

**КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ФИЛЬТРАЦИИ
ИМПУЛЬСНЫХ ШУМОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ****Е. А. Самойлин**

*Ростовский военный институт ракетных войск
им. Главного маршала артиллерии М. И. Неделина, Ростов-на-Дону
E-mail: sea@rsu.ru*

Предложены и обоснованы критерии эффективности для численно-строгого оценивания качества различных методов и алгоритмов фильтрации изображений, искаженных импульсными шумами. Приведены и обсуждены результаты вычислительных экспериментов по исследованию статистических зависимостей предложенных критериев от нестационарности рисунков, величины дискретизации координат (размера) и квантования уровня яркости изображений при их фильтрации в диапазоне зашумленности импульсными шумами от 0 до ∞ .

Введение. В настоящее время продолжают стремительно развиваться теория и системы цифровой обработки и передачи изображений [1–3]. Для многих подобных цифровых систем характерно появление на изображении импульсных шумов (ИШ), т. е. независимых случайных искажений отдельных пикселей. Например, импульсный шум может возникать при ошибках оцифровки и квантования изображений, сбоях отдельных элементов матриц оптико-электронных преобразователей и т. д. Разработано достаточно много алгоритмов и методов фильтрации ИШ на изображениях, большинство из которых является развитием медианного фильтра. Между тем вопросам оценивания качества подобных процедур фильтрации (подавление ИШ и сохранение полезного изображения) уделяется недостаточное внимание. Так, в [1–4] отсутствуют сведения относительно строгого оценивания эффективности алгоритмов, приведены лишь примеры обработки элементарных тестовых изображений. В работах [5–7] оценивание методов проведено лишь для одного фиксированного уровня ИШ, в [8] – для трех уровней, в [9] – для шести. Оценка эффективности предлагаемых алгоритмов во всем диапазоне интенсивности ИШ сделана в работе [10]. Следует отметить, что в [5–10] авторами выбраны различные критерии оценивания (ошибки фильтрации изображений) и их нормировки, кроме того, предлагаемые критерии нередко являются зависимыми от параметров изображений, что существенно затрудняет сравнение эффективности алгоритмов. Некоторые критерии качества процедур фильтрации и сегментации изображений предложены в работах [11, 12], однако их сопоставление проведено для одного значения интенсивности ИШ.

Требуется исследовать и чувствительность критериев эффективности к основным параметрам обрабатываемого изображения – нестационарности рисунков (различию пространственных частот), размеру и степени квантования яркости.

Цель предлагаемой работы – обоснование критериев оценивания качества фильтрации ИШ на изображениях и исследование статистических зависимостей данных критериев от основных параметров изображения в диапазоне интенсивности шума от 0 до ∞ .

Постановка задач. Используемая модель исходного дискретизированного по строкам i и столбцам j изображения $\lambda(i, j)$ имеет вид

$$\lambda(i, j) = \Lambda(i\Delta t_1, j\Delta t_2), \quad (1)$$

где $\Lambda(t_1, t_2)$ – непрерывное изображение, соответствующее $\lambda(i, j)$; $\Delta t_1, \Delta t_2$ – интервалы дискретизации для i, j ($i \in 1, \dots, m, j \in 1, \dots, n$) соответственно.

Уровень яркости элементов изображения $\lambda(i, j)$ квантован на интервале от абсолютно черного до абсолютно белого:

$$\lambda(i, j) \in [0, \dots, 2^N - 1], \quad N = 1, 2, \dots, 8, \quad (2)$$

где 2^N – число уровней квантования элементов $\lambda(i, j)$.

Изображение, искаженное воздействием шума, описывается выражением

$$x(i, j) = f[\lambda(i, j), \hbar(i, j)], \quad (3)$$

где $f[\lambda(i, j), \hbar(i, j)]$ – оператор, определяющий взаимодействие полезного изображения $\lambda(i, j)$ и шума $\hbar(i, j)$.

Положив $x(i, j) = x_{i, j}$, $\lambda(i, j) = \lambda_{i, j}$, $\hbar(i, j) = \hbar_{i, j}$, запишем выражение (3) для ИШ:

$$x_{i, j} = \begin{cases} \lambda_{i, j} & \text{с вероятностью } p(\lambda); \\ \hbar_{i, j} & \text{с вероятностью } p(\hbar) = 1 - p(\lambda). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $p(\lambda)$ – вероятность появления полезного сигнала $\lambda_{i, j}$ в ячейке с координатой (i, j) ; $\hbar_{i, j}$ – значения искаженных элементов изображения, которые являются независимыми случайными величинами с равномерным распределением (rnd) и соответствуют интервалу квантования (2):

$$\hbar_{i, j} = \text{rnd}[0, \dots, 2^N - 1], \quad N = 1, 2, \dots, 8; \quad (5)$$

$p(\hbar)$ – вероятность появления выброса шума $\hbar_{i, j}$ в ячейке с координатой (i, j) , которая не зависит ни от наличия шума в других координатах, ни от исходного изображения, т. е. $p(\hbar) = \text{const} \forall i \in 1, \dots, m, j \in 1, \dots, n$.

Появление $\lambda_{i, j}$ и $\hbar_{i, j}$ образует полную группу несовместных событий для каждой отдельной координаты (i, j) .

При синтезе процедуры фильтрации изображения $x_{i, j}$ обычно находится оператор обработки F :

$$y_{i, j} = F[x_{i, j}], \quad (6)$$

позволяющий сформировать оценку $y_{i,j}$ изображения, наиболее близкую к ее истинным значениям:

$$\delta = \|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|, \quad \delta \rightarrow \min. \quad (7)$$

В зависимости от вида ошибки фильтрации (7) это может быть средне-квадратическое отклонение [5–7], модуль ошибки [9], евклидово расстояние [11, 12] и т. д.

Задачу выбора критерия сформулируем следующим образом: найти вид ошибки фильтрации (7), обеспечивающий ее инвариантность к размерности m, n и степени N квантования (2) изображений, а также обеспечивающий возможность объективной оценки качества фильтрации в случае $p(\hbar) \rightarrow 0$.

Задачу исследования ошибки фильтрации сформулируем следующим образом: экспериментально исследовать статистическую зависимость ошибки (7) от нестационарности рисунков (пространственных частот) размером $m \times n$ (1) и степенью N квантования (2) изображений при изменении интенсивности ИШ H , определяемой выражением

$$H = p(\hbar) \cdot 100\% = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\begin{cases} 1, & x_{i,j} = \hbar_{i,j}; \\ 0, & x_{i,j} = \lambda_{i,j} \end{cases} \right)}{mn} \cdot 100\%, \quad (8)$$

от 0 до 100 %.

Выбор ошибки фильтрации $\|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|$. Желательно, чтобы во многих случаях максимум ошибки фильтрации $\|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|$ был принят равным единице, поэтому в некоторых работах вводится его нормирование (деление) на $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|\lambda_{i,j}\|$ [5, 6, 8] или $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|x_{i,j}\|$ [9]. Однако при подобном нормировании ошибка (7) становится чувствительной к конкретному рисунку изображения. Так, если на изображении преобладает белый фон, т. е. $\lambda_{i,j} \approx 2^N - 1$ (2) либо $x_{i,j} \approx 2^N - 1$, то значения ошибки (7) будут намного меньшими (растет знаменатель $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|\lambda_{i,j}\|$), а если преобладает черный фон, наоборот, значительно большими (уменьшается знаменатель $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|\lambda_{i,j}\|$),

чем в случае среднестатистического изображения.

Известны работы, в которых ошибка (7) нормируется на величину $mn(2^N - 1)$, именуемую в некоторых случаях информационной емкостью изображения. Однако в данном случае выражение (7) становится зависимым от размера (1) и количества уровней квантования (2) конкретного изображения. Наиболее часто, особенно при синтезе оптимальных процедур фильтрации, в качестве ошибки (7) выбирается ее второй начальный момент $M\{(y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2\}$, обусловленный математической простотой. Между тем

точечная оценка момента $M \{(y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2\}$, определяемая выражением

$$\delta^M = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2, \quad (9)$$

также зависит от размера (1).

С учетом вышеизложенного предлагается ошибку (7) нормировать на максимальное ее значение, которое будет получено при $H \approx 100\%$ (8), т. е. $p(\hbar) = 1$ (4):

$$\delta = \frac{\|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|}{\max_{p(\hbar)=1} \|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|}. \quad (10)$$

При этом значения δ (10) будут приближаться к единице по мере роста $p(\hbar)$ и не будут зависеть от преобладания яркости элементов, размера и степени квантования тестового изображения.

В качестве метрик ошибки (7) могут быть использованы наиболее распространенные: среднеквадратическая ошибка фильтрации, нормированная в соответствии с (10):

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2}{\max_{p(\hbar)=1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2}, \quad (11)$$

евклидово расстояние в $m \times n$ -мерном пространстве:

$$\delta^E = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2}}{\max_{p(\hbar)=1} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2}}, \quad (12)$$

модуль разности векторов $y_{i,j}$ и $\lambda_{i,j}$:

$$\delta^{|\cdot|} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |y_{i,j} - \lambda_{i,j}|}{\max_{p(\hbar)=1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |y_{i,j} - \lambda_{i,j}|} \quad (13)$$

и корень квадратный из модуля (13):

$$\delta^{\sqrt{|\cdot|}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |y_{i,j} - \lambda_{i,j}|}}{\max_{p(\hbar)=1} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |y_{i,j} - \lambda_{i,j}|}}. \quad (14)$$

В качестве дополнительных метрик ошибки (7), представляющих интерес, можно предложить синус угла между векторами $y_{i,j}$ и $\lambda_{i,j}$ в $m \times n$ -мерном пространстве, впервые использованный для оценивания ошибок фильтрации и сегментации изображений в [11, 12],

$$\delta^{\sin} = \sqrt{1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{i,j} \lambda_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j})^2}} \right)^2} \quad (15)$$

и коэффициент их обратной взаимной корреляции [11, 12]

$$\delta^K = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \langle y \rangle)(\lambda_{i,j} - \langle \lambda \rangle)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \langle y \rangle)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j} - \langle \lambda \rangle)^2}} \right), \quad (16)$$

где $\langle y \rangle$ и $\langle \lambda \rangle$ – средние значения массивов $y_{i,j}$ и $\lambda_{i,j}$ соответственно.

В отличие от (11)–(14), ошибки фильтрации (15) и (16) не требуют нормирования на $\max_{p(h)=1} \|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|$, так как значения коэффициента корреляции и синуса угла лежат в пределах от нуля до единицы.

На рис. 1 представлены результаты вычислительного эксперимента по оцениванию эффективности двух процедур фильтрации ИШ: алгоритма медианной пространственно-избирательной фильтрации [10] и широко известного алгоритма медианной пространственно-инвариантной фильтрации [13]. Размеры апертуры при обеих обработках выбраны равными 3×3 элемента. В диапазоне значений интенсивности ИШ от 0 до 100 % для вышеуказанных процедур фильтрации рассчитаны их ошибки по выражениям (11)–(16). Результаты расчета ошибок фильтрации на рис. 1 являются усредненными по выборке из более чем 100 различных изображений модели (1), (2), подвергаемых импульсному зашумлению в соответствии с (3)–(5) и последующей фильтрации. Параметры изображений: $m \times n = 640 \times 480$, $N = 8$. Все рассматриваемые вычислительные эксперименты проведены в среде MathCad11.

Из рис. 1 видно, что предложенные ошибки фильтрации (11)–(16) являются относительными при оценивании двух алгоритмов. Так, согласно ошибке (11) алгоритмы имеют одинаковую эффективность при интенсивности шума $H = 40$ %. Исходя из критерия (12) алгоритмы равны по эффективности при $H \approx 48$ %, $H \approx 70$ %. Ошибка (13) показывает тождественность процедур фильтрации при $H \approx 67$ %. Исходя из критерия (14) эффективность алгоритмов одинакова при $H \approx 90$ %, а из критериев (15), (16) – при $H \approx 40$ % и $H \approx 38$ % соответственно.

Необходимо отметить, что интенсивности шума H , при которых эффективность алгоритмов одинакова, приблизительно совпадают у четырех критериев – (11), (12), (15), (16) – из шести рассмотренных, что может свидетельствовать об адекватности ошибок фильтрации (11) и (12), так как критерии (15) и (16) по физическому смыслу далеки от (11)–(14).

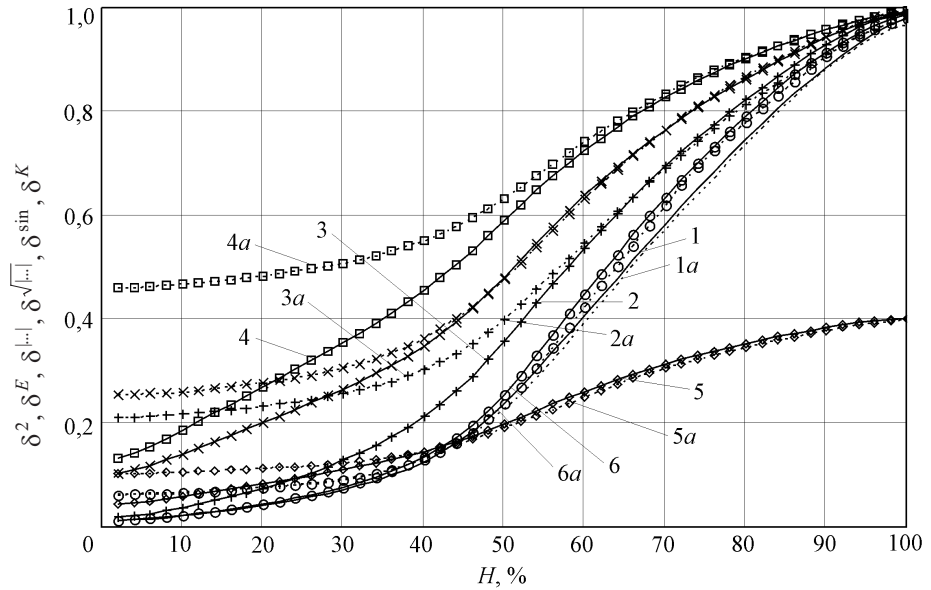


Рис. 1. Сопоставление критериев (11)–(16) при оценивании эффективности фильтрации изображений двумя алгоритмами: кривая 1 – медианная избирательная и кривая 1а – инвариантная фильтрация по критерию (11); 2 и 2а – по критерию (12); 3 и 3а – по критерию (13); 4 и 4а – по критерию (14); 5 и 5а – по критерию (15); 6 и 6а – по критерию (16)

Из рис. 1 можно также сделать вывод, что для оценивания приблизительно одинаковых по эффективности процедур фильтрации в диапазоне интенсивности ИШ от 0 до 30 % целесообразно использовать выражения (14), (13), (12), дающие наибольшие расхождения критериальных показателей. Для оценивания алгоритмов в диапазоне шума от 30 до 60 % целесообразно использовать также (14), (13). Для оценивания эффективности процедур фильтрации в диапазоне зашумленности более 60 % целесообразно использовать критерии (16), (15), (11), показывающие большие расхождения эффективности по сравнению с остальными.

Необходимо также отметить особенности поведения синуса угла двух векторов-изображений (15), максимальное значение которого не превышает 0,4 при $H = 100\%$.

В практике оценивания качества фильтрации часто возникают случаи поиска компромисса между степенью подавления шума и сохранением неискаженного изображения. Меньшую (фильтрация нескольких шумовых импульсов) или большую ошибку (искажения полезных контуров по всей $m \times n$ -площади) при оценивании выходного изображения принесет использование традиционного пространственно-инвариантного медианного алгоритма [13], например, в случае $p(\hbar) \rightarrow 0$ (4)? Ответ на данный вопрос можно получить, используя нелинейно нормированный в диапазоне H критерий, например, евклидовой метрики

$$\delta_{y/x}^E = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \lambda_{i,j})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \lambda_{i,j})^2}}. \quad (17)$$

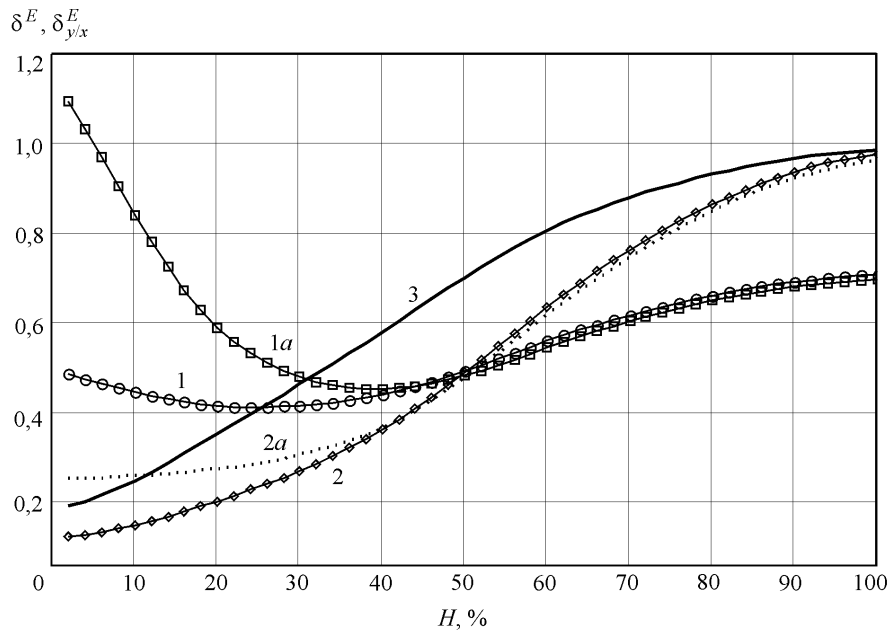


Рис. 2. Сопоставление критериев (12) и (17) при оценивании эффективности двух алгоритмов фильтрации изображений: кривая 1 – медианная избирательная и кривая 1а – инвариантная фильтрация по критерию (17); 2 и 2а – по критерию (12); 3 – нормированный знаменатель выражения (17)

Таким образом, выражение (17) является евклидовой метрикой изображений $y_{i,j}$ и $\lambda_{i,j}$, нормированной на аналогичную метрику изображений $x_{i,j}$ и $\lambda_{i,j}$.

На рис. 2 приведены результаты вычислительного эксперимента по сопоставлению эффективности алгоритмов по критерию (17). Для сравнения оценок по линейно нормированному в диапазоне H критерию приведены значения ошибки (12) (нормированный числитель (17)) и значения евклидовой метрики $\|x_{i,j} - \lambda_{i,j}\|$ (нормированный знаменатель (17)).

Проводя оценивание алгоритмов по критерию (17) (см. рис. 2), можно сделать вывод, что алгоритм медианной пространственно-избирательной фильтрации, предложенный в [10], в существенно меньшей степени искажает полезное изображение при $p(\hbar) \rightarrow 0$, чем известный алгоритм медианной пространственно-инвариантной фильтрации [13]. Компромисс между степенью фильтрации шума и сохранением полезных деталей на изображении у процедуры [10] достигается при $H = 20-30\%$ (экстремум через минимум соответствующей кривой на рис. 2), а у процедуры [13] – при $H = 40\%$.

Зависимость ошибки $\|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\|$ от параметров изображения. Исследование статистической зависимости ошибки фильтрации (7) от параметров изображения проведено в два этапа. На первом исследовалась ее зависимость от нестационарности рисунков (различия пространственных частот), на втором – от размера $m \times n$ (1) и степени квантования N (2).

На рис. 3 представлены результаты статистических исследований зависимости ошибки вида (12) от нестационарности рисунка изображения для алгоритма пространственно-избирательной медианной фильтрации [10].

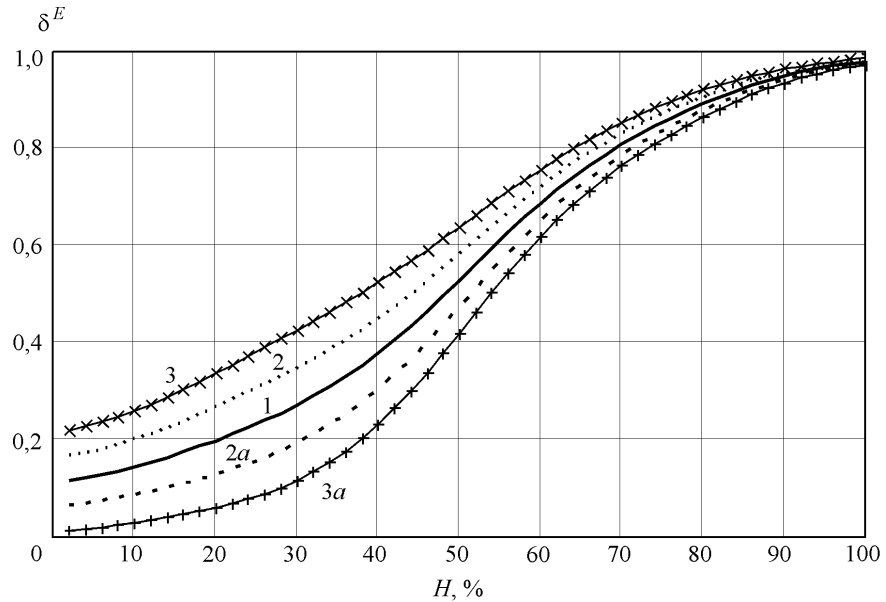


Рис. 3. Зависимость критерия (12) от статистики изображений с различными пространственными частотами: кривая 1 – математическое ожидание значений ошибки (12) для различных изображений; 2 – верхняя и 2а – нижняя граница доверительного интервала для вероятности 0,9550; 3 и 3а – для вероятности 0,9999

Для исследования использована рабочая выборка самых разнообразных рисунков и сцен из более чем 100 изображений с $m \times n = 640 \times 480$, $N = 8$, включая пространственно-монотонные (абсолютно белый и черный фон) и высокочастотные изображения (наиболее высокочастотное являлось случайной генерацией значений элементов по закону (5)). На рис. 3 приведена зависимость математического ожидания значений ошибки фильтрации для рабочей выборки изображений в исследуемом диапазоне шума и рассчитанные по методике [14] границы доверительных интервалов для двух значений доверительной вероятности: 0,9550 и 0,9999. Из рисунка видно, что значения ошибки двух изображений одинакового размера и квантования при доверительной вероятности 0,9550 могут отличаться в 2 раза. Причем установлено, что изображения с преимущественно низкими пространственными частотами имеют меньшие значения ошибки (приближаются к нижней границе доверительного интервала), а изображения с высокими частотами – большие (приближаются к верхней границе), что свидетельствует о большей адекватности рангового по своей сути алгоритма [10] фильтрации низкочастотных изображений. Алгоритм [13] показывает результаты, аналогичные представленным на рис. 3 (разброс величин доверительных интервалов практически совпадает с [10]), но с отличной зависимостью математического ожидания ошибки (12) (см. рис. 1).

Для исследования влияния размера $m \times n$ (1) на величину ошибки были использованы изображения с дискретизациями от 500×500 до 100×100 элементов, разночастотными рисунками и $N = 8$. На рис. 4 представлены результаты численных исследований зависимости ошибки (12) алгоритмов фильтрации [10] и [13] от размера $m \times n$ (1). Выбор размера изображения в сторону

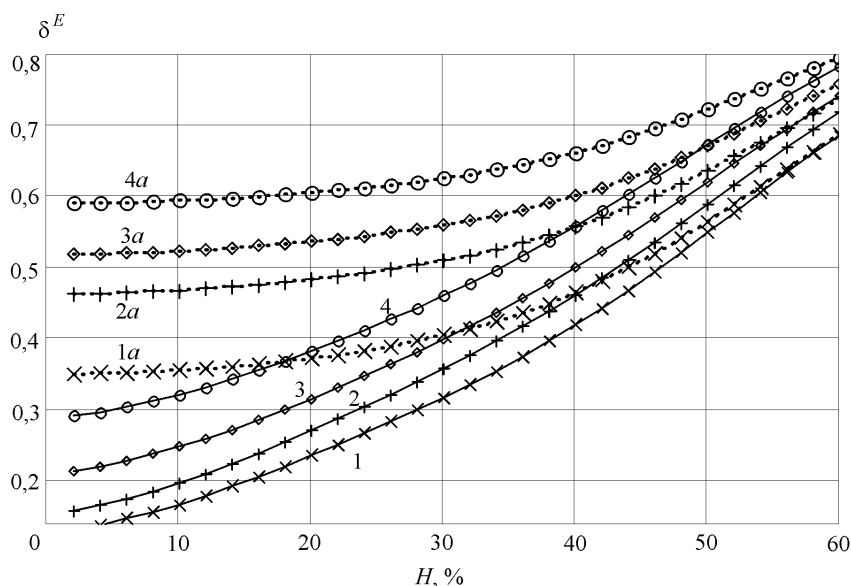


Рис. 4. Зависимость критерия (12) от размера $m \times n$ изображений при их фильтрации двумя алгоритмами: кривая 1 – 500×500 , алгоритм [10] и кривая 1a – алгоритм [13]; 2 – 300×300 , алгоритм [10] и 2a – алгоритм [13]; 3 – 200×200 , алгоритм [10] и 3a – алгоритм [13]; 4 – 100×100 , алгоритм [10] и 4a – алгоритм [13]

уменьшения сделан исходя из того, что при оценивании процедур фильтрации, ввиду высокой вычислительной сложности алгоритмов, уменьшают размеры изображения независимо от того, как это повлияет на конечный результат. Из рис. 4 видно, что при уменьшении размера изображения ошибка фильтрации увеличивается как для алгоритма [10], так и для процедуры [13], причем характер кривых соответствует рис. 1 для всех $m \times n$. Это позволяет обобщить данный вывод на другие подобные алгоритмы фильтрации. Результаты, приведенные на рис. 4, согласуются с зависимостями на рис. 3, так как уменьшение размера изображения ведет, по сути, к росту его высокочастотности, и наоборот.

Результаты численных исследований зависимости ошибки (12) алгоритмов [10] и [13] от степени квантования изображения N (2), равной 8, 6 и 1 при $m \times n = 640 \times 480$, представлены на рис. 5. Как следует из (2), при $N = 8$ изображение имеет 256 градаций серого, при $N = 1$ – две градации, т. е. является бинарным. Из рисунка видно, что со снижением N значения ошибки (12) двух алгоритмов уменьшаются, что согласуется с зависимостями на рис. 3 и 4, так как рост N в некотором смысле повышает высокочастотность изображения. Между тем при $N = 8$ различие ошибок (12) для [10] и [13] более чем в 2 раза выше, чем при $N = 6$; при $N = 1$ и $H = 5-35\%$ ошибка алгоритма [13] становится несколько меньшей, чем ошибка в [10]. Это позволяет сделать вывод о большей приемлемости алгоритма [10] для фильтрации многоградационных изображений.

На рис. 4 и 5 зависимости приведены в диапазоне шума H от 0 до 60 % и от 0 до 50 % соответственно; при дальнейшем росте N кривые постепенно сближаются.

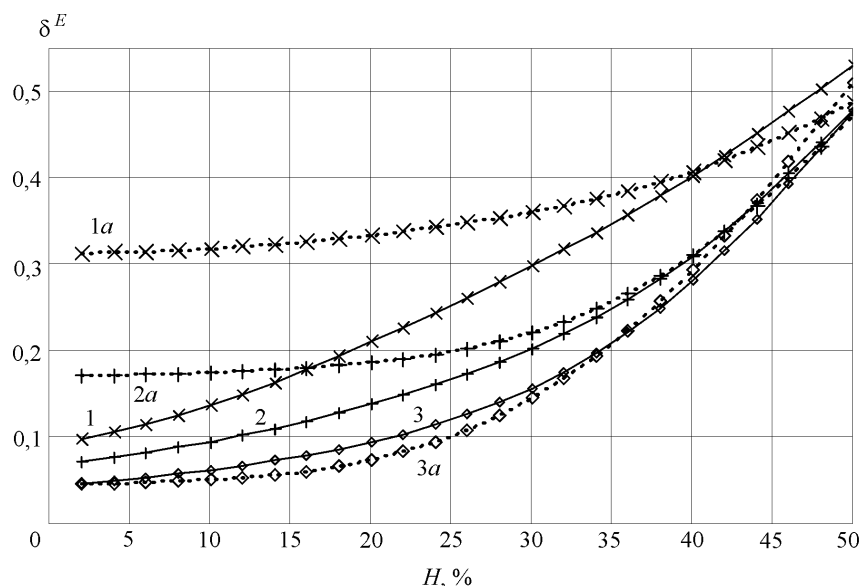


Рис. 5. Зависимость критерия (12) от степени квантования яркости N изображений при их фильтрации двумя алгоритмами: кривая 1 – $N = 8$, алгоритм [10] и кривая 1a – алгоритм [13]; 2 – $N = 6$, алгоритм [10] и 2a – алгоритм [13]; 3 – $N = 1$, алгоритм [10] и 3a – алгоритм [13]

Заключение. Предложенные и сопоставленные в работе критерии качества на основе различных ошибок фильтрации, а также результаты вычислительных экспериментов по исследованию данных критериев при различной интенсивности шума позволяют обосновать единый численно-строгий и объективный подход к оцениванию эффективности самых различных процедур фильтрации импульсных шумов на изображениях.

Необходимо отметить известное расхождение в оценках качества изображения математическими критериями и восприятием человека. Поэтому некоторые результаты, являющиеся с точки зрения математических показателей более предпочтительными, визуально могут быть хуже, и наоборот. Тем не менее цифровая фильтрация изображений находит применение в различных информационных системах с автоматическим принятием решений, функционирование которых полностью подчинено математическим критериям, и эффективность их работы должна оцениваться исключительно математически.

Рассмотренный подход к оцениванию качества процедур фильтрации изображений по предложенным критериям может быть использован не только для модели импульсных, но и других типов шумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воскобойников Ю. Е., Колкер А. Б. Адаптивный алгоритм фильтрации и преобразование изображений в векторный формат // Автометрия. 2002. 38, № 4. С. 3.
2. Ключко В. К., Ермаков А. А. Алгоритмы фильтрации и сегментации трехмерных радиолокационных изображений поверхности // Там же. С. 41.

3. **Чуриков Д. В.** Атомарные функции и комбинированный алгоритм фильтрации изображений в условиях помех высокой интенсивности // Радиотехника. 2004. № 9. С. 69.
4. **Воскобойников Ю. Е., Касьянова С. Н., Кисленко Н. П., Трофимов О. Е.** Использование алгоритмов нелинейной фильтрации для улучшения качества восстановленных томографических изображений // Автометрия. 1997. № 3. С. 13.
5. **Белявцев В. Г., Воскобойников Ю. Е.** Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры // Автометрия. 1998. № 3. С. 18.
6. **Бронников А. В., Воскобойников Ю. Е.** Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений // Автометрия. 1990. № 1. С. 21.
7. **Сергеев В. В., Мясников В. В.** Алгоритм быстрой реализации фильтра Габора // Автометрия. 1999. № 6. С. 51.
8. **Белявцев В. Г., Воскобойников Ю. Е.** Векторные локальные фильтры с адаптацией размера апертуры // Автометрия. 2001. № 6. С. 32.
9. **Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г.** Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97.
10. **Самойлин Е. А.** Нелинейные алгоритмы фильтрации импульсного шума на изображениях // Автометрия. 2005. 41, № 5. С. 26.
11. **Самойлин Е. А.** Оценка эффективности алгоритмов фильтрации-сегментации изображений // Автоматика и вычисл. техника. 2004. № 2. С. 62.
12. **Самойлин Е. А.** Оценка эффективности программных методов обработки изображений // Программные продукты и системы. 2003. № 4. С. 34.
13. **Хуанг Т. С.** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984.
14. **Королюк В. С., Портенко Н. И., Скороход А. В., Турбин А. Ф.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985.

Поступила в редакцию 7 сентября 2005 г.