

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 518.1

Ю. Е. Воскобойников, А. М. Кузнецов
(Новосибирск)

НОВЫЙ АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ РАЗМЕРА АПЕРТУРЫ
ЛОКАЛЬНЫХ ВЕКТОРНЫХ ФИЛЬТРОВ

Предложен алгоритм адаптации размера апертуры локального фильтра для обработки зашумленных векторных сигналов, имеющих несколько отдельных составляющих. Алгоритм позволяет формировать несимметричную апертуру фильтра в зависимости от локальных особенностей обрабатываемого векторного сигнала и не требует задания априорной информации о числовых характеристиках шума и сигнала. Результаты вычислительного эксперимента показали эффективность предложенного алгоритма адаптации для обработки контрастных векторных изображений, искаженных шумами различной природы (включая импульсные шумы).

Введение. Во многих областях науки и техники обрабатываемые сигналы имеют несколько отдельных составляющих, каждая из которых несет определенную информацию о разных свойствах сигналов. Такие сигналы будем называть векторными. Сигналы, имеющие только одну составляющую, – скалярными. Характерным примером векторных сигналов могут служить многоспектральные изображения, получаемые со спутников, или стандартные цветные изображения в телевизионных системах. В этих случаях разные составляющие содержат информацию о разных частях спектра сигнала. Другой пример векторного сигнала – сигнал, несущий информацию о скорости. В трехмерном пространстве этот сигнал (поле скоростей) имеет три отдельные составляющие, которые соответствуют компонентам скорости вдоль направления трех осей.

Так же как и скалярные сигналы, составляющие (компоненты) векторного сигнала могут быть искажены шумами различной природы. Это обстоятельство приводит к необходимости фильтрации. В работах [1, 2] отмечалось, что покомпонентная обработка векторных сигналов имеет ряд недостатков. Поэтому возникает задача разработки эффективных алгоритмов фильтрации (а в общем случае – обработки) векторных сигналов. Заметим, что решению этой задачи посвящено сравнительно (со скалярными сигналами) мало публикаций. Следует отметить пионерскую работу [1], в которой предложен векторный медианный фильтр. В [2] представлен и исследован новый класс комбинированных фильтров для обработки контрастных век-

торных сигналов, искаженных как импульсными, так и низкоамплитудными шумами. Точностные характеристики таких фильтров существенно превосходят характеристики медианного векторного фильтра и векторного фильтра скользящего среднего. Все эти фильтры относятся к локальным, входной сигнал которых есть результат преобразования исходных значений из некоторой области, называемой апертурой локального фильтра. Как правило, размеры апертуры намного меньше размеров обрабатываемого векторного сигнала.

Как и при обработке скалярных сигналов, степень сглаживания шума при фильтрации векторных сигналов с использованием локальных фильтров пропорциональна размеру их апертуры, т. е. чем больше апертура фильтра, тем лучше сглаживается шум. Однако чрезмерное увеличение размера апертуры локального фильтра может привести к искажению тонких или контрастных деталей исходного сигнала. Для разрешения этого известного противоречия можно использовать так называемые алгоритмы адаптации размеров апертуры локальных фильтров. Принцип работы этих алгоритмов заключается в том, что размер апертуры локального фильтра изменяется в зависимости от локальных статистических характеристик обрабатываемого сигнала, что позволяет лучше сгладить шум в монотонных областях (увеличивая размер апертуры) и с меньшими искажениями передать контрастные детали, присутствующие в обрабатываемом сигнале (уменьшая размер апертуры). Для локальных скалярных фильтров некоторые алгоритмы адаптации приведены в работах [3–6]. Для векторных фильтров в [7] был предложен алгоритм адаптации размера апертуры, применение которого на практике выявило недостатки, проанализированные в данной работе.

Предлагается новый алгоритм адаптации, отличающийся от алгоритма [7] следующими моментами:

- автономным (независимым) изменением размеров прямоугольников (четвертей), составляющих апертуру локального фильтра;
- алгоритмом оценивания локальной дисперсии, обладающим более высокой чувствительностью к появлению в апертуре фильтра контрастных деталей изображения.

Эти моменты обусловили более высокие точностные характеристики векторного фильтра по сравнению с алгоритмом адаптации [7].

Алгоритм адаптации размера апертуры. Применение при обработке реальных векторных сигналов алгоритма адаптации, предложенного в [7], показало следующие недостатки.

1. Как по вертикали, так и по горизонтали апертура локального фильтра (АЛФ) изменяется симметрично (относительно обрабатываемой точки). Таким образом, как только встретилась граница контрастного элемента обрабатываемого сигнала, увеличение размера АЛФ прекращается. Например, слева от обрабатываемой точки встретилась граница, и, следовательно, выполнен критерий останова процедуры увеличения размера АЛФ по горизонтали, хотя справа могут находиться однородные значения сигнала, которые можно было бы включить в АЛФ. Таким образом, уменьшается количество векторов, попавших в АЛФ, и тем самым снижается эффективность сглаживания шумов. Аналогичное явление наблюдается и при изменении размера АЛФ в вертикальном направлении.

2. Локальная дисперсия вычисляется относительно среднего значения, которое определяется по всем значениям сигнала, попавшим в АЛФ. Из-за этого при большом размере АЛФ попадание границы контрастного элемента

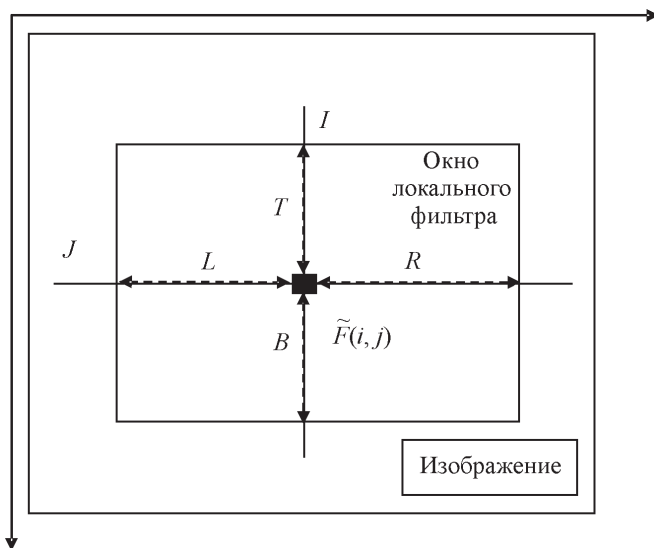


Рис. 1. Изображение окна локального фильтра с асимметричной апертурой относительно обрабатываемой точки с координатами i, j

может не привести к значительному изменению локальной дисперсии, и тем самым не выполнится критерий останова увеличения размера АЛФ.

Для устранения первого отмеченного недостатка в данной работе предлагается алгоритм асимметричного изменения размера АЛФ. Для пояснения этого алгоритма на рис. 1 приведена прямоугольная апертура, составленная из четырех четвертей, размеры которых не зависят друг от друга и определяются следующими величинами (относительно обрабатываемой точки с координатами i, j): L, R – расстояния до левой и правой границы окна; T, B – расстояния до верхней и нижней границы соответственно.

На рис. 2 показано поведение апертуры с асимметричным (a) и симметричным (b) изменением размера АЛФ. Здесь пиксели с небольшими амплитудами сигнала окрашены в белый цвет, пиксели с высокими значениями сигнала – в черный цвет. Пиксель, относительно которого ведется обработка, выделен серым цветом. При симметричном изменении АЛФ (см. рис. 2, b)

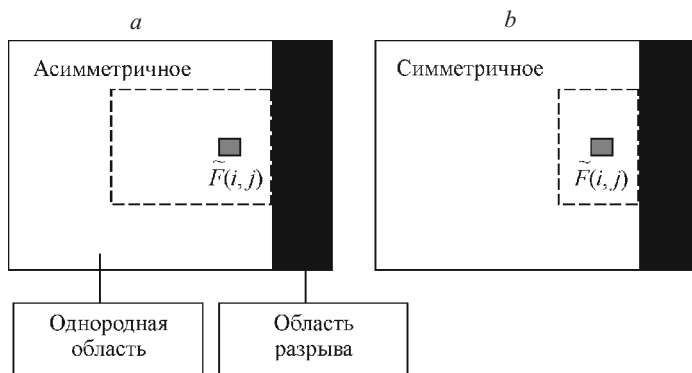


Рис. 2. Изменение размера апертуры: асимметричное (a) и симметричное (b)

размеры по горизонтали уменьшаются и слева и справа, хотя граница между черными и белыми пикселями находится справа от обрабатываемого пикселя. При несимметричном изменении АЛФ (см. рис. 2, а) левый размер L АЛФ остается без изменения, а правый размер R уменьшается.

Перейдем к изложению алгоритма асимметричного изменения размера АЛФ. Пусть зашумленный векторный сигнал представляет собой векторное изображение размером $N_x \times N_y$ и в (i, j) -м пикселе определен вектор $\tilde{F}(i, j)$, имеющий m компонент. Для значений $\tilde{F}(i, j)$ примем следующую модель:

$$\tilde{F}(i, j) = \begin{pmatrix} \tilde{f}_1(i, j) & f_1(i, j) \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{f}_m(i, j) & f_m(i, j) \end{pmatrix} \quad (i, j), \quad (1)$$

где $\begin{pmatrix} f_1(i, j) \\ \vdots \\ f_m(i, j) \end{pmatrix}$ – вектор точных значений изображения в пикселе (i, j) ;
 $\begin{pmatrix} \tilde{f}_1(i, j) \\ \vdots \\ \tilde{f}_m(i, j) \end{pmatrix}$ – случайный вектор шума в том же пикселе.

Работу алгоритма асимметричного изменения АЛФ можно представить следующими шагами:

Шаг 1. По всему обрабатываемому изображению вычисляем оценку для глобальной дисперсии:

$$s_{\text{glob}}^2 = \frac{1}{mN_xN_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \left\| \tilde{F}(i, j) - m_{\text{glob}} \right\|^2, \quad (2)$$

где $\| \cdot \|$ означает евклидову норму вектора в m -мерном векторном пространстве; m_{glob} – оценка вектора глобального среднего:

$$m_{\text{glob}} = \frac{1}{N_xN_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \tilde{F}(i, j). \quad (3)$$

Шаг 2. Устанавливаем начальные размеры апертуры: $R = 1, L = 1, T = 1, B = 1$ (см. рис. 1).

Шаг 3. В пикселе с координатами (i, j) для текущего размера апертуры определяем следующие величины:

$$s_L^2 = \frac{1}{m(B - T + 1)} \sum_{k=1}^B \sum_{T=1}^T \left\| \tilde{F}(i - k, j - L) - \tilde{F}(i, j) \right\|^2, \quad (4)$$

$$s_R^2 = \frac{1}{m(B-T-1)} \frac{1}{k} \frac{B}{T} \left\| \tilde{F}(i-k, j-R) - \tilde{F}(i, j) \right\|^2, \quad (5)$$

$$s_T^2 = \frac{1}{m(L-R-1)} \frac{1}{k} \frac{R}{L} \left\| \tilde{F}(i-T, j-k) - \tilde{F}(i, j) \right\|^2, \quad (6)$$

$$s_B^2 = \frac{1}{m(L-R-1)} \frac{1}{k} \frac{R}{L} \left\| \tilde{F}(i-B, j-k) - \tilde{F}(i, j) \right\|^2. \quad (7)$$

Заметим, что приведенные выражения отличаются от аналогичных выражений работы [7] двумя моментами:

– в вычислениях локальных характеристик (4)–(7) участвуют векторы $\tilde{F}(i, j)$, относящиеся к границам апертуры локального фильтра;

– вычитаются не векторы выборочного среднего, а зашумленные векторы $\tilde{F}(i, j)$.

Эти моменты в определенной степени устраняют отмеченный выше второй недостаток алгоритма адаптации [7].

Шаг 4. Находим коэффициенты чувствительности s_H (по горизонтали), s_V (по вертикали) по следующим формулам:

$$s_H = \frac{1}{m(T-B-1)} \frac{1}{k} \frac{B}{T} \frac{2}{1} ; m(T-B-1) \frac{2}{1}, \quad (8)$$

$$s_V = \frac{1}{m(L-R-1)} \frac{1}{k} \frac{R}{L} \frac{2}{1} ; m(L-R-1) \frac{2}{1}, \quad (9)$$

где $\frac{2}{1} ; m(L-R-1) \frac{2}{1}$ – квантиль уровня $1 - (0,05)^{\frac{2}{1}}$ -распределения с числом степеней свободы $m(L-R-1) \frac{2}{1}$.

Шаг 5. Определяем новые размеры апертуры в соответствии с выражениями:

$$L = \begin{cases} \min[L-1, A_{\max}], & \text{если } s_H s_L^2 \leq s_{\text{glob}}^2; \\ \max[L-1, 0], & \text{если } s_H s_L^2 > s_{\text{glob}}^2, \end{cases} \quad (10)$$

$$R = \begin{cases} \min[R-1, A_{\max}], & \text{если } s_H s_R^2 \leq s_{\text{glob}}^2; \\ \max[R-1, 0], & \text{если } s_H s_R^2 > s_{\text{glob}}^2, \end{cases} \quad (11)$$

$$T = \begin{cases} \min[T-1, A_{\max}], & \text{если } s_V s_T^2 \leq s_{\text{glob}}^2; \\ \max[T-1, 0], & \text{если } s_V s_T^2 > s_{\text{glob}}^2, \end{cases} \quad (12)$$

$$B = \begin{cases} \min[B - 1, A_{\max}], & \text{если } \nu s_B^2 \leq s_{\text{glob}}^2; \\ \max[B - 1, 0], & \text{если } \nu s_B^2 > s_{\text{glob}}^2, \end{cases} \quad (13)$$

где A_{\max} – максимальный размер апертуры локального фильтра.

Шаги 3–5 повторяются в точке (i, j) до тех пор, пока не выполняются критерии останова для всех размеров апертуры. В качестве критерия останова берется момент достижения одного из граничных значений 0 или A_{\max} , или момент смены знака приращения величин R, L, T, B .

Шаг 6. Шаги 2–5 повторяются для каждой обрабатываемой точки (i, j) .

Описанный алгоритм адаптации размера АЛФ не требует априорного задания числовых характеристик обрабатываемого векторного сигнала и шума, искажающего сигнал. Однако важную роль играет задание «правильных» значений коэффициентов чувствительности ν_H, ν_V , которые позволяют обнаруживать появление границы в апертуре фильтра.

Вначале рассмотрим ν_H . Определим следующие числа:

$$n_H = m(T - B - 1) - 1; \quad n = mN_x N_y - 1.$$

Распределение случайных величин $\frac{s_L^2 n_H}{2L}, \frac{s_{\text{glob}}^2 n}{2}$ можно аппроксимировать

χ^2 -распределениями с n_H и n степенями свободы соответственно. Величины $\frac{s_L^2}{2L}, \frac{s_{\text{glob}}^2}{2}$ – это локальная и глобальная дисперсии, оценками которых выступают s_L^2, s_{glob}^2 . Тогда ν_H можно определить как квантиль $F_{n_H; n; 0,95}$ уровня 0,95 распределения Фишера с n_H, n степенями свободы соответственно, т. е. $\nu_H = F_{n_H; n; 0,95}$. На практике число степеней свободы n , как правило, достаточно велико (больше 500). В этом случае для упрощения вычисления $F_{n_H; n; 0,95}$ можно использовать приближенное (с относительной погрешностью 0,01–0,02) равенство для квантилей $n_H F_{n_H; n; 0,95} \approx \frac{1}{n_H} F_{n_H; 0,95}^2$, где $F_{n_H; 0,95}^2$ – квантиль уровня 0,95 χ^2 -распределения с n_H степенями свободы.

Тогда $\nu_H = \frac{1}{n_H} F_{n_H; 0,95}^2$, и приходим к выражению (8).

Аналогично определяем другой коэффициент чувствительности ν_V :

$$\nu_V = F_{n_V; n; 0,95} \quad \text{или} \quad \nu_V = \frac{1}{n_V} F_{n_V; 0,95}^2,$$

где $n_V = m(L - R - 1) - 1$. Последнее выражение совпадает с (9).

Результаты вычислительного эксперимента. Для проверки эффективности предложенного алгоритма адаптации АЛФ были обработаны несколько тестовых векторных изображений $F(i, j)$, искаженных шумом $\nu_k(i, j)$. Проекция $\nu_k(i, j), k = 1, \dots, m$, этого вектора шума определялись моделью

$$\nu_k(i, j) = (1 - p) \nu_k + p \nu_{k'}, \quad (14)$$

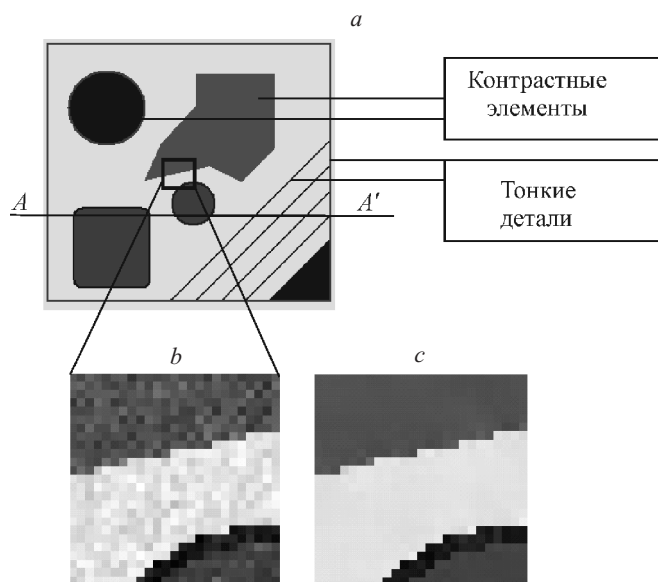


Рис. 3. Результат обработки зашумленного изображения адаптивным фильтром: точное изображение (a); фрагменты зашумленного (b) и обработанного (c) изображений

в которой случайная величина k моделирует низкоамплитудный шум с вероятностью $1 - p$, а k – импульсный шум с вероятностью p . Если $p = 0$, то импульсный шум отсутствует. Величина k подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним и дисперсией σ_k^2 , вычисленной по формуле

$$\sigma_k^2 = \frac{\max_l |f_k(k, l)|^2}{2}, \quad (15)$$

где $f_k(k, l)$ – относительный уровень шума проекции. Случайная величина k также подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним и дисперсией $\sigma_k^2 = C \sigma_k^2$, где $C = 1$.

Первоначально остановимся на результатах обработки тестового изображения, показанного на рис. 3, a, изображения размером 280×260 , состоящего из различных элементов: контрастные элементы – круги, квадрат и многоугольник; тонкие детали – прямые линии шириной 2 пикселя. Каждая из трех компонент этого «точного» изображения искажалась шумом (14) с относительным уровнем $0,1$ и $p = 0$ (т. е. импульсные шумы отсутствовали). В качестве локального фильтра использовался фильтр скользящего среднего, размеры апертуры которого изменялись по описанному выше алгоритму. На рис. 3, b приведен увеличенный фрагмент, искаженный шумом, а на рис. 3, c – этот же фрагмент после обработки. Следует отметить хорошее удаление шума при сохранении границы контрастных областей. На рис. 4, a показано сечение $A - A'$ (см. рис. 3) точного (кривая 1) и зашумленного (кривая 2) изображений. На рис. 4, b представлено сечение обработанного изображения (кривая 2), которое практически сливается с сечением точного изображения (кривая 1). На рис. 4, c показано изменение размера апертуры

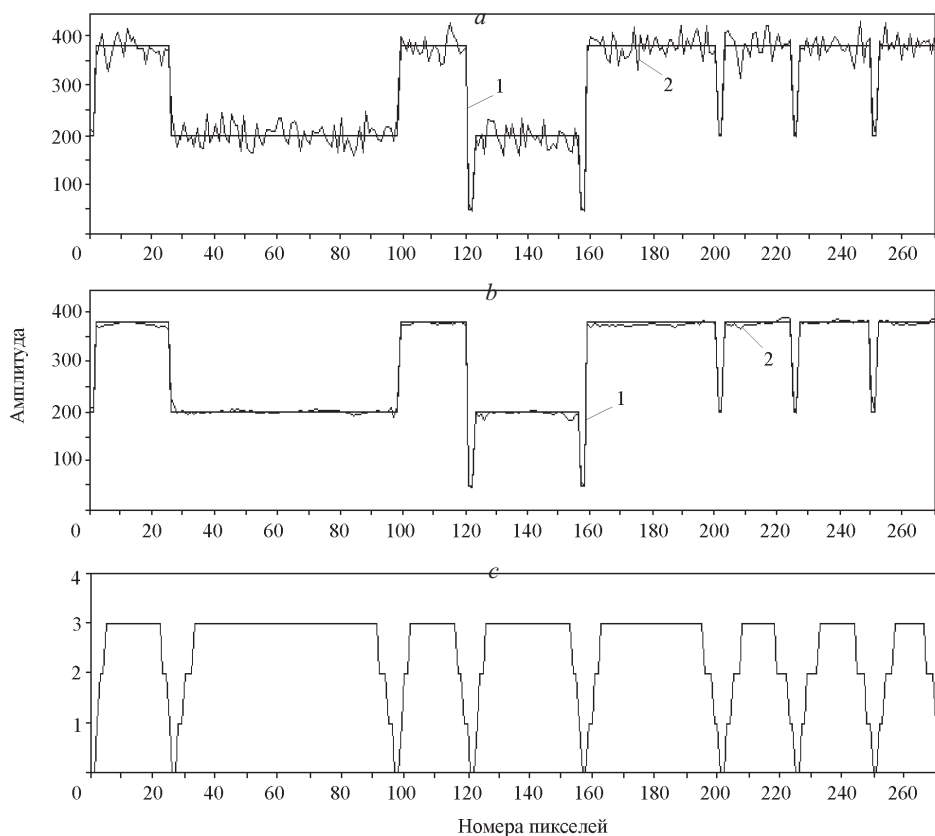


Рис. 4. Сечение A A контрастного изображения

локального фильтра $(L - R)/2$ предлагаемым алгоритмом. Видно, что на границах контрастных элементов величина $(L - R)/2$ уменьшается до 0, а на однородных участках увеличивается до $A_{\max} - 3$ (т. е. $R - L - A_{\max}$).

Заметим, что для зашумленного изображения величина

$$\text{исх} \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \|\tilde{F}(i, j) - F(i, j)\|^2}{\|F(i, j)\|^2}^{1/2} \quad (16)$$

равнялась 0,11, а после обработки относительная ошибка фильтрации

$$\text{фил} \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \|\tilde{F}_{\text{ад}}(i, j) - F(i, j)\|^2}{\|F(i, j)\|^2}^{1/2} \quad (17)$$

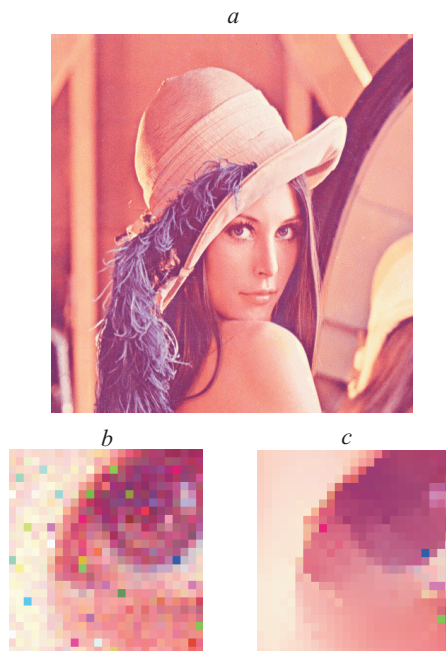


Рис. 5. Обработка изображения адаптивным фильтром: точное изображение (*a*); фрагменты зашумленного (*b*) и обработанного (*c*) изображений

была равна 0,029. Отметим, что величина относительной ошибки уменьшилась примерно в 3,5 раза, что показывает высокую эффективность предложенного адаптивного алгоритма фильтрации. Для сравнения заметим, что ошибка (17) для векторного фильтра скользящего среднего (без адаптации апертуры) составила 0,13, т. е. больше, чем ошибка в исходном зашумленном изображении. Это объясняется размытием границ во время фильтрации.

Далее в качестве точного рассмотрено изображение Lena (рис. 5, *a*), часто используемое для исследования различных алгоритмов фильтрации. Это изображение искажалось комбинированным шумом (15) с $\sigma = 0,05$ и вероятностью появления импульсного шума $p = 0,05$. Величина $C = 100$, т. е. амплитуда импульсного шума в 10 раз больше амплитуды шума σ , а относительный уровень импульсного шума равен 0,5. Зашумленный фрагмент – глаз девушки (в увеличенном масштабе) – показан на рис. 5, *b*.

Для обработки зашумленного изображения использовался комбинированный алгоритм, включающий в себя два этапа: этап 1 – обработка векторным медианным фильтром [2] с фиксированным размером апертуры $L = R = T = B = 1$, этап 2 – обработка полученного на предыдущем этапе изображения векторным фильтром скользящего среднего с адаптивным изменением размера апертуры. Фрагмент обработанного изображения приведен на рис. 5, *c*. Видно хорошее удаление шума и сохранение границ. График изменения размера апертуры имеет примерно такой же вид, что и на рис. 4, *c*. Заметим, что для исходного зашумленного изображения $\sigma_{исх} = 0,118$, после обработки $\sigma_{фил} = 0,052$.

Заключение. Приведенные результаты вычислительного эксперимента и обработка реальных векторных изображений позволяют рекомендовать предложенный в работе алгоритм адаптации размера апертуры локальных

векторных фильтров для обработки контрастных векторных изображений, искаженных шумами различной природы (включая импульсные шумы), а также использовать в скалярных локальных фильтрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Astova J., Naavisto P. Vector median filter // Proc. IEEE. 1990. 78, N 4. P. 678.
2. Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г. Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97.
3. Mahesh B., Song W.-J., Pearlman W. A. Adaptive estimators for filtering noisy images // Opt. Eng. 1990. 29, N 5. P. 488.
4. Song W.-J., Pearlman W. A. Edge-preserving noise filtering based on adaptive windowing // IEEE Trans. Circuits and Systems. 1988. 35, N 8.
5. Белявцев В. Г., Воскобойников Ю. Е. Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры // Автометрия. 1998. № 3. С. 18.
6. Katkovnik V., Egiazarian K., Astova J. Weighted median filter with varying adaptive windows size // Proc. of the IASTED Intern. conf. on Signal Processing and Communications. Spain, 2000. P. 329.
7. Белявцев В. Г., Воскобойников Ю. Е. Векторные локальные фильтры с адаптацией размера апертуры // Автометрия. 2001. № 6. С. 32.

Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет,
E-mail: voscob@ngasu.nsk.su

Поступила в редакцию
5 мая 2005 г.