

В. И. МОЖЕЙКО, В. Т. ФИСЕНКО, Т. Ю. ФИСЕНКО

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД РАНГОВОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМОВ В ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Представлен адаптивный метод пространственной фильтрации цифрового цветного изображения, предназначенной для подавления импульсных шумов изображения. Метод основан на применении многоканальной ранговой (медианной) векторной фильтрации в двух окнах разного размера. Уменьшение аддитивного шума обеспечивается выбором канала с минимальной дисперсией сигналов отсчетов. Сохранение малоразмерных деталей и границ объектов изображения обеспечивается выбором минимального размера окна. Подавление импульсной помехи и сохранение характеристик цветности достигается подстановкой вектора отсчета, отстоящего на минимальное расстояние от оценки вектора медианы.

Ключевые слова: векторные фильтры, многоканальная обработка изображений, импульсная помеха, медианная фильтрация.

Введение. Медианный фильтр основан на порядковых статистиках и представляет собой нелинейный пространственный фильтр. Медианная фильтрация выполняется в скользящем окне. Значения яркости упорядочиваются по возрастанию (или убыванию), определяется значение 50 % перцентиля (медианы), и полученное значение отклика фильтра помещается в элемент изображения, координаты которого соответствуют центру окна фильтрации.

Известно, что медианные фильтры подавляют импульсные шумы. К таким шумам относится и шум типа „соль и перец“ [1], отсчеты которого имеют значения, соответствующие максимальному („соль“) и минимальному („перец“) уровням квантования в сигнале изображения. Цифровое цветное телевизионное изображение, представленное в *RGB* цветовом координатном пространстве, является трехкомпонентным двумерным сигналом. Каждый элемент цифрового растрового цветного изображения размера $L \times M$ может быть представлен вектором

$$C(l,m)=[R(l,m),G(l,m),B(l,m)],$$

где l — номер строки, m — номер столбца, $l \in [0, L-1]$; $m \in [0, M-1]$; $R(l,m)$, $G(l,m)$, $B(l,m)$ — компоненты элемента с координатами раstra (l,m) . При создании векторных медианных фильтров вводят меру расстояния между векторами [2]. Функция расстояния между двумя векторами с номерами i и j в пространстве *RGB* в общем виде задается формулой

$$d_{ij} = \|C_i - C_j\|_\gamma = \left(\sum_{n=1}^3 |C_i^n - C_j^n|^\gamma \right)^{1/\gamma},$$

где n — номер компонента вектора, γ — характеристика метрики.

В случае евклидова расстояния (метрика L_2 , $\gamma=2$)

$$d_{ij} = \|C_i - C_j\| = \sqrt{(R_i - R_j)^2 + (G_i - G_j)^2 + (B_i - B_j)^2}. \quad (1)$$

Множество входных векторов в скользящем окне фильтрации обозначим

$$W = \{C_0, C_1, \dots, C_{p-1}\}, \text{ где } C_i = (R_i, G_i, B_i), i \in [0, p-1].$$

Расстояние для j -го вектора оценивается как сумма расстояний от j -го вектора до каждого из векторов в окне:

$$D_j = \sum_{i=0}^{p-1} d_{ij}. \quad (2)$$

Последовательность расстояний $\{D_0, D_1, \dots, D_{p-1}\}$ упорядочивают по неубыванию, и в качестве отклика фильтра используют вектор C_i , соответствующий минимальному расстоянию $D_i = \min_j \{D_j\}$. Медианные векторные фильтры отличаются мерой расстояний и весовыми функциями, используемыми для взвешивания суммы в (2).

Применение медианного фильтра приводит к подавлению верхних частот изображения, вызывая размытие краев и текстур. В связи с этим в настоящее время получают все большее развитие схемы адаптивной фильтрации [1, 3], которые позволяют изменить импульсную характеристику фильтра в зависимости от обрабатываемого изображения. Один из алгоритмов адаптивной медианной фильтрации (АМФ) выполняется следующим образом [1]. В окне фильтрации оцениваются минимальное I_{\min} , максимальное значение I_{\max} и медиана I_{med} . Фильтрации подвергается только тот центральный элемент окна I_{xy} , для которого выполняется условие

$$A_1 = I_{\text{med}} - I_{\min}; \quad A_2 = I_{\text{med}} - I_{\max}; \quad A_1 > 0 \text{ и } A_2 < 0,$$

т.е. величина медианы больше минимального и меньше максимального значений в окне и не выполняется условие

$$B_1 = I_{xy} - I_{\min}; \quad B_2 = I_{xy} - I_{\max}; \quad B_1 > 0 \text{ и } B_2 < 0,$$

т.е. величина сигнала в центре окна больше минимального и меньше максимального значений в окне.

Применение такого фильтра позволяет удалить биполярную импульсную помеху, обеспечить сглаживание шумов и уменьшить подавление верхних пространственных частот в изображении.

Предлагаются переключающиеся медианные фильтры, схемы которых основаны на предварительном обнаружении искаженных помехой элементов [4, 5]. Фильтрации подвергаются только те элементы изображения, которые искажены шумом. В телевизионных системах сигнал импульсной помехи может иметь любую амплитуду. При этом наибольший интерес представляют те изображения, в которых число элементов, содержащих сигнал импульсной помехи, составляет до 10 % изображения. В этом случае она не формирует выраженного пика гистограммы распределения компонентов сигнала, что затрудняет определение отсчетов, содержащих помеху. Так, например, в изображении „Lena“ компоненты G и B не содержат отсчетов, равных 0 и 255, а в R компоненте всего 112 максимальных отсчетов и ни одного минимального. Наложение импульсной помехи типа „соль и перец“ позволяет простым квантованием определить эти элементы. В этом случае возможно применение самых разных методов интерполяции сигнала, не обязательно медианной фильтрации.

В настоящей работе предложен метод векторной медианной фильтрации (ВМФ), позволяющий подавить импульсную помеху неизвестной амплитуды, обеспечивающий сохранение информации о контурах объектов, которая является наиболее важным признаком при решении задач обнаружения объектов.

Векторная медианная фильтрация. Покомпонентная фильтрация в RGB -пространстве приводит к изменению цветовых характеристик изображения (тона и насыщенности). Это связано с тем, что при независимой фильтрации компонентов получаются некоторые новые значения этих компонентов. Значения медианы каждого компонента принадлежат одному из элементов окна:

$$\begin{aligned} & C_m (R_m, G_m, B_m), \\ & (R_0, R_1, \dots, R_{p-1} : R_m), \quad R_0 \leq R_1 \leq \dots \leq R_{p-1}; \quad m = p/2; \\ & (G_0, G_1, \dots, G_{p-1} : G_m), \quad G_0 \leq G_1 \leq \dots \leq G_{p-1}; \quad m = p/2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$(B_0, B_1, \dots, B_{p-1} : B_m), B_0 \leq B_1 \leq \dots \leq B_{p-1}; m = p/2.$$

Результирующий вектор C_m может совпадать с элементом окна только в частном случае. Следовательно, при фильтрации элемент изображения заменяется некоторым другим с новыми характеристиками цветности, что эквивалентно генерированию некоторого цветного шума.

Поясним это на примере рис. 1. На нем представлены синтезированное тестовое изображение (*a*) и изображения на выходе линейного усредняющего и медианных фильтров (*б* — полученное после медианной фильтрации фильтром 3×3 (формула (3)); *в* — после линейной фильтрации 3×3 ; *г* — после каскадной многоканальной медианной фильтрации). Для сравнения характеристик цветности выполним преобразование цветового координатного пространства RGB в пространство Стрикленда — HLS [6]. Компонент тона (H -hue) исходного изображения (рис. 1, *a*) принимает семь дискретных значений: 0, 169, 77, 104, 40, 122, 125. После медианной фильтрации 5×5 , выполняемой в соответствии с формулой (3), компонент тона принимает 16 значений: 0, 169, 77, 104, 122, 125, 126, 114, 115, 137, 109, 45, 46, 105, 35, 32. После низкочастотной фильтрации 5×5 тоновый компонент имеет 238 значений, а при каскадной многоканальной фильтрации общее число составляющих тонового компонента и их значения совпадают со значениями тестового изображения. При подавлении шума в изображении наряду с задачей сохранения границ объектов и малоразмерных деталей изображения ставится задача сохранения цветовых характеристик изображения. В связи с этим предпочтительным представляется применение векторной медианной фильтрации. Оценка (2) требует большого объема вычислений. Оптимизация этого алгоритма достигается за счет того, что при $\gamma=2$ медианой является вектор, отстоящий на минимальное расстояние от среднего вектора $C_{cp}(R_{cp}, G_{cp}, B_{cp})$ [7], для которого

$$R_{cp} = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{p-1} R_i, \quad (4)$$

где p — общее число элементов в окне.

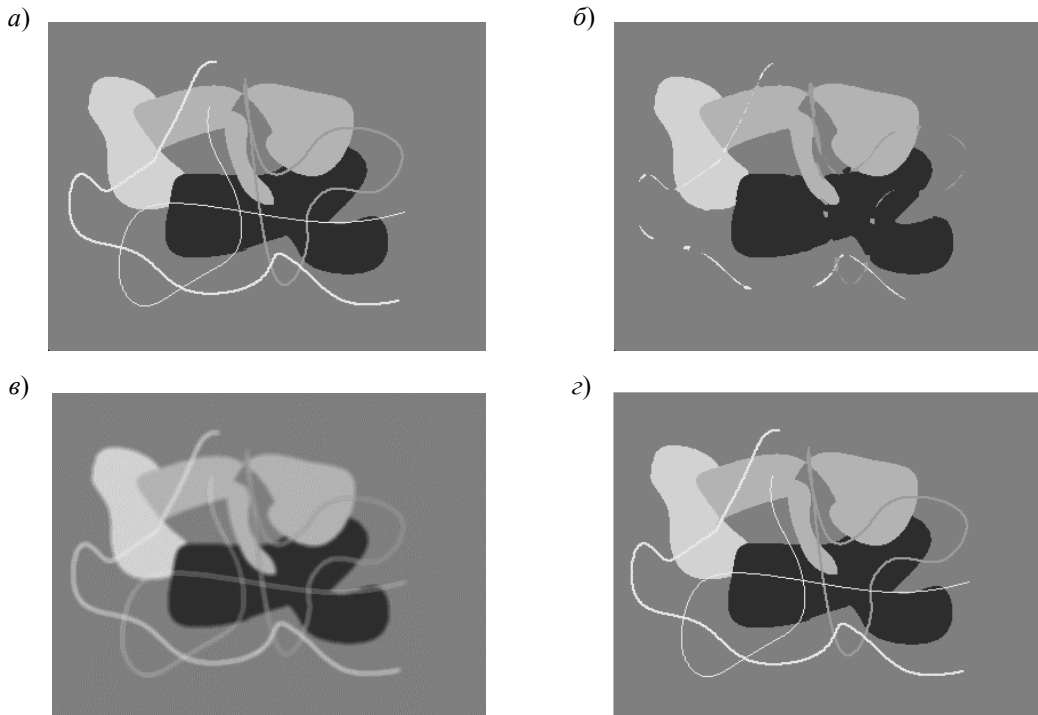


Рис. 1

В соответствии с формулой (4) получим оценки математических ожиданий RGB -компонентов в окне, найдем координаты вектора. Затем оценим расстояния (d) от каждого

элемента окна до вектора C_{cp} в соответствии с формулой (1) и расположим их в неубывающем порядке $d_0 \leq d_1 \leq \dots \leq d_{p-1}$

$$C_m(R_m, G_m, B_m): d_0. \quad (5)$$

Медианой будет вектор C_m из множества входных векторов, расстояние до среднего значения для которого минимально и равно d_0 . Однако такой метод не обеспечивает необходимой степени сохранения границ объектов.

Многоканальная векторная медианная фильтрация (ММФ). Предлагается производить каналную медианную фильтрацию. Каналы определяются как последовательность координат прямых линий, проходящих через центральный элемент окна под углом от 0 до 180°. Число каналов ограничивается дискретностью раstra. Назовем эти последовательности координат апертурами.

На рис. 2 представлены примеры апертур для размеров 3×1 и 5×1 , совмещенные в одном окне размером 5×5 относительно центрального элемента. В настоящей работе исследовано 12 каналов для апертуры 3×1 и 35 каналов для апертуры 5×1 . Сохранение информации о границах и текстурах достигается за счет того, что из всех каналов выбирается тот, в котором дисперсия минимальна. Откликом фильтра является вектор медианы канала с минимальной дисперсией. Вектор медианы определяется как вектор в канале, отстоящий от вектора C_m , полученного в соответствии с (3), на минимальное расстояние:

$$\min_{k \in [1, N_w]} \varepsilon_{wk} = \sum_{j \in [1, p_w]} \|C_j - C_{mk}\|, \quad (6)$$

где k — номер канала, w — номер окна фильтрации, N_w — число каналов в i -м окне, p_w — размер апертуры, C_{mk} — оценка C_m в k -й апертуре.

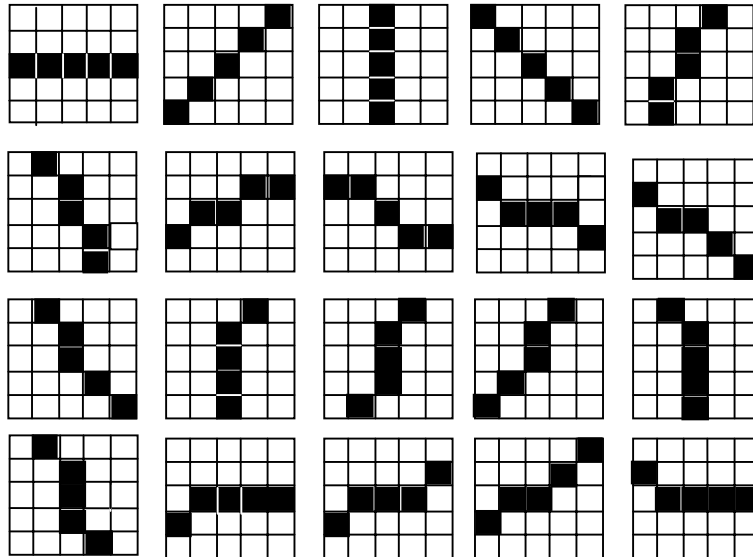


Рис. 2

Метод каскадной многоканальной медианной векторной фильтрации (КММФ). При медианной фильтрации подавляется помеха, размер которой меньше половины размера апертуры, исходя из этого выбираются два размера окна. В канале с минимальной дисперсией, выбранном на основании критерия (6), производится оценка медианы $C_{mk} = (R_{mk}, G_{mk}, B_{mk})$ для каждого окна. Производится сравнение расстояния между оценками медиан в каналах двух окон с некоторым пороговым значением $T = (R_t, G_t, B_t)$. Если расстояние больше него, то в качестве выходного элемента фильтра выбирается вектор из

апертуры большего размера W_2 , находящийся на минимальном расстоянии от медианы в этом канале. Если расстояние между медианами меньше порога, то оценивается расстояние между центральным элементом апертуры и оценкой медианы, полученной в окне меньшего размера W_1 . Если это расстояние меньше порога, то выходным элементом фильтра является центральный элемент апертуры, в противном случае — элемент апертуры, отстоящий на минимальное расстояние от медианы. В качестве порогового значения T выбирается ожидаемое среднее квадратическое отклонение (СКО) аддитивного шума

$$C_{\text{вых}} = \begin{cases} \arg \min_{C_i \in W_2} \|C_i - C_{m2}\|, \|C_{m1} - C_{m2}\| > T, \\ C_c, \|C_c - C_{m1}\| \leq T, \\ \arg \min_{C_i \in W_1} \|C_c - C_{m1}\|, \|C_c - C_{m1}\| \geq T, \end{cases} \quad (7)$$

где C_c — центральный элемент апертуры, $C_{\text{вых}}$ — выходной элемент фильтра, C_{m1} — медиана, рассчитанная по формуле (5) в апертуре меньшего размера, C_{m2} — медиана, рассчитанная по формуле (5) в апертуре большего размера.

Разработанный метод фильтрации обеспечивает лучшее сохранение границ, так как использует оценку медианы вдоль границы объекта. Подавление малоразмерных деталей определяется размером апертуры окна меньшего размера. Подавление импульсной помехи производится за счет медианной фильтрации в окне большего размера. Поскольку выходными элементами фильтра являются элементы исходного изображения, то такая фильтрация не приводит к появлению дополнительных составляющих цветных шумов в изображении.

Результаты экспериментальных исследований. Выполнены экспериментальные исследования методов медианной фильтрации на примерах синтезированных и известных цветных цифровых тестовых изображений. Моделирование шума и импульсной помехи выполнялось следующим образом. В качестве шума использовались реализации случайного процесса, распределенного по нормальному закону с параметрами $(0, \sigma_{\text{ш}})$. Сигнал шума $\mathbf{n}(l, m)$ накладывался независимо на каждый компонент. Импульсная помеха \mathbf{I} принимала некоторое задаваемое значение. Координаты отсчетов, содержащих импульсную помеху, выбирались по равномерному закону распределения. Число отсчетов определялось задаваемой вероятностью помехи P в изображении. Сигнал изображения генерировался в соответствии с уравнениями:

$$C(l, m) = \begin{cases} \mathbf{S}(l, m) + \mathbf{n}(l, m), & (1-P), \\ \mathbf{I}(l, m), & P, \end{cases} \quad (8)$$

где $\mathbf{S}(l, m)$ — исходное значение сигнала изображения.

Качество фильтрации оценивалось по объективному критерию СКО сигналов ошибок компонентов изображения ($\sigma_R, \sigma_G, \sigma_B$ соответственно). Изображение ошибок формировалось как разность изображения, полученного на выходе фильтра, и исходного (незашумленного) изображения.

Результирующее значение СКО было получено в соответствии с формулой

$$\sigma = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + \sigma_B^2}. \quad (9)$$

Кроме того, оценивалось пиковое отношение сигнал/шум. В случае использования восьмиразрядного квантования его значение вычисляется по формуле:

$$\psi = 20 \lg(255 / \sigma). \quad (10)$$

Получим качественную оценку потенциальной точности рассмотренных алгоритмов. В табл. 1 представлена оценка потенциальной точности алгоритмов медианной фильтрации,

полученная для изображения, содержащего в большей степени низкочастотную информацию. Использовано портретное изображение „Лена“.

Таблица 1

Фильтр	σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ
КММФ	1,05	1,47	1,55	2,38	40,6
АМФ 3×3	2,23	3,33	4,37	5,9	32,67
ММФ 3×1	2,88	3,8	4,04	6,24	32,2
ММФ 5×1	3,96	5,3	5,53	8,62	29,4
МФ 3×3	6,82	9,15	8,8	14,41	24,95
МФ 5×5	7,52	10,25	9,67	15,97	24,1

Из табл. 1 видно, что потенциально наименьшие ошибки преобразования можно получить при использовании АМФ и КММФ. Результаты исследования эффективности подавления импульсной помехи для изображения „Brick Wood“, из тестовых изображений фирмы Kodak под именем „kodim01.png“, подвергнуты изменению в соответствии с (8) при импульсной помехе, амплитуда которой представлена в таблице, и отсутствии аддитивного шума. Исследования выполнены для двух лучших методов фильтрации.

Таблица 2

P, %	Метод	Изображение „kodim01“									
		I = (100, 100, 100)					I = (200, 200, 200)				
		σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ	σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ
2	АМФ	14,3	14,9	13,9	24,9	20,2	14,3	14,8	13,8	24,8	20,2
	КММФ	8,43	8,67	8,28	12,4	26,3	8,57	9,04	8,46	15	24,6
5	АМФ	14,4	15	14	25,1	20,2	14,7	15,4	14,3	25,6	20
	КММФ	9,46	9,92	9,35	16,6	23,7	10,1	10,9	10,5	18,2	22,9
7	АМФ	15	15,7	14,6	26,2	19,7	14,7	15,3	14,2	25,5	20
	КММФ	10,1	10,7	10,1	17,8	23,1	11,6	11,7	11,5	20,1	22,1
10	АМФ	15,4	16,2	15	26,9	19,5	15	15,8	14,5	26,1	19,8
	КММФ	10,6	11,5	10,6	18,9	22,6	14,2	14	14,2	24,4	20,4

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что алгоритм КММФ обеспечивает более эффективную фильтрацию. Высокая эффективность метода обусловлена прежде всего лучшим сохранением информации о верхних частотах изображения.

Получены оценки эффективности предлагаемого алгоритма при наличии аддитивного нормального шума. Исследования проведены на изображении „Лена“, результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Уровень квантования	σ аддитивного нормального шума				
	σ_R	σ_G	σ_B	σ	ψ , дБ
5	1,28	1,68	1,81	2,78	39,2
10	3,31	3,55	3,81	6,17	32,3
15	7,22	7,35	7,74	12,89	25,9
20	11,14	11,37	11,79	19,8	22,2

Оценка эффективности нового метода в сравнении с другими методами фильтрации произведена также на примере тестового изображения, представленного на рис. 1, а. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Шум (помеха)	КММФ	МФ 3×3	МФ 5×5	КМФ 3×1	КМФ 5×1
Без шума	0,39	18,74	20,09	0,78	3,74
	0,27	15,27	16,18	0,48	4,43
	0,42	15,95	16,79	0,46	4,61
	0,63	28,96	30,78	1,02	7,41
Нормальный (0,100)	9,70	19,13	21,28	7,11	7,58
	9,76	15,02	15,98	7,1	7,29
	9,71	15,74	16,86	7,1	7,41
	16,84	28,97	31,5	12,3	12,86
Импульсный (1 %)	2,72	18,46	20,22	6,82	3,99
	2,44	15,07	16,29	6,82	4,57
	2,21	15,72	16,9	6,91	4,87
	4,27	28,54	30,98	11,86	7,78
Нормальный + импульсный	10,06	19,94	20,74	7,34	7,68
	10,03	15,68	15,52	7,4	7,4
	9,97	16,4	16,41	7,52	7,54
	17,36	30,2	30,66	12,85	13,06

На рис. 3 представлены изображения ошибок, полученные при применении КММФ (б) и АМФ (в) к тестовому изображению (а) фирмы Kodak под именем „kodim04.png“ „Hats“. Из рисунка видно, что АМФ в большей степени подавляет контуры изображения, чем КММФ.

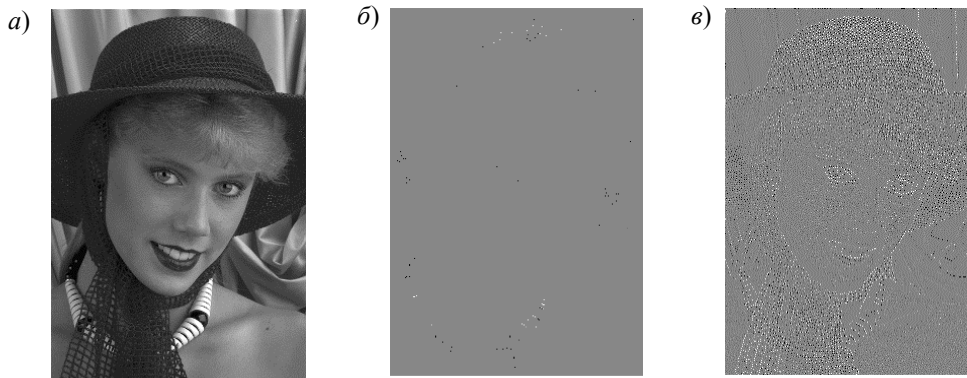


Рис. 3

На рис. 4 представлены примеры фильтрации исходного (а) изображения „Brick Woods“ разными фильтрами: б — МФ 3×3 (17,3 дБ), в — КММФ (24,6 дБ), г — АМФ (20,2 дБ).

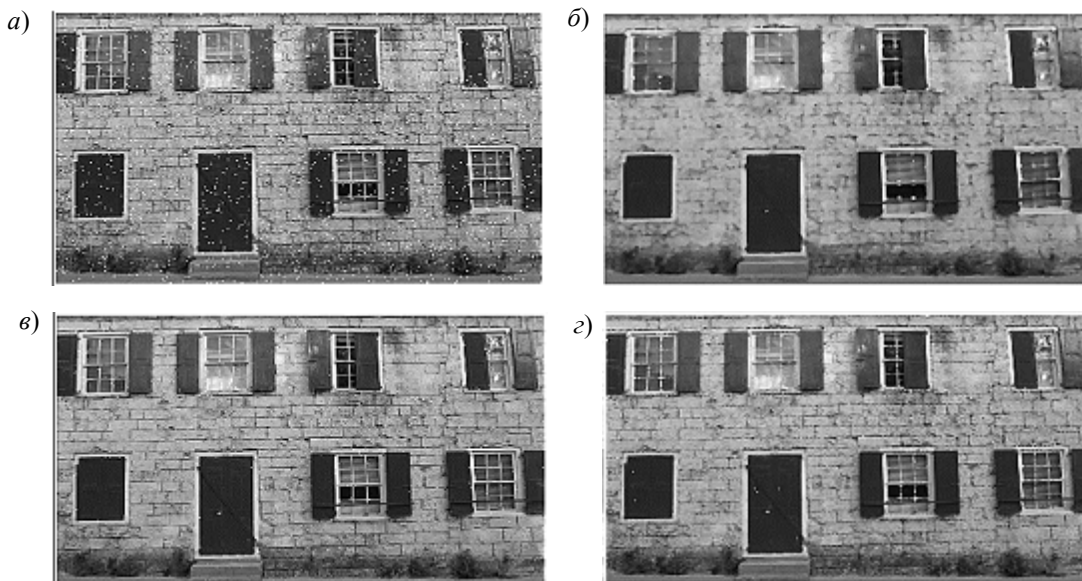


Рис. 4

Полученные оценки ошибок фильтрации по результатам статистического моделирования работы рассмотренных алгоритмов на идеальных изображениях и на изображениях, содержащих аддитивный шум и импульсную помеху, подтверждают эффективность предложенного метода.

Заключение. В статье представлен новый метод подавления импульсной помехи и уменьшения шумов. Каскадный многоканальный медианный фильтр является адаптивным векторным медианным фильтром, обеспечивающим сохранение границ объектов изображения малоразмерных деталей. Применение КММФ не изменяет цветовых характеристик изображения. Максимальная эффективность метода КММФ наблюдается при обработке изображений, искаженных импульсными помехами. При этом подавляются не только помехи типа „соль и перец“, но и помехи произвольной амплитуды. Подавление аддитивного шума производится за счет исключения максимальных выбросов шума в апертуре и за счет выбора канала с минимальной дисперсией. Метод можно использовать в задачах повышения качества изображений и их восстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Под ред. П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Lukac R., Smolka B. Application of the Adaptive Center-Weighted Vector Median Framework for the Enhancement of cDNA Microarray Images // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 2003. Vol. 13, N 3. P 369—383.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит, 2001. 784 с.
4. Wang Z., Zhang D. Progressive Switching Median Filter for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images // IEEE Transactions on Circuits and Systems. II. Analog and Digital Signal Processing. 1999. Vol. 46, N 1. P. 78—81.
5. Приоров А.Л., Апальков И.В., Бухтояров С.С., Хряцев В.В. Переключающийся медианный фильтр с блоком предварительного детектирования // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 4. С. 2—7.
6. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Метод автоматического анализа цветных изображений // Оптич. журн. 2003. Т. 79, № 9. С. 18—23.
7. Tang K., Astola J. Nonlinear Multivariate Image Filtering Techniques // IEEE Transactions on Image Processing. 1995. Vol. 4, N 6. P. 788.

Сведения об авторах

- Владимир Иванович Можейко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; начальник сектора;
E-mail: Lab2@eoss.ru
- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор;
E-mail: valery@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; вед. науч. сотр.;
E-mail: tatiana@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.