

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932.4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА МЕЖКАНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ЦВЕТНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Е. А. Самойлин, В. В. Шипко**

*Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а  
E-mail: shipko.v@bk.ru*

Обобщены результаты вычислительных экспериментов по исследованию точностных характеристик межканальной градиентной реконструкции сигналов цветных цифровых изображений, искажённых некоррелированными между каналами импульсными помехами с различными законами яркостного распределения. Приведены примеры межканальной реконструкции цветных цифровых изображений по разным наборам градиентных оценок.

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

**Введение.** Как известно [1, 2], одной из основных задач цифровой обработки визуальной информации является фильтрация изображений от помех, которые препятствуют системам технического зрения осуществлять сегментацию изображений, распознавать объекты и в целом снижают их визуальное восприятие. Отмечено, что чаще всего возникающие на изображениях помехи носят аддитивный и импульсный характер. Важная особенность импульсных помех (ИП) — априорная неопределённость относительно их амплитуды и пространственного положения, что затрудняет разработку алгоритмов восстановления изображений. Например, медианный фильтр (МФ), обладающий достаточной робастностью [3], не в состоянии удовлетворительно работать при площади ИП больше половины площади апертуры фильтра. При этом известно [1, 2], что увеличение размеров апертуры приводит к размытию мелких деталей изображения.

Многие условия регистрации и обработки цветных цифровых изображений становятся причиной появления некоррелированных (либо с низкой корреляцией) ИП между цветовыми каналами. Такое возможно, например, в случае неисправности электроники одного из каналов. При обработке цветных цифровых изображений свою эффективность в качестве фильтрации ИП показал метод межканальной градиентной реконструкции (МГР) [4], основанный на допущении равенства локальных градиентов соответствующих координат в каждом канале и восстановлении потерянных сигналов сбойной компоненты по полученным оценкам от соседних каналов.

Цель данной работы — исследование точностных характеристик межканальной градиентной реконструкции искажённых элементов цветных цифровых изображений.

**Математические модели сигналов цветных цифровых изображений и импульсных помех.** Модель исходного оцифрованного по строкам  $i$  и столбцам  $j$  цветного изображения  $\Lambda$  имеет вид

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

где  $R, G, B$  — красная, зелёная и синяя компоненты;  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ;  $m, n$  — число строк и столбцов изображения;  $N$  — степень квантования элементов изображения  $\mathbf{\Lambda}$ ;  $\lambda_{i,j}^{R,G,B}$  — элементы компонент  $R, G, B$  соответственно.

Модель изображения, искажённого воздействием ИП, описывается выражением

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^R \\ \mathbf{X}^G \\ \mathbf{X}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,j}^R \in [0, \dots, 2^N - 1] \\ x_{i,j}^G \in [0, \dots, 2^N - 1] \\ x_{i,j}^B \in [0, \dots, 2^N - 1] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где каждый канал  $\mathbf{X}^{R,G,B}$  содержит ИП

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

В выражении (3)  $p(\lambda)$  — вероятность появления полезного сигнала  $\lambda_{i,j}^{R,G,B}$  в ячейке с координатой  $(i, j)$ ;  $p(h)$  — вероятность появления помехи в ячейке с координатой  $(i, j)$ , не зависящая ни от наличия помех в других координатах, ни от исходного сигнала;  $h_{i,j}^{R,G,B}$  — значения искажённых элементов в цветовых компонентах изображения, являющиеся независимыми случайными величинами с неизвестным законом яркостного распределения, которые соответствуют интервалу квантования (1), (2):

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

Как правило, задача реконструкции цветных цифровых изображений, искажённых ИП, формулируется в виде синтеза алгоритма обработки зашумлённого изображения  $\mathbf{X}$ , позволяющего сформировать такую оценку  $\hat{\mathbf{\Lambda}}$  изображения, которая была бы наиболее близка к её истинным значениям. Другими словами, необходимо определить оператор  $\hat{\mathbf{\Lambda}} = F[\mathbf{X}]$ , при котором минимизировалась бы невязка  $\|\hat{\mathbf{\Lambda}} - \mathbf{\Lambda}\| \rightarrow \min_F$ .

**Сущность метода межканальной градиентной реконструкции.** Введём понятие локальных градиентов цветовых каналов  $R, G$  и  $B$ , описываемых соответственно выражениями [4]

$$g_{i\pm p, j\pm q}^R = \lambda_{i,j}^R - \lambda_{i\pm p, j\pm q}^R; \quad g_{i\pm p, j\pm q}^G = \lambda_{i,j}^G - \lambda_{i\pm p, j\pm q}^G; \quad g_{i\pm p, j\pm q}^B = \lambda_{i,j}^B - \lambda_{i\pm p, j\pm q}^B, \quad (5)$$

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

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

Тогда оценки сбойного элемента одной компоненты по двум соседним можно определить из следующих выражений:

$$(\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)})_{t^{a(b)}} = x_{i\pm p, j\pm q}^a + g_{i\pm p, j\pm q}^b, \quad (\hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)})_{t^{a(c)}} = x_{i\pm p, j\pm q}^a + g_{i\pm p, j\pm q}^c, \quad p, q \neq 0, \quad (6)$$

где  $a$  — 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 « $\vee$ » означает логическую операцию «ИЛИ»;  $t^{a(b)}$ ,  $t^{a(c)}$  — индексы оценок из общего количества оценок по компонентам,  $t^{a(b)}, t^{a(c)} = 1, \dots, (2P+1)(2Q+1) - 1$ . В выражении (6) переменные  $p$  и  $q$  задаются одновременно не равными нулю, в результате чего исключается участие центрального элемента в формировании градиентных оценок.

В целях исключения избыточности при каждой оценке сигналов одной из компонент по другой необходимо ввести ограничение на интервале квантования яркости:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)} = \begin{cases} (x_{k,s}^a + g_{k,s}^b) & \text{при } 0 \leq (x_{k,s}^a + g_{k,s}^b) \leq (2^N - 1), \\ (2^N - 1) & \text{при } (x_{k,s}^a + g_{k,s}^b) > (2^N - 1), \\ 0 & \text{при } (x_{k,s}^a + g_{k,s}^b) < 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $k, s$  — координаты одного из элементов изображения в скользящем окне с центром  $i, j$  в каналах  $R, G, B$ .

При этом конечную оценку сбойной компоненты по двум соседним можно определить как медиану локальных оценок (6):

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b,c)} = \text{med} \left[ (\hat{\lambda}_{i,j}^{a(b)})_{t^{a(b)}}, (\hat{\lambda}_{i,j}^{a(c)})_{t^{a(c)}} \right] \quad (8)$$

( $\text{med}[\cdot]$  — оператор вычисления медианы).

**Исследование точностных характеристик межканальной реконструкции сбойного канала цветного изображения.** *Исследование чувствительности пространственно-инвариантной межканальной градиентной реконструкции к параметрам импульсных помех.* Для исследования чувствительности межканальной градиентной реконструкции выберем три наиболее часто встречающихся на практике закона распределения яркости ИП (равномерное, бимодальное и модальное гауссовоподобное [1–3]).

Вычислительные исследования проводились на разнообразных цветных ( $RGB$ -компонентных) цифровых оптических изображениях с параметрами  $m \times n = 640 \times 640$  и  $N = 8$  при наличии ИП в одном из цветовых каналов. Приводимые далее результаты усреднены по выборке более чем из 100 самых различных цифровых изображений с указанными параметрами.

Перед обработкой изображения целенаправленно подвергались воздействию ИП в канале  $R$  в диапазоне вероятности их появления  $p(h) = 0, \dots, 0,8$ . В качестве критерия различия изображений  $\Lambda^R$  и  $\hat{\Lambda}^R$ , т. е. ошибки восстановления сигналов в канале  $R$ , выбрана среднеквадратическая ошибка (СКО) [5]

$$\sigma^R = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^R - \lambda_{i,j}^R)^2}. \quad (9)$$

На рис. 1,  $a$ — $c$  представлены зависимости СКО (9) от вероятности наличия ИП с различными законами распределения яркости для инвариантных по пространству изображения алгоритмов МГР и МФ с разными размерами апертуры (кривые 1 — зашумлённое изображение; кривые 2–4 — результат работы МФ с апертурами  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ; кривые 5–7 — МГР с апертурами  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ). Анализ рисунка показывает, что МГР даже при пространственно-инвариантной обработке эффективно устраняет ИП. Для МГР расширение апертуры фильтра при увеличении помеховых элементов в цветовом канале изображения положительно влияет на точность восстановления искажённого сигнала изображения.

На рис. 2 представлена зависимость СКО при работе алгоритмов МГР и МФ от параметров, определяющих размер апертуры ( $P, Q$ ). Очевидно, что с увеличением уровня ИП требуется ещё больший размер апертуры для МГР, так как с ростом апертуры возрастает и количество возможных оценок сбойного элемента цветового канала изображения, что

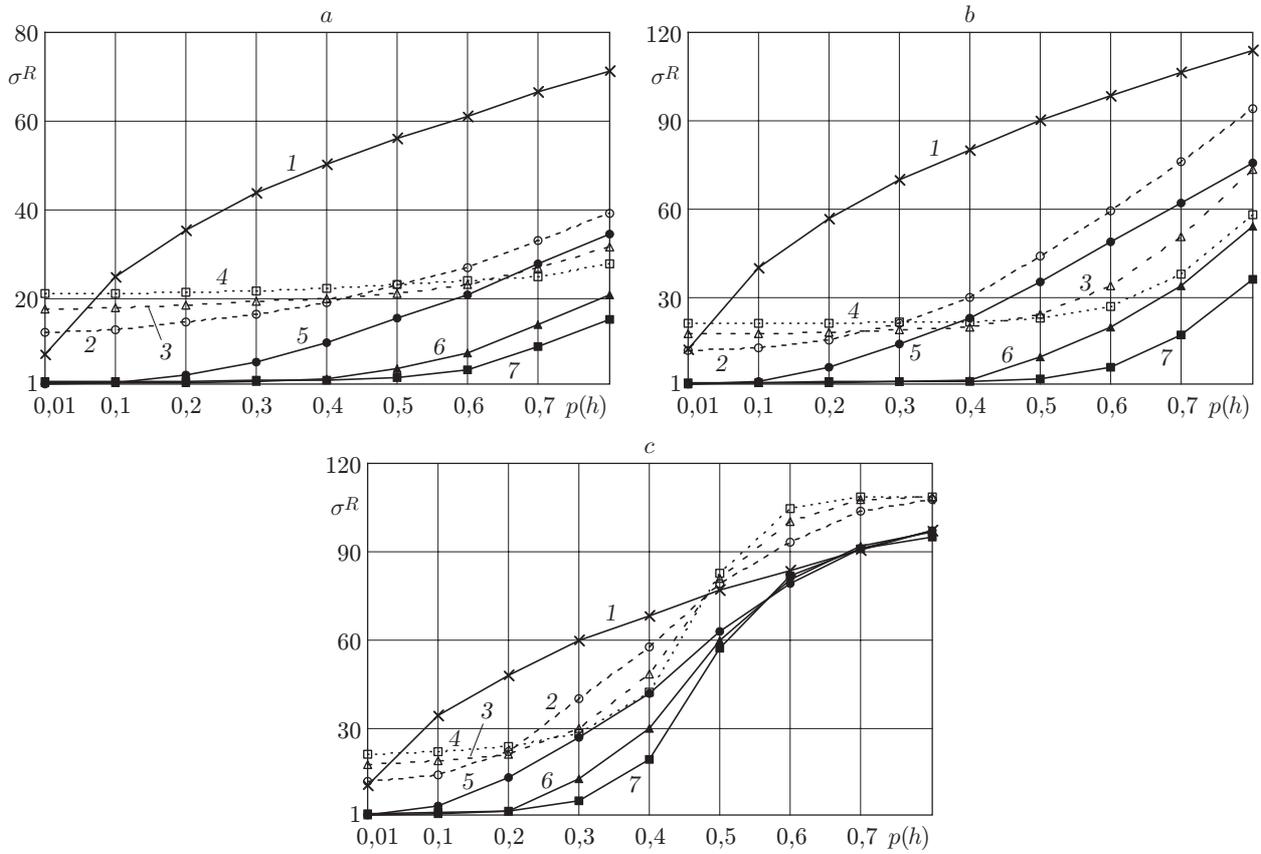


Рис. 1. Ошибки восстановления изображения пространственно-инвариантными алгоритмами при наличии ИП: *a* — с равномерным, *b* — бимодальным, *c* — нижнемодальным законами распределения яркости

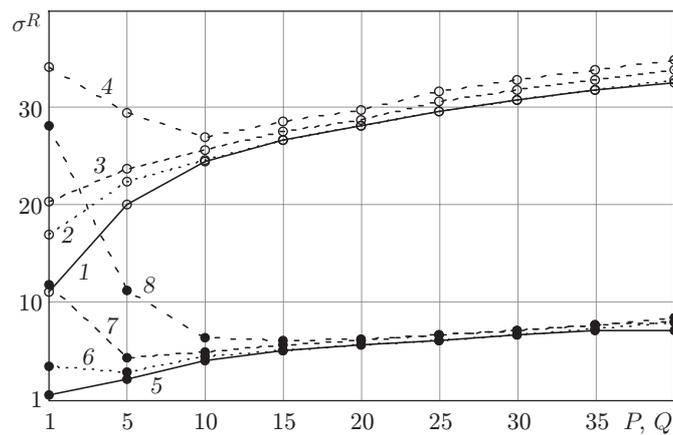


Рис. 2. Ошибки восстановления: кривая 1 — МФ незашумлённого изображения; кривые 2–4 — МФ при  $p(h) = 0,3, 0,5, 0,8$ ; кривая 5 — МГР незашумлённого изображения; кривые 6–8 — МГР при  $p(h) = 0,3, 0,5, 0,8$

$p(h)$	$P, Q$	$p(h)$	$P, Q$
0,1	1	0,5	5
0,2	2	0,6	7
0,3	3	0,7	9
0,4	4	0,8	12

впоследствии приведёт к более качественному визуальному эффекту. При этом сама зависимость в случае зашумлённого изображения является экстремальной (через минимум). В целом анализ результатов, приведённых на рис. 2, показал, что для получения наименьшей ошибки восстановления (9) можно руководствоваться правилом выбора размера апертуры в соответствии с таблицей.

Между тем для традиционного МФ при увеличении апертуры вносятся ещё бóльшие дополнительные искажения.

*Исследование зависимости градиентной ошибки межканальной оценки от пространственного расстояния между элементами градиента.* Как указано выше, допущением метода МГР является предположение о равенстве локальных градиентов:  $g_{i\pm p, j\pm q}^R \approx g_{i\pm p, j\pm q}^G \approx g_{i\pm p, j\pm q}^B$ . Рассмотрим, насколько критичным является такое допущение для метода МГР. Введём понятие градиентной ошибки. Суммарную градиентную ошибку для каждого элемента цветного изображения  $\Lambda$  можно представить в следующем виде:

$$\delta_{i,j} = \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q \left( \sqrt{\frac{(g_{i\pm p, j\pm q}^a - g_{i\pm p, j\pm q}^b)^2 + (g_{i\pm p, j\pm q}^a - g_{i\pm p, j\pm q}^c)^2 + (g_{i\pm p, j\pm q}^b - g_{i\pm p, j\pm q}^c)^2}{(2P+1)(2Q+1) - 1}} \right). \quad (10)$$

При этом общая нормированная градиентная ошибка для всего цветного изображения будет иметь вид

$$\delta = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \delta_{i,j}. \quad (11)$$

Зависимость общей градиентной ошибки (11) от размера апертуры фильтра (параметров  $P, Q$ ) и интенсивности ИП на цветных изображениях представлена на рис. 3. Как видно из рисунка, для незашумлённого изображения с увеличением числа элементов окрестности градиентная ошибка незначительно возрастает (кривая 5). Отсюда следует, что чем больше пространственное расстояние между восстанавливаемым элементом и элементами, по которым определяется межканальная оценка, тем больше градиентная ошибка (11). Это значит, что с увеличением размера апертуры происходит незначительная потеря точности восстановления. Между тем при переходе к зашумлённым изображениям рассматриваемая ошибка для изображений с различной вероятностью наличия ИП  $p(h)$  с равномерным распределением значений яркости в одном из цветовых каналов (кривые 1–4 на рис. 3) имеет экстремальный (через максимум) характер. При этом наблюдается уменьшение градиентной ошибки с увеличением размера апертуры. Кроме того, чем больше уровень помех, тем характер зависимости более убывающий.

На рис. 4 для визуального сравнения представлены результаты обработки  $R$ -компоненты изображения, искажённого ИП с вероятностью наличия 0,4 и равномерным законом распределения яркости, пространственно-инвариантными алгоритмами МФ и МГР с разными размерами апертуры фильтра. Видно, что при МГР с увеличением размера

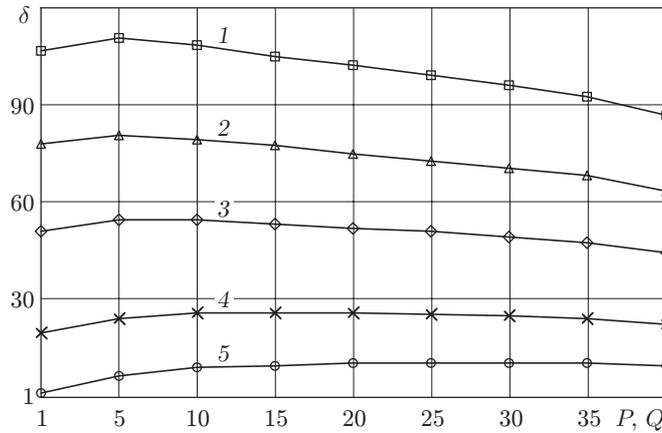


Рис. 3. Градиентная ошибка цветных изображений: кривые 1–4 —  $p(h) = 0,1, 0,3, 0,5, 0,8$  в R-канале; кривая 5 — отсутствие помех во всех цветовых каналах

апертуры фильтра ИП устраняются более эффективно, при этом мелкоразмерные детали и перепады яркости сохраняются с высокой точностью. Другими словами, влияние градиентной ошибки при увеличении расстояния между оценочными элементами ничтожно по сравнению с влиянием амплитуды импульсной помехи.

*Исследование чувствительности пространственно-избирательной межканальной градиентной реконструкции к параметрам импульсных помех.* Пространственная избирательность [6] алгоритмов МГР заключается в предварительном формировании бинарных матриц оценок положения искажённых сигналов каждой компоненты  $\hat{h}_{i,j}^{R,G,B}$  и применении фильтра исключительно по координатам помеховых элементов, на что указывают оценки  $\hat{h}_{i,j}^{R,G,B} = 1$ .

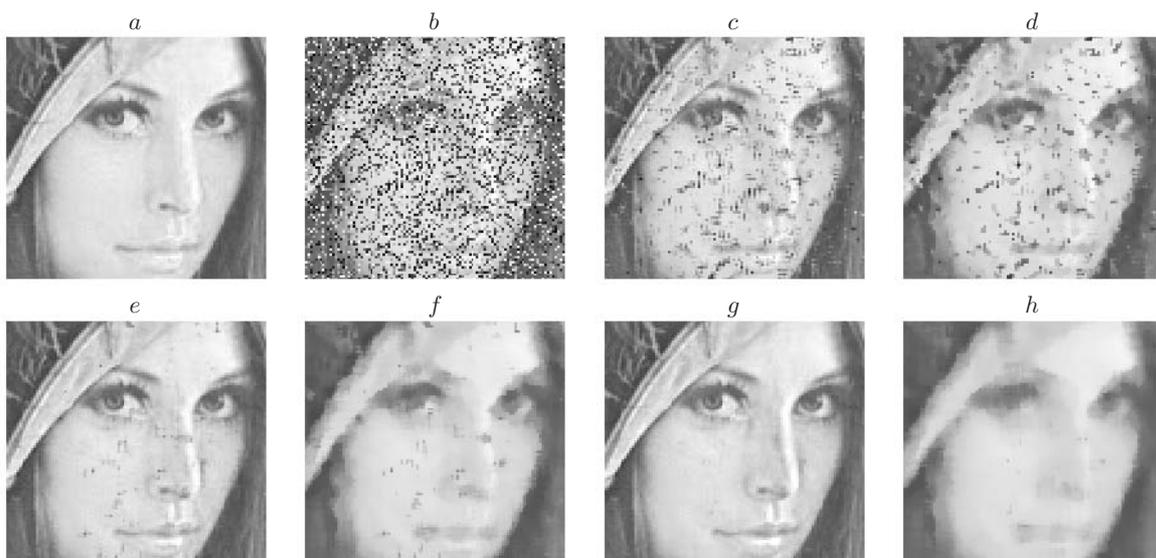


Рис. 4. Результаты восстановления R-канала изображения: a — исходное изображение; b — искажённое ИП изображение; c — МГР с апертурой  $3 \times 3$ ; d — МФ с апертурой  $3 \times 3$ ; e — МГР с апертурой  $5 \times 5$ ; f — МФ с апертурой  $5 \times 5$ ; g — МГР с апертурой  $7 \times 7$ ; h — МФ с апертурой  $7 \times 7$

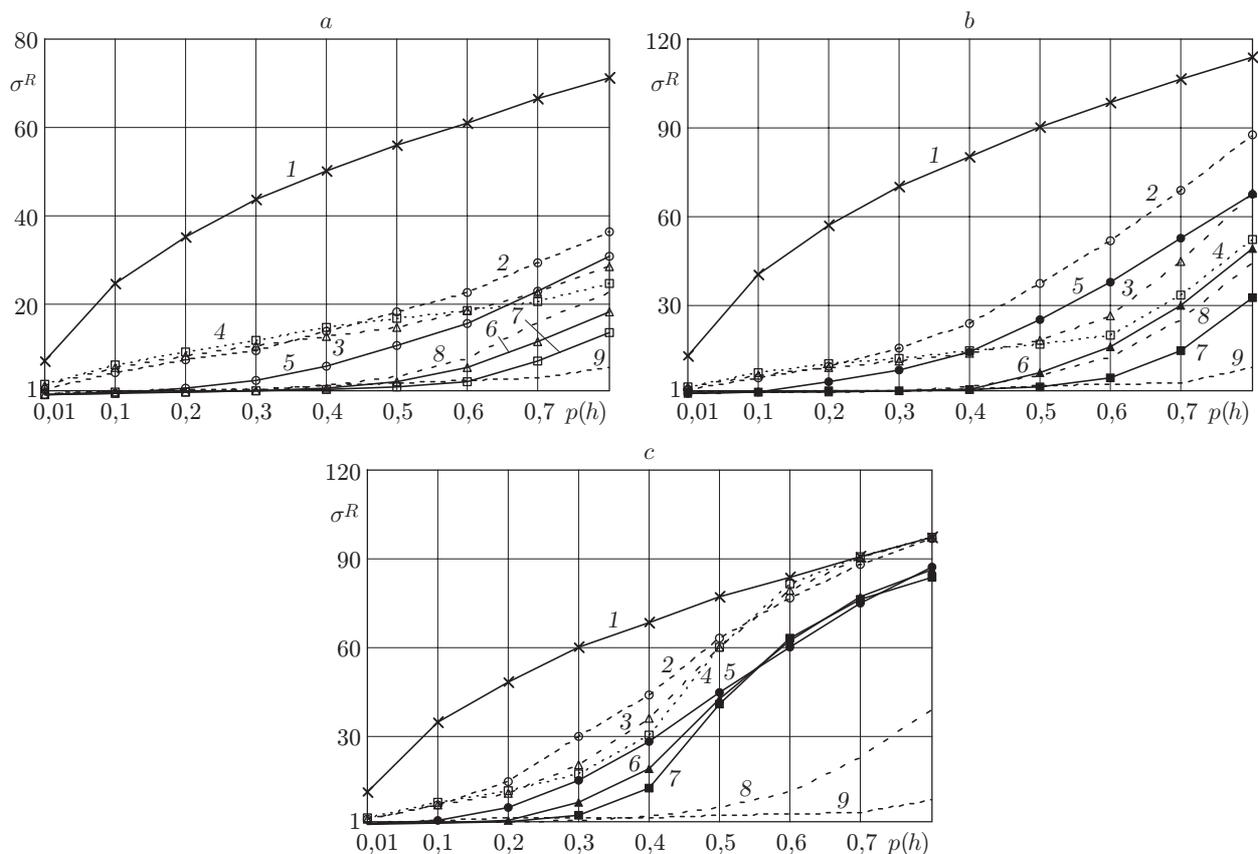


Рис. 5. Ошибки восстановления изображения пространственно-избирательными алгоритмами при наличии ИП: *a* — с равномерным, *b* — бимодальным, *c* — нижнемодальным законами распределения яркости

На рис. 5, *a—c* представлены зависимости ошибки (9) от вероятности наличия ИП с различными законами распределения яркости для пространственно-избирательных алгоритмов МГР с предварительной оценкой положения ИП на изображении. Предварительная оценка наличия ИП выполнялась идеальным обнаружителем с целью показать потенциальную точность восстановления. Обозначения кривых 1–7 аналогичны обозначениям кривых на рис. 1. Кривые 8, 9 приведены для МГР по выборке оценок  $t^{R(G)}, R^{(B)} = 1, \dots, ((2P+1)(2Q+1)) - 1 - \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — число, соответствующее помеховым совпадениям  $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^R = 1 \wedge (\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^G = 0 \vee \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^B = 0)$  за исключением центрального элемента; символ « $\wedge$ » означает логическую операцию «И» (кривая 8 характеризует апертуру фильтра  $3 \times 3$ , кривая 9 — апертуру фильтра  $5 \times 5$ ).

Сравнительный анализ рис. 1 и 5 показывает, что процедуры пространственной избирательности повышают точность восстановления сигналов, искажённых ИП. Исключение помеховых сигналов из выборки межканальных оценок также способствует повышению эффективности работы алгоритмов МГР. Пространственная избирательность при МГР позволяет повысить точность восстановления изображений даже при высоком уровне помех, поэтому целесообразно использовать именно этот класс алгоритмов МГР. Из рис. 1, 5 также следует, что при восстановлении изображений, искажённых ИП с различными законами яркостного распределения, ошибки алгоритма МГР являются сопоставимыми. Таким образом, предложенные алгоритмы МГР — достаточно универсальны к отклонениям таких параметров ИП, как закон их распределения и интенсивность появления.

**Заключение.** Как показали результаты численных исследований, использование межканальной градиентной реконструкции в задачах фильтрации ИП на цветных изображениях позволяет с высокой точностью восстанавливать информацию о потерянных полезных сигналах. Между тем основной недостаток МГР — невозможность фильтрации ИП, коррелированных между всеми цветовыми каналами изображения. Поэтому для реализации МГР требуется, чтобы, как минимум, один из каналов был «свободен» от помех. Предположительно преодоление этой проблемы возможно при комбинировании МГР с МФ [4].

Приведённые результаты вычислительных исследований могут оказаться полезными при создании систем обработки изображений, основанных на использовании свойства межканальной избыточности. Дальнейшие исследования могут быть направлены на обобщение метода МГР для мульти- и гиперспектральных изображений, имеющих большее число компонент.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Сойфер В. А., Гашников М. В., Глумов Н. И. и др. Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2001. 784 с.
3. Хуанг Т. С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г. Дж. и др. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
4. Самойлин Е. А., Шипко В. В. Межканальная градиентная реконструкция цветных изображений, искажённых импульсными помехами // Автометрия. 2014. **50**, № 2. С. 22–30.
5. Самойлин Е. А. Критерии оценивания качества фильтрации импульсных шумов на изображениях // Автометрия. 2006. **42**, № 4. С. 25–35.
6. Самойлин Е. А. Пространственно-избирательная фильтрация изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. **49**, № 12. С. 7–12.

*Поступила в редакцию 19 августа 2013 г.*

---