

УДК 621.3:681.34

**С.К. АБРАМОВ, Р.А. КОЖЕМЯКИН, С.С. КРИВЕНКО, Н.Н. ПОНОМАРЕНКО,
В.В. ЛУКИН**

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ ОДНОВЗГЛЯДОВЫХ РСА-ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО-КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХАХ

Проанализирована эффективность фильтрации однозглядовых РСА-изображений в предположении, что они искажены спекл-шумом с явно выраженной пространственной коррелированностью. Исследование проведено для фильтров на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП), способных легко учитывать априорную информацию о пространственном спектре помех и их мультипликативном характере. Показано, что использование при фильтрации учета априорной информации позволяет повысить эффективность фильтрации в соответствии с различными метриками и фиксировать параметры ДКП-фильтра. При этом использование вариационно-стабилизирующих преобразований логарифмического типа не является необходимым.

Ключевые слова: *однозглядовые РСА-изображения, ДКП-фильтр, пространственно-коррелированный спекл, визуальное качество.*

Введение

Одним из основных средств дистанционного зондирования (ДЗ) поверхности Земли и других планет с аэрокосмических носителей являются в настоящее время радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые позволяют получать изображения в ночное и дневное время, а также при сложных погодных условиях [1, 2]. Пространственное разрешение современных РСА при работе в однозглядовом режиме сравнимо с пространственным разрешением оптических систем космического базирования, однако качество исходных однозглядовых РСА-изображений невысоко вследствие присутствия специфического вида помех, называемого спекл-шумом или просто спеклом [1, 3, 4]. Поэтому часто для предварительной обработки РСА-изображений приходится использовать фильтрацию [1, 3-7].

К настоящему времени разработано большое число фильтров, в том числе и специально ориентированных на обработку однозглядовых РСА-изображений [3-9], то есть учитывающих мультипликативный характер помех (спекла) и их негауссовость. Вместе с тем, при разработке большинства из этих фильтров не учтена пространственная коррелированность спекла, имеющая место на практике и приводящая к снижению эффективности подавления помех [10, 11] по сравнению со случаем их пространственной некоррелированности. Поэтому желательно проанализировать эффективность фильт-

рации изображений, искаженных пространственно-коррелированными помехами, в предположении, что пространственные спектральные характеристики помех априорно известны или оценены с приемлемой точностью.

Кроме того, при фильтрации изображений желательно не просто подавить спекл, но и сохранить полезную информацию – контрастные малоразмерные объекты, границы и текстуры. В этом плане традиционные критерии эффективности фильтрации – среднеквадратическая ошибка (СКОш) и пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ) – недостаточно адекватны, а изображения, получаемые на выходе фильтра с параметрами, оптимизированными относительно СКОш или ПОСШ, выглядят несколько дефокусированными (смазанными) [12, 13]. Поэтому при анализе эффективности фильтрации желательно анализировать также метрики визуального качества [12-14] и локальные количественные критерии [15], характеризующие качество сохранения полезной информации. Хотя в работах [12, 16] при анализе эффективности фильтрации метрики визуального качества использовались, спекл-шум полагался некоррелированным.

Таким образом, актуальной является задача сравнительного анализа эффективности фильтрации однозглядовых РСА-изображений с учетом пространственной коррелированности помех в соответствии с различными метриками, как традиционными, так и способными более адекватно характеризовать визуальное качество.

1. Варианты фильтрации на основе ДКП

Как показывает сравнение эффективности современных групп фильтров для обработки изображений [11, 13, 17-19], наибольшей эффективностью обладают методы на основе поиска подобных блоков [17-19] и ортогональных преобразований, дискретных косинусных преобразований (ДКП) и вейвлетов. Поэтому в дальнейшем рассмотрим только методы, принадлежащие этим группам. Отметим, что не все методы применимы напрямую для обработки изображений, искаженных мультипликативными помехами. Поэтому часто в качестве предварительной обработки используют вариационно-стабилизирующие преобразования (ВСП) логарифмического типа, позволяющие получить изображения, искаженные аддитивными помехами с постоянной дисперсией [6, 16], хотя эти помехи после преобразования могут быть негауссовыми, особенно для однозглядовых РСА-изображений [5, 16].

Фильтрация на основе ДКП является не менее эффективной, чем наилучшие алгоритмы подавления помех на основе вейвлетных преобразований [5], и при этом обладает рядом других достоинств. Прежде всего, имеются модификации ДКП-фильтров как для аддитивных, так и мультипликативных помех. Кроме того, алгоритм обработки способен легко учитывать пространственный спектр помех путем установки частотно-зависимых порогов. Поэтому в дальнейшем уделим основное внимание фильтрации однозглядовых РСА-изображений на основе ДКП в блоках размером 8x8 пикселей. При этом будем предполагать, что обработка производится с использованием полного перекрытия блоков и жесткого порога, поскольку именно такие установки алгоритма обеспечивают при прочих равных условиях наиболее эффективную фильтрацию как в соответствии с традиционными, так и нетрадиционными (визуального качества) критериями (метриками) [5, 11, 13].

ДКП-фильтрация предусматривает выполнение прямого ДКП в каждом блоке, применение пороговой обработки к полученным ДКП-коэффициентам, выполнение обратного ДКП в каждом блоке и усреднение полученных фильтрованных значений для каждого пикселя для случая фильтрации с перекрытием. Основным инструментом варьирования свойств ДКП-фильтров является выбор порога. В общем виде, для каждого блока с верхним левым углом в nm -м пикселе порог устанавливается как

$$T_{nm}(k, l) = \beta \sqrt{f(\bar{I}_{nm}) W_{norm}(k, l)},$$

где β - параметр, $f(\bullet)$ - функция, характеризующая зависимость дисперсии помех от истинного значения изображения I_{ij}^{true} в ij -м пикселе, где среднее в

блоке \bar{I}_{nm} служит оценкой I_{ij}^{true} для всех пикселей, принадлежащих данному блоку, $W_{norm}(k, l)$ - нормированный ДКП-спектр пространственно-коррелированной помехи (матрица 8x8 пикселей).

Рассмотрим четыре варианта фильтрации:

1) Порог устанавливается в соответствии с выражением $T_{nm}(k, l) = \beta \bar{I}_{nm} \sigma_{\mu}$ (σ_{μ} - СКО мультипликативных помех, где для однозглядовых РСА-изображений $\sigma_{\mu}^2 = 0,273$), которое не учитывает пространственно-коррелированный характер помех, фильтр применяется к исходному изображению, то есть без использования ВСП;

2) Порог устанавливается в соответствии с выражением $T_{nm}(k, l) = \beta \bar{I}_{nm} \sigma_{\mu} \sqrt{W_{norm}(k, l)}$, которое учитывает пространственно-коррелированный характер помех, фильтр применяется к исходному изображению, то есть без ВСП;

3) Порог устанавливается в соответствии с выражением $T_{nm}(k, l) = \beta \sigma_{at}$ (σ_{at} - СКО аддитивных помех, равное единице при условии, что используется ВСП вида $I_{vst} = 2\sqrt{6}\pi^{-1} \ln(I)$, где I_{vst} - изображение после трансформации, I - зашумленное изображение); этот вариант обработки не учитывает пространственно-коррелированный характер помех, фильтр применяется к изображению после выполнения ВСП;

4) Порог устанавливается в соответствии с выражением $T_{nm}(k, l) = \beta \sigma_{at} \sqrt{W_{norm}(k, l)}$; этот вариант обработки учитывает пространственную коррелированность помех, фильтр применяется к изображению после выполнения ВСП.

Для третьего и четвертого вариантов к изображениям после фильтрации применяется обратное преобразование вида $I_{inv} = K \cdot e^{I_{fil}(2\sqrt{6}\pi^{-1})^{-1}}$, где I_{inv} - изображение после обратного преобразования, I_{fil} - отфильтрованное изображение, K - поправочный коэффициент, равный 1,2.

Значение β , при котором обеспечивается оптимум метрик, количественно характеризующих эффективность фильтрации, зависит от свойств обрабатываемого изображения (его сложности), свойств помех и используемой метрики. Общие закономерности следующие [13]:

1) если в качестве метрик используются стандартные критерии (метрики ПОСШ или СКОш), то для жесткого порога оптимальное значение β_{opt}^{PSNR} порядка или чуть меньше 2,6, если уровень помех невысок и обрабатываемое изображение достаточно сложное; в противном случае β_{opt}^{PSNR} примерно равно

или несколько больше 2,6 (до 3,0);

2) если для описания качества выходных изображений используются метрики визуального качества (например, MSSIM [14]), то оптимальные значения β немного меньше, при этом обычно выполняется следующее приближенное равенство:

$$\beta_{\text{opt}}^{\text{MSSIM}} \approx 0,95 \cdot \beta_{\text{opt}}^{\text{PSNR}},$$

то есть для обеспечения оптимального визуального качества нужно в первую очередь лучше сохранить границы, малоразмерные объекты и текстуры, что достигается при $\beta \approx 2$, чем эффективно подавить шум, что обеспечивается при $\beta > 2,6$.

Эти рекомендации справедливы при условии, что варианты 1 и 3 ДКП-фильтра применяются для подавления пространственно-некоррелированных помех, а варианты 2 и 4 – для подавления пространственно-коррелированных помех. Вместе с тем, вопрос оптимальной установки β для вариантов 1 и 3 при пространственно-коррелированных помехах до настоящего времени не рассматривался. Если же устанавливается $\beta \approx 2,6$ и осуществляется обработка изображений, искаженных пространственно-коррелированными помехами, то применение ДКП-фильтров с частотно-зависимыми порогами, как для вариантов 2 и 4, обеспечивает существенный выигрыш по эффективности обработки в сравнении с ДКП-фильтром, не учитывающим коррелированность помех [11]. Рассмотрение указанных выше четырех вариантов фильтрации позволяет производить попарное сравнение их эффективности. Например, сравнение вариантов 1 и 2 позволяет проанализировать, в какой мере учет свойств помех может сказаться на эффективности обработки. Сравнение вариантов 1 и 3 или 2 и 4 может дать ответ на вопрос, целесообразно ли для рассматриваемого приложения использовать ВСП.

2. Методика проведения исследования

Одной из проблем анализа эффективности и сравнения характеристик фильтров, предназначенных для обработки РСА-изображений, является отсутствие стандартных (общепринятых) тестовых изображений, для которых бы имелось изображение без помех $\{I_{ij}^{\text{true}}, i=1, \dots, I_m, j=1, \dots, J_m\}$, где I_m, J_m – количество пикселей в изображении по горизонтали и вертикали, а также соответствующее изображение $\{I_{ij}^n, i=1, \dots, I_m, j=1, \dots, J_m\}$, искаженное помехами с желаемыми свойствами. Поэтому нами были созданы такие тестовые изображения [20]. Их основой послужили реальные изображения аэрофотосъемки, на которых присутствуют, в частности, зоны затенения (см. примеры на рис. 1,а и 1,б). Был также сге-

нерирован мультипликативный шум с заметной пространственной коррелированностью, для которого пространственный ДКП-спектр соответствует реальному случаю однозглядовых РСА-изображений, формируемых системой TerraSAR-X космического базирования [21], которая является одной из лучших, на данный момент, радиолокационных систем ДЗ.

Методика моделирования спекла с Рэлеевским законом распределения, который имеет место для однозглядовых амплитудных РСА-изображений, для случая пространственно-коррелированных помех заключается в следующем.

1. Генерируется двумерный массив значений пространственно-коррелированного гауссова шума (ПКГШ, GCN – Gaussian correlated noise) с заданным пространственным спектром (размер массива $I_m \times J_m$) (решение этой задачи не представляет проблем).

2. Двумерный массив GCN известным способом, например, построчным сканированием, преобразуется в одномерный массив C длиной $K=I_m \times J_m$.

3. Генерируется такой же по длине, как и C , массив B с белым шумом B .

4. Для массива C формируется массив индексов CI таким образом, что $CI(1)$ содержит номер элемента массива C с наибольшим значением, $CI(2)$ содержит номер элемента массива C со вторым по величине значением, $CI(3)$ – с третьим и т.д. $CI(K)$, последний элемент массива CI , содержит номер элемента массива C с наименьшим значением.

5. Аналогичным образом для массива B формируется массив индексов BI .

6. Для $i=1..K$ выполняется $C(CI(i))=B(BI(i))$. При этом шум с Гауссовым распределением заменяется шумом с заданным законом распределения.

7. Одномерный массив C инверсно преобразуется в двумерный массив RES с размерами по горизонтали и вертикали $I_m \times J_m$.

Фрагмент кода на языке Matlab, реализующего описанный метод для заданного (Рэлеевского закона распределения):

```
C=GCN(:);
B=random('rayleigh',1,1,M*N)/1.26;
[CC,CI]=sort(C);
[BB,BI]=sort(B);
C(CI)=B(BI);
RES=reshape(C,M,N);
```

Здесь M, N – размеры массива шума по вертикали и горизонтали, GCN – предварительно сформированный двумерный массив пространственно-коррелированного шума с гауссовым распределением, RES – сформированный двумерный массив шума с заданным (Рэлеевским) законом распределения

и практически такой же пространственной корреляцией, как и у массива GCN. Значения $RES(i,j)$ поэлементно умножаются на I_{ij}^{true} с получением соответствующих значений $I_{ij}^n, i = 1, \dots, I_{lm}, j = 1, \dots, J_{lm}$. Изображение на рис. 1,а, искаженное пространственно-коррелированным спеклом, сгенерированным в соответствии с описанной выше методикой, представлено на рис. 1,в.

В качестве количественных критериев (метрик) эффективности фильтрации использовалась СКОш, вычисленная для всего изображения MSE_{int} , метрика визуального качества $MSSIM$, являющаяся одной из наиболее адекватных для изображений, искаженных различного рода помехами и остаточными ошибками после фильтрации (значения этой метрики изменяются от 0, что соответствует крайне низкому визуальному качеству, до 1), а также локальная СКОш MSE_{la} , вычисляемая только для локально-активных участков тестовых изображений, то есть окрестностей границ площадных объектов, малоразмерных объектов и их окрестностей, текстурных участков.

Возможны различные методики определения таких локально-активных участков. Нами была использована методика, предусматривающая применение детектора неоднородностей на основе обученной нейросети, на вход которой подаются выходные данные нескольких эффективных детекторов [22]. Обнаруженные области локальной активности для изображения на рис. 1,а (детектор применен к изображению на рис. 1,а) показаны на рис. 1,г белым цветом.

В ходе исследования анализировались различные значения параметра β , которые варьировались в достаточно широких диапазонах с целью определить положения экстремумов зависимостей $MSE_{int}(\beta)$ (минимум), $MSE_{la}(\beta)$ (минимум) и $MSSIM(\beta)$ (максимум).

3. Анализ полученных результатов

В табл. 1 представлены значения метрик MSE_{int} , MSE_{la} , $MSSIM$ для двух тестовых изображений и предложенных методов фильтрации при изменяющейся величине порога (параметра β , который определяет порог).

Прежде всего, отметим, что для всех вариантов фильтров MSE_{int} существенно меньше MSE_{la} , то есть выполнять эффективное подавление помех без внесения заметных искажений в локально-активных областях гораздо сложнее, чем подавлять спектр на однородных участках изображений. Впрочем, такое свойство характерно не только для ДКП-фильтров, но и для любых других.

Анализ данных для первого метода фильтрации

(обработка без учета пространственной коррелированности шума и без ВСП) показывает, что оптимальные значения β для метрики MSE_{int} гораздо больше традиционно рекомендуемых и не совпадают с оптимальными значениями β для MSE_{la} и $MSSIM$. Оптимум по β согласно метрике MSE_{int} наблюдается при $\beta=4,0..4,2$, а для метрик MSE_{la} и $MSSIM$ он имеет место при $\beta=3,6..3,8$. При значении параметра $\beta=3,8$ оптимумы для метрик MSE_{la} и $MSSIM$ совпадают как для первого, так и для второго тестового изображения. Таким образом, чтобы данный метод работал с наибольшей эффективностью параметр β целесообразно устанавливать примерно равным 3,8. В будущем возможна разработка и локально-адаптивных процедур установки порога.

Анализируя второй подход, предусматривающий учет пространственной коррелированности шума и обработку без ВСП, видно, что наилучшие результаты работы фильтра достигаются при $\beta=2,8$, оптимумы метрик MSE_{la} и $MSSIM$ при этом значении также совпадают.

Оптимальное значение β для третьего варианта фильтрации (без учета пространственной коррелированности помех с применением ВСП) примерно равно 3,8, то есть оно практически совпадает с оптимальным значением β для первого варианта фильтрации.

Оптимальное значение параметра β при четвертом методе фильтрации (с учетом пространственно-коррелированного шума и с применением ВСП) совпадает с оптимальным значением β для второго метода ($\beta \approx 2,8$).

Сравнивая первый и третий варианты фильтрации при оптимальном $\beta=3,8$, видно, что применение первого варианта приводит к лучшим результатам, как по визуальному критерию ($MSSIM$ больше на примерно 0,03 для первого изображения и на 0,032 для второго), так и по другим критериям (MSE_{int} меньше на 83, MSE_{la} меньше на 98 для первого изображения, для второго MSE_{int} и MSE_{la} меньше соответствующих значений на 66 и 81).

При сравнении второго и четвертого методов основные закономерности поведения и свойства метрик не изменились. Для метода обработки с учетом пространственной коррелированности помех применение ВСП также не увеличивает эффективность фильтрации. При этом второй вариант фильтрации по метрике $MSSIM$ дает выигрыш на 0,029 и 0,031 для первого и второго изображения. Согласно метрике MSE_{int} значения меньше на 78 и 99, а по метрике MSE_{la} – на 92 и 84.

Таким образом, применение ВСП в данном случае не приводит к повышению эффективности обработки ни по одному из анализируемых критериев (показателей). Причины этого, по-видимому, со-

стоят в следующем. Во-первых, ВСП обеспечивает аддитивный характер помех, но при этом шум оказывается явно негауссовым и подавляется при ДКП-фильтрации менее эффективно, чем шум с распределением Рэлея. Во-вторых, после применения ВСП ухудшается сохранение малоразмерных объектов с положительным контрастом относительно фона [23, 24], которые наиболее важны при обработке РСА-изображений и во многом определяют их визуальное качество [1].

Также в ходе исследования были проанализированы свойства одного из наилучших фильтров на сегодняшний день - BM3D [19], предназначенного для аддитивных помех. Поэтому перед его применением было применено ВСП, а после обработки – обратное гомоморфное преобразование с коррекцией среднего уровня [16]. Полученные результаты таковы: $MSE_{int}=746$, $MSE_{la}=872$, $MSSIM=0,757$ для первого изображения; $MSE_{int}=761$, $MSE_{la}=838$, $MSSIM=0,688$ для второго изображения. Эти значения являются наихудшими среди всех рассматриваемых подходов к фильтрации (при оптимальной установке параметров). Причины того, что этот подход оказался хуже, чем рассмотренные выше, заключаются, на наш взгляд, в следующем. Во-первых, BM3D-фильтр осуществляет поиск подобных блоков, предполагая некоррелированность помех, которые на самом деле являются простран-

венно-коррелированными. Это обстоятельство снижает эффективность поиска подобных блоков. Во-вторых, при фильтрации собранных в группы блоков также предполагается некоррелированность помех и оптимальное значение β устанавливается, как для некоррелированных помех, что снижает эффективность подавления помех. Поэтому можно предположить, что модификации BM3D-фильтра, которые могут быть разработаны в будущем для случая пространственно-коррелированных помех, окажутся способными обеспечить лучшие показатели эффективности обработки.

Из анализа приведенных в табл. 1 данных можно сделать не совсем верный вывод, что учет пространственно-коррелированного характера помех (вариант 2, 4) позволяет получить результаты, сравнимые с результатами для методов без учета коррелированности помех, для которых не возникают проблемы, связанные с оцениванием спектра шума. Это не так. В действительности, оптимальные значения параметра β зависят от спектра шума. Для меньшей степени пространственной коррелированности помех, чем исследованная, оптимальные значения β оказываются меньше и наоборот. В настоящий момент не установлена функциональная зависимость между пространственным ДКП-спектром спекл-шума и оптимальным β для первого и третьего вариантов ДКП-фильтров. В свою очередь, для

Таблица 1

Количественные критерии эффективности фильтрации при различных подходах

Изображение	β	Метрика											
		Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
		MSE_{int}	MSE_{la}	$MSSIM$									
Fr1	2	-	-	-	730	956	0,792	1182	1304	0,720	802	971	0,772
	2,2	-	-	-	593	817	0,809	1007	1153	0,735	671	859	0,785
	2,4	-	-	-	510	730	0,820	869	1033	0,750	590	794	0,793
	2,6	646	846	0,789	466	682	0,825	762	940	0,763	546	765	0,796
	2,8	575	777	0,802	448	668	0,825	683	872	0,774	526	760	0,796
	3	524	727	0,812	443	672	0,823	625	823	0,783	521	771	0,793
	3,2	489	693	0,819	449	688	0,818	584	791	0,789	525	790	0,789
	3,4	465	673	0,824	-	-	-	556	770	0,794	-	-	-
	3,6	451	662	0,826	-	-	-	537	760	0,796	-	-	-
	3,8	444	659	0,827	-	-	-	527	757	0,797	-	-	-
	4,0	442	662	0,826	-	-	-	521	759	0,796	-	-	-
	4,2	442	669	0,825	-	-	-	519	766	0,795	-	-	-
	4,4	446	680	0,822	-	-	-	521	777	0,793	-	-	-
Fr4	2	-	-	-	706	970	0,740	1160	1217	0,653	772	920	0,717
	2,2	-	-	-	570	835	0,758	979	1081	0,670	638	824	0,731
	2,4	-	-	-	488	746	0,767	837	974	0,687	557	774	0,739
	2,6	629	854	0,734	444	697	0,773	728	893	0,703	512	757	0,742
	2,8	556	791	0,748	426	679	0,773	648	836	0,716	489	763	0,742
	3,0	505	741	0,759	421	681	0,769	589	794	0,726	481	781	0,740
	3,2	471	711	0,766	423	701	0,765	547	769	0,733	480	804	0,737
	3,4	447	690	0,771	-	-	-	519	755	0,738	483	828	0,733
	3,6	432	678	0,774	-	-	-	500	751	0,741	-	-	-
	3,8	423	671	0,774	-	-	-	489	752	0,742	-	-	-
	4,0	420	673	0,773	-	-	-	482	759	0,742	-	-	-
	4,2	419	680	0,771	-	-	-	479	770	0,741	-	-	-
	4,4	-	-	-	-	-	-	477	783	0,739	-	-	-

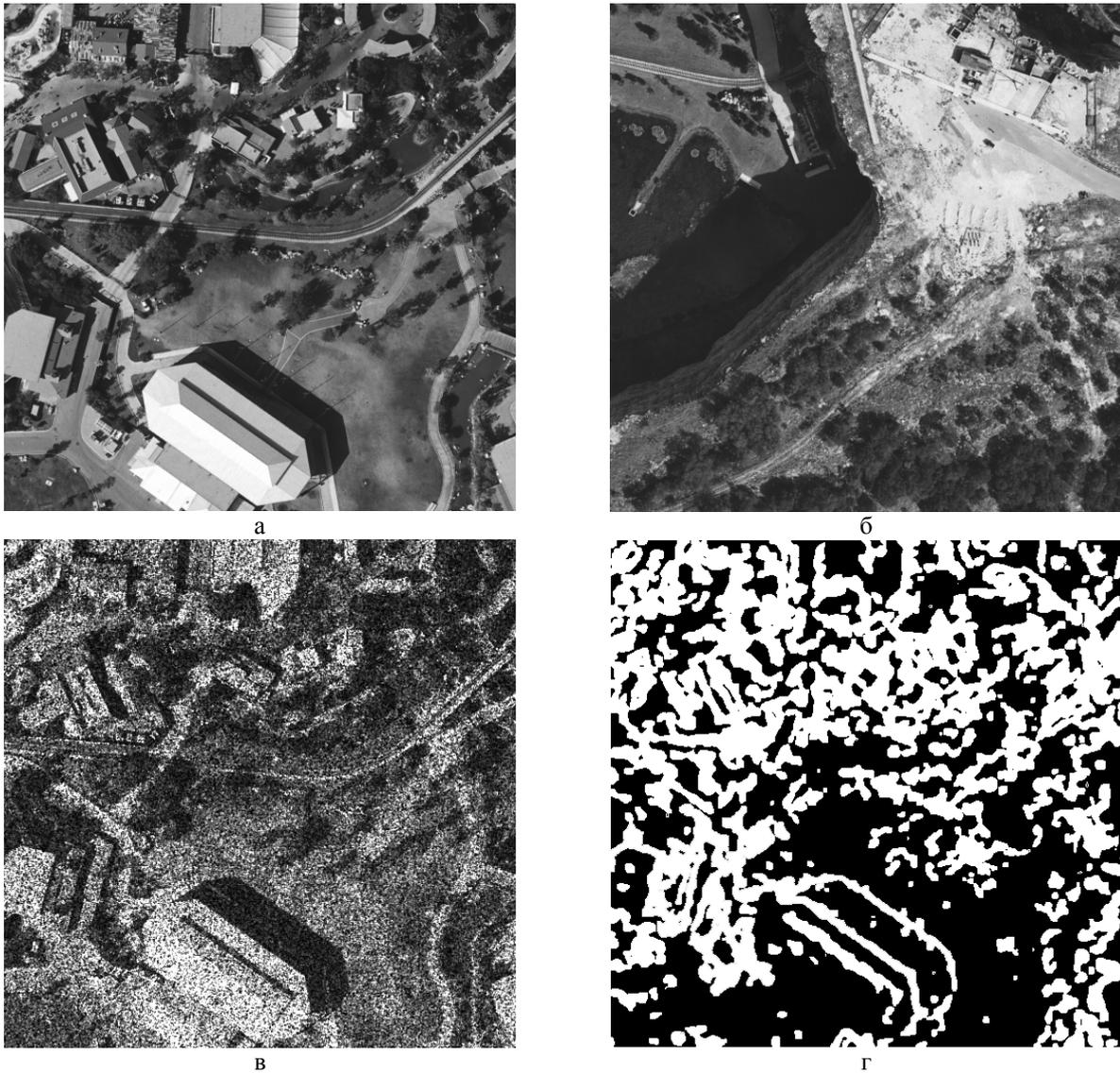


Рис. 1. Исходные тестовые изображения Fr1 (а) и Fr4 (б), Fr1 искаженное спекл-шумом (в), карта локально-активных зон изображения Fr1 (г)

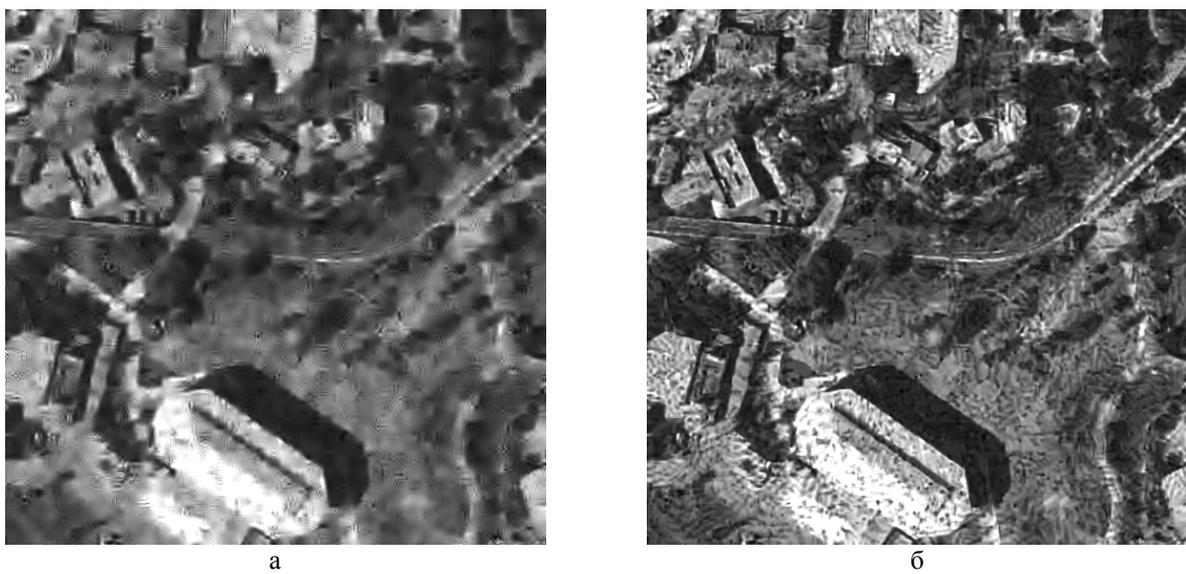


Рис. 2. Первое тестовое изображение: полученное с использованием варианта обработки 2 (а), полученное с использованием VM3D-фильтра совместно с ВСП (б)

вариантов 2 и 4 рекомендации по оптимальному выбору β являются четкими и совпадают с обычными [5, 13] независимо от свойств ДКП-спектра (лишь бы он был заранее оценен или известен и использовался при частотно-зависимой установке порогов). Наконец, приведем два изображения на выходе фильтров (оба для первого тестового изображения). Первое изображение (рис. 2,а) получено для варианта 2, второе (рис. 2.б) – для случая использования ВСП и ВМЗД-фильтра. При использовании обоих фильтров достигнуто хорошее сохранение границ и мелких деталей, но при использовании ВМЗД-фильтра в выходном изображении присутствует большее число нежелательных артефактов.

Заключение

В соответствии с тремя метриками проанализирована эффективность фильтрации РСА-изображений, искаженных пространственно-коррелированным спеклшумом, при различных подходах. Показано, что целесообразно использовать ДКП-фильтр, учитывающий спектр шума, что позволяет повысить эффективность фильтрации. Проведено сравнение фильтров на основе ДКП с ВМЗД-фильтром. Из полученных результатов можно сделать вывод, что ДКП-фильтр обладает большей эффективностью подавления помех. Применение ВСП совместно с ДКП-фильтром не увеличивает его эффективность, поэтому применение ВСП для данного приложения нецелесообразно. Даны практические рекомендации по установке оптимальных параметров фильтров. Планируется провести анализ поведения фильтров для многоканальных РСА-изображений.

Литература

1. Oliver, C. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images [Text]* / C. Oliver, S. Quegan. – SciTech Publishing. – 2004. – 464 p.
2. *Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery [Text]* / J.S. Lee, J.H. Wen, T.L. Aintworth, et. Al. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2009. – №1. Vol.47. – P. 202-213.
3. Touzi, R.A. *Review of Speckle in the Context of Estimations Theory [Text]* / R.A. Touzi // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2002. – №11. Vol.40. – P. 2392-2404.
4. *3D DCT Based of Color and Multichannel Images [Text]* / N. Ponomarenko, V. Lukin, A.A. Zelensky, K.O. Egiazarian // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2008. – №15. – P. 1369-1392.
5. *Locally Adaptive DCT Filtering for Signal-Dependent Noise Removal [Text]* / R. Oktem, K. Egiazarian, V. Lukin, N. Ponomarenko, O. Tsymbal // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2007. – Article ID 42472. – 10 p.
6. Solbo, S. *Homomorphic Wavelet-based Statistical Despeckling of SAR Images [Text]* / S. Solbo, T. Eltoft // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2004. – №4. Vol.GRS-42. – P. 711-742.
7. Chen, Z. *A Novel Speckle Filter for SAR Images Based on Information-theoretic Heterogeneity Measurements [Text]* / Z. Chen, J. Zhu, C. Li, Y. Zhou // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2009. – №.22. – P. 528-534.
8. Klaine, L. *An Integro Differential Method for Adaptive Filtering of Additive or Multiplicative Noise [Text]* / L. Klaine, B. Vozel, K. Chehdi // *Proceedings of ICASSP*. – 2005. – P. 1001-1004.
9. Achim, A. *SAR Images Denoising via Bayesian Wavelet Shrinkage Based on Heavy-Tailed Modeling [Text]* / A. Achim, P. Tsakalides, A. Bezerianos // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – №8. Vol.21. – P. 1773-1784.
10. Ponomarenko, N. *Pre-filtering of multichannel remote sensing data for agricultural bare soil field parameter estimation [Text]* / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Simeunovic // *Proceedings of BioScience*. – Serbia. – 2009. – 4 p.
11. *Efficiency analysis of color image filtering [Text]* / D. Fevrale, V. Lukin, N. Ponomarenko, S. Abramov, K. Egiazarian, J. Astola. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – Vol.2011:41, doi:10.1186/1687-6180-2011-41. – 2011. – 19 p.
12. *Анализ эффективности фильтрации одно-взглядовых РСА-изображений с использованием различных метрик [Текст]* / А.А. Зеленский, В.В. Лукин, Д.В. Февралев, С.С. Кривенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 3(70). – С. 93-102.
13. Lukin, V. *HVS-Metric-Based Performance Analysis Of Image Denoising Algorithms [Text]* / V. Lukin, N. Ponomarenko, K. Egiazarian // *Proceedings of EUVIP*. – Paris, France. – 2011. – 6 p.
14. Wang, Z. *Multi-scale Structural Similarity for Visual Quality Assessment [Text]* / Z. Wang, E.P. Simoncelli, A.C. Bovik // *Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. – Vol.2. – 2003. – P 1398-1402.
15. Melnik, V. *Nonlinear Locally Adaptive Techniques for Image Filtering and Restoration in Mixed Noise Environments [Text]* / V. Melnik // *Thesis for the degree of Doctor of Technology, Tampere University of Technology*. – Tampere, Finland. – 2000. – 234 p.
16. *Denoising of single-look SAR images based on variance stabilization and non-local filters [Электронный ресурс]* / M. Makitalo, A. Foi, D. Fevrale, V. Lukin // *CD-ROM Proceedings of MMET*. – Kiev, Ukraine. – Sept. 2010. – 4 p.
17. *Image Filtering: Potential Efficiency and Current Problems [Text]* / V. Lukin, S. Abramov, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, J. Astola // *Proceedings of ICASSP*. – Prague. – May 2011. – P. 1433-1436.
18. Chatterjee, P. *Is Denoising Dead? [Text]* / P. Chatterjee, P. Milanfar // *IEEE Transactions on Im-*

age Processing. – April 2010. – Vol.19. – № 4. – P. 895-911.

19. Image denoising by sparse 3-D Transform-domain collaborative filtering [Text] / K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian / IEEE Transactions of Image Processing. – 2007. – №8. Vol.16. – P. 2080-2095.

20. Ponomarenko, N.N. Visually Lossless Compression of Synthetic Aperture Radar Images [Електронний ресурс] / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K.O. Egiazarian // CD-ROM Proceedings of ICATT. – Kiev, Ukraine. – 2011. – 3 p.

21. Free TerraSAR-X Data Samples [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.infoterra.de/free-sample-data>. – 02.09.12 г.

22. Науменко, А.В. Детектирование границ на изображениях с помощью искусственной нейронной

сети [Текст] / А.В. Науменко, В.В. Лукин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 2(89). – С. 101-110.

23. 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 on Applied Signal Processing. – May 2005. – №8. – P. 1185-1204.

24. Use of homomorphic transforms in locally adaptive filtering of radar images [Text] / V.V. Lukin, V.P. Melnik, V.I. Chemerovsky, S. Peltonen, P. Kuosmanen // Proceedings of SPIE Conference on Nonlinear Image Processing XI. – San Jose, USA. – Jan. 2000. – Vol.3961. – P. 184-195.

Поступила в редакцию 20.09.2012

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

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФІЛЬТРАЦІЇ ОДНОПОГЛЯДОВИХ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ ПРІ ПРОСТОРОВО-КОРЕЛЬОВАНИХ ЗАВАДАХ

С.К. Абрамов, Р.О. Кожемякін, С.С. Кривенко, М.М. Пономаренко, В.В. Лукін

Проаналізовано ефективність фільтрації однопоглядових РСА-зображень в припущенні, що вони спотворені спекл-завадою з явно вираженою просторовою корельованістю. Дослідження проведено для фільтрів на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП), здатних легко враховувати апріорну інформацію про просторовий спектр завад та їх мультиплікативний характер. Показано, що використання при фільтрації апріорної інформації дозволяє підвищити ефективність фільтрації у відповідності з різними метриками і фіксувати параметри ДКП-фільтра. При цьому використання варіаційно-стабілізуючих перетворень логарифмічного типу не є необхідним.

Ключові слова: однопоглядове РСА-зображення, ДКП-фільтр, просторово-корельований спекл, візуальна якість.

EFFICIENCY FILTERING OF SINGLE-LOOK SAR-IMAGES WITH SPATIALLY CORRELATED SPECKLE

S.K. Abramov, R.O. Kozhemiakin, S.S. Krivenko, N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin

Efficiency of filtering single-look SAR-images the assumption that they are corrupted by speckle with clearly expressed spatial correlation is analyzed. The study was carried out for filters based on the discrete cosine transform (DCT) that could easily take into account a priori information on spatial spectrum of the noise and its multiplicative nature. It is shown that accounting a priori information in filtering improves efficiency of filtering according to different metrics and allows fixing parameters of DCT filter. The use of variance-stabilizing transformations of logarithmic type is not necessary.

Key words: single-look SAR-images, DCT-filter, spatially correlated speckle, visual quality.

Абрамов Сергей Клавдиевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: ask379@mail.ru.

Кожемякин Руслан Александрович – аспирант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: Arctic818@gmail.com.

Кривенко Сергей Станиславович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: Krivenkos@inbox.ru.

Пonomаренко Николай Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: uagames@mail.ru.

Лукин 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.