

УДК 004.932.4

МЕТОД МЕЖКАНАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ЗАДАЧАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2013 г. Е. А. Самойлин, доктор техн. наук; В. В. Шипко, адъюнкт

Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

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

Предложен метод восстановления многокомпонентных цифровых изображений на основе предварительного адаптивного обнаружения импульсных помех и последующей их компенсации за счет свойства межканальной избыточности. Проведено численное исследование предложенного метода в широком диапазоне интенсивности импульсных помех, результаты которого свидетельствуют о повышении точности восстановления трехкомпонентных (цветных) изображений. Представлены примеры восстановления изображений с использованием известного и предлагаемого методов обработки.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, импульсные помехи, межканальная компенсация, многокомпонентные изображения.

Коды OCIS: 100.2000

Поступила в редакцию 20.03.2013

Введение

В настоящее время методы и алгоритмы обработки многокомпонентных (цветных) изображений широко используются в системах телекоммуникации, мониторинга, радиоастрономии, медицине и др. [1]. Использование цветовой компонент в обработке изображений обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, цвет является важным признаком, который часто облегчает распознавание и выделение объекта на изображении. Во-вторых, человек в состоянии различать тысячи различных оттенков цвета, и всего лишь порядка двух десятков оттенков серого. Второе обстоятельство особенно важно при визуальном анализе изображений.

Как известно [1–4], для многих систем с цифровой обработкой и преобразованием изображений характерно появление аппликативных импульсных помех (ИП), т.е. независимых

случайных искажений отдельных пикселей. Например, ИП могут возникать при ошибках оцифровки и квантования изображений (шум квантования), сбоях отдельных элементов оптико-электронных преобразователей и др. Обычно шум на цветном изображении имеет одинаковые характеристики в каждом цветовом канале, но иногда его влияние на каждом из каналов проявляется по-разному [1]. Такое возможно, например, в случае неисправности электроники одного из каналов.

К настоящему времени разработано немало методов борьбы с ИП, большинство из которых является развитием ранговой процедуры обработки [1–5]. Как правило, подавление помех на цветных изображениях происходит независимо в каждом цветовом канале. Поэтому все ранговые методы и алгоритмы восстановления полутоновых изображений могут быть применены покомпонентно в каждом отдельном канале при обработке цветных изображений. Между

тем, возникающая избыточность при переходе к многокомпонентным изображениям (в случае трех компонент R, G, B – цветным) открывает новые возможности по восстановлению потерянных вследствие воздействия ИП значений сигналов изображений. В частности, в случае искажения значения яркости элемента изображения в одном из каналов возможно оценить это значение по амплитуде яркости соответствующих элементов других каналов.

Цель работы – повышение точности восстановления искаженных помехами многокомпонентных цифровых изображений на основе свойства межканальной избыточности.

Постановка задачи восстановления многокомпонентных изображений

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

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

где $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$, m , n – количество строк и столбцов изображения соответственно, N – степень квантования, как правило $N = 8$, 2^N – число уровней квантования элементов изображения Λ .

Модель a -компонентного изображения, искаженного воздействием ИП, описывается выражением

$$\mathbf{X} = [x_{i,j}^1 \quad x_{i,j}^2 \quad \dots \quad x_{i,j}^a]^T, \quad (2)$$

где каждый канал $x_{i,j}^{1, \dots, a}$ содержит ИП

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

здесь $p(\lambda)$ – вероятность появления полезного сигнала $\lambda_{i,j}$ в ячейке с координатой (i, j) , $p(h)$ – вероятность появления помехи $h_{i,j}$ в ячейке с координатой (i, j) , которая не зависит ни от наличия

помех в других координатах, ни от исходного сигнала, т.е. $p(h) = \text{const} \forall i \in 1, \dots, m, j \in 1, \dots, n$, $h_{i,j}$ – значения искаженных элементов в цветовых компонентах изображения, являющиеся независимыми случайными величинами с некоторым законом яркостного распределения, соответствующими интервалу квантования (1)

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

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

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

Метод и реализующий его алгоритм межканальной компенсации импульсных помех

Предлагаемый метод межканальной компенсации ИП на многокомпонентных цифровых изображениях предполагает выполнение следующих этапов. Вначале осуществляется обнаружение ИП в каждом цветовом канале изображения. Затем происходит компенсация (т.е. замена) искаженных элементов одного канала неискаженными элементами других каналов. К примеру, искаженные элементы канала с компонентой $x_{i,j}^1$ компенсируются (заменяются) значениями соответствующих по положению элементов других компонент $x_{i,j}^2, \dots, x_{i,j}^a$. Причем выбор канала $(x_{i,j}^2, \dots, x_{i,j}^a)$, из которого будет взято значение яркости для компенсации потерянного в $x_{i,j}^1$ уровня, осуществляется на основе принципа минимума межканального расстояния между пространственными окрестностями соответствующих элементов, вычисляемых без учета яркости этого элемента. Далее следует повторная процедура оценки наличия помех в каждом канале и покомпонентное восстановление изображения ранговым алгоритмом.

Предложенный метод рассмотрим в виде алгоритма для случая трехкомпонентного цифрового изображения с компонентами R (красный), G (зеленый) и B (синий), которое обозначим в соответствии с выражением (2)

$$\mathbf{X} = [x_{i,j}^R \quad x_{i,j}^G \quad x_{i,j}^B]^T. \quad (6)$$

Шаг 1. Предварительное покомпонентное оценивание среднего значения яркости ИП. Проводится грубая оценка пространственного положения ИП на компонентах $x_{i,j}^R$, $x_{i,j}^G$, $x_{i,j}^B$,

изображения \mathbf{X} и вычисляется их средняя яркость. Для этого формируются матрицы $\hat{x}_{i,j}^{1R}$, $\hat{x}_{i,j}^{1G}$, $\hat{x}_{i,j}^{1B}$ значений яркости обнаруженных помех

$$\hat{x}_{i,j}^{1R,G,B} = \begin{cases} x_{i,j}^{R,G,B} & \text{при} \left| x_{i,j}^{R,G,B} - \left[\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} w_{i+p,j+q} \right] \right|_{\substack{w_{i=i[r],j=j[r]}=1 \\ w_{i \neq i[r],j \neq j[r]}=0}} \geq T \\ 0 & \text{при} \left| x_{i,j}^{R,G,B} - \left[\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} w_{i+p,j+q} \right] \right|_{\substack{w_{i=i[r],j=j[r]}=1 \\ w_{i \neq i[r],j \neq j[r]}=0}} < T \end{cases}, \quad (7)$$

где $w_{i,j}$ – весовые коэффициенты обнаружителя, $i[r]$, $j[r]$ – индексы заданной ранговой статистики, T – значение порога, выбираемое экспериментальным путем, $T = 55$, $p = (-P, \dots, 0, \dots, P)$, $q = (-Q, \dots, 0, \dots, Q)$ – размеры апертуры по i и j .

Далее формируются бинарные матрицы $\hat{x}_{i,j}^{2R}$, $\hat{x}_{i,j}^{2G}$, $\hat{x}_{i,j}^{2B}$ оценки помех

$$\hat{x}_{i,j}^{2R,G,B} = \begin{cases} 1 & \text{при} \hat{x}_{i,j}^{1R,G,B} \neq 0 \\ 0 & \text{при} \hat{x}_{i,j}^{1R,G,B} = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

После этого вычисляются средние яркости обнаруженных помех в каналах

$$\hat{h}_{i,j}^{(1)R,G,B} = \begin{cases} 1 & \text{при} V^H \left[\frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} \right] \leq x_{i,j}^{R,G,B} \\ 0 & \text{при} V^H \left[\frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} \right] > x_{i,j}^{R,G,B} \end{cases}, \quad (10)$$

где V^H – весовой коэффициент для верхнемодального обнаружителя, выбранный экспериментально, $V^H = 1,5$.

$$\hat{H}^{R,G,B} = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{x}_{i,j}^{1R,G,B} \right) \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{x}_{i,j}^{2R,G,B} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Шаг 2. Оценивание положения ИП в каждом цветовом канале R, G и B изображения. Поскольку ИП различны по модальности [1], то для оценивания их пространственного положения на цифровых изображениях используются алгоритмы обнаружения верхнемодальных, нижнемодальных, бимодальных и равномерных ИП.

Алгоритм обнаружения верхнемодальных ИП в каналах изображения описывается выражением

Алгоритм обнаружения нижнемодальных ИП в каждом из каналов имеет вид

$$\hat{h}_{i,j}^{(2)R,G,B} = \begin{cases} 1 & \text{при} V^L \left[\frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} \right] \geq x_{i,j}^{R,G,B} \\ 0 & \text{при} V^L \left[\frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} \right] < x_{i,j}^{R,G,B} \end{cases}, \quad (11)$$

где V^L – весовой коэффициент для нижнемо-
дального обнаружителя, выбранный экспери-
ментально, $V^L = 0,5$.

Алгоритм обнаружения ИП с равномерным
или бимодальным распределением яркости, осно-
ванный на разности центрального элемента апер-
туры с ее медианой, представляется выражением

$$\hat{h}_{i,j}^{(3)R,G,B} = \begin{cases} 1 & \text{при } \left| x_{i,j}^{R,G,B} - \left[\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} w_{i+p,j+q} \right] \right|_{\substack{w_{i=j[r],j=j[r]}=1 \\ w_{i \neq j[r],j \neq j[r]}=0}} \geq T \\ 0 & \text{при } \left| x_{i,j}^{R,G,B} - \left[\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q}^{R,G,B} w_{i+p,j+q} \right] \right|_{\substack{w_{i=j[r],j=j[r]}=1 \\ w_{i \neq j[r],j \neq j[r]}=0}} < T \end{cases} \quad (12)$$

На основе информации о значениях средней
яркости помех $\hat{H}^R, \hat{H}^G, \hat{H}^B$ (вычисленных по
формуле (9)) в R, G, B-каналах обнаружитель

принимает решение, какой из алгоритмов оце-
нивания (10)–(12) применить к конкретному
виду ИП

$$\hat{h}_{i,j}^{1R,G,B} = \begin{cases} \hat{h}_{i,j}^{(1)R,G,B} & \text{при } \hat{H}^{R,G,B} \in 0,6(2^N - 1), \dots, (2^N - 1) \\ \hat{h}_{i,j}^{(2)R,G,B} & \text{при } \hat{H}^{R,G,B} \in 0, \dots, 0,4(2^N - 1) \\ \hat{h}_{i,j}^{(3)R,G,B} & \text{при } \hat{H}^{R,G,B} \in 0,4(2^N - 1), \dots, 0,6(2^N - 1) \end{cases} \quad (13)$$

Шаг 3. Восстановление многокомпонент-
ных изображений с использованием межка-
нальной обработки. После процедур обна-
ружения ИП в каждом цветовом канале осу-
ществляется их компенсация на основе меж-

канальной избыточности, т.е. формирование
элементов $c_{i,j}^R, c_{i,j}^G, c_{i,j}^B$ R, G, B-компонент мно-
гокомпонентного изображения С. В канале R
компенсация происходит следующим обра-
зом:

$$c_{i,j}^R = \begin{cases} x_{i,j}^R & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^R = 0) \vee (\hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 1) \\ x_{i,j}^G, & \text{если } |\tilde{M}^R - M^G| < |\tilde{M}^R - M^B| \\ x_{i,j}^B, & \text{если } |\tilde{M}^R - M^G| > |\tilde{M}^R - M^B| \end{cases} \text{ при } \hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 0, \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_{i,j}^G & \text{при } \hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 1 \\ x_{i,j}^B & \text{при } \hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 0 \end{cases}$$

где символы \wedge и \vee означают логические операции “И” и “ИЛИ”,

$$M = \frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q} - \text{средняя яркость в апертуре,}$$

$$\tilde{M} = \frac{1}{[(2P+1)(2Q+1)]-1} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q x_{i+p,j+q} w'_{i+p,j+q} - \text{средняя яркость в апертуре без учета центрального элемента,}$$

$$w'_{i+p,j+q} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} - \text{весовой коэффициент.}$$

Смысл выражения (14) состоит в том, что если помехой поражен элемент с координатой (i, j) R-компоненты, то он заменяется элементом (i, j) -ой компоненты, в которой он не искажен. Причем если не искажены помехой оба i, j -ых элемента компонент G и B, то выбор ком-

поненты для компенсации осуществляется на основе принципа минимума расстояния между окрестностью компоненты R и соответствующими окрестностями G и B-каналов.

По аналогичному принципу осуществляется компенсация в канале G, имеющая вид

$$c_{i,j}^G = \begin{cases} x_{i,j}^G & \text{при } (\hat{h}1_{i,j}^G = 0) \vee (\hat{h}1_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1) \\ x_{i,j}^R, & \text{если } |\tilde{M}^G - M^R| < |\tilde{M}^G - M^B| \\ x_{i,j}^B, & \text{если } |\tilde{M}^G - M^R| > |\tilde{M}^G - M^B| \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \text{при } \hat{h}1_{i,j}^R = 0 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 0 \\ x_{i,j}^R & \text{при } \hat{h}1_{i,j}^R = 0 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1 \\ x_{i,j}^B & \text{при } \hat{h}1_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

В канале B компенсация оцененных на шагах 1 и 2 ИП происходит по аналогичному правилу

$$c_{i,j}^B = \begin{cases} x_{i,j}^B & \text{при } (\hat{h}1_{i,j}^B = 0) \vee (\hat{h}1_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1) \\ x_{i,j}^R, & \text{если } |\tilde{M}^B - M^R| < |\tilde{M}^B - M^G| \\ x_{i,j}^G, & \text{если } |\tilde{M}^B - M^R| > |\tilde{M}^B - M^G| \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \text{при } \hat{h}1_{i,j}^R = 0 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 0 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1 \\ x_{i,j}^R & \text{при } \hat{h}1_{i,j}^R = 0 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1 \\ x_{i,j}^G & \text{при } \hat{h}1_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 0 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1 \end{array} \right. \quad (16)$$

Шаг 4. Аналогично выражениям (7)–(13) осуществляется оценивание пространственного положения ИП на полученном изображении C, т.е. формирование бинарных матриц $\hat{h}2_{i,j}^{R,G,B}$. В основном это помехи, совпадающие по своему пространственному положению на изображении во всех цветовых каналах (при выполнении условий $\hat{h}1_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}1_{i,j}^B = 1$).

Шаг 5. Осуществляется покомпонентное восстановление сигналов изображения в локализованных на шаге 4 участках с наличием помех. Для восстановления выбран ранговый алгоритм на основе порядковых статистик, в частности, пространственно-избирательный медианный [5], реализующий построение изображения $\hat{\Lambda}$

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{R,G,B} = \begin{cases} \left[\sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q c_{i+p,j+q}^{R,G,B} w_{i+p,j+q} \right]_{\substack{w_i = \{l(r), j = j(r)\} = 1 \\ w_{i \neq l(r), j \neq j(r)} = 0}} & \text{при } \hat{h}2_{i,j}^{R,G,B} = 1 \\ x_{i,j}^{R,G,B} & \text{при } \hat{h}2_{i,j}^{R,G,B} = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

где $w_{i,j}$ – весовые коэффициенты фильтра.

На рис. 1 представлена структурная схема рассмотренного алгоритма восстановления многокомпонентных изображений с межканальной компенсацией ИП.

Результаты численных исследований

При численных исследованиях рассмотренного алгоритма были использованы разнообразные цифровые цветные изображения

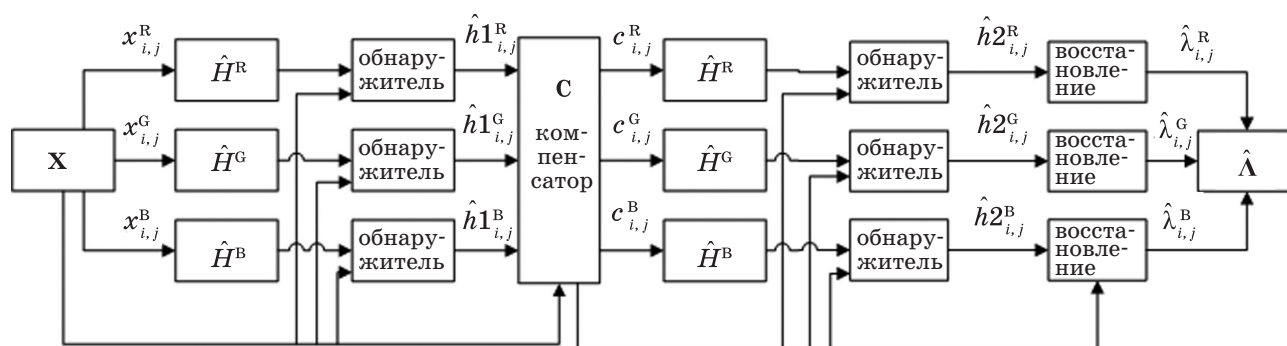


Рис. 1. Алгоритм восстановления цветных изображений с межканальной компенсацией ИП.

(с компонентами R, G, B). Перед обработкой изображения целенаправленно подвергались воздействию ИП с различными законами распределения яркости. Оценивание точности алгоритма восстановления проводилось в диапазоне вероятности появления ИП от 0 до 1. В качестве меры невязки изображений Λ и $\hat{\Lambda}$, т.е. ошибки восстановления, выбрано нормированное евклидово расстояние, вычисляемое в соответствии с выражением [6]

$$E = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^{R,G,B} - \lambda_{i,j}^{R,G,B})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j}^{R,G,B})^2 \right]^{-1/2}. \quad (18)$$

На рис. 2 представлены зависимости критерия (18) от вероятности (p) появления ИП для приведенного алгоритма на основе межканаль-

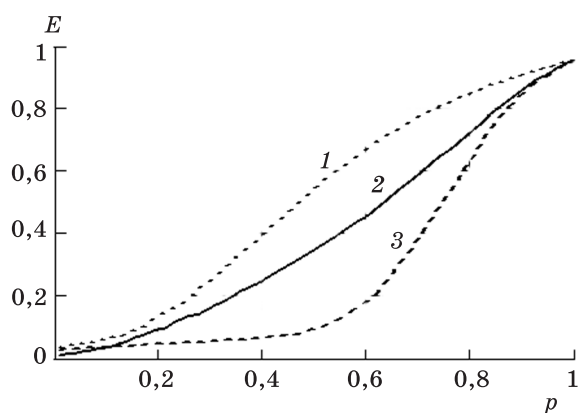


Рис. 2. Ошибка восстановления сигналов многокомпонентного изображения при медианной обработке с предварительной оценкой ИП [5] (1), межканальной компенсации с предварительной оценкой ИП (2), медианной обработке после предварительной межканальной компенсации (3).

ной компенсации, а также пространственно-избирательного медианного алгоритма восстановления [5]. Из рисунка следует, что алгоритм восстановления многокомпонентных изображений на основе межканальной компенсации является более эффективным по сравнению с медианным алгоритмом во всем диапазоне вероятности появления помех. На интервале наличия помех от 0 до 0,6 наблюдается достаточно низкая ошибка восстановления предлагаемого алгоритма. Также следует отметить, что даже сама процедура межканальной компенсации точнее восстанавливает изображение по сравнению с классической пространственно-избирательной медианной фильтрацией [5].

На рис. 3 для визуального сравнения приведены результаты обработки цветного цифрового аэрофотоснимка с вероятностью наличия нижнемодальных помех в каждом цветовом канале 0,4.

Результаты обработки показывают преимущество введения процедуры межканальной компенсации при восстановлении цветных цифровых изображений. На изображениях, обрабатываемых предложенным алгоритмом, наблюдается потускнение цветов, но, тем не менее, с высоким качеством сохраняются контуры всех объектов. Наибольшую эффективность данный метод восстановления проявляет в цветных изображениях с высокой межканальной корреляцией, т.е. где значения яркостей в каждом цветовом канале имеют небольшие отличия. Такими изображениями, к примеру, являются аэрокосмические снимки, где отсутствуют резкие цветовые перепады. К тому же, как известно [1], потери в цвете можно устранить последующей коррекцией цвета и яркости.

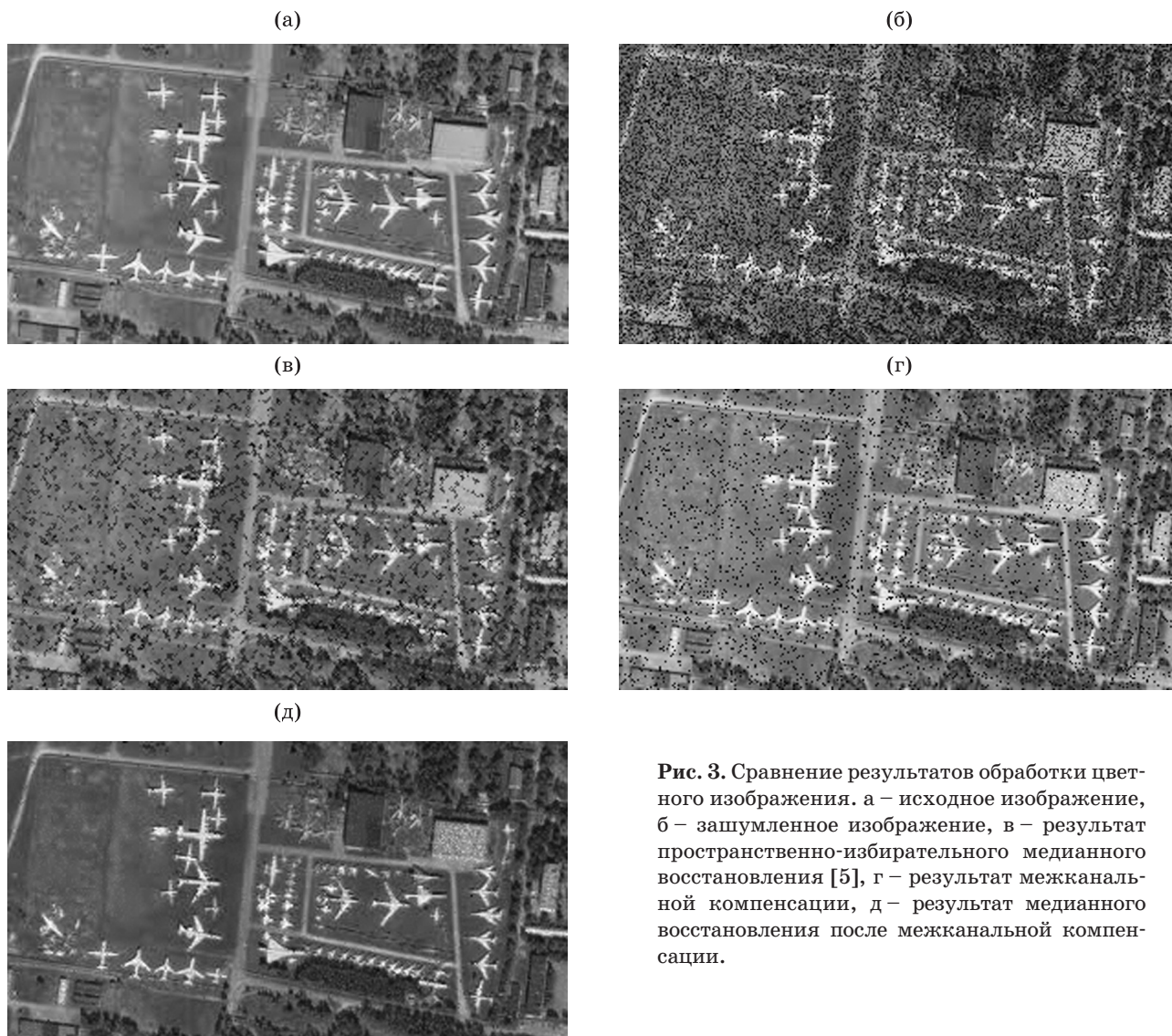


Рис. 3. Сравнение результатов обработки цветного изображения. а – исходное изображение, б – зашумленное изображение, в – результат пространственно-избирательного медианного восстановления [5], г – результат межканальной компенсации, д – результат медианного восстановления после межканальной компенсации.

Заключение

Предложенный метод обработки многокомпонентных цифровых изображений, искаженных импульсными помехами, позволяет повысить точность восстановления потерянных значений элементов за счет свойства межканальной избыточности. Новиз-

на работы заключается в представленном впервые методе межканальной компенсации ИП на цветных цифровых изображениях, а также его численных исследованиях. Приведенные алгоритмы достаточно легко реализуемы программно и аппаратно и могут быть использованы в различных системах цифровой обработки оптических изображений.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г.Дж., Зохар Ш., Юстуссон Б.И., Тянь Ш.-Г. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
3. Самойлин Е.А. Пространственно-избирательная фильтрация изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 12. С. 7–12.
4. Самойлин Е.А. Алгоритмы оценивания импульсного шума в задачах цифровой фильтрации оптических изображений // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 42–46.
5. Самойлин Е.А. Алгоритмы восстановления цифровых оптических изображений, искаженных импульсными шумами // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 50–55.
6. Самойлин Е.А. Численные методы анализа эффективности процедур фильтрации изображений // Математическое моделирование. 2008. Т. 20. № 2. С. 113–121.