

УДК 621.391

Н.Н. ПОНОМАРЕНКО¹, В.В. ЛУКИН¹, Е.О. КОЛГАНОВА²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

ОБНАРУЖЕНИЕ И УСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрена задача подавления равномерно распределенного импульсного шума на изображениях, сформированных системами дистанционного зондирования Земли. Проведен сравнительный анализ различных методов устранения импульсного шума для случая, когда точно известно, какие пиксели изображения искажены, и для случая, когда эта информация отсутствует. Показано, что разность между исходным и отфильтрованным изображениями может использоваться для обнаружения пикселей, искаженных импульсным шумом. Рассмотрены критерии оценивания эффективности таких обнаружителей, в частности, ошибки первого и второго рода, а также критерий AUC, позволяющий получать интегральные оценки качества обнаружения. Показано, что задача автоматического выбора порога для принятия решения о присутствии импульсного шума должна решаться только в привязке к конкретному методу последующего устранения этого шума.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, системы дистанционного зондирования Земли, импульсный шум, медианная фильтрация, анализ изображений, дискретное косинусное преобразование.

Введение

Одной из важных задач цифровой обработки изображений, формируемых системами дистанционного зондирования (ДЗ) Земли, является обнаружение пикселей, искаженных импульсным шумом, и реконструкция их значений [1, 2]. При этом характеристики и тип импульсного шума зависят от вызвавших его причин. На практике чаще всего встречаются импульсный шум типа “соль и перец” [1], импульсный шум с равномерным распределением значений [1], компактные импульсные помехи [3]. В данной работе будет рассматриваться импульсный шум с равномерным распределением, являющийся одним из наиболее сложных для обнаружения и подавления.

Одной из основных причин присутствия на изображениях систем ДЗ импульсного шума являются помехи и искажения в каналах передачи данных, когда могут быть изменены один, несколько или все биты пикселя изображения. При этом координаты пикселей, искаженных импульсным шумом, могут быть как известны (при использовании помехоустойчивого кодирования и обработке изображения в телекоммуникационной системе передачи данных), так и неизвестны (при постобработке изображения на Земле). Другой причиной могут быть сбои в аппаратуре регистрации изображения. В частности для ДЗ, работающих в оптическом диапазоне волн, к возникновению импульсного шума может приводить выход из строя отдельных элементов све-

точувствительной матрицы. В этом случае, если подавление шума происходит на борту системы ДЗ, то координаты пикселей, утерянных в результате воздействия импульсного шума, могут быть известны. В случае же постобработки изображения на Земле, перед подавлением шума может понадобиться выполнить обнаружение пикселей, искаженных им.

На практике часто импульсный шум присутствует на изображениях наряду с другими типами шумов, например, аддитивным или мультипликативным Гауссовым шумом [4]. Поэтому для подавления его могут использоваться универсальные фильтры, предназначенные для подавления смеси шума, например [5-8].

Задача подавления импульсного шума на изображении может решаться двумя путями. Во-первых, может проводиться обнаружение пикселей, искаженных импульсной помехой с последующей обработкой (реконструкцией значений) только искаженных пикселей [9-11]. Во-вторых, может обрабатываться все изображение фильтрами, робастными к присутствию импульсного шума. В этом случае важной характеристикой таких фильтров является способность сохранять информативные участки изображений. Например, обычный медианный фильтр, применяемый в скользящем окне, наряду с хорошим подавлением импульсного шума устраняет мелкие информационные детали, может искажать границы изображений. В то же время центрально-взвешенный медианный фильтр [12] или КИХ-медианный гибридный фильтр [13] достаточно хорошо

сохраняют детали изображений, хотя это и сказывается на эффективности подавления шума.

В данной работе для тестовых оптических изображений ДЗ проводится сравнительный анализ различных методов подавления импульсного шума, а также рассматривается подход к обнаружению импульсного шума на основе разности между исходным и отфильтрованным изображениями.

В первом подразделе анализируется ситуация, когда заранее известны координаты пикселей, искаженных импульсным шумом. Во втором подразделе проводится сравнительный анализ методов подавления шума, для которых не требуется знания информации о том, какие пиксели искажены, а какие - нет. В третьем подразделе рассматривается метод обнаружения пикселей, искаженных импульсным шумом, по разности исходного и отфильтрованного изображений, и анализируется его эффективность. Четвертый подраздел посвящен задаче автоматического выбора порога для принятия решения о присутствии импульсного шума.

1. Подавление импульсного шума при известных координатах искаженных пикселей

Для проведения статистического анализа в данной работе использовались четыре фрагмента реального изображения системы ДЗ оптического диапазона, предварительно уменьшенные усреднением соседних пикселей так, чтобы практически не содержать шума (рис. 1).

Каждое изображение искажалось импульсным шумом с равномерным распределением значений импульсов и с вероятностями встречаемости импульсов $P_{\text{imp}} = 1\%$, 2% и 3% . Шум с P_{imp} больше 3% редко встречается на практике, а три разных значения P_{imp} позволят нам оценить тенденции изменения качества фильтрации при увеличении P_{imp} .

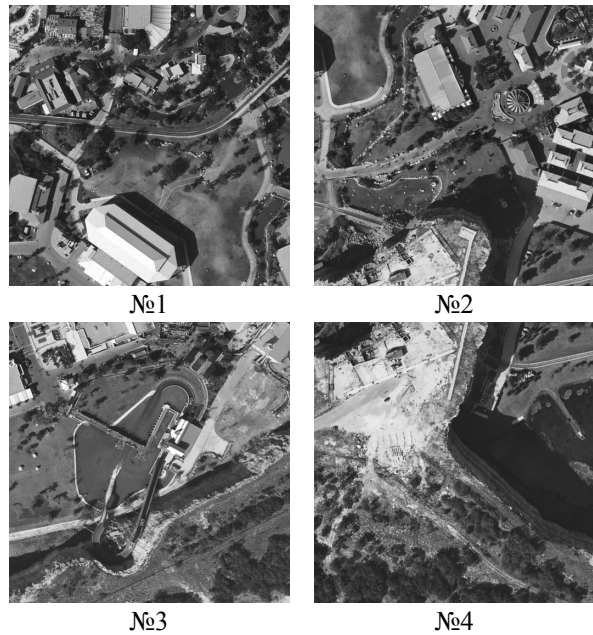


Рис. 1. Тестовые изображения (512x512 пикселей) системы ДЗ оптического диапазона

Для сравнительного анализа были отобраны следующие фильтры: медианный фильтр с размером окна 3×3 пикселя ($\text{med}3$), медианный фильтр с размером окна 5×5 пикселей ($\text{med}5$), центрально-взвешенный медианный фильтр с размером окна 5×5 пикселей и весом центрального элемента, равным 9 (medw), КИХ-медианный гибридный фильтр (medf), гибридный медианный фильтр Абреу (medh) [14] и метод $\text{edd}8$ [11], основанный на гипотезе, что истинное значение пикселя, искаженного импульсным шумом, минимизирует значение энтропии коэффициентов дискретного косинусного преобразования в блоке 8×8 пикселей.

Все перечисленные фильтры применялись только к пикселям изображения, искаженным импульсным шумом. Остальные пиксели оставались без изменения.

Таблица 1

Подавление импульсного шума при известных координатах искаженных пикселей, ПССШ, дБ

| Фрагмент | P_{imp} | Фильтр | | | | | |
|----------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | $\text{med}3$ | $\text{med}5$ | medw | medf | medh | $\text{edd}8$ |
| №1 | 1% | 44,64 | 43,95 | 41,37 | 37,07 | 44,63 | 49,06 |
| | 2% | 42,00 | 41,22 | 39,13 | 34,01 | 41,88 | 46,34 |
| | 3% | 39,41 | 38,89 | 36,88 | 31,72 | 39,58 | 44,00 |
| №2 | 1% | 43,75 | 43,40 | 41,09 | 37,14 | 44,15 | 48,42 |
| | 2% | 41,20 | 40,42 | 38,16 | 33,64 | 41,48 | 45,20 |
| | 3% | 39,08 | 38,48 | 36,31 | 31,48 | 39,36 | 43,63 |
| №3 | 1% | 44,06 | 43,40 | 41,65 | 37,83 | 44,27 | 48,59 |
| | 2% | 41,25 | 40,39 | 38,40 | 34,27 | 40,90 | 45,45 |
| | 3% | 39,68 | 38,72 | 36,96 | 32,31 | 39,52 | 43,61 |
| №4 | 1% | 44,80 | 44,07 | 42,52 | 37,87 | 44,93 | 47,93 |
| | 2% | 41,49 | 40,85 | 39,27 | 34,40 | 41,44 | 44,86 |
| | 3% | 40,14 | 39,36 | 37,73 | 31,90 | 39,90 | 43,24 |

В Таблице 1 приведены значения пикового соотношения сигнал/шум (ПССШ) для обработанных изображений. Из анализа данных этой таблицы можно сделать следующие выводы.

Лучший результат для всех рассмотренных изображений и P_{imp} показывает метод edd8, эффективно учитывающий пространственную и статистическую информацию в области 15x15 пикселей вокруг искаженного пикселя (все положения скользящего окна 8x8 пикселей, захватывающие искаженный пиксель). Причем его преимущество перед остальными методами составляет от 3,5 до 4,5 дБ.

Следует также отметить результаты для фильтра Абреу, который, несмотря на высокую эффективность в сохранении границ и деталей изображения, показывает такую же эффективность подавления шума, как обычный медианный фильтр.

Другие два метода, ориентированные на сохранение деталей изображения medw и medf существенно уступают обычному медианному фильтру для случая, когда координаты искаженных пикселей изображения точно известны.

2. Подавление импульсного шума при отсутствии информации о координатах искаженных пикселей

Рассмотрим теперь ситуацию, когда нам неизвестно, какие пиксели искажены, а какие - нет.

Фильтры med3, med5, medw, medf и medh будем применять для всех пикселей изображения.

Метод edd8 будем также применять для всего изображения, однако с некоторой модификацией. Будем применять его в две итерации, причем отфильтрованное изображение первой итерации использовать для того, чтобы определить порядок реконструкции пикселей во время второй итерации.

Первыми будем реконструировать те пиксели, которые изменились сильнее всего в результате первой итерации. Это позволит раньше обработать пиксели, для которых выше вероятность того, что они были искажены импульсным шумом.

Результаты работы рассмотренных фильтров приведены в Таблице 2. Анализ данных Таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы.

Лучшие результаты с отрывом в 3..3,5 дБ снова показывает метод edd8. Однако результаты обработки даже для этого метода получаются хуже на 10 дБ и более, чем приведенные в таблице 1. Это свидетельствует о том, что даже лучший из методов фильтрации наряду с подавлением импульсного шума вносит существенные искажения в изображение. Причем результаты обработки даже не лучшими фильтрами (medf, medh) при известных координатах искаженных пикселей получаются намного более качественными, чем результаты лучшего из рассмотренных методов edd8 при обработке всего изображения.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что в задаче подавления шума от эффективности обнаружения пикселей, искаженных импульсным шумом, зависит гораздо больше, чем от качества последующей реконструкции утраченных значений пикселей.

Еще одним выводом является то, что для ситуации, когда обрабатывается все изображение, фильтры medf и medh, сохраняющие мелкие детали изображения, существенно превосходят обычный медианный фильтр в отличие от ситуации, рассмотренной в предыдущем подразделе.

На рис. 2 приведены увеличенный фрагмент изображения №1, обработанный разными фильтрами, что поможет полнее проанализировать достоинства и недостатки рассмотренных фильтров.

Таблица 2

Подавление импульсного шума при неизвестных координатах искаженных пикселей, ПССШ, дБ

| Фрагмент | P_{imp} | Фильтр | | | | | | |
|----------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | нет фильтра | med3 | med5 | medw | medf | medh | edd8 |
| №1 | 1% | 28,46 | 26,52 | 24,72 | 29,03 | 34,69 | 31,59 | 35,05 |
| | 2% | 25,40 | 26,49 | 24,73 | 28,95 | 32,70 | 31,46 | 34,94 |
| | 3% | 23,65 | 26,36 | 24,68 | 28,75 | 30,94 | 31,14 | 34,45 |
| №2 | 1% | 28,54 | 25,94 | 24,08 | 28,48 | 34,15 | 30,91 | 34,52 |
| | 2% | 25,62 | 25,91 | 24,09 | 28,36 | 32,09 | 30,72 | 34,35 |
| | 3% | 23,71 | 25,85 | 24,07 | 28,18 | 30,50 | 30,51 | 34,02 |
| №3 | 1% | 28,90 | 26,06 | 24,10 | 28,55 | 34,30 | 31,36 | 35,03 |
| | 2% | 26,03 | 25,98 | 24,07 | 28,39 | 32,44 | 31,10 | 34,85 |
| | 3% | 24,29 | 25,95 | 24,07 | 28,27 | 31,09 | 30,97 | 34,47 |
| №4 | 1% | 28,16 | 26,62 | 24,66 | 28,80 | 34,18 | 31,46 | 34,42 |
| | 2% | 25,11 | 26,53 | 24,64 | 28,66 | 32,43 | 31,26 | 34,25 |
| | 3% | 23,41 | 26,47 | 24,65 | 28,57 | 30,72 | 31,10 | 33,95 |

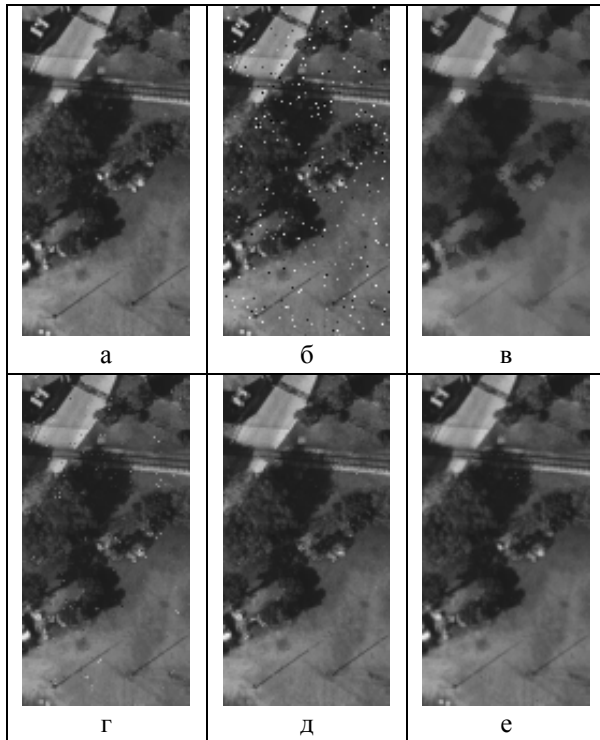


Рис. 2. Увеличенный фрагмент изображения №1 и результаты обработки фильтрами: а - исходное изображение, б - искаженное шумом, в - medw, г - medf, д - medh, е- edd8

Качество изображения 2в самое плохое - центрально-взвешенный медианный фильтр убрал большинство малоразмерных объектов.

КИХ-медианный гибридный фильтр (рис. 2г) сохранил малоразмерные детали, но убрал не все импульсы.

Фильтр Абреу (рис. 2д) убрал все импульсы и неплохо сохранил детали, но все же часть из них оказалось существенно сглаженной или удаленной, например, два малоразмерных объекта в нижней левой части фрагмента.

Фильтр edd8 (рис.2е) сохранил все малоразмерные объекты, хотя, и несколько размыл их.

3. Обнаружение пикселей, искаженных импульсным шумом

Идея рассматриваемого здесь метода заключается в том, чтобы для вычисления параметра D_{ij} , характеризующего вероятность присутствия импульсного шума в пикселе изображения с координатами ij , использовать значения пикселей искаженного изображения Γ^n и результата его фильтрации Γ^f фильтрами, рассмотренными в предыдущем подразделе:

$$D_{ij} = |\Gamma_{ij}^n - \Gamma_{ij}^f| \quad (1)$$

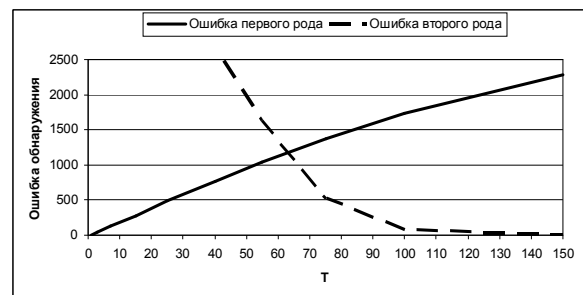
Чем больше будет значение D_{ij} , тем выше веро-

ятность, что в данном пикселе присутствует импульсная помеха.

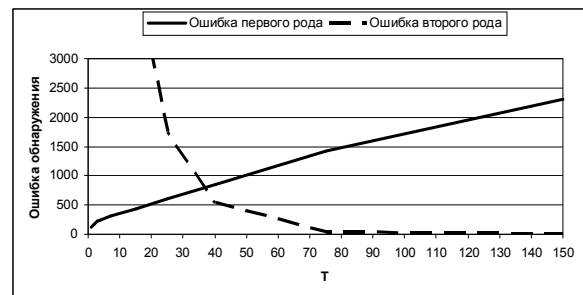
Решение о том, что пиксель с координатами ij искажен импульсным шумом, может приниматься, если значение параметра D_{ij} превышает некий порог T .

Эффективность обнаружителя, построенного в соответствии с данным методом, будет зависеть от эффективности фильтра, положенного в его основу, и от правильности выбора порога T . Но каким же образом оценить эту эффективность?

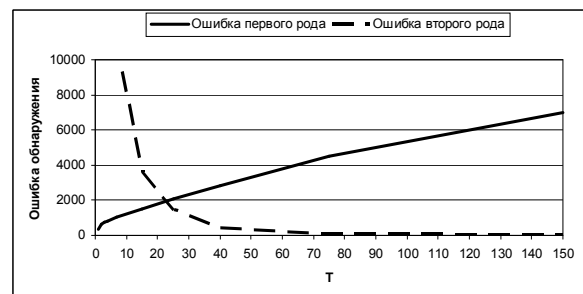
Традиционный подход [15, 16] состоит в вычислении ошибок первого рода (количество пикселей, ошибочно детектированных как искаженные импульсным шумом) и второго рода (количество пикселей, ошибочно детектированных, как искаженные импульсным шумом) для заданного параметра D и порога T . На рис. 3 приведены зависимости этих ошибок от T для нескольких параметров (ошибки будем характеризовать количеством пикселей, для которых они наблюдались).



а



б



в

Рис. 3. Зависимости величины ошибки детектирования от T для: а - D на основе medh, $P_{\text{imp}}=1\%$, б - D на основе edd8, $P_{\text{imp}}=1\%$, в - D на основе edd8, $P_{\text{imp}}=3\%$

Таблица 3

| Фрагмент | P_{imp} | Значение параметра AUC | | | | | |
|----------|------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
| | | Фильтр | | | | | |
| | | med3 | med5 | medv | medf | medh | edd8 |
| №1 | 1% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,90 | 0,91 | 0,96 |
| | 2% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,89 | 0,91 | 0,96 |
| | 3% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,89 | 0,91 | 0,95 |
| №2 | 1% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,90 | 0,91 | 0,96 |
| | 2% | 0,93 | 0,93 | 0,92 | 0,88 | 0,90 | 0,95 |
| | 3% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,88 | 0,90 | 0,95 |
| №3 | 1% | 0,93 | 0,92 | 0,91 | 0,89 | 0,90 | 0,95 |
| | 2% | 0,93 | 0,92 | 0,92 | 0,89 | 0,90 | 0,95 |
| | 3% | 0,93 | 0,93 | 0,92 | 0,89 | 0,90 | 0,95 |
| №4 | 1% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,91 | 0,91 | 0,96 |
| | 2% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,90 | 0,90 | 0,95 |
| | 3% | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,89 | 0,90 | 0,95 |

Как видно из рис. 3 получаемые кривые сложны для анализа, на разных их участках оптимальными могут быть разные обнаружители. Сложно также сказать, что важнее - обеспечить меньшую ошибку первого или второго рода? Как было отмечено в подразделе 2, известные фильтры существенно искажают изображение, поэтому желательно обеспечить как можно меньшее значение ошибки второго рода. Однако, при высоком значении ошибки первого рода, часть импульсов может быть не устранена и существенно исказить результаты последующей интерпретации изображения.

Анализ графиков показывает, что некоторый компромисс между этими пожеланиями может быть достигнут, например, при $T=50$ для рис. 3а, $T=30$ для рис. 3б и $T=20$ для рис. 3в. Однако, очевидно, что оптимальное значение T зависит не только от параметра D и P_{imp} , но и от используемого метода фильтрации. Этот вопрос будет в некоторой степени рассмотрен в подразделе 4.

Кроме значений ошибок первого и второго рода, которые зависят от выбранного порога T , для анализа эффективности заданного параметра D можно использовать и интегральный параметр AUC (площадь под кривой) [17]. Этот параметр не требует выбора порога для своего вычисления и является ранговым (характеризует различие между рангом пикселей в выборке, упорядоченной по параметру D , и выборке, в которой вначале помещены все пиксели, искаженные импульсным шумом).

Таблица 3 содержит значения AUC для параметра D , построенного с использованием всех рассмотренных фильтров. Чем ближе к единице значения AUC, тем выше качество параметра D .

Анализ данных таблицы 3 показывает, что, во-первых, с ростом P_{imp} эффективность обнаружения импульсов несколько уменьшается.

Следующий вывод, который можно сделать - лучшим (по критерию AUC) из обнаружителей импульсного шума является параметр D , построенный на основе фильтра EDD8.

Однако не всегда лучший фильтр (см. Таблицы 2 и 3) обеспечивает построение лучшего по критерию AUC обнаружителя пикселей, искаженных импульсным шумом. Так, фильтр medh существенно превосходит обычный медианный фильтр по качеству отфильтрованного изображения, однако параметр D , построенный на его основе уступает по критерию AUC параметру D , построенного на основе медианного фильтра.

4. Практическая проверка эффективности обнаружения пикселей, искаженных импульсным шумом

Попытаемся оценить на практике эффективность параметров D , построенных на основе различных фильтров. Для этого будем обрабатывать искаженное шумом изображение методом EDD8, осуществляя реконструкцию только для пикселей, которые детектированы, как искаженные импульсным шумом. Исследования будем проводить для изображения №1 с $P_{\text{imp}} = 2\%$. Для каждого из фильтров будем выбирать оптимальное значение порога T , обеспечивающее максимальное значение ПССШ.

Таблица 4

Результаты подавления импульсного шума на основе предварительного обнаружения пикселей, искаженных импульсным шумом

| Фильтр в основе D | T | $K_p, \%$ | E_1 | E_2 | ПССШ, дБ |
|---------------------|-----|-----------|-------|-------|----------|
| med3 | 70 | 1,3 | 2696 | 909 | 32,90 |
| medh | 65 | 1,4 | 2483 | 857 | 33,62 |
| edd8 | 44 | 1,4 | 1923 | 361 | 36,93 |

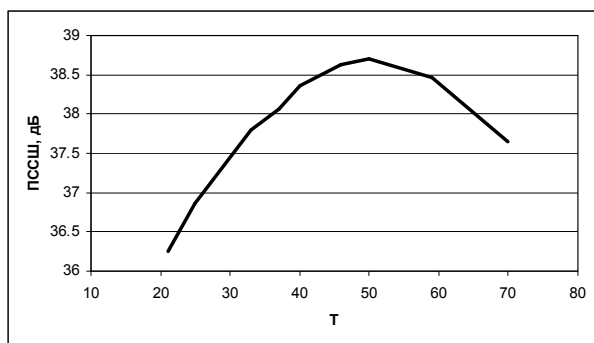
В Таблице 4 приведены оптимальные значения T и ПССШ для параметров D , построенных на основе фильтров med , $medh$ и $edd8$.

Кроме этого, для оптимального T приводятся значения количества обнаруженных импульсов (K_p) в % от общего числа пикселей изображения, величина ошибки первого (E_1) и второго (E_2) рода.

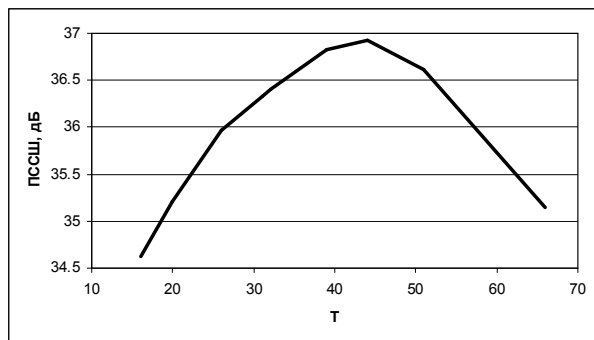
Из данных таблицы 4 можно сделать несколько выводов. Использование параметра D на основе $medh$ обеспечивает существенно более высокое качество подавления шума, чем использование параметра D на основе $med3$, хотя согласно критерию AUC все должно быть наоборот. Поэтому данный критерий можно рекомендовать для использования лишь в качестве вспомогательного наряду с другими критериями, такими, как ошибки первого и второго рода. Интересным представляется построение критерия качества обнаружения на основе взвешенной суммы ошибок первого и второго рода.

Кроме того, данные таблицы 4 позволяют сделать вывод, что лучшее качество подавления шума обеспечивает связка обнаружителя импульсов на основе EDD8 и реконструкции утраченных значений пикселей на основе EDD8.

Отметим, что использование двухэтапного метода (обнаружение импульсов с последующим их подавлением) для всех трех фильтров обеспечивает лучший результат (более, чем на 2 дБ), чем обработка всего изображения в целом.



а



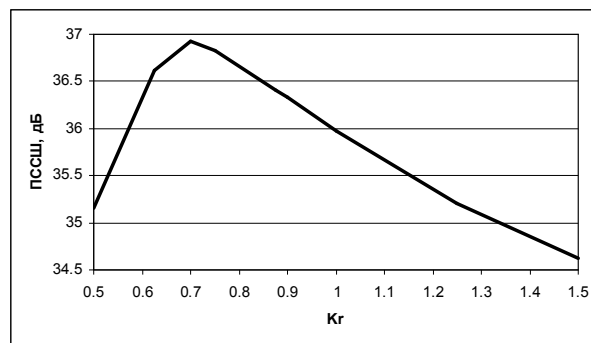
б

Рис. 4. Зависимость ПССШ от T для: а - $P_{imp} = 2\%$, б - $P_{imp} = 1\%$

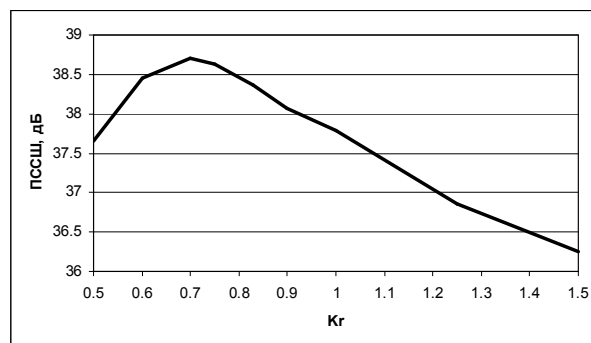
Остается открытым вопрос о выборе на практике оптимального значения порога T . Эта задача заслуживает отдельного рассмотрения. На рис. 4 для изображения №1 приведены зависимости качества устранения шума методом EDD8 (согласно критерию ПССШ) от T для разных значений P_{imp} .

Видно, что рабочая точка может быть выбрана на диапазоне значений T от 40 до 50, причем с ростом P_{imp} это значение уменьшается.

Более стабильные результаты могут быть достигнуты, если точно известно P_{imp} . В этом случае может быть введена нормированная величина K_r , вычисляющаяся, как отношение числа реконструируемых пикселей к P_{imp} . Заданное значение K_r может быть достигнуто за счет варьирования значений T . На рисунке 5 приведены зависимости ПССШ от K_r для того же случая, как и на рис.4.



а



б

Рис. 5. Зависимость ПССШ от K_r для: а - $P_{imp} = 2\%$, б - $P_{imp} = 1\%$

Хорошо видно, что при использовании K_r рабочая точка не зависит от P_{imp} и может быть выбрана как $K_r=0,75$. Проведенные исследования показали, что данная рабочая точка является квазиоптимальной для широкого диапазона P_{imp} и различных тестовых изображений.

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что задача подавления импульсного шума на

ізображеннях систем ДЗ может быть эффективно решена при ее разделении на два этапа - обнаружение пикселей, искаженных импульсным шумом и реконструкция (фильтрация) их значений.

При этом показано, что основной из этих двух задач, от эффективности решения которой в основном зависит эффективность подавления импульсного шума в целом, является задача обнаружения импульсов.

Рассмотрены критерии оценивания эффективности обнаружения импульсов. Показано, что критерий AUC в ряде случаев показывает преимущество одного из методов обнаружения, в то время как на практике лучшие результаты обеспечивает другой метод обнаружения.

Предложенный метод построения обнаружителя пикселей, искаженных импульсным шумом, на основе модуля разности между искаженным и отфильтрованным изображениями является эффективным и позволяет повысить качество обработанных изображений в среднем на 2 дБ.

Показано также, что среди рассмотренных фильтров наиболее эффективно в задаче подавления шума с P_{imp} в диапазоне 1..3% может использоваться метод EDD8, основанный на минимизации энтропии коэффициентов дискретного косинусного преобразования на локальных участках изображения.

Предложен нормированный параметр K_r , позволяющий при известном P_{imp} автоматически выбирать рабочую точку (количество реконструируемых пикселей) для обеспечения максимальной эффективности подавления импульсного шума. В качестве рекомендуемого к использованию на практике предложено значение K_r равное 0,75.

Литература

1. Astola, J. *Fundamentals of nonlinear digital filtering* [Text] / J. Astola, P. Kuosmanen. - Boca Raton (USA): CRC Press LLC, 1997. - 273 p.
2. Pitas, I. *Nonlinear Digital Filters: Principles and Applications* [Text] / I. Pitas, A.N. Venetsanopoulos. - A.N. Boston (USA): Kluwer Academic Publisher, 1990. - 321 p.
3. *Removing Impulse Bursts from Images by Training Based Filtering* [Text] / P. Koivisto, J. Astola, V. Lukin, V. Melnik, O. Tsymbal // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. - Vol. 2003. - No 3. - 2003, P. 223-237.
4. *Two-stage methods for mixed noise removal* [Text] / V.V. Lukin, P.T. Koivisto, N.N. Ponomarenko, S.K. Abramov, J.T. Astola // in *Proceedings of International Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. - Sapporo, Japan. - May, 2005. - P. 128-133.
5. *Robust Lee local statistic filter for removal of mixed multiplicative and impulse noise* [Text] / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K.O. Egiazarian, J.T. Astola // presented at the *SPIE International Symposium on Electronic Imaging*. - San Jose, USA. - January, 2004. - SPIE Vol. 5298. - P. 267-277.
6. *Three-state locally adaptive texture preserving filter for radar and optical image processing* [Text] / O.V. Tsymbal, V.V. Lukin, N.N. Ponomarenko, A.A. Zelensky, K.O. Egiazarian, J.T. Astola // *Eurasip Journal of Applied Signal Processing*. - 2005. - issue 8. - P. 1185-1204.
7. *Locally adaptive image filtering based on learning with clustering*, in *Proceedings of Image Processing: Algorithms and Systems IV* [Text] / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, A.A. Zelensky, K.O. Egiazarian, J.T. Astola // San Jose, USA, - January, 2005. - P. 94-105.
8. Alparone, L. *A hybrid sigma filter for unbiased and edge-preserving speckle reduction* [Text] / L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli // *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, July 10-15, 1995. - P.1409-1411.
9. Lee, K.-C. *Detection-estimation based approach for impulsive noise removal* [Text] / K.-C. Lee, H.-J. Song, K.-H. Sohn // *Electronic Letters*. - March, 1998. - Vol. 34. - N 5. - P. 449-450.
10. Chen, S. *Two-stage method for impulse-noise removal* [Электронный ресурс] / S. Chen, X. Yang // *Optical Engineering*. - issue 9 (2007). - Vol. 46. - Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1117/1.2784483>. - 12.09.2013.
11. *Реконструкция значений утраченных точек изображений по энтропии коэффициентов ДКП. Информационные, телекоммуникационные и программные средства цифровой обработки сигналов* [Текст] / Н.Н. Пономаренко, В.В. Лукин, А.А. Зеленский, К. Егизарян, Я. Астола // *Монография под ред. В.И. Марчука*. - Шахты: Изд-во ЮРГУЭС. - 2008. - С. 5-24.
12. Brownrigg, D.R.K. *The weighted median filter* [Text] / D.R.K. Brownrigg // *Communications of the ACM*. - 1984. - Vol. 27. - P. 807-818.
13. Nieminen, A. *A New Class of Detail Preserving Filters for Image Processing* [Text] / A. Nieminen, P. Heinonen, Y. Neuvo // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. - 1987. - Vol. 9. - P. 74-90.
14. *A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images* [Text] / E. Abreu, M. Lightstone, S. K. Mitra, K. Arakawa // *IEEE Transactions on Image Processing*. - 1996. - Is. 6, vol. 5. - P. 1012-1025.
15. *Object classification, segmentation, and parameter estimation in multichannel images by classifier learning with clustering of local parameters* [Text] / V.V. Lukin, N.N. Ponomarenko, A.A. Zelensky, J.T. Astola, K.O. Egiazarian // *Proceedings of the SPIE conference Image Processing: Algorithms and Systems V*. - 2007. - SPIE Vol. 6497, 649712. - 9 p.
16. *Classification of compressed multichannel remote sensing images* [Text] / V.V. Lukin, N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K.O. Egiazarian, J.T. Astola // presented at the *SPIE International Symposium on Electronic Imaging*. - San Jose, USA. - January, 2004. - SPIE Vol. 5298. - P. 267-277.

renko, A.A. Zelensky, A.A. Kurekin, K. Lever // *Proceedings of Image and Signal Processing for Remote Sensing XIV*. - Cardiff, UK. - September, 2008. - SPIE Vol. 7109. - P. 487-498.

17. Ling, C.X. *AUC: a statistically consistent and*

more discriminating measure than accuracy [Text] / C.X. Ling, J. Huang, H. Zhang // Proceedings of 18th International Conference on Artificial Intelligence. - 2003. - P. 519-524.

Поступила в редакцію 05.09.2013, рассмотрена на редколлегии 11.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов» Э.Н. Хомяков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВИЯВЛЕННЯ ТА УСУНЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО ШУМУ НА ЗОБРАЖЕННЯХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

М.М. Пономаренко, В.В. Лукін, О.О. Колганова

Розглянуто задачу придушення рівномірно розподіленого імпульсного шуму на зображеннях, які сформовано системами дистанційного зондування Землі. Проведено порівняльний аналіз різних методів усунення імпульсного шуму для випадку, коли точно відомо, які пікселі зображення спотворені, і для випадку, коли ця інформація відсутня. Показано, що різниця між вихідним і відфільтрованим зображеннями може використовуватися для виявлення пікселів, спотворених імпульсним шумом. Розглянуто критерії оцінювання ефективності таких методів виявлення, зокрема, помилки першого і другого роду, а також критерій AUC, що дозволяє отримувати інтегральні оцінки якості виявлення. Показано, що завдання автоматичного вибору порогу для прийняття рішення про присутність імпульсного шуму повинне вирішуватися тільки в прив'язці до конкретного методу подальшого усунення цього шуму.

Ключові слова: цифрова обробка зображень, системи дистанційного зондування Землі, імпульсний шум, медіанна фільтрація, аналіз зображень, дискретне косинусне перетворення.

DETECTION AND REMOVING OF IMPULSE NOISE ON REMOTE SENSING IMAGES

N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, E.O. Kolganova

The problem of suppressing uniformly distributed impulse noise on remote sensing images is considered. A comparative analysis of different methods of impulse noise removing for both cases when it is known what image pixels are distorted and when this information is unavailable is carried out. It is shown that the difference between the original and filtered images can be used to identify pixels corrupted by impulse noise. The criteria of effectiveness of impulse detection methods, especially false positives and false negatives, criterion AUC which provides integrated quality assessment of the detection are considered. It is shown that the problem of automatic selection of a threshold for decision of the presence of impulse noise should be addressed only in relation to a particular method to further reduce of the noise.

Key words: digital image processing, remote sensing systems, impulse noise, median filtration, image analysis, discrete cosine transform.

Пономаренко Николай Николаевич - д-р техн. наук, доцент каф. приема, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: nikolay@ponomarenko.info.

Лукін Владимир Васильевич – д-р техн. наук, профессор, профессор каф. приема, передачи и обработки сигналов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: lukin@ai.kharkov.com.

Колганова Елена Олеговна – канд. техн. наук, докторант каф. защиты информации, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.