

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА СО СЛУЧАЙНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ИМПУЛЬСОВ

*Приоров А.Л., к.т.н., доцент кафедры динамики электронных систем Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, e-mail: dcslab@uniyar.ac.ru*

*Куйкин, Д.К., аспирант Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, e-mail: denis.kuykin@gmail.com*

*Хрящев В.В., к.т.н., доцент кафедры динамики электронных систем Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, e-mail: dcslab@uniyar.ac.ru*

**Ключевые слова:** импульсный шум, медианный фильтр, ранговая статистика, детектирование шума, фильтрация изображений

### Введение

Наиболее распространены две модели импульсного шума: с фиксированными значениями импульсов (типа «соль и перец») и со случайными значениями импульсов [1-3]. Проблеме восстановления цифровых изображений, искаженных импульсным шумом с фиксированными значениями импульсов традиционно уделяется значительное внимание исследователей [4-8], но существует относительно мало работ, посвященных борьбе с импульсным шумом со случайными значениями импульсов. Искаженное изображение в этом случае можно представить в виде:

$$\hat{f}(i, j) = \begin{cases} z, & \text{с вероятностью } p, \\ f(i, j), & \text{с вероятностью } (1-p), \end{cases}$$

где  $f(i, j)$  и  $\hat{f}(i, j)$  – значения яркости пикселя с координатами  $(i, j)$  у исходного и искаженного изображений, соответственно,  $z$  – целочисленная случайная величина из интервала  $[0...255]$  с равномерным законом распределения,  $p \in [0...1]$  – вероятность появления импульсов на изображении.

Анализ современных научно-технических источников показывает, что в задаче удаления импульсного шума со случайными значениями импульсов могут использоваться нелинейные фильтры на основе ранговой статистики с предварительным детектированием [9, 10], итерационные алгоритмы [11], модификации взвешенного медианного фильтра [12], алгоритмы на основе вариационного исчисления [13], фильтры с нечеткой логикой [14].

В данной работе рассматривается подход, основанный на предварительном детектировании импульсов, как показано на рис. 1. В качестве исходных алгоритмов, реализующих эту схему, были выбраны: ранжирующий фильтр (РФ) [15], направленный взвешенный медианный фильтр (НВМФ) [16] и прогрессивный переключающийся медианный фильтр (ППМФ) [17].

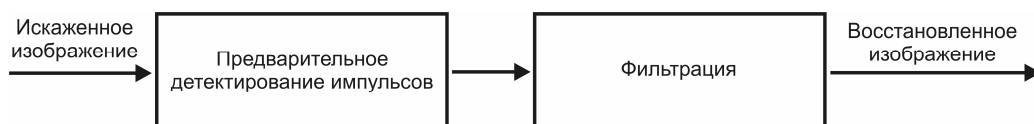


Рис. 1. Удаление импульсного шума с предварительным детектированием

Рассматривается новый алгоритм фильтрации изображений, искаженных импульсным шумом со случайными значениями импульсов. Представлена модификация прогрессивного переключающегося медианного фильтра, используемого для этой цели. Приводятся результаты сравнительного анализа предложенных и ряда других алгоритмов детектирования и фильтрации импульсного шума со случайными значениями импульсов.

Предлагается алгоритм детектирования шума со случайными значениями импульсов на основе взвешенной медианы – взвешенный медианный детектор (ВМД), а также рассматривается модификация прогрессивного переключающегося медианного фильтра (МПМФ), полученная с использованием предложенного алгоритма детектирования.

Для сравнения результатов фильтрации шума используются следующие критерии качества восстановленных изображений:

- пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) [18];
- визуально воспринимаемое качество изображений [19].

Анализ проводился на наборе стандартных тестовых полутоновых изображений размером  $512 \times 512$  пикселей [20].

### Детектирование импульсов

Рассмотрены результаты сравнительного анализа трех детекторов импульсного шума со случайными значениями импульсов: детектор импульсов из алгоритма РФ, детектор из алгоритма НВМФ и предложенный алгоритм ВМД.

Процедура детектирования импульсов в ранжирующем фильтре основана на вычислении ранжированных разностей. Данные разности сравниваются с набором предустановленных пороговых значений и, если хотя бы одна из них превышает по модулю соответствующее пороговое значение, то пиксель считается искаженным [15].

Более сложный алгоритм детектирования импульсов используется в фильтре НВМФ. В нем вычисляются четыре специальных индекса, отражающих отличие центрального пикселя в окне фильтрации от соседних пикселей по каждому из четырех возможных направлений. Минимальный из этих индексов используется для принятия решения о признании пикселя импульсом [16].

Предложенный детектор импульсного шума ВМД рассмотрен ниже при описании модифицированного прогрессивного переключающегося медианного фильтра.

Для оценки эффективности алгоритмов детектирования импульсного шума со случайными значениями импульсов используются два критерия:

- число пропущенных детектором искаженных пикселей (ошибки I рода);
- число ложных срабатываний детектора импульсов (ошибки II рода).

Для достижения высокого качества восстановления изображения детектор должен обнаруживать как можно больше искаженных шумом пикселей при минимальном количестве ложных срабатываний.

Результаты моделирования работы детекторов для тестовых изображений с различной степенью детализации «Перцы», «Лена», «Барбара» и «Бабуин» приведены в табл. 1-4, соответственно.

Приведенные результаты показывают, что число ошибок типа I у рассмотренных трех типов детекторов сопоставимо. При малой вероятности импульсов преимущество имеют детекторы РФ и ВМД, а при  $p \geq 0,2$

лучшие результаты дает НВМФ. Повышение степени детализации изображения при фиксированной вероятности шума приводит к росту ошибок типа I для всех типов детекторов на 20-40%.

С точки зрения ошибок II рода ситуация выглядит иначе. Для всех типов тестовых изображений и различных вероятностей появления импульсов существенно лучшие результаты показывает предложенный детектор ВМД. Легко заметить также существенный рост ошибок II рода при увеличении степени детализации изображения. В то же время анализ числа ошибок детектора ВМД для изображений с высокой детализацией «Барбара» и «Бабуин» показывает, что с увеличением степени зашумления число ошибок II рода уменьшается на 20-30%.

Хорошие результаты дает использование комбинированных алгоритмов, полученные путем сочетания рассмотренных детекторов совместно с процедурой фильтрации ППМФ [17]. На рис. 2 представлены результаты восстановления тестовых изображений «Перцы», «Лена», «Барбара» и «Бабуин» для модели импульсного шума со случайными значениями импульсов и  $0,05 \leq p \leq 0,3$ .

Таблица 1

Число ошибок детектирования для изображения «Перцы»

Вероятность импульсов	0,1		0,2		0,3	
	I	II	I	II	I	II
РФ	3475	4085	7041	4661	11018	6134
НВМФ	5209	2324	8325	3792	10577	5635
ВМД	3313	2169	7809	2087	14516	2570

Таблица 2

Число ошибок детектирования для изображения «Лена»

Вероятность импульсов	0,1		0,2		0,3	
	I	II	I	II	I	II
РФ	3523	4501	7257	5119	10962	6749
НВМФ	5216	2212	8607	4217	10396	6715
ВМД	3372	1514	8134	1553	14351	2110

Таблица 3

Число ошибок детектирования для изображения «Барбара»

Вероятность импульсов	0,1		0,2		0,3	
	I	II	I	II	I	II
РФ	4283	21776	8585	22492	12782	23490
НВМФ	5446	16914	9030	22942	11375	27213
ВМД	4434	13124	10136	11915	17593	11387

Таблица 4

Число ошибок детектирования для изображения «Бабуин»

Вероятность импульсов	0,1		0,2		0,3	
	I	II	I	II	I	II
РФ	5224	35085	10059	35500	14991	36484
НВМФ	5942	29232	9675	39587	12259	47082
ВМД	5531	24285	11928	20781	20174	18553

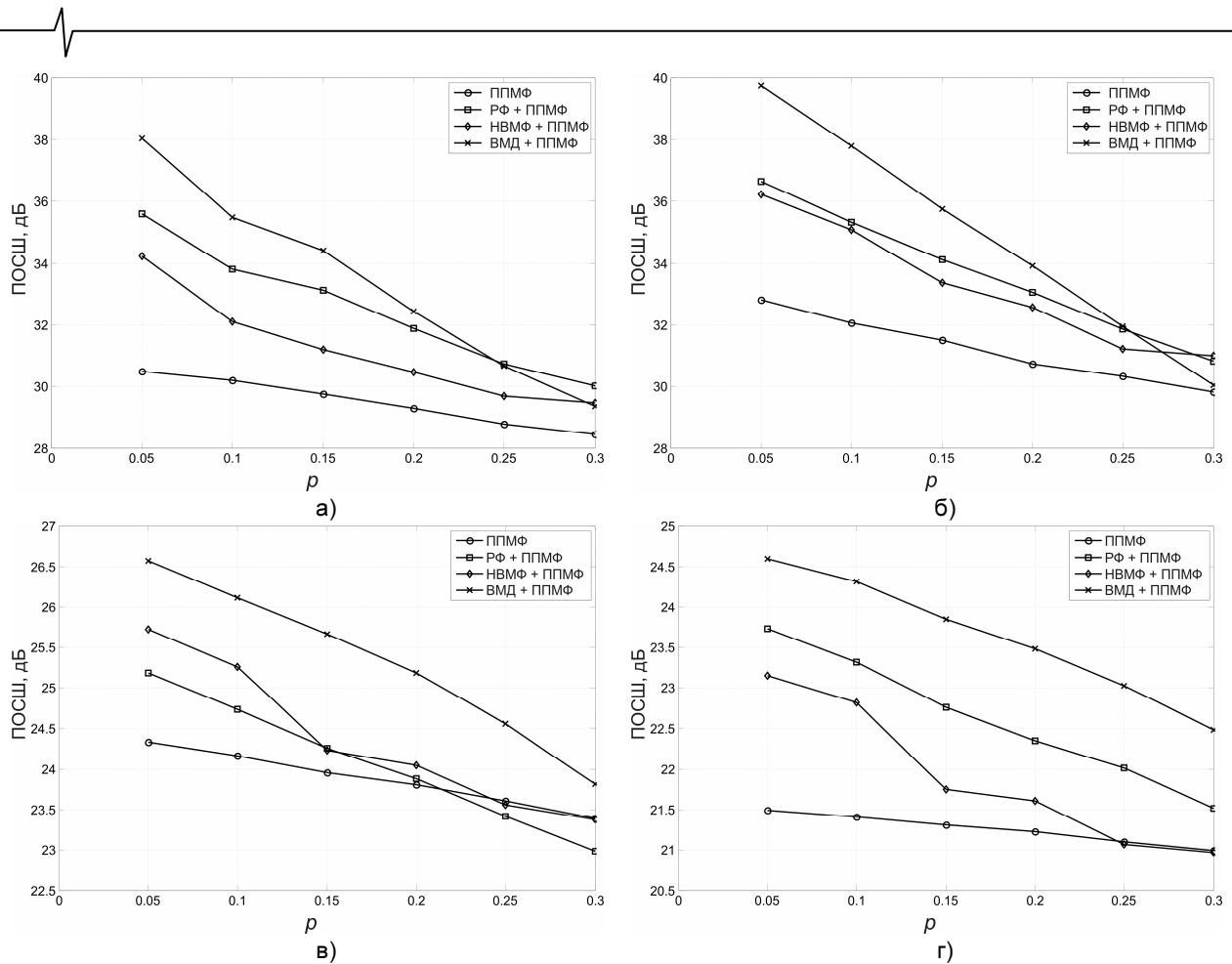


Рис. 2. Результаты восстановления тестовых изображений: а) «Перцы»; б) «Лена»; в) «Барбара»; г) «Бабуин»

Анализ этих результатов показывает, что для изображений с низкой и средней детализацией («Перцы», «Лена») использование связки ВМД+ППМФ дает преимущество до 1,5 дБ, если  $p \leq 0,25$ . При увеличении вероятности импульсного шума сказывается большее количество ошибок типа I у детектора ВМД, что приводит к ухудшению результатов восстановления.

Для изображений с высокой детализацией («Барбара», «Бабуин») связка ВМД+ППМФ оказывается наилучшей на всем рассмотренном диапазоне вероятности импульсного шума. Преимущество в значениях ПОСШ составляет 1-2 дБ. Следует отметить, что абсолютные значения ПОСШ для изображений с высокой детализацией лежат в интервале 22-27 дБ, что в среднем на 10 дБ ниже, чем для изображений с низкой детализацией.

Данные результаты показывают целесообразность использования связки ВМД+ППМФ (далее обозначаемой как МППМФ) в задаче удаления импульсного шума. Рассмотрим работу этого комбинированного алгоритма более подробно.

### Модифицированный прогрессивный переключающийся медианный фильтр

Обозначим через  $X$  искаженное изображение, представленное в виде матрицы значений яркости пикселей. В качестве процедуры обнаружения импульсов используется алгоритм ВМД. Рассмотрим бинарную матрицу  $F$  такую, что значение  $F(i, j)$  используется для отображения того, является ли пиксель в позиции  $(i, j)$  импульсом, а именно,  $F(i, j) = 0$  означает, что пиксель  $X(i, j)$  – неискаженный.

При  $F(i, j) = 1$  пиксель идентифицируется как импульс шума. На старте процедуры детектирования импульсов полагается, что все пиксели неискаженные, т.е.  $F(i, j) = 0 \forall i, j$ .

Пусть размеры окна детектора обозначаются  $W \times W$  ( $W$  – нечетное целое, не меньше трех) и  $\Omega_{ij}^W$  отображает множество значений пикселей в пределах этого окна, централизованного вокруг пикселя с координатами  $(i, j)$ . Обозначим через  $V$  множество координат пикселей в пределах указанного окна:

$$V = \{ (s, t) | -h \leq s \leq h, -h \leq t \leq h \},$$

где  $h$  – целое число, такое, что  $W = 2h + 1$ .

Положим взвешенная медиана пикселей внутри окна детектора имеет вид:

$$Y_{ij}^w = \text{медиана}(X_{ij}^w),$$

$$X_{ij}^w = \{ X(i+s, j+t), w \diamond X(i, j) | (s, t) \in V, (s, t) \neq (0, 0) \},$$

где  $\diamond$  – оператор повторения.

Для текущего центрального пикселя  $X(i, j)$  вычисляются следующие разности:

$$d_k = |Y_{ij}^{2k+1} - X(i, j)|, \quad k = 0, \dots, L-1,$$

где  $L$  – целое число, удовлетворяющее условию  $2L - 1 = W_D \cdot W_D$ .

Процедура детектирования использует набор предустановленных пороговых значений  $T = [T_0, T_1, \dots, T_{L-1}]$  для определения, является текущий пиксель  $X(i, j)$  импульсом:

$$F(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists k, d_k > T_k \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Пороговые значения  $T_k$  вычисляются адаптивно и зависят от текущего положения окна фильтрации. При этом учитываются локальные статистические свойства пикселей в рассматриваемой окрестности  $\Omega_{ij}^W$ .

Результирующая бинарная матрица  $\mathbf{F}$  является результатом работы детектора и используется далее в процедуре фильтрации.

В ходе процедуры фильтрации генерируются две последовательности изображений. Первая представляет собой последовательность полутоновых изображений  $\{\mathbf{X}^{(0)}, \mathbf{X}^{(1)}, \dots, \mathbf{X}^{(n)}, \dots\}$ , где  $\mathbf{X}^{(0)} = \mathbf{X}$  – входное зашумленное изображение, а  $\mathbf{X}^{(n)}$  – изображение после  $n$ -й итерации. Вторая – последовательность бинарных изображений  $\{\mathbf{F}^{(0)}, \mathbf{F}^{(1)}, \dots, \mathbf{F}^{(n)}, \dots\}$ , где бинарное значение  $F^{(n)}(i, j) = 0$  означает, что пиксель в позиции  $(i, j)$  рассматривается как неискаженный на  $n$ -й итерации, а  $F^{(n)}(i, j) = 1$  – что пиксель с данными координатами испорчен шумом. Начальное значение бинарной матрицы  $\mathbf{F}^{(0)} = \mathbf{F}$ , то есть равно результату работы детектора импульсов.

На  $n$ -й итерации ( $n=1, 2, \dots$ ) для каждого пикселя  $X^{(n-1)}(i, j)$  сначала вычисляется медианное значение  $m^{(n-1)}(i, j)$  в окне  $W_F \times W_F$  с центром вокруг пикселя. Медиана вычисляется, используя только пиксели, которые на данном этапе считаются неискаженными шумом и находящиеся в пределах окна фильтра. Пусть  $M$  отмечает число всех таких пикселей в окне. Если  $M$  четное, то медиана вычисляется как среднее арифметическое между двумя средними элементами отсортированных данных.

Если  $M > 0$ , то

$$m^{(n-1)}(i, j) = \text{медиана} \{ X^{(n-1)}(t, s) \mid F^{(n-1)}(t, s) = 0, X(t, s) \in \Omega_{ij}^{W_F} \}.$$

Значение  $X^{(n)}(i, j)$  на данной итерации изменяется только в том случае, если пиксель с координатами  $(i, j)$  – импульс и  $M > 0$ :

$$X^{(n)}(i, j) = \begin{cases} m^{(n-1)}(i, j), & \text{если } F^{(n)}(i, j) = 1; M > 0 \\ X^{(n-1)}(i, j), & \text{иначе.} \end{cases}$$

Если пиксель был изменен, то далее он рассматривается как неискаженный, т.е.

$$F^{(n)}(i, j) = \begin{cases} F^{(n-1)}(i, j), & \text{если } X^{(n)}(i, j) = X^{(n-1)}(i, j) \\ 0, & \text{если } X^{(n)}(i, j) = m^{(n-1)}(i, j). \end{cases}$$

Процедура останавливается на  $N_F$ -й итерации, когда все пиксели, отмеченные как искаженные, модифицированы, то есть выполняется равенство:

$$\sum_{i, j} F^{(N_F)}(i, j) = 0.$$

Полученная в результате матрица  $X^{(N_F)}(i, j)$  и есть восстановленное изображение.

**Визуальные результаты восстановления изображений**

На рис. 3 представлены визуальные результаты восстановления фрагмента тестового изображения «Лена» алгоритмами ППМФ и МППМФ. При этом использовалась вероятность появления импульсов  $p = 0,15$ .



а)



б) ПОСШ = 16,9 дБ



в) ПОСШ = 31,1 дБ



г) ПОСШ = 33,9 дБ

Рис. 3. Восстановление фрагмента тестового изображения «Лена»: а) исходное изображение; б) зашумленное изображение с  $p = 0,15$ ; в) восстановленное ППМФ, г) восстановленное МППМФ



Из анализа приведенных на рис. 3 изображений следует, что предложенный алгоритм МППМФ обеспечивает более высокое визуальное качество восстановленного изображения, чем исходный алгоритм ППМФ. На изображении, восстановленном алгоритмом МППМФ, заметно меньше пропущенных импульсов по сравнению с применением алгоритма ППМФ. Заметно, что мелкие детали на изображении, обработанном алгоритмом МППМФ, сохранились лучше.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ данного алгоритма детектирования ВМД и ряда других современных детекторов импульсного шума показывает, что по совокупности ошибок I и II рода этот алгоритм обеспечивает более высокое качество детектирования, чем другие рассмотренные алгоритмы, если вероятность импульсного шума относительно низкая ( $p \leq 0,20$ ).

По результатам сравнительного анализа предложенного алгоритма с рядом известных алгоритмов восстановления можно заключить, что при относительно невысоких ( $p \sim 0,05-0,15$ ) значениях вероятности шума со случайными значениями импульсов алгоритм МППМФ обеспечивает более высокие результаты восстановления по сравнению с другими рассмотренными современными алгоритмами с точки зрения критерия ПОСШ и позволяет добиться более высокого визуально воспринимаемого качества восстановленного изображения.

#### Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005.
2. Mitra S., Sicuranza G. Nonlinear Image Processing. – Academic Press, 2000.
3. Хуанг Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений: преобразования и медианные фильтры. – М.: Радио и связь, 1984.
4. Kong H., Guan L. A neural network adaptive filter for the removal of impulse noise in digital images // Neural networks. 1996. V. 9, № 3, P. 373-378.
5. Russo F. Impulse noise detection and filtering using fuzzy models // Proc. of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2000). 2000. V. 2, P. 1041-1044.
6. Xiaowei H., Junsheng L., Yanping L., Xinhe X. A selective and adaptive image filtering approach based on impulse noise detection // Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2004). 2004. V. 5, P. 4156-4159.
7. Бухтояров С.С., Приоров А.Л., Апальков И.В., Хрящев В.В. Применение переключающихся медианных фильтров для восстановления зашумленных изображений // Вопросы радиоэлектроники: серия общетехническая. 2006. Вып. 2. С. 137-147.
8. Luo W. An efficient detail-preserving approach for removing impulse noise in images // IEEE Signal Processing Letters. 2006. V. 13, № 7. P. 413-416.

9. Kondo K., Haseyama M., Kitajima H. Efficient fixed-valued and random-valued impulse detection for accurate image restoration // Proc. of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA'03). 2003. V. 2, P. 1009-1012.
10. Yamashita N., Ogura M., Jianming Lu, Sekiya H., Yahagi T. A random-valued impulse noise detector using level detection // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'05). 2005. V. 6, P. 6292-6295.
11. Chan R., Hu C., Nikolova M. An iterative procedure for removing random-valued impulse noise // IEEE Signal Processing Letters. 2004. V. 11, P. 921-924.
12. Wang Dong Y., Xu S. A new directional weighted median filter for removal of random-valued impulse noise // IEEE Signal Processing Letters. 2006. V. 14, № 3. P. 193-196.
13. Hu C., Lui S. Variational approach for restoring random-valued impulse noise // LNCS. 2005. V. 3401, P. 312-319.
14. Schulte S., De Witte V., Nachtegaele M., Van der Weken D., Kerre E. Fuzzy random impulse noise reduction method // Fuzzy Sets and Systems. 2007. V. 158, № 3. P. 270-283.
15. Abreu E., Mitra S. A signal-dependent rank ordered mean (SD-ROM) filter-a new approach for removal of impulses from highly corrupted images // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'95). 1995. V. 4, P. 2371-2374.
16. Dong Y., Hu S. A new directional weighted median filter for removal of random-valued impulse noise // IEEE Signal Processing Letters. 2003. V. 14, № 3. P. 193-196.
17. Wang Z., Zhang D. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images // IEEE Trans. Circuits Systems – II. 1999. V. 46, № 1. P. 78-80.
18. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – М.: Техносфера, 2005.
19. ITU-R Recommendation BT.500-11. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. ITU-T, 2002.
20. The USC-SIPI Image Database (<http://sipi.usc.edu/database/index.html>).

## DETECTING AND FILTERING OF RANDOM-VALUED IMPULSE NOISE

*A. Priorov, D. Kuykin, V. Khryashchev*

The restoration of random-valued impulse noise corrupted images is considered. A new random-valued impulse noise detection algorithm is proposed. Also the modified progressive switching median filter is described. This modification is developed using the proposed noise detection algorithm and progressive switching median filter noise filtering procedure. The results of comparison of proposed algorithms with other modern random-valued impulse noise detection and removal algorithms are depicted.