lr} \leq P1, \end{cases} \quad (13)$$

где $P1$ – порог, выбираемый экспериментально, в зависимости от корреляции между компонентами изображения \mathbf{X} , $P1 = 7$.

Шаг 4. По полученным наборам оценок (13) формируются суммарные оценки для всех возможных пар компонент каждого элемента изображения:

$$\hat{h}_{i,j}^{lr} = \begin{cases} 1, & \left(\sum_{s=0}^S \sum_{q=0}^Q \hat{h}_{i\pm s, j\pm q}^{lr} \right) > P2, \\ 0, & \left(\sum_{s=0}^S \sum_{q=0}^Q \hat{h}_{i\pm s, j\pm q}^{lr} \right) \leq P2, \end{cases} \quad (14)$$

где $P2$ – порог, выбираемый экспериментально в зависимости от размера апертуры.

Определено наилучшее значение $P2 = (2S + 1)(2Q + 1) - SQ - 2$.

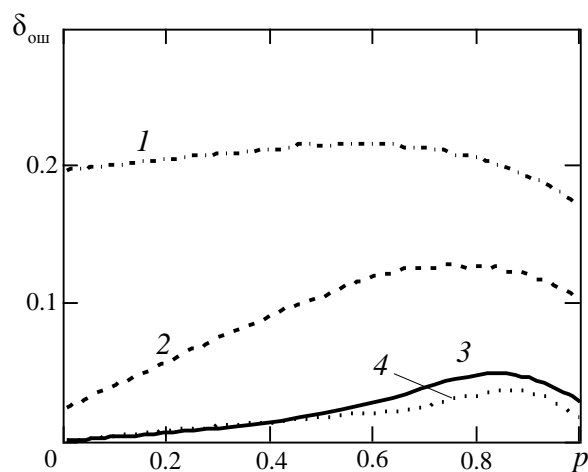
Шаг 5. Заключительным этапом обработки многокомпонентного изображения является определение по полученным предварительным парным оценкам (14) конечных оценок пространственного положения АП в спектральных компонентах. С этой целью осуществляется накопление (суммирование) парных оценок (14) для каждой компоненты, что позволяет получить межканальные оценки искаженных элементов в каждой компоненте в отдельности:

$$\hat{h}_{i,j}^l = \begin{cases} 1, & \sum_r \hat{h}_{i,j}^{lr} = L - 1, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (15)$$

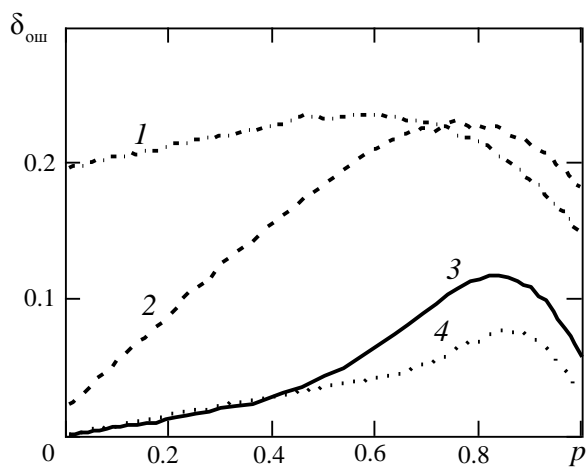
Для исследования качественных характеристик предлагаемого алгоритма обнаружения вычислялись ошибки типа пропуск помех ($\delta_{\text{ПП}}$) и ложная тревога ($\delta_{\text{ЛТ}}$).

На рисунке 5 приведена общая частота ошибок обнаружения АП ($\delta_{\text{ош}} = \delta_{\text{ип}} + \delta_{\text{лт}}$). Вычислительные исследования проводились на разнообразных цветных (RGB-компонентных) цифровых изображениях с размерами $m \times n = 640 \times 640$. Приводимые далее результаты усреднены по выборке более чем из 100 самых различных цветных цифровых изображений с указанными размерами. В качестве АП использовалась модель ИП с равномерным законом распределения яркости и пространству изображения. На рисунке 5 кривая 1 – известный разностный алгоритм, основанный на выделении границ объектов [20], где решение о принадлежности элемента $x_{i,j}^a$ к контуру принимается исходя из разности между значением яркости этого элемента и оценкой среднего значения апертуры; кривая 2 – известный алгоритм основанный на сравнении центрального элемента апертуры $x_{i,j}^a$ с медианным элементом [20]; кривая 3 – предлагаемый алгоритм с апертурой 3×3 ; кривая 4 – предлагаемый алгоритм с апертурой 5×5 .

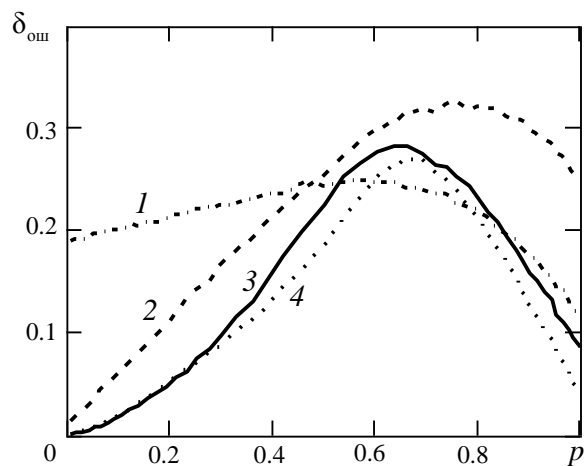
Представленный алгоритм межканального градиентного обнаружения АП на многокомпонентных изображениях является предварительным и неотъемлемым этапом реконструкции искаженных изображений. Непосредственно для самой реконструкции разработаны алгоритмы, реализующие МГР в комбинации с МФ.



а)



б)



в)

Рис. 5. Ошибки обнаружения при наличии АП в одной из компонент – (а), в двух компонентах – (б), в трех компонентах – (в)

Алгоритм межканальной градиентной реконструкции многоспектральных изображений искаженных аппликативными помехами

Применение процедур МГР возможно только для спектрально-некоррелированных помех или в случае наличия спектральной избыточности. В случае спектрально-коррелированной помехи можно применять МФ. Поэтому фильтрацию комбинированных АП на многоспектральных изображения удобно осуществлять алгоритмами, комбинирующими МГР и МФ. На рисунке 6 представлен алгоритм поэтапного комбинирования (алгоритм 1).

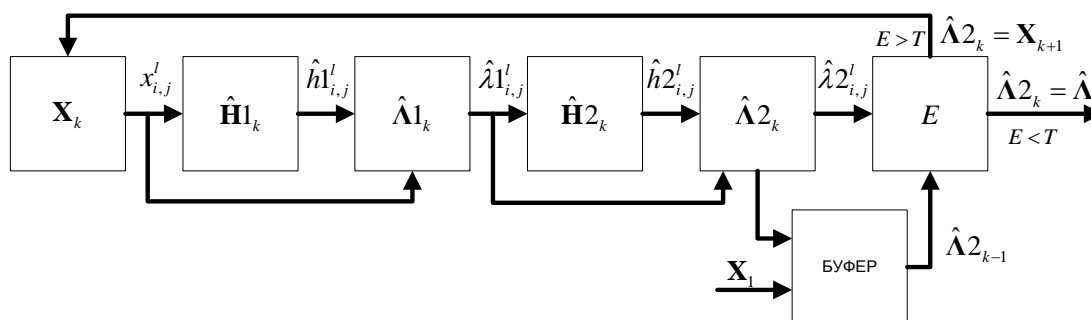


Рис. 6. Итерационный алгоритм поэтапного комбинирования МГР и МФ

Шаг 1. Оценивается пространственное положение АП в каждой компоненте алгоритмом межканального градиентного обнаружения (представленным выше). Так оценка $\hat{h}^1_{i,j} = 1$ означает наличие АП в координате i,j , а $\hat{h}^1_{i,j} = 0$ – отсутствие помехи.

Шаг 2. По значениям неискаженных элементов D^B в окрестности i,j -того элемента апертуры компонент B , определяемых по комбинации оценок $\hat{h}^a_{i\pm s, j\pm q} = 0, \hat{h}^B_{i\pm s, j\pm q} = 0$, формируется $(2S + 1)(2Q + 1) - 1 - \varepsilon^{a \rightarrow B}$ градиентов

$g_{i\pm s, j\pm q}^B = x_{i,j}^B - \lambda_{i\pm s, j\pm q}^B$, где $\varepsilon^{a \rightarrow B}$ – число, соответствующее искаженным элементам в окрестности i, j -того элемента апертуры, $\varepsilon^{a \rightarrow B} = \sum_{s=0}^S \sum_{q=0}^Q \begin{cases} 1, & \hat{h}_{i\pm s, j\pm q}^a = 1 \text{ или } \hat{h}_{i\pm s, j\pm q}^B = 1 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$.

Межканальные градиентные оценки элементов искаженной компоненты a по неискаженным компонентам B определяются выражением:

$$\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a \rightarrow B} \right)_{t^{a \rightarrow B}} = x_{i\pm s, j\pm q}^a + g_{i\pm s, j\pm q}^B, \quad s, q \neq 0, \quad (16)$$

где $t^{a \rightarrow B}$ – индексы оценок из общего количества оценок компоненты a по компонентам B , $t^{a \rightarrow B} = 1, \dots, (2S+1)(2Q+1) - 1 - \varepsilon^{a \rightarrow B}$

Конечная межканальная оценка искаженных элементов компоненты a примет следующий вид:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^a = \begin{cases} x_{i,j}^a, & \text{при } \hat{h}_{i,j}^a = 0 \text{ или } \hat{h}_{i,j}^l = 1, \\ \text{median}_t \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a \rightarrow B} \right)_{t^{a \rightarrow B}} \right], & \text{при } \hat{h}_{i,j}^a = 1 \text{ и } \hat{h}_{i,j}^B = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Шаг 3. Аналогично шагу 1, формируются бинарные матрицы $\hat{h}_{i,j}^l$ обнаруженных АП в каждой компоненте. В основном это помехи, совпадающие по своему пространственному положению на изображении во всех спектральных компонентах (выполнение условия $\hat{h}_{i,j}^l = 1$).

Шаг 4. Осуществляется МФ по всем элементам апертуры, или МФ по выборке не искаженных элементов апертуры (исключены значения помех определяемые по $\hat{h}2_{i,j}^l$):

$$\hat{\lambda}2_{i,j}^a = \begin{cases} \hat{\lambda}1_{i,j}^a, & \text{при } \hat{h}2_{i,j}^a = 0, \\ \text{median}_{s,q} [\hat{\lambda}1_{i\pm s, j\pm q}^a], & \text{при } \hat{h}2_{i,j}^a = 1. \end{cases} \quad (18)$$

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

$$E_k = \left(\sum_{l=1}^3 (\hat{\Lambda}_k^l - \hat{\Lambda}_{k-1}^l)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{l=1}^3 (\hat{\Lambda}_k^l)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

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

Если выполняется условие $E > T$, то принимается решение о повторении процедур обнаружения и реконструкции (шаги 1–5), где T – порог останова, $T = 0.01$. В случае выполнения условия $E < T$ цикл останавливается.

Возможна другая реализация итерационного алгоритма представленная на рисунке 7 (алгоритм 2).

Шаги 1 и 2 аналогичны алгоритму 1 за исключением того, что на шаге 2 при коррелированной помехе во всех компонентах (условия $\hat{h}_{i,j}^l = 1$) осуществляется МФ:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^a = \begin{cases} x_{i,j}^a, & \text{при } \hat{h}_{i,j}^a = 0, \\ \text{median}_t \left[\left(\hat{\lambda}_{i,j}^{a \rightarrow B} \right)_{t^{a \rightarrow B}} \right], & \text{при } \hat{h}_{i,j}^a = 1 \text{ и } \hat{h}_{i,j}^B = 0, \\ \text{median}_{s,q} \left[x_{i \pm s, j \pm q}^a \right], & \text{при } \hat{h}_{i,j}^l = 1. \end{cases} \quad (20)$$

Шаг 3 аналогичен шагу 5 алгоритма 1.

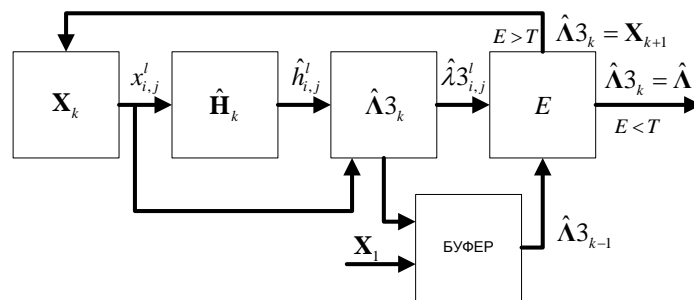


Рис. 7. Алгоритм совместного комбинирования МГР и МФ

Еще одной реализацией комбинирования МГР и МФ может являться их применение разнесенное по итерациям (алгоритм 3). На рисунке 8 представлена структурная схема такого алгоритма. Итерационная обособленность процедур МГР и МФ позволяет, не мешая друг другу, последовательно устранять АП с различной степенью межканальной корреляции.

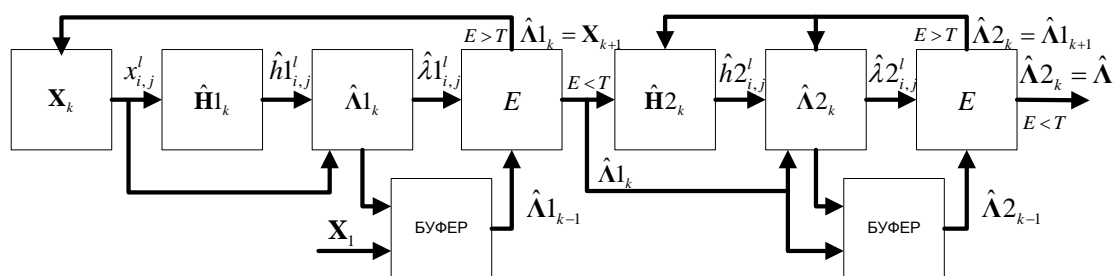


Рис. 8. Алгоритм разнесенного комбинирования МГР и МФ

Результаты численных исследований

Численные исследования алгоритмов реконструкции проводились в диапазоне вероятности появления АП $p_h^l = 0, \dots, 0,9$. В качестве ошибки реконструкции, выбрано нормированное евклидово расстояние, вычисляемое в каждой компоненте:

$$E^a = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^a - \lambda_{i,j}^a)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j}^a)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

При численных исследованиях использовались разнообразные цветные (*RGB*-компонентные) цифровые оптические изображения с размерами $m \times n = 640 \times 640$. Приводимые далее результаты (значения ошибок (21)) усреднены по выборке более чем 100 цифровых изображений с указанными параметрами.

На рисунке 9 представлены зависимости критерия (21) при равнозначной вероятности наличия помех в каждой компоненте ($p_h^R = 0, \dots, 0,9$; $p_h^G = 0, \dots, 0,9$; $p_h^B = 0, \dots, 0,9$). На рисунке 11 кривая 1 – искаженное изображение, 2 – МГР, 3 – МФ, 4 – МФ по выборке неискаженных элементов в апертуре, 5 – алгоритм 1, 6 – алгоритм 1 по выборке неискаженных элементов, 7 – алгоритм 2, 8 – алгоритм 2 по

выборке неискаженных элементов, 9 – алгоритм 3, 10 – алгоритм 3 по выборке неискаженных элементов.

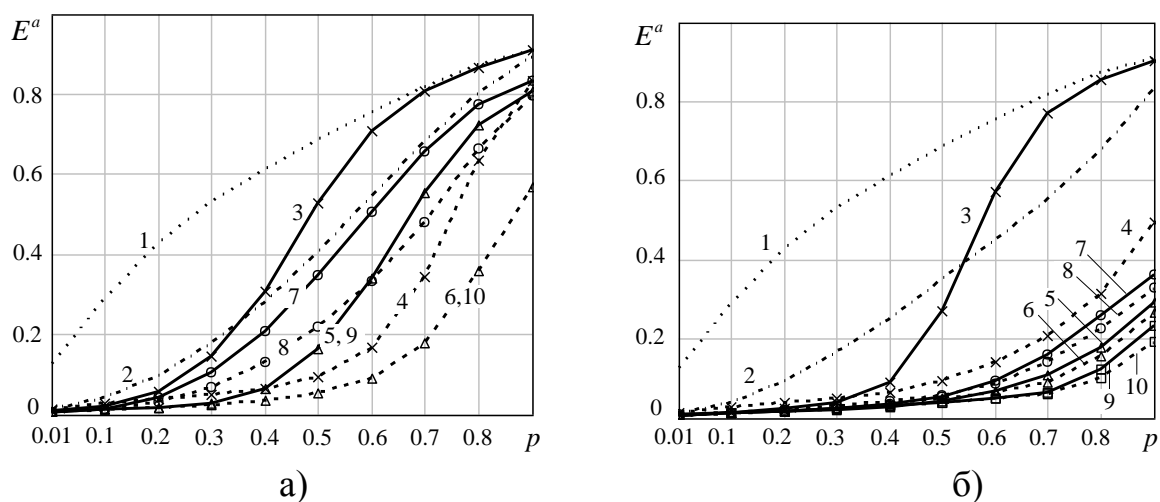


Рис. 9. Ошибка реконструкции a компоненты при наличии помех в каждой компоненте: (а) – на первой итерации, (б) – на последней итерации

Из рисунка 9 видно, что алгоритм 1 является более эффективным в качестве реконструкции, чем алгоритм 2, при этом алгоритм 1 сходится с алгоритмом 3 на первой итерации. В свою очередь алгоритм 3 является наиболее эффективным по сравнению со всеми остальными алгоритмами на последней итерации.

Рисунок 10 показывает дополнительное преимущество МГР по устранению АП в одной из цветовых компонент, при отсутствии помех в соседних компонентах ($p_h^R = 0, \dots, 0, 9$; $p_h^G = 0$; $p_h^B = 0$). В этом случае алгоритмы 2 и 3 сходятся с итерационной МГР на всех итерациях и являются более эффективными, чем алгоритм 1. Этот положительный эффект достигается вследствие того, что при отсутствии коррелированных между компонентами АП (не выполнение условия

$\hat{h}_{i,j}^R = 1$ и $\hat{h}_{i,j}^G = 1$ и $\hat{h}_{i,j}^B = 1$), исключаются процедуры ранговой (медианной) обработки, вносящие дополнительные искажения (см. рис.4).

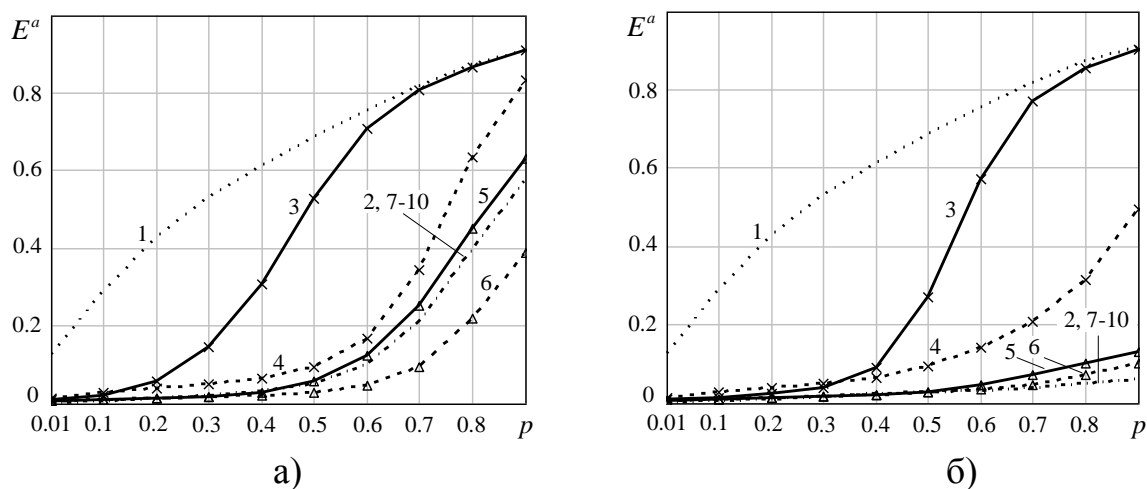
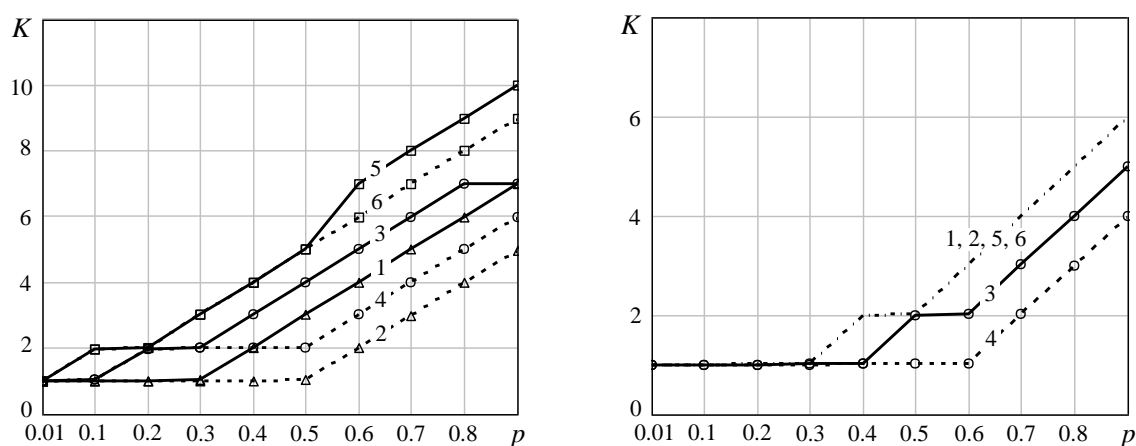


Рис. 10. Ошибка реконструкции a компоненты при отсутствии помех в соседней компоненте: (а) – на первой итерации, (б) – на последней итерации

На рисунке 11 представлены зависимости числа итераций (K) от вероятности наличия помех в компонентах изображения, где 1 – алгоритм 1, 2 – алгоритм 1 по выборке неискаженных элементов, 3 – алгоритм 2, 4 – алгоритм 2 по выборке неискаженных элементов, 5 – алгоритм 3, 6 – алгоритм 3 по выборке неискаженных элементов.



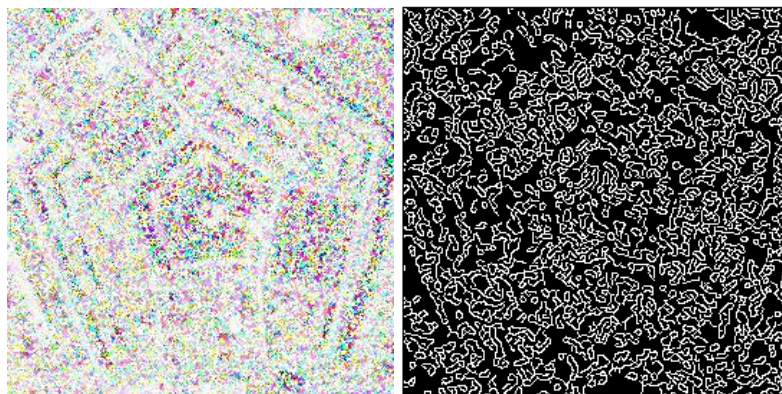
а)

б)

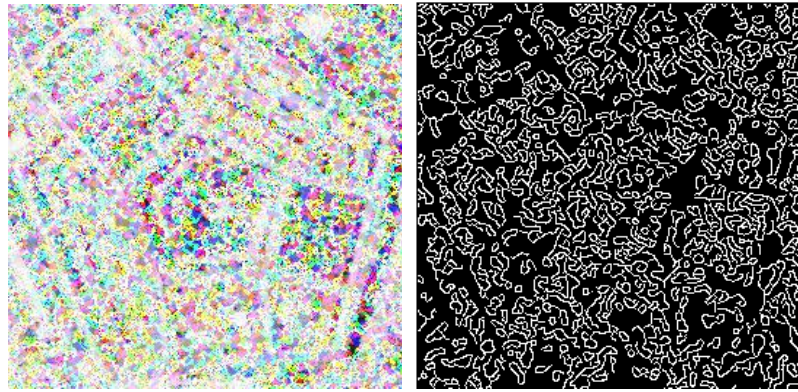
Рис. 11. Зависимость числа итераций от вероятности помех: (а) – в трех компонентах, (б) – в одной компоненте

Таким образом, при условии наличия помех в каждой компоненте изображения, целесообразно использовать алгоритм 1 по неискаженным элементам в апертуре, а при наличии помех в одной из соседних компонент – алгоритм 2. Альтернативным симбиозом алгоритмов 1 и 2 является алгоритм 3, эффективно работающий в любых помеховых условиях, при этом ему требуется большее число итераций для достижения наилучшего результата.

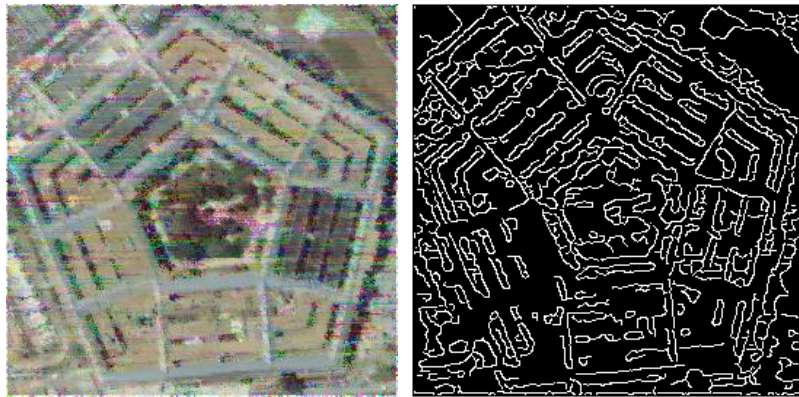
На рисунке 12 представлены примеры реконструкции искаженного аппликативными помехами цветного изображения. На рисунке 12 слева – само изображение, а справа – контур этого изображения полученный детектором границ Канни [21].



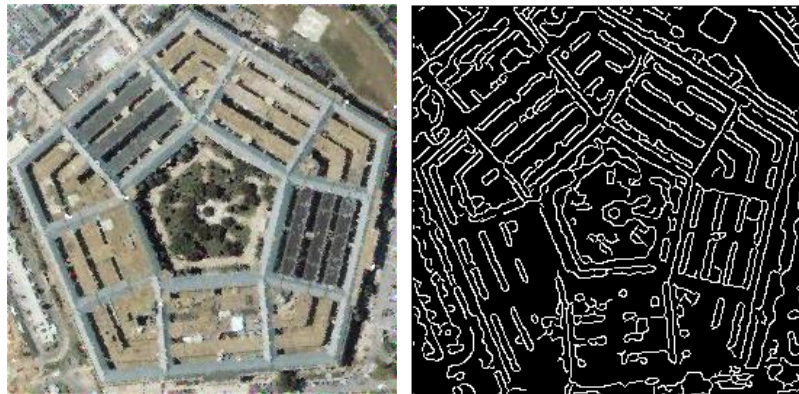
а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 12. Примеры реконструкции: искаженное аппликативными помехами изображение с $p_h = 0,9$ в каждой компоненте – (а), результат обработки алгоритмом итерационной МФ [22] – (б); алгоритм итерационной МФ по выборке неискаженных элементов [22] – (в); разработанным алгоритмом 3 – (г); исходное неискаженное изображение – (д)

На рисунке 13 представлена вычислительная сложность (O) приведенных алгоритмов (количество элементарных операций) в зависимости от количества реконструируемых элементов (r) RGB -компонентного изображения, апертурой 3×3 . Анализ зависимостей на рисунке 12 показывает, что при нормировании вычислительных затрат алгоритмов на вычислительные затраты классического медианного фильтра (кривая 6), относительные показатели вычислительной сложности будут следующие: для МГР медианой оценок по одному соседнему каналу составляет 1,7 (кривая 5), для МГР медианой оценок по двум соседним каналам – 3,5 (кривая 3), для МГР по одной случайной оценке соседнего канала – 0,2 (кривая 7), для алгоритмов 1, 2, при МГР медианой оценок по одному соседнему каналу – 2,6 (кривая 4), для алгоритмов 1, 2, при МГР медианой оценок по двум соседним каналам – 4,4 (кривая 2), для векторной МФ – 80 (кривая 1).

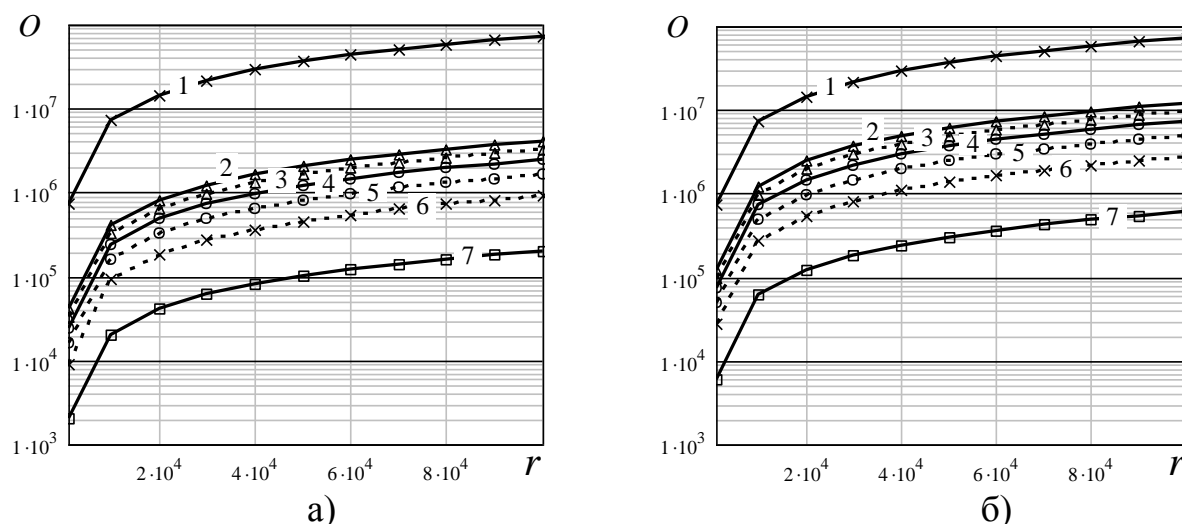


Рис. 13. Зависимость вычислительных затрат алгоритмов от количества реконструируемых элементов: (а) – в одной компоненте, (б) – в трех компонентах

Вычислительный эксперимент по расчету временных затрат алгоритмов реконструкции проводился на разных процессорных системах, на *RGB*-компонентных изображениях размером 768×512 пикселей. Результаты проведения экспериментов по оцениванию времени выполнения алгоритмов реконструкции представлены в таблице. В таблице для процессора NeuroMatrix в скобках представлены значения времени после оптимизации программного кода алгоритма и перераспределения данных в памяти процессора.

Таблица – Временные затраты алгоритмов реконструкции

Процессор	Intel G620 2.6 ГГц	ARM Cortex A15 1.7 ГГц	NeuroMatrix 320 МГц
$p_h^{R,G,B}$			
$p_h^R = 0.1, p_h^{G,B} = 0$	0.1 с	1.06 с	2.3 (0.43) с
$p_h^{R,G,B} = 0.1$	0.11 с	1.45 с	3.4 (0.87) с
$p_h^R = 0.5, p_h^{G,B} = 0$	0.11 с	1.6 с	4.1 (1.08) с
$p_h^{R,G,B} = 0.5$	0.12 с	2.9 с	7.6 (1.8) с
$p_h^R = 0.8, p_h^{G,B} = 0$	0.12 с	1.65 с	4.6 (1.11) с

$p_h^{R.G.B} = 0.8$	0.14 с	4.89 с	13.3 (3.18) с
---------------------	--------	--------	---------------

Выводы

Из представленных численных исследований по оценке качества реконструкции и вычислительных затрат процедур и алгоритмов межканальной обработки следует, что разработанный алгоритмический аппарат на основе метода межканальной градиентной реконструкции способен решать поставленные задачи высокоточной реконструкции в реальном масштабе времени при выполнении оптико-электронным комплексом многоканальной разведки в условиях помех.

Библиографический список

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и много диапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. - М.: Университетская книга, Логос, 2007. - 192 с.
2. Дворкин Б.А., Дудкин С.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 16 - 36.
3. Бельский А.Б., Чобан В.М. Математическое моделирование и алгоритмы распознавания целей на изображениях, формируемых прицельными системами летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40856>
4. 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.

5. Барабин Г.В., Гусев В.Ю. Фотограмметрический метод построения единого изображения при спутниковой съемке секционированным датчиком изображений // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46740>

6. Казбеков Б.В. Совмещение инфракрасных изображений с изображениями видимого диапазона в задачах идентификации подвижных наземных целей с борта беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35912>

7. Козирацкий Ю.Л., Юхно П.М. Синтез оптических помех // Радиотехника. 2000. № 10. С. 52 - 59.

8. Калинин П.В., Сирота А.А. Моделирование аппликативных искажений с различной степенью прозрачности и случайной формой // Цифровая обработка сигналов. 2013. №1. С. 28 - 33.

9. Шипко В.В. Экспериментальные исследования полей изображений в условиях воздействия засветочных лазерных помех на многоканальный фотоприемник // Вестник военно-воздушной академии. 2014. № 2 (21). С. 181 - 185.

10. Асанов С.В., Егоров С.М., Игнатъев А.Б., Морозов В.В., Резунков Ю.А., Степанов В.В. Нелинейность и инерционность отклика матричных инфракрасных фотоприемников на лазерное излучение // Оптический журнал. 2014. Т. 1. № 9. С. 62 - 68.

11. Стафеев В.И., Бурлаков И.Д., Бонтарь К.О., Акимов В.М., Климанов Е.А., Сагинов Л.Д. Экспериментальное исследование оптической стойкости матрицы «смотрящего» типа на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ к воздействию лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм // Материалы электронной техники. 2007. № 2. С. 31 - 34.
12. Воскобойников Ю.Е., Белявцев В.Г. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97 – 105.
13. Можейко В.И., Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Адаптивный метод ранговой многоканальной фильтрации для подавления шумов в цветных изображениях // Известия Вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 8. С. 30 - 37.
14. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Межканальная градиентная реконструкция сигналов цветных цифровых изображений искаженных импульсными помехами // Автометрия. 2014. Т. 50. № 2. С. 22 - 30.
15. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Исследование точностных характеристик метода межканальной градиентной реконструкции цветных цифровых изображений // Автометрия. 2014. Т. 50. № 4. С. 59 - 66.
16. 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.
17. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Итерационные алгоритмы межканальной градиентной реконструкции многокомпонентных изображений, искаженных аппликативными помехами // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 4. С. 54 - 60.

18. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Метод межканальной градиентной реконструкции искаженных сигналов цветных цифровых изображений // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 13 – 16.
19. Самойлин Е.А., Шипко В.В. Метод различения случайных сигналов многокомпонентных изображений и импульсных помех на основе свойства межканальной избыточности // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 3. С. 13 - 16.
20. Самойлин Е.А. Алгоритмы оценивания импульсного шума в задачах цифровой фильтрации оптических изображений // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 42 - 46.
21. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
22. Самойлин Е.А., Шипко В.В., Трифонов П.А. Итерационный алгоритм восстановления цифровых изображений с адаптивным обнаружением импульсных помех // Материалы XIX Международной научной конференции «Радиолокация навигация связь». - Воронеж: Изд-во САКВОЕЕ, 2013. Т. 1. С. 182 - 189.

Статья поступила в редакцию 18.12.2018