УДК 004.932.4

МЕЖКАНАЛЬНАЯ ГРАДИЕНТНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЁННЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ ПОМЕХАМИ

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

Предложен алгоритм реконструкции искажённых импульсными помехами сигналов компонент цветного цифрового изображения за счёт межканальной избыточности. Полученные результаты численных исследований свидетельствуют о преимуществе межкомпонентной градиентной реконструкции перед медианной фильтрацией в точности восстановления потерянных или искажённых элементов цветного изображения. Показана эффективность представленного алгоритма на примере обработки 3-компонентного цветного цифрового изображения.

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

Введение. Цифровая обработка изображений является одной из наиболее стремительно развивающихся областей техники. Известно множество алгоритмов и методов цифровой обработки изображений [1–8]. Отдельным классом задач считается обработка цветных цифровых изображений. Это могут быть как обычные оптические RGB-компонентные, так и мультиспектральные изображения, где каждый отдельный канал несёт цветовую информацию об объекте и совокупность цветовых компонент даёт полную картину происходящего. В области обработки цветных изображений наиболее актуальны вопросы фильтрации, сегментации, распознавания образов [1]. В данной работе рассматривается подавление импульсных помех (ИП) на цветных изображениях.

Как известно [1–4], к ИП относятся независимые случайные искажения отдельных элементов. Импульсные помехи могут возникать при ошибках оцифровки и квантования изображений, сбоях отдельных элементов оптико-электронных преобразователей и т. д. На цветном изображении помехи могут иметь одинаковые характеристики в каждом цветовом канале, но иногда они влияют на цветовые каналы по-разному. Такое возможно, например, в случае неисправности электроники одного из каналов.

Кроме того, известно, что наиболее приемлемыми процедурами фильтрации ИП являются алгоритмы на основе порядковых статистик, в частности алгоритм медианной фильтрации. Медианный фильтр представляет собой локальный нелинейный фильтр [2], выход которого определяется как медиана элементов, попавших в его апертуру. В работе [4] приведены векторные медианные фильтры, показывающие своё преимущество в обработке цветных изображений. Тем не менее медианная фильтрация не в состоянии всегда точно восстановить значение потерянного сигнала вследствие своей ограниченности только выборкой элементов апертуры фильтра, а также при преобладающем числе сбойных элементов в апертуре [2]. Между тем возникающая избыточность при переходе к цветным изображениям открывает новые возможности для восстановления потерянных вследствие воздействия помех значений сигналов изображений. В частности, в случае искажения значения яркости элемента изображения в одном из каналов возможно оценить это значение по амплитудным перепадам яркости соответствующих элементов других каналов.

Цель работы — повышение точности реконструкции искажённых элементов цветных цифровых изображений за счёт свойства межканальной избыточности.

Постановка задачи восстановления цветных изображений. Используемая модель исходного оцифрованного по строкам i и столбцам j цветного изображения $\mathbf{\Lambda}$ имеет вид

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}^R \\ \mathbf{\Lambda}^G \\ \mathbf{\Lambda}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{i,\,j}^R \in [0, \ldots, 2^N - 1] \\ \lambda_{i,\,j}^G \in [0, \ldots, 2^N - 1] \\ \lambda_{i,\,j}^B \in [0, \ldots, 2^N - 1] \end{bmatrix}. \tag{1}$$

Здесь R, G, B — красная, зелёная и синяя компоненты соответственно; $i = 1, \ldots, m$, $j = 1, \ldots, n$ (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.

Модель такого 3-компонентного изображения, искажённого воздействием ИП, описывается выражением

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^R \\ \mathbf{X}^G \\ \mathbf{X}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,\,j}^R \in [0, \ldots, 2^N - 1] \\ x_{i,\,j}^G \in [0, \ldots, 2^N - 1] \\ x_{i,\,j}^B \in [0, \ldots, 2^N - 1] \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Каждый канал $\mathbf{X}^{R,\,G,\,B}$ (2) содержит ИП:

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

Здесь $p(\lambda)$ — вероятность появления полезного сигнала $\lambda_{i,\,j}^{R,\,G,\,B}$ в ячейке с координатой (i, j); $p(h)$ — вероятность появления помехи $h_{i,\,j}^{R,\,G,\,B}$ в ячейке с координатой (i, j), которая не зависит ни от наличия помех в других координатах, ни от исходного сигнала, т. е. $p(h) = \mathrm{const}\, \forall i \in 1, \ldots, m,\ j \in 1, \ldots, n$; $h_{i,\,j}^{R,\,G,\,B}$ — значения искажённых элементов в цветовых компонентах изображения, являющиеся независимыми случайными величинами с неизвестным законом яркостного распределения, соответствующие интервалу квантования (1), (2):

$$h_{i,\,j}^{R,\,G,\,B} = \mathrm{rnd}[0, \ldots, 2^N - 1]. \tag{4}$$

Требуется разработать алгоритм реконструкции зашумлённого изображения $\mathbf{X}$, который позволит сформировать оценку $\hat{\mathbf{\Lambda}}$, наиболее близкую к её истинным значениям:

$$\|\hat{\mathbf{\Lambda}} - \mathbf{\Lambda}\| \to \min, \tag{5}$$

где $\|\cdot\|$ — векторная норма.

Алгоритм межканальной градиентной реконструкции искажённых сигналов. Обозначим $g_{k,\,s}^R = \lambda_{i,\,j}^R - \lambda_{k,\,s}^R$, $g_{k,\,s}^G = \lambda_{i,\,j}^G - \lambda_{k,\,s}^G$, $g_{k,\,s}^B = \lambda_{i,\,j}^B - \lambda_{k,\,s}^B$ и будем называть $g_{k,\,s}^{R,\,G,\,B}$ далее однонаправленными градиентами компонент R, G и B, где k, s — координаты любого (случайного) элемента изображения в скользящем окне с центром i, j в каналах R, G, B.

Примем допущение о том, что однонаправленные градиенты компонент R, G, B приблизительно равны: $g_{k,s}^R \approx g_{k,s}^G \approx g_{k,s}^B$. Данное допущение, как показали исследования, справедливо для многих реальных цветных цифровых изображений.

Тогда при восстановлении скользящей апертурой с размерами $p = (0, \ldots, P)$ по i и $q = (0, \ldots, Q)$ по j возможен следующий алгоритм градиентной реконструкции сбойных сигналов компонент R, G, B.

На первом этапе осуществляется оценка пространственного положения ИП в каждом канале. Поскольку закон распределения яркости ИП является неизвестным, то можно использовать ранговые алгоритмы обнаружения [5, 6]. Эти обнаружители формируют бинарные матрицы оценок положения искажённых сигналов каждой компоненты:

$$\hat{h}_{i,j}^{R,G,B} = \begin{cases} 1 & \text{при наличии ИП}, \\ 0 & \text{при отсутствии ИП}. \end{cases} \tag{6}$$

На следующем этапе реализуется межканальная реконструкция обнаруженных сбойных элементов изображения. В случае если $(\hat{h}_{i,j}^R = 0) \vee (\hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 1)$, оценке $\hat{\lambda}_{i,j}^R$ присваивается значение $x_{i,j}^R$. Символы «$\vee$», «$\wedge$» означают логические операции ИЛИ и И. В случае когда искажён i, j-й сигнал компонент R и B при неискажённом i, j-м элементе компоненты G $(\hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 1)$, оценка $\hat{\lambda}_{i,j}^R$ рассчитывается на основе локальных градиентов компоненты G согласно следующему правилу.

По значениям незашумлённых элементов в апертуре изображения (на которые указывают оценки $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^G = 0 \wedge \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^R = 0$) формируются $z^{R(G)} = ((2P+1)(2Q+1)) - 1 - \varepsilon^{R(G)}$ локальных градиентов канала G, где $\varepsilon^{R(G)}$ — число, соответствующее помеховым совпадениям $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^G = 1 \vee \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^R = 1$, не считая центрального элемента:

$$g_{i\pm p, j\pm q}^G = x_{i,j}^G - x_{i\pm p, j\pm q}^G, \quad p, q \neq 0. \tag{7}$$

Далее формируются $z^{R(G)}$ оценок сбойного элемента компоненты R по компоненте G:

$$(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G)})_{t^{R(G)}} = x_{i\pm p, j\pm q}^R + g_{i\pm p, j\pm q}^G, \quad p, q \neq 0. \tag{8}$$

Здесь $t^{R(G)}$ — индекс оценки из общего количества оценок компоненты R по G, $t^{R(G)} = 1, \ldots, z^{R(G)}$.

Общая оценка компоненты R по компоненте G имеет следующий вид:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G)} = \mathrm{med}\Big[(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G)})_{t^{R(G)}}\Big], \tag{9}$$

где $\mathrm{med}[\cdot]$ — оператор вычисления медианы.

В случае если $z^{R(G)}$ чётное, то медиана выборки определяется как среднее значение двух ближайших к середине элементов вариационного ряда.

Если $\hat{h}_{i,j}^R = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^G = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^B = 0$, то $\hat{\lambda}_{i,j}^R$ рассчитывается по информации от однонаправленных градиентов компоненты B.

По значениям незашумлённых элементов в апертуре изображения $(\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^B = 0 \wedge \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^R = 0)$ формируются $z^{R(B)} = ((2P+1)(2Q+1)) - 1 - \varepsilon^{R(B)}$ локальных градиентов канала B, где $\varepsilon^{R(B)}$ — число, соответствующее помеховым совпадениям $\hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^B = 1 \vee \hat{h}_{i\pm p, j\pm q}^R = 1$, за исключением центрального элемента:

$$g_{i\pm p, j\pm q}^B = x_{i,j}^B - x_{i\pm p, j\pm q}^B, \quad p, q \neq 0. \tag{10}$$

Далее формируются $z^{R(B)}$ оценок сбойного элемента компоненты R по компоненте B:

$$(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(B)})_{t^{R(B)}} = x_{i\pm p,\, j\pm q}^{R} + g_{i\pm p,\, j\pm q}^{B}, \quad p, q \neq 0. \tag{11}$$

Здесь $t^{R(B)}$ — индекс оценки из общего количества оценок компоненты R по B, $t^{R(B)} = 1, \ldots, z^{R(B)}$.

Общая оценка компоненты R по компоненте B находится как медиана оценок (11):

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{R(B)} = \operatorname{med}\Big[(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(B)})_{t^{R(B)}}\Big]. \tag{12}$$

Если $\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 0$, то выполняются операции (7), (8), (10), (11) и общая оценка определяется как значение медианы всех полученных оценок по компонентам:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)} = \operatorname{med}\Big[(\hat{\lambda}_{i,j}^{R(G)})_{t^{R(G)}},\, (\hat{\lambda}_{i,j}^{R(B)})_{t^{R(B)}}\Big]. \tag{13}$$

Когда $z^{R(G)} + z^{R(B)}$ чётное, медиана выборки вычисляется как среднее значение двух ближайших к середине элементов вариационного ряда.

Необходимо отметить, что если $z^{R(G)}$, $z^{R(B)}$ или $z^{R(G)} + z^{R(B)}$ равны нулю при $\varepsilon^{R(G)}$ и $\varepsilon^{R(B)}$ равных $((2P+1)(2Q+1))-1$, то расчёт оценок по соседним компонентам не возможен, поскольку не будет сформировано ни одного локального градиента в соседних каналах. Это осуществимо при высокой интенсивности помех в каждом канале.

Таким образом, восстановленное изображение компоненты R может быть представлено как

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{R} = \begin{cases} x_{i,j}^{R} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 0) \vee (\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 1), \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{R(G)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 1), \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{R(B)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 0), \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{R(G,B)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 0). \end{cases} \tag{14}$$

Реконструкция компонент G и B осуществляется аналогично построению оценок компоненты R и выглядит следующим образом:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^{G} = \begin{cases} x_{i,j}^{G} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{G} = 0) \vee (\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 1), \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{G(R)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 1), \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{G(B)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 0), \\ \hat{\lambda}_{i,j}^{G(R,B)} & \text{при } (\hat{h}_{i,j}^{R} = 0 \wedge \hat{h}_{i,j}^{G} = 1 \wedge \hat{h}_{i,j}^{B} = 0), \end{cases} \tag{15}$$

$$\hat{\lambda}^{B}_{i,j} = \begin{cases} x^{B}_{i,j} & \text{при } (\hat{h}^{B}_{i,j} = 0) \vee (\hat{h}^{R}_{i,j} = 1 \wedge \hat{h}^{G}_{i,j} = 1 \wedge \hat{h}^{B}_{i,j} = 1), \\ \hat{\lambda}^{B(R)}_{i,j} & \text{при } (\hat{h}^{R}_{i,j} = 0 \wedge \hat{h}^{G}_{i,j} = 1 \wedge \hat{h}^{B}_{i,j} = 1), \\ \hat{\lambda}^{B(G)}_{i,j} & \text{при } (\hat{h}^{R}_{i,j} = 1 \wedge \hat{h}^{G}_{i,j} = 0 \wedge \hat{h}^{B}_{i,j} = 1), \\ \hat{\lambda}^{B(R,G)}_{i,j} & \text{при } (\hat{h}^{R}_{i,j} = 0 \wedge \hat{h}^{G}_{i,j} = 0 \wedge \hat{h}^{B}_{i,j} = 1). \end{cases} \tag{16}$$

При этом для каждой оценки сигналов одной из компонент по другой необходимо ввести ограничение на интервале квантования яркости:

$$\hat{\lambda}^{a(b)}_{i,j} = \begin{cases} (x^{a}_{k,s} + g^{b}_{k,s}) & \text{при } 0 \le (x^{a}_{k,s} + g^{b}_{k,s}) \le (2^N - 1), \\ (2^N - 1) & \text{при } (x^{a}_{k,s} + g^{b}_{k,s}) > (2^N - 1), \\ 0 & \text{при } (x^{a}_{k,s} + g^{b}_{k,s}) < 0, \end{cases} \tag{17}$$

где a — оцениваемая компонента, $a = (R \vee G \vee B)$; b — компонента, по которой осуществляется оценка, $b = (R \vee G \vee B)$; $b \neq a$.

Результаты численных исследований представлены на примере обработки тестового цветного RGB-компонентного изображения «Лена» с параметрами $m \times n = 320 \times 320$, $N = 8$.

Перед обработкой изображение целенаправленно подвергалось воздействию ИП в диапазоне вероятности их появления $p(h) = 0$–$0{,}9$. В качестве меры невязки изображений $\mathbf{\Lambda}$ и $\hat{\mathbf{\Lambda}}$, т. е. ошибки восстановления, выбрано нормированное евклидово расстояние, вычисляемое в каждом цветовом канале [7]:

$$E^{R,G,B} = \Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\hat{\lambda}^{R,G,B}_{i,j} - \lambda^{R,G,B}_{i,j})^2\Big)^{1/2}\Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\lambda^{R,G,B}_{i,j})^2\Big)^{-1/2}. \tag{18}$$

Предварительное оценивание ИП выполнено идеальным обнаружителем с целью показать потенциальную точность восстановления изображений приведёнными алгоритмами. Реконструкция сбойных сигналов по локальным градиентам соседних каналов выполнялась по одной (случайной) оценке из всей выборки оценок по компонентам.

На рис. 1 представлен критерий (18) в канале R при равнозначной вероятности наличия помех в каждом цветовом канале для приведённого алгоритма реконструкции на основе межканальной избыточности, а также для пространственно-избирательного медианного алгоритма восстановления [8] скользящей апертурой размером 3×3 ($P = 1, Q = 1$). Из рисунка следует, что алгоритм восстановления цветных изображений на основе межканальной избыточности является более эффективным по сравнению с медианным алгоритмом в рассматриваемом диапазоне интенсивности помех. Кроме того, видно, что применение медианного фильтра после градиентной реконструкции позволяет повысить качество восстановления искажённого импульсными помехами изображения даже при высокой их интенсивности. Ошибки (18) в каналах G и B имеют вид, аналогичный рис. 1.

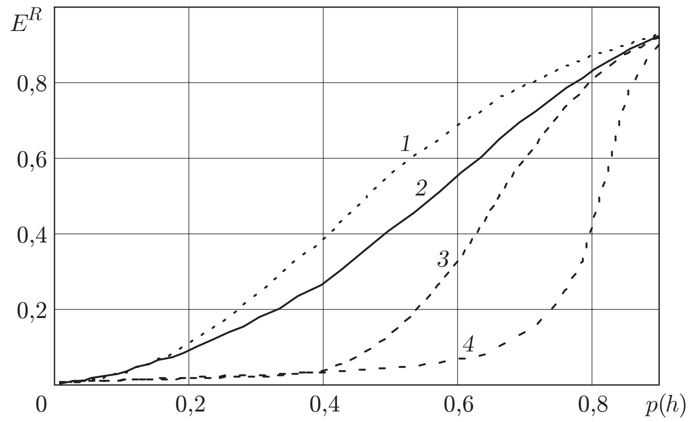

Рис. 1. Ошибка восстановления сигналов компоненты R при наличии помех в каждом цветовом канале: кривая *1* — пространственно-избирательная медианная фильтрация [8]; *2* — межканальная градиентная реконструкция; *3* — пространственно-избирательная медианная фильтрация после градиентной реконструкции; *4* — пространственно-избирательная медианная фильтрация по выборке неискажённых элементов после градиентной реконструкции

На рис. 2 представлен критерий (18) при наличии помех только в канале R для алгоритма межканальной градиентной реконструкции и пространственно-избирательной медианной фильтрации [8] скользящей апертурой размером 3×3 элемента. Рисунок показывает дополнительное преимущество межканальной обработки по устранению помех сбойной цветовой компоненты при отсутствии либо низкой интенсивности шума в соседних каналах. При сравнении рис. 1 и 2 видно, что результат медианной фильтрации не зависит от уровня помех в каждом канале. В свою очередь, градиентная реконструкция эффективно восстанавливает практически полностью зашумлённое изображение одной из компонент по другой (незашумлённой). Комбинация градиентной реконструкции и медианной обработки заметно увеличивает точность восстановления искажённого изображения.

На рис. 3 для визуального сравнения приведены результаты обработки цветного цифрового изображения с вероятностью наличия ИП $p(h) = 0{,}4$ в каждом цветовом канале. Из рисунка видно, что использование предлагаемого алгоритма реконструкции ИП по локальным градиентам соседних каналов при цифровой обработке цветных изображений

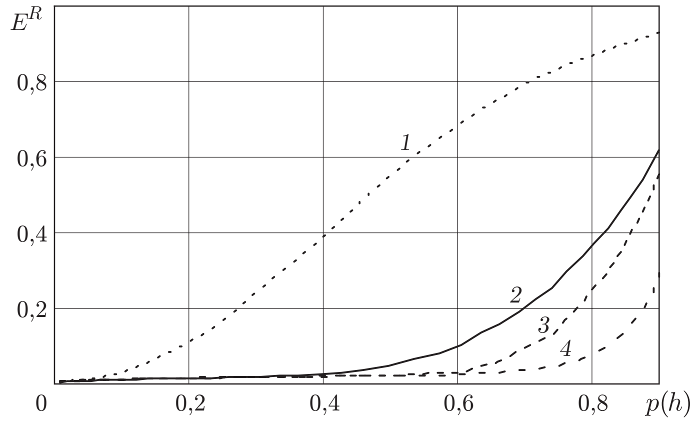

Рис. 2. Ошибка восстановления сигналов компоненты R при отсутствии помех в каналах G и B (описание кривых см. на рис. 1)

Рис. 3. Обработка цветного изображения при наличии ИП в каждом канале: *a* — искажённое ИП изображение; *b* — результат пространственно-избирательного медианного восстановления [8]; *c* — результат градиентной реконструкции; *d* — результат пространственно-избирательного медианного восстановления после градиентной реконструкции

позволяет получить более высокую точность восстановления за счёт меньшего искажения полезных границ областей и перепадов яркости. Искажённый пиксель замещается не элементом окрестности, который может кардинально отличаться от истинного значения потерянного сигнала, а значением оценки по соседним цветовым компонентам соответствующих координат, что, в свою очередь, является наиболее достоверным.

На рис. 4 представлена вычислительная сложность O (количество элементарных операций) приведённых алгоритмов в зависимости от количества их реализаций L апертурой размером 3×3 элемента. Анализ зависимостей на рисунке показывает, что при нормировании вычислительных затрат алгоритмов реконструкции на вычислительные затраты классического медианного фильтра относительные показатели вычислительной сложности будут следующие: для алгоритма реконструкции медианой оценок по одному соседнему каналу — 2,6, для алгоритма реконструкции медианой оценок по двум соседним каналам — 5,3, а при реконструкции по одному градиенту соседнего канала — 0,2.

На рис. 5 показана зависимость вычислительных затрат разработанных алгоритмов от числа помеховых совпадений ε между каналами при $L = 100$. По результатам, представленным на рисунке, выявлена интересная особенность, связанная с тем, что с увеличением интенсивности помех (и тем самым увеличением ε) уменьшается количество оценок по соседним каналам и, как следствие, снижаются вычислительные затраты.

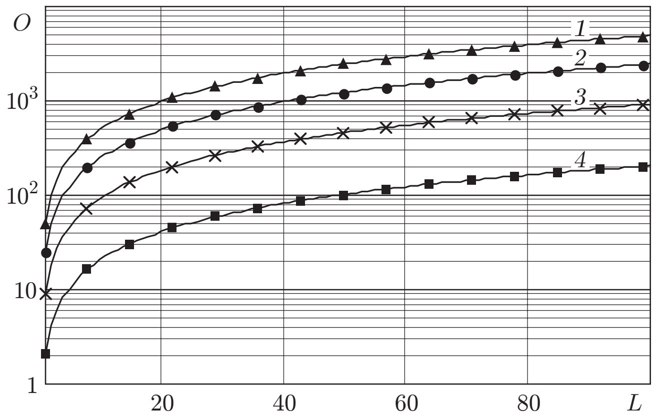

Рис. 4. Зависимость вычислительных затрат алгоритмов от числа их реализаций: кривая *1* — алгоритм градиентной реконструкции по двум соседним каналам; *2* — алгоритм градиентной реконструкции по одному соседнему каналу; *3* — алгоритм медианной фильтрации; *4* — алгоритм градиентной реконструкции по одной случайной оценке

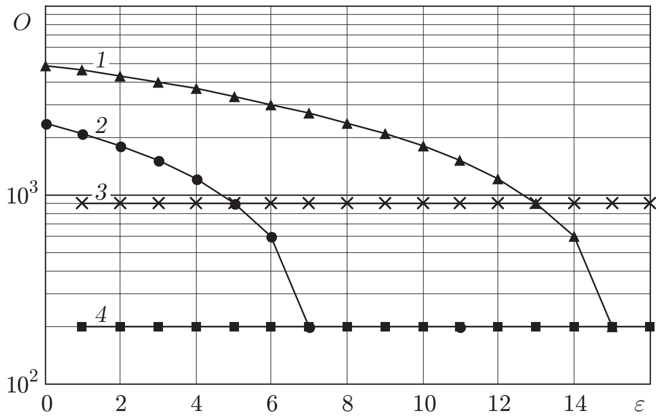

Рис. 5. Зависимость вычислительных затрат алгоритмов от количества помеховых совпадений в цветовых каналах (описание кривых см. на рис. 4)

Заключение. Предложенный в данной работе алгоритм межканальной градиентной реконструкции принципиально отличается от ранговых процедур обработки и является более эффективным. При этом комбинирование процедур только дополняет возможности качественного восстановления искажённых или потерянных сигналов цветного цифрового изображения. Рассмотренные процедуры межканальной градиентной реконструкции цветовых компонент изображения могут быть использованы в различных оптико-электронных системах технического зрения для восстановления искажённых сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. **Хуанг Т. С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г. Дж. и др.** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
3. **Калинин П. В., Сирота А. А.** Статистические нейросетевые и комбинированные алгоритмы фильтрации аппликативных помех на изображениях // Автометрия. 2012. **48**, № 6. С. 18–28.

4. **Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г.** Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97–105.
5. **Самойлин Е. А.** Нелинейные алгоритмы фильтрации импульсного шума на изображениях // Автометрия. 2005. **41**, № 5. С. 26–32.
6. **Самойлин Е. А., Шипко В. В., Трифонов П. А.** Итерационный алгоритм восстановления цифровых изображений с адаптивным обнаружением импульсных помех // Матер. XIX Междунар. науч. конф. «Радиолокация. Навигация. Связь». Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2013. Т. 1. С. 182–189.
7. **Самойлин Е. А.** Критерии оценивания качества фильтрации импульсных шумов на изображениях // Автометрия. 2006. **42**, № 4. С. 25–35.
8. **Самойлин Е. А.** Пространственно-избирательная фильтрация изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. **49**, № 12. С. 7–12.

Поступила в редакцию 14 мая 2013 г.