

УДК 681.3

АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ ШУМАМИ

© 2007 г. Е. А. Самойлин, канд. техн. наук

Ростовский военный институт ракетных войск им. Главного маршала артиллерии Неделина М.И.,
г. Ростов-на-Дону

E-mail: sea@rsu.ru

Предложены инвариантные к присутствию импульсных шумов алгоритмы восстановления сигналов цифровых оптических изображений. Приведены результаты численных исследований предлагаемых и известных алгоритмов, свидетельствующие о преимуществах первых. Представлен пример фильтрации импульсных шумов на изображении с использованием известного и одного из предлагаемых алгоритмов восстановления.

Коды OCIS: 100.2000.

Поступила в редакцию 23.11.2006.

Введение

В настоящее время созданы и широко используются различные оптико-электронные и информационные системы с цифровой обработкой оптических изображений.

Между тем, многие практические условия цифровой обработки, передачи, хранения и преобразования изображений в оптико-электронных системах являются причиной появления на растре точечных или импульсных шумов (ИШ), т. е. некоррелированных резких изменений яркости отдельных пикселей [1, 2]. Например, импульсные шумы могут возникать при ошибках оцифровки и квантования изображений (шумы квантования), выходе из строя отдельных элементов оптико-электронных датчиков и т. д. [1, 2]. В настоящее время известно [1–4] немало методов и алгоритмов фильтрации ИШ, большинство из которых являются развитием медианной процедуры обработки. Однако известные методы, включая адаптивные с оптимальной подстройкой параметров скользящего окна [5], являются инвариантными процедурами обработки, что ведет к неизбежным искажениям изображений в областях, в которых ИШ отсутствуют. Выход из данной ситуации предложен в работе [6] и заключается в разделении процедуры фильтрации на два этапа – пространственное оценивание ИШ и непосредственная фильтрация, т. е. восстановление элементов изображений, содержащих ИШ. В [6] рассмотрены несколько алгоритмов оценивания ИШ, введение которых в процедуру позволяет повысить эффективность фильтрации изображений. Между

тем дальнейшее улучшение качества фильтрации ИШ на изображениях может быть достигнуто использованием усовершенствованных правил восстановления элементов, оцененных как шумы на первом этапе. Поэтому разработка алгоритмов восстановления сигналов изображений, искаженных ИШ, является актуальной научной задачей.

Цель работы – повышение качества фильтрации цифровых оптических изображений, искаженных воздействием ИШ.

Постановка задачи

Модель цифрового (со строками i и столбцами j) оптического изображения $\lambda(i, j)$ имеет вид

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

где $\Lambda(t_1, t_2)$ – аналоговое изображение, соответствующее $\lambda(i, j)$; $\Delta t_1, \Delta t_2$ – интервалы дискретизации для i, j соответственно.

Значения яркости пикселей изображения $\lambda(i, j)$ квантованы на интервале от черного до белого:

$$\lambda(i, j) \in [0, 2^N - 1], \quad N = 8, 16 \text{ и т. д.}, \quad (2)$$

где N – число бит квантования яркости сигналов $\lambda(i, j)$ (глубина полутонов).

Изображение, искаженное шумом, в общем случае описывается выражением

$$x(i, j) = f(\lambda(i, j), h(i, j)), \quad i \in [1, m], \quad j \in [1, n], \quad (3)$$

где $f(\lambda(i, j), h(i, j))$ – оператор, описывающий взаимодействие исходного изображения $\lambda(i, j)$ и шума $h(i, j)$; m, n – соответственно числа i и j .

Перейдя к индексам $x(i,j) = x_{i,j}$, $\lambda(i,j) = \lambda_{i,j}$, $h(i,j) = h_{i,j}$, запишем выражение (3) для изображения, искаженного ИШ,

$$x_{i,j} = \begin{cases} \lambda_{i,j} & \text{с вероятностью } p(\lambda), \\ \tilde{h}_{i,j} & \text{с вероятностью } p(\tilde{h}) = 1 - p(\lambda), \end{cases} \quad (4)$$

где $p(\lambda)$ – вероятность появления исходного сигнала $\lambda_{i,j}$ в ячейке с координатой (i,j) , $\tilde{h}_{i,j}$ – значения искаженных элементов изображения, которые являются независимыми случайными величинами с равномерным распределением (rnd), соответствующими интервалу квантования (2)

$$\tilde{h}_{i,j} = \text{rnd}(0, \dots, 2^N - 1), \quad N = 8, 16 \text{ и т. д.}, \quad (5)$$

$p(h) = \text{const} \forall i \in [1, m], j \in [1, n]$ – вероятность появления выброса шума $\tilde{h}_{i,j}$ в ячейке с координатами i, j .

Появления $\lambda_{i,j}$ и $\tilde{h}_{i,j}$ составляют полную группу несовместных событий для каждого отдельного пиксела (i,j) .

Необходимо разработать алгоритм обработки зашумленного изображения $x_{i,j}$, описываемого выражением (4), позволяющий сформировать такую оценку $y_{i,j}$ изображения, которая была бы наиболее близка к ее истинным значениям, т. е. необходимо определить оператор $x_{i,j} = F[x_{i,j}]$, при котором минимизировалась бы невязка

$$\|y_{i,j} - \lambda_{i,j}\| \rightarrow \min_F. \quad (6)$$

Алгоритмы восстановления сигналов изображений

Как указано в [6], восстановлению изображений должна предшествовать процедура оценивания ИШ. Рассмотрим алгоритм оценивания ИШ, предложенный в [6] и показавший достаточную эффективность по сравнению с остальными. Так как медиана является наилучшей оценкой неискаженного изображения, то оценка ИШ будет выглядеть следующим образом [6]:

$$\tilde{h}_{i,j} = \begin{cases} 1, & |x_{i,j} - \text{med}\{x_{i+r,j+q}\}| \geq P_M, \\ 0, & |x_{i,j} - \text{med}\{x_{i+r,j+q}\}| < P_M, \end{cases} \quad r, q = -1, 0, 1, \quad (7)$$

где P_M – некоторый порог, величина которого должна выбираться порядка 5% от количества уровней квантования изображения, т. е. около 12,5 при $N = 8$ (2); r, q – параметры, определяющие размер скользящего окна (апертуры) по i и j соответственно ($r, q = -1, 0, 1$ для размера 3×3 элемента).

Таким образом, результатом первого этапа обработки (7) будет бинарная матрица оценки шума $\tilde{h}_{i,j}$, единицы которой будут пространственно соответствовать ИШ на изображении $x_{i,j}$.

Рассмотрим алгоритмы восстановления сигналов изображений, оцениваемые в соответствии с (7) как ИШ.

Алгоритм 1. Пространственно-избирательное восстановление [7] на основе усреднения по апертуре

$$y_{i,j}^1 = \begin{cases} \frac{1}{8} \sum_{r=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 (x_{i+r,j+q}), & \tilde{h}_{i,j} = 1, \quad r, q = -1, 0, 1, \\ x_{i,j}, & \tilde{h}_{i,j} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

В выражении (8) r и q одновременно не равны нулю, т. е. усредняются только 8 смежных с центром апертуры пикселей. Согласно выражению (8) усреднение осуществляется для восстановления только тех элементов, которые оценены как шум ($\tilde{h}_{i,j} = 1$) на этапе (7). При этом центральный элемент текущей апертуры не участвует в усреднении, что повышает качество восстановления и делает процедуру на основе усреднения (традиционно считавшуюся неприемлемой для фильтрации ИШ) достаточно эффективной.

Алгоритм восстановления (8) приемлем при относительно низкой интенсивности ИШ на изображении, т. е. в тех случаях, когда в текущей апертуре, кроме центра, отсутствуют элементы, оцененные на этапе (7) как шумовые. В противном случае шумовые элементы могут оказать существенное влияние на результат усреднения (выход фильтра). При этом можно предложить алгоритм восстановления, инвариантный к присутствию шумов в апертуре.

Алгоритм 2. Усреднение по выборке неиспорченных элементов (т. е. исключая $\tilde{h}_{i,j} = 1$) из текущей апертуры

Шаг 1. Формирование матрицы изображения, у которой значения шумовых элементов в соответствии с (7) подлежат замене на нули

$$z_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, & \tilde{h}_{i,j} = 0, \\ 0, & \tilde{h}_{i,j} = 1. \end{cases} \quad (9)$$

Шаг 2. Восстановление пикселей, содержащих ИШ, путем усреднения по апертуре смежных неиспорченных элементов. В усреднении не участвуют элементы, оцененные как шумы $\tilde{h}_{i,j}$ на этапе (7)

$$y_{i,j}^2 = \begin{cases} \frac{1}{8 - \varepsilon} \sum_{r=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 (z_{i+r,j+q}), & \tilde{h}_{i,j} = 1, \quad r, q = -1, 0, 1, \\ x_{i,j}, & \tilde{h}_{i,j} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где ε – число пикселей в апертуре, содержащих ИШ ($\tilde{h}_{i+r,j+q} = 1$), не считая центрального, который по условию в первой строке (10) $\tilde{h}_{i,j} = 1$. В (10) переменные r и q одновременно не равны нулю (для исключения участия центрального пиксела в усреднении).

В выражении (10), в отличие от известных усредняющих (порогово-усредняющих) [1] процедур и алгоритма (8), усреднению подлежит выборка, из которой полностью исключены пиксели, содержащие шум.

Известно [1, 2], что для подавления ИШ в наибольшей степени подходит медианный фильтр, выходом которого является срединное значение ряда, получаемого при упорядочивании элементов, попавших в апертуру, по возрастанию (убыванию). Таким образом, по аналогии с (8), можно предложить следующий алгоритм восстановления.

Алгоритм 3. Пространственно-избирательное восстановление [7] на основе медианы

$$y_{i,j}^3 = \begin{cases} \text{med}(x_{i+r,j+q}), \tilde{h}_{i,j}=1; \\ x_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=0, \end{cases} \quad r, q = -1, 0, 1. \quad (11)$$

$$y_{i,j}^4 = \begin{cases} \begin{cases} \text{med}(w_{i+r,j+q}) \forall w_{i+r,j+q} > 0 \text{ при нечетной выборке } w_{i+r,j+q} \\ \frac{1}{2}(\overline{\text{med}}(w_{i+r,j+q}) + \overline{\text{med}}(w_{i+r,j+q})) \forall w_{i+r,j+q} > 0 \text{ при четной выборке } w_{i+r,j+q} \end{cases}, \tilde{h}_{i,j}=1, \\ x_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=0, \end{cases} \quad (13)$$

где $\overline{\text{med}}$ – левое срединное (т. е. ближайшее слева к середине) значение ряда в случае четного числа элементов выборки, $\overline{\text{med}}$ – правое срединное значение. Таким образом, при четном числе положительной после (12) выборки, ее медиана представляет собой среднее двух центральных при ранжировании по возрастанию значений элементов.

При высокой интенсивности ИШ, когда в апертуре остается 1–3 неиспорченных элемента, вместо процедуры усреднения и медианы можно использовать замену центра апертуры на смежные пиксели.

Алгоритм 5. Замена центра апертуры на одно из значений смежных пикселей

$$y_{i,j}^5 = \begin{cases} \text{rnd}(x_{i+r,j+q})_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=1; \\ x_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=0, \end{cases} \quad r, q = -1, 0, 1. \quad (14)$$

В (14) замена центрального пиксела осуществляется по случайному закону с равномерным распределением (rnd).

Для высокой интенсивности помех более эффективен алгоритм, заменяющий центр аналогично (14), но на значения неиспорченных пикселей.

Алгоритм 6. Замена центра апертуры на одно из значений смежных пикселей, не содержащих шум

На первом шаге, аналогично (12), находится матрица $w_{i,j}$. На втором осуществляется замена центра апертуры на один из смежных элементов, который в соответствии с (7) не содержит ИШ,

По аналогии с (10), для случая высокой интенсивности ИШ на изображении можно предложить следующий алгоритм восстановления.

Алгоритм 4. Медиана выборки неиспорченных элементов в апертуре

Шаг 1. Формирование, аналогично (9), матрицы изображения, у которой пиксели, содержащие ИШ (в соответствии с (7)), подлежат замене на значения, лежащие вне интервала квантования, например, отрицательные.

$$w_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=0; \\ -x_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=1. \end{cases} \quad (12)$$

Шаг 2. Восстановление пикселей по медиане выборки, из которой исключены значения шума, определяемые по $\tilde{h}_{i,j}$.

$$y_{i,j}^6 = \begin{cases} \text{rnd}(w_{i+r,j+q}) \forall w_{i+r,j+q} > 0, \tilde{h}_{i,j}=1; \\ x_{i,j}, \tilde{h}_{i,j}=0, \end{cases} \quad r, q = -1, 0, 1. \quad (15)$$

Таким образом, полная процедура фильтрации, т. е. искомый оператор F (см. выражение 6), представляет собой использование алгоритма оценивания ИШ (7) либо другого, аналогичного [6], и одного из предлагаемых алгоритмов 1–6 восстановления сигналов.

Результаты численных исследований алгоритмов

Численное исследование эффективности предлагаемых алгоритмов восстановления сигналов цифровых изображений проведено путем вычисления значений невязки (6) между исходным изображением $\lambda_{i,j}$ и изображением, зашумленным в соответствии с выражением (4) и восстановленным впоследствии по предлагаемым процедурам. Причем исследование эффективности выполнено для интенсивности зашумления от 0 (шум отсутствует) до 70% (испорченных пикселей) и определяемой из выражения

$$H = p(h)100\% = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\begin{cases} 1, x_{i,j} = \tilde{h}_{i,j} \\ 0, x_{i,j} = \lambda_{i,j} \end{cases} \right) / mn \right) 100\%. \quad (16)$$

В качестве невязки (6), т. е. ошибки восстановления, выбрано евклидово расстояние, нормированное аналогично [6] на размер изображения,

$$E^{1,\dots,6} = \left(\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j} - y_{i,j}^{1,\dots,6})^2} \right) / mn. \quad (17)$$

В выражении (17) критерий E^1 определяет ошибку алгоритма восстановления $y_{i,j}^1$, критерий E^2 – алгоритма $y_{i,j}^2$ и т. д.

При численном исследовании использовались разнообразные цифровые изображения с $m \times n = 300 \times 300$, $N = 8$ и различными пространственными частотами. Приводимые далее результаты (значения ошибок $E^{1,\dots,6}$) усреднены по выборке из более чем 100 цифровых изображений с указанными параметрами.

На рис. 1 представлены результаты расчета ошибок (17) для трех алгоритмов восстановления: известного [1] усредняющего, 1 и 2. Из рис. 1 следу-

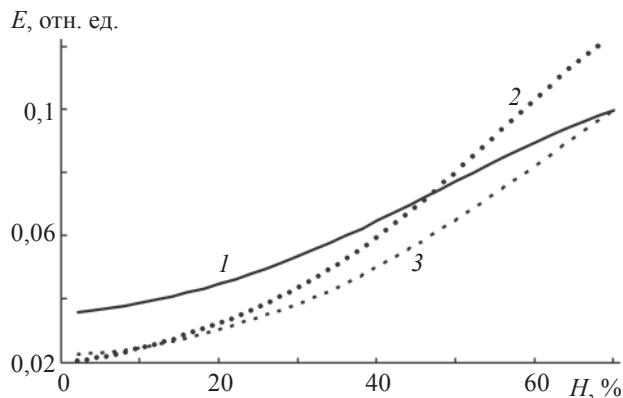


Рис. 1. Результаты расчета ошибок фильтрации (17) для алгоритмов восстановления на основе усреднения. 1 – известный [1], 2 – алгоритм 1, 3 – алгоритм 2. H – уровень шума.

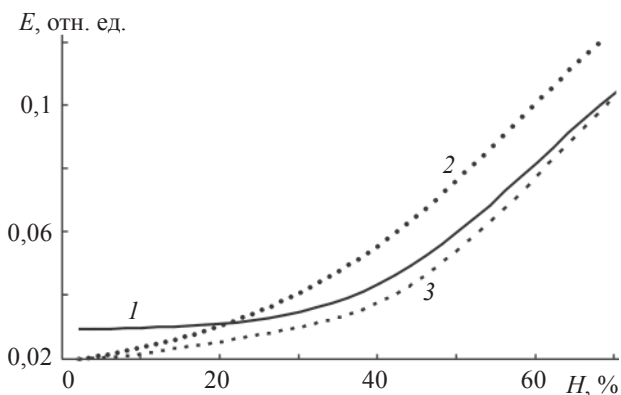


Рис. 2. Результаты расчета ошибок (17) для алгоритмов восстановления на основе медианы. 1 – известный [2], 2 – алгоритм 3, 3 – алгоритм 4. H – уровень шума.

ет, что введение в известную [1] процедуру усреднения алгоритма оценивания ИШ (7) позволяет повысить эффективность (меньшие значения ошибки) фильтрации при интенсивности ИШ до 50%. При уровне шума $H = 50\text{--}70\%$ использование алгоритма оценивания (7) ухудшает качество фильтрации изображений. Из рис. 1 также следует, что алгоритм восстановления 2 на основе усреднения выборки из незашумленных пикселей является наиболее эффективным из всех усредняющих алгоритмов в рассматриваемом диапазоне интенсивности шума.

На рис. 2 приведены ошибки (17) для трех медианных алгоритмов восстановления: известного [2] инвариантного, 3 и 4. Из рис. 2 видно, что алгоритм 3 является более эффективным по сравнению с известным [2] при низком уровне шума (до 20%), что объясняется меньшими искажениями контуров и контрастных деталей. Предлагаемый алгоритм восстановления 4 показывает наилучшее качество из сопоставляемых процедур в рассматриваемом диапазоне шума, так как в медианном анализе, позволяющем сохранить контуры и контрастные детали, не участвуют шумовые пиксели.

На рис. 3 приведены аналогичные ошибки восстановления сигналов для алгоритмов 5 и 6. Из рис. 3 видно, что эффективность алгоритма 6 выше более чем в два раза при низкой интенсивности шума (до 15%). С дальнейшим ростом H ошибки алгоритмов сближаются и имеют одинаковое значение при $H = 65\%$.

На рис. 4 с целью сравнительного анализа сопоставлены алгоритмы, показавшие наилучшие по критерию (17) результаты (алгоритмы 2, 4, 6). Из рис. 4 следует, что при незначительном уровне H (до 5%) наиболее эффективным является алгоритм 6. При интенсивностях шума $H = 5\text{--}65\%$ более качественным является алгоритмом 4 медиан-

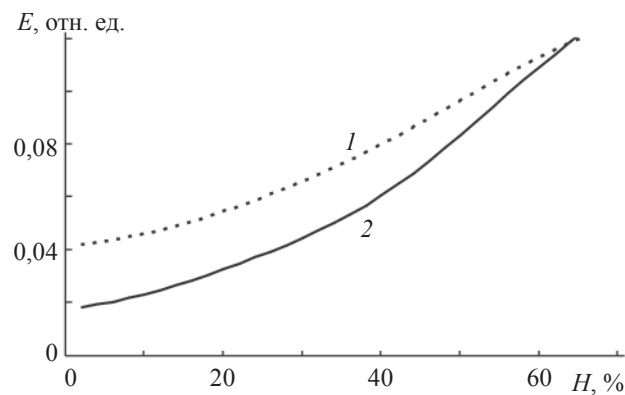


Рис. 3. Результаты расчета ошибок (17) для алгоритмов восстановления на основе замены. 1 – алгоритм 5, 2 – алгоритм 6. H – уровень шума.

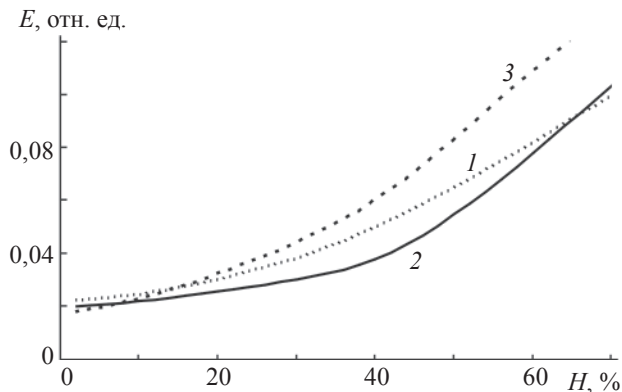


Рис. 4. Сопоставление ошибок для алгоритмов восстановления. 1 – алгоритм 2, 2 – алгоритм 4, 3 – алгоритм 6. H – уровень шума.

ного восстановления по незашумленной выборке. При уровне $H = 65\text{--}70\%$ наилучшие результаты показывает алгоритм восстановления на основе усреднения незашумленной окрестности.

На рис. 5а–5в в качестве примера приведены результаты восстановления цифрового космического снимка Санкт-Петербурга известным [1] инвариантным усредняющим алгоритмом, традиционно неприемлемым для фильтрации ИШ, и процедурой (9), (10). Судя по рис. 5а–5в, можно сделать вывод о том, что использование предварительного оценивания шума на первом этапе обработки и восстановления сигналов испорченных пикселей на основе усреднения незашумленных элементов текущей апертуры позволяет получить существенно лучшее качество фильтрации изображений.

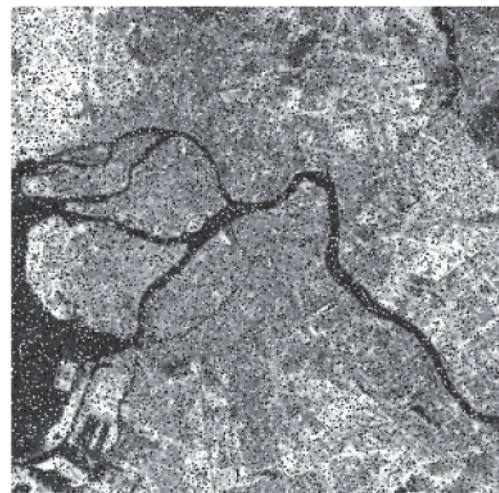
Заключение

Предлагаемые алгоритмы восстановления сигналов позволяют повысить эффективность процедур цифровой фильтрации оптических изображений. Наилучшим качеством в широких пределах интенсивности ИШ обладает медианный алгоритм, инвариантный к наличию шумов в апертуре, которые оцениваются на предварительном этапе обработки и не включаются при ранжировании ряда.

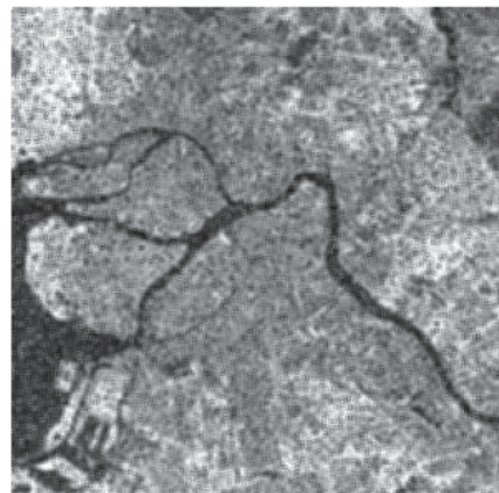
Новизна работы заключается в представленных впервые алгоритмах восстановления сигналов цифровых оптических изображений, отличающихся от известных процедур инвариантностью к присутствию шумов в апертуре, а также в численных исследованиях, свидетельствующих о преимуществах данных алгоритмов.

Рассмотренные алгоритмы достаточно легко реализуемы программно и аппаратно и могут быть использованы в различных информационных и компьютерных системах с цифровой обработкой оптических изображений.

(а)



(б)



(в)

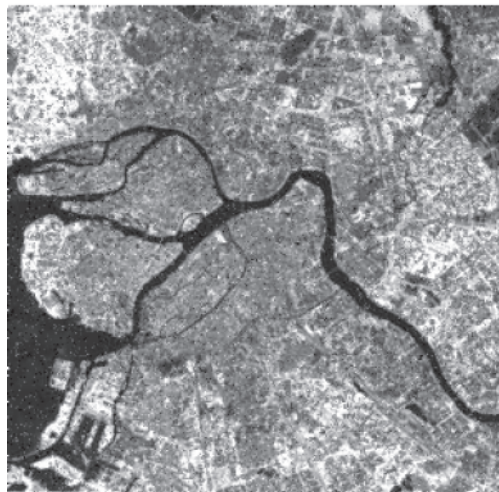


Рис. 5. а – исходное зашумленное изображение при $H = 20\%$, б – результат восстановления исходного изображения известной [1] усредняющей процедурой, в – результат восстановления исходного изображения алгоритмом 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

2. *Сойфер В.А., Гашиников М.В., Глумов Н.И. и др.* Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2001. 784 с.
 3. *Петров Е.П., Трубин И.С., Буторин Е.Л.* Нелинейная фильтрация последовательности цифровых полутоновых изображений // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 10. С. 1265–1272.
 4. *Трубин И.С., Тихонов И.Е.* Адаптивная нелинейная цифровая фильтрация полутоновых изображений // Радиотехника. 2003. № 12. С. 27–30.
 5. *Воскобойников Ю.Е., Кузнецов А.М.* Новый алгоритм адаптации размера апертуры локальных векторных фильтров // Автометрия. 2005. Т. 41. № 5. С. 3–12.
 6. *Самойлин Е.А.* Алгоритмы оценивания импульсного шума в задачах цифровой фильтрации оптических изображений // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 42–46.
 7. *Самойлин Е.А.* Нелинейные алгоритмы фильтрации импульсного шума на изображениях // Автометрия. 2005. Т. 41. № 5. С. 26–32.
-