

УДК 621.3:681.34

А.А. ЗЕЛЕНСКИЙ, В.В. ЛУКИН, Д.В. ФЕВРАЛЕВ, С.С. КРИВЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Украина***АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ОДНОВЗГЛЯДОВЫХ
РСА-ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТРИК**

Проведен анализ эффективности нескольких методов фильтрации однозвездчатых РСА-изображений на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП). При исследовании использованы традиционные метрики и метрики, учитывающие визуальное качество изображений. Установлено, что оптимальная в соответствии с этими метриками эффективность ДКП-фильтрации достигается при различных значениях настроечных параметров фильтра. Показано, что для обеспечения высокого визуального качества основное внимание должно быть уделено сохранению границ и деталей. В этом плане ДКП-фильтры не уступают фильтру Ли, существенно превосходя его по эффективности подавления помех на однородных участках.

Ключевые слова: РСА-изображения, эффективность фильтрации, метрики

Введение

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) являются в настоящее время одним из основных средств дистанционного зондирования (ДЗ) авиационного и космического базирования [1, 2]. Всепогодность и способность РСА формировать изображения как днем, так и ночью, а также определенные возможности подповерхностного зондирования считаются их основными преимуществами. Кроме того, современные РСА обладают разрешающей способностью порядка единиц и даже долей метров, что сравнимо с разрешением оптических средств.

Платой за эти достоинства является высокий уровень специфического мультипликативного шума (спекла) на получаемых изображениях, что затрудняет их идентификацию [1, 3]. Уровень помех может быть снижен, если использовать многозвездчатый режим формирования РСА-изображений, но при этом резко ухудшается разрешающая способность [1, 4]. Поэтому чаще применяют фильтрацию изображений с целью одновременно подавить помехи и сохранить полезную информацию, которая заключается в положении и контрастах границ площадных и малоразмерных объектов, текстурных признаках и т.д.

Количество различных фильтров, разработанных к настоящему времени для подавления спекла, достаточно велико [3 – 7]. Однако случай малого количества взглядов и, в частности, однозвездчатых РСА-изображений представляет определенные сложности в связи с несимметричной относительно среднего плотностью распределения вероятности (ПРВ) мультипликативной помехи и низкими относитель-

ными контрастами объектов относительно фона. Многие фильтры наряду с достаточно эффективным подавлением спекла на однородных участках сглаживают мало контрастные границы, искажают мало размерные объекты и текстурные признаки. Поэтому отфильтрованное изображение нередко воспринимается как недостаточно четкое. В то же время, визуальное качество РСА-изображений весьма важно, поскольку по ним операторы часто в интерактивном режиме выполняют поиск контрольных точек, используемых для совмещения многоканальных изображений и их привязке к топокарте местности, а также ряд других операций, например поиск интересующих пользователя объектов и т.д. Вместе с тем, визуальное качество РСА-изображений обычно оценивают субъективно, не привлекая для этого количественных критериев.

Возможно, причина этого состоит в том, что для РСА-изображений не разработаны к настоящему времени адекватные метрики визуального качества. Эта проблема характерна и для других типов изображений, например оптических. Но в последнее время достигнут значительный прогресс в разработке метрик визуального качества, повышении их адекватности и их применении для анализа качества оптических изображений [8 – 10].

Поскольку визуальный анализ как оптических, так и РСА-изображений производится оператором (экспертом, дешифровщиком), то логично предположить, что для описания визуального качества РСА-изображений можно использовать те же метрики, которые проявили себя как наиболее адекватные для оптических изображений и способны наилучшим образом учитывать особенности визуальной системы человека. К таковым относятся

метрики MSSIM [11] и PSNR-HVS-M [10]. Первая является наиболее универсальной [9, 12], вторая лучше других характеризует такие искажения как разнообразные типы шумов, эффекты сжатия и фильтрации [9].

Поэтому целью данной статьи является анализ эффективности методов фильтрации однозглядовых PCA-изображений как в соответствии с традиционными метриками (среднеквадратической ошибкой (СКОш) и пиковым отношением сигнал-шум (ПОСШ)), так и в соответствии с метриками, характеризующими визуальное качество изображений (MSSIM и PSNR-HVS-M). Поскольку параметры некоторых фильтров, в частности, методов фильтрации на основе ДКП можно варьировать [4, 13-17], то дополнительная цель исследований состоит в анализе зависимости эффективности фильтрации от этих параметров и выработке практических рекомендаций согласно полученным результатам.

1. Модели изображений и помех

Как отмечено ранее, основным источником искажений PCA-изображений является спекл – разновидность мультипликативной помехи, характерными особенностями которого принято считать несимметричность ПРВ и большое значение относительной дисперсии σ_{μ}^2 . Предельно высокий уровень спекла имеет место при формировании однозглядовых изображений, которые могут быть представлены как в виде оценок интенсивности сигналов на выходе системы когерентной обработки принятых сигналов, так и оценок амплитуды [1]. В первом случае имеет вид односторонняя экспоненциальная ПРВ спекла, во втором – ПРВ Рэлея. В любом случае, пренебрегая влиянием аддитивных помех, боковых лепестков аппаратной функции и некоторых других факторов, упрощенная модель однозглядового изображения может быть представлена в виде

$$I_{ij}^s = I_{ij}^{\text{true}} \mu_{ij}, \quad (1)$$

где I_{ij}^{true} – истинное значение (интенсивности или амплитуды) изображения в ij -м отсчете (пикселе), μ_{ij} – случайная величина с одним из указанных выше законов распределения и математическим ожиданием (МО), равным единице. При одностороннем экспоненциальном распределении $\sigma_{\mu}^2 = 1$, а при ПРВ Рэлея $\sigma_{\mu}^2 = 0,273$.

Часто полагают, что спекл является пространственно-некоррелированным, хотя на практике это предположение выполняется далеко не всегда [1, 17]. Однако поскольку большинство известных фильтров разработано исходя из этого предположе-

ния, будем в дальнейшем полагать пространственную некоррелированность спекл-шума.

Однозглядовые изображения могут формироваться как в виде пространственных оценок амплитуды, так и интенсивности отраженных сигналов. Получаемые при этом изображения легко пересчитываются одно в другое. Но при визуализации однозглядовых PCA-изображений чаще используют «амплитудные» изображения, поскольку они характеризуются меньшим динамическим диапазоном значений [1]. Поэтому основное внимание в дальнейшем уделим именно таким изображениям. Следовательно, будем полагать, что спекл имеет ПРВ Рэлея.

Одной из проблем анализа эффективности фильтрации PCA-изображений является то, что, в отличие от оптических, отсутствуют общепринятые тестовые изображения.

В связи с этим используют либо синтезированные авторами различные искусственные изображения, часто довольно простые и не учитывающие разнообразие практических свойств данных ДЗ [4, 6, 14, 17], либо используют в качестве $\{I_{ij}^{\text{true}}\}$ стандартные оптические изображения (Lena, Boat, Montage), которые искусственно искажают спекл-шумом [18 – 20]. Поэтому в данной работе воспользуемся одним синтезированным изображением (рис. 1) и одним оптическим тестовым изображением (Boat, рис. 2), имеющими достаточно сложную структуру и одинаковый размер 512x512 пикселей.

Отметим, что в ходе исследований нами использовался модифицированный вариант этого тестового изображения, более удобный для проведения моделирования.

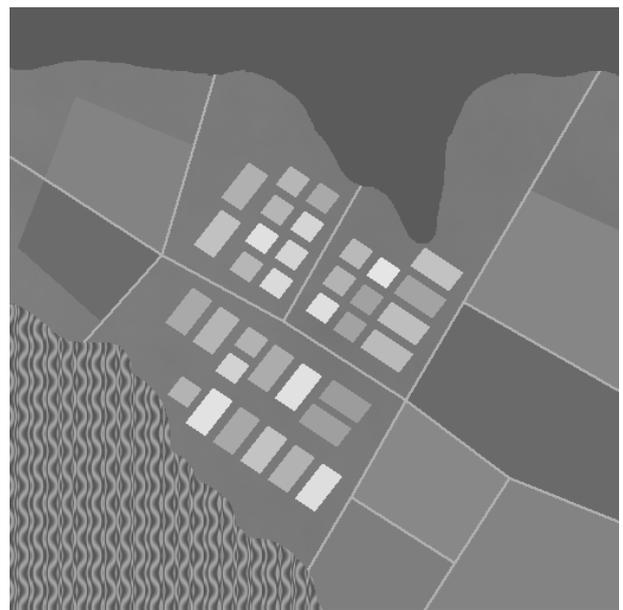


Рис. 1. Незашумленное изображение PCA



Рис. 2. Незашумленное (истинное) изображение Boat

2. Метрики эффективности фильтрации

Среднеквадратическая ошибка на выходе фильтра для анализируемого изображения рассчитывается в виде

$$\sigma_{\text{out}}^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (I_{ij}^f - I_{ij}^{\text{true}})^2 / IJ, \quad (2)$$

где I_{ij}^f - ij -й отсчет изображения на выходе фильтра; I, J – количество пикселей в строках и столбцах изображений. ПОСШ при 8-битном представлении истинного изображения определяется как

$$\text{PSNR}_k = 10 \lg(255^2 / \sigma_{\text{out}}^2). \quad (3)$$

Метрика PSNR-HVS-M [10] также предусматривает сначала определение $\sigma_{\text{HVS-M}}^2$, а затем расчет

$$\text{PSNR - HVS - M} = 10 \lg(255^2 / \sigma_{\text{HVS-M}}^2). \quad (4)$$

При расчете $\sigma_{\text{HVS-M}}^2$ учитываются две важные особенности визуальной системы человека: более низкая чувствительность к искажениям в области высоких пространственных частот и эффекты маскирования. Значения PSNR-HVS-M представляются в дБ и чем они больше, тем выше визуальное качество изображений. Программный модуль для расчета PSNR-HVS-M бесплатно доступен в [21].

Метрика MSSIM также учитывает ряд аспектов зрения человека. При этом значения MSSIM варьируются в пределах от 0 до 1. Чем они больше, тем выше визуальное качество изображений.

Программный пакет ее расчета также доступен для свободного скачивания [22].

3. Фильтрация на основе ДКП

Методы фильтрации на основе ортогональных преобразований, особенно вейвлетов и ДКП, в последнее время стали одним из основных средств подавления помех [3, 4, 14 – 18]. ДКП является особо привлекательным для рассматриваемого приложения по следующим причинам. Во-первых, фильтрация на его основе обладает высокой степенью подавления помех на однородных участках, сохранением текстуры и относительно небольшой степенью искажения границ и деталей [13, 21, 24]. Фактически методы, описанные в работах [13, 24] и основанные на ДКП и различных подходах к локальной адаптации и поиску самоподобия фрагментов изображений, являются на настоящий момент наиболее эффективными, но достаточно сложными. Во-вторых, фильтры на основе ДКП обладают способностью легко адаптироваться для обработки изображений, искаженных различными типами помех (сигнально-зависимыми, мультипликативными, смешанными) [4, 13, 18]. В-третьих, имеются также возможности адаптироваться к локальному контенту изображений и локальным характеристикам помех [15, 16] при ограниченных априорных сведениях о типе статистике шума.

Основной принцип ДКП-фильтрации [14, 23] состоит в том, что для каждого положения блока изображения рассчитывают коэффициенты ДКП, которые затем сравниваются с определенным образом рассчитанными порогами. Наименьшие по амплитуде значения коэффициентов ДКП, которые с большой вероятностью соответствуют помехам, обнуляются, а остальные коэффициенты остаются неизменными (при жесткой пороговой обработке) или изменяются незначительно. Затем выполняются обратное ДКП. Если используется обработка в перекрывающихся блоках, то усредняют отфильтрованные значения для каждого пикселя с учетом тех блоков, которые включают данный пиксель.

Далее при анализе нами будет использоваться обработка с перекрывающимися блоками, поскольку этот режим работы ДКП-фильтра обладает наибольшей эффективностью (хотя и менее высоким быстродействием, чем фильтрация без перекрытия или с частичным перекрытием блоков). Кроме того, будем анализировать метод фильтрации с жесткой пороговой обработкой, при которой

$$D_t(n, m, k, l) = \begin{cases} D(n, m, k, l), & \text{если } |D(n, m, k, l)| > T(n, m) \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где $D(n,m,k,l)$ – значение kl -го ДКП-коэффициента в блоке с левым верхним углом в nm -м элементе изображения; $T(n,m)$ – порог, устанавливаемый индивидуально для каждого блока (при сигнально-зависимых помехах); $D_t(n,m,k,l)$ значение соответствующего ДКП-коэффициента после пороговой обработки (которая применяется ко всем коэффициентам, кроме $D(n,m,0,0)$, соответствующего постоянной составляющей в блоке). Ниже будем рассматривать обработку в блоках стандартного размера 8×8 пикселей ($k=0,1,\dots,7; l=0,1,\dots,7$), при котором легко применять алгоритмы быстрого ДКП.

Для рассматриваемого случая воздействия мультипликативных помех (спекла) возможны следующие варианты расчета порога. При известной дисперсии мультипликативных помех

$$T(n,m) = \beta \sigma_\mu \hat{I}(n,m), \quad (6)$$

где $\hat{I}(n,m)$ – оценка среднего в nm -м блоке, β – параметр, обычно выбираемый равным 2,7 [4, 18], но который, в принципе, можно варьировать для достижения желаемого компромисса между степенью подавления помех (β должно быть побольше) и степенью сохранения деталей и текстур (β должно быть порядка 2). При заранее неизвестной дисперсии спекла и, в общем случае, зависимости локальной дисперсии от локального среднего возможно использовать устойчивый адаптивный алгоритм, предложенный в работах [15, 16]

$$T(n,m) = \beta \hat{\sigma}(n,m), \quad (7)$$

где $\hat{\sigma}(n,m)$ – оценка среднеквадратического отклонения (СКО) в nm -м блоке, рассчитываемая как

$$\hat{\sigma}(n,m) = 1,483 \text{med}(|D(n,m,k,l)|, k=0,\dots,7; l=0,\dots,7). \quad (8)$$

Как видно из (6), в случае мультипликативных помех даже при известной дисперсии σ_μ^2 при расчете локального порога используется оценка локального СКО в виде $\sigma_\mu \hat{I}(n,m)$. Эта оценка является более точной, чем оценка (8), поскольку на оценку (8) существенно влияет локальный контент информационной составляющей в блоке [15, 16]. Поэтому представляет интерес, в какой степени неточность оценивания локального СКО влияет на эффективность фильтрации в целом.

4. Анализ эффективности

Значения ПОСШ (PSNR), PSNR-HVS-M и MSSIM для первого тестового изображения (рис. 1)

и метода ДКП-фильтрации на основе (6) приведены в табл. 1. В четырех нижних строках приведены данные для фильтра Ли [5] и его модификации [25] при размере скользящих окон 5×5 и 7×7 элементов. Напомним, что для обычного фильтра Ли выходное значение в скользящем окне получают в виде

$$I_{ij}^f = \bar{I}_{ij} + (I_{ij}^s - \bar{I}_{ij}) \sigma_{ij}^2 / (\bar{I}_{ij}^2 \sigma_\mu^2 + \sigma_{ij}^2), \quad (9)$$

где \bar{I}_{ij} – среднее в скользящем окне с центром в ij -м отсчете (пикселе), σ_{ij}^2 – локальная дисперсия для этого же положения скользящего окна. Для модифицированного фильтра Ли (МЛи) [25] вводится следующая поправка:

$$\text{если } \bar{I}_{ij}^2 \sigma_\mu^2 > \sigma_{ij}^2, \text{ то } I_{ij}^f = \bar{I}_{ij}, \quad (10)$$

что приводит к повышению эффективности подавления спекла на однородных участках изображений. Отметим, что для исходного (зашумленного) изображения значения этих метрик таковы:

$$\text{PSNR}=19,23 \text{ дБ, PSNR-HVS-M}=21,51 \text{ дБ и MSSIM}=0,755.$$

Эти значения метрик очень низкие, что подтверждает тот факт, что качество исходных PCA-изображений низкое. PSNR-HVS-M больше, чем PSNR благодаря эффектам маскирования, присутствующим на тестовом изображении, прежде всего на текстурных участках [10].

Таблица 1

Значения метрик для первого тестового изображения (для ДКП-фильтра на основе (6) и двух вариантов фильтра Ли)

β	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	MSSIM
2,2	27,70	26,89	0,925
2,4	28,41	27,09	0,934
2,6	28,80	27,07	0,938
2,8	28,92	26,91	0,939
3,0	28,76	26,60	0,935
Ли 5×5	23,71	24,39	0,838
Ли 7×7	23,69	24,80	0,850
МЛи 5×5	25,19	22,82	0,858
МЛи 7×7	24,88	22,34	0,862

Анализ приведенных результатов показывает следующее:

1. Значения β , при которых наблюдаются максимумы различных метрик, не совпадают; если для PSNR и MSSIM максимум имеют место при $\beta \approx 2,8$, то для PSNR-HVS-M – при $\beta \approx 2,5$.

2. Если значения PSNR в результате фильтрации возросли почти на 10 дБ, то значения PSNR-HVS-M всего на 5,6 дБ, что обусловлено внесением при фильтрации визуально заметных искажений.

3. Если до фильтрации значение PSNR-HVS-M было больше, чем PSNR, то после фильтрации имеет место обратная ситуация, то есть положительный эффект от эффектов маскирования значительно меньше негативного эффекта сглаживания.

4. Для фильтра Ли полученные результаты весьма интересны: использование модифицированного фильтра Ли приводит к заметному улучшению PSNR и небольшому возрастанию MSSIM, но при этом заметно уменьшается PSNR-HVS-M; увеличение размера скользящего окна не приводит к улучшению качества выходного изображения – имеет место небольшое возрастание MSSIM, но значения PSNR и PSNR-HVS-M немного уменьшаются.

5. При использовании фильтра Ли [5] значения PSNR-HVS-M больше, чем PSNR, то есть в обработанном изображении имеют место эффекты маскирования, а при применении модификации [25] наоборот значения PSNR-HVS-M меньше, чем соответствующие значения PSNR; причины этого могут стать понятными при визуальном анализе выходных изображений (см. следующий подраздел).

6. В соответствии со всеми тремя метриками эффективность фильтра Ли (обеих модификаций) существенно ниже, чем для ДКП-фильтра на основе (6) при β порядка 2,6.

Приведем теперь результаты для варианта адаптивного ДКП-фильтра на основе (7) и (8). Для первого тестового изображения они представлены в таблице 2. Анализ данных в таблице 2 показывает, что максимумы PSNR и MSSIM имеют место при $\beta \approx 2,5$, а максимум PSNR-HVS-M - при меньшем значении β , примерно равном 2,2.

Таблица 2

Значения метрик для первого тестового изображения (ДКП-фильтр на основе (7) и (8))

β	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	MSSIM
2,0	27,47	26,37	0,911
2,2	28,07	26,40	0,918
2,4	28,29	26,22	0,923
2,6	28,24	25,89	0,924
2,8	28,05	25,49	0,921

Как видно из сравнения результатов, представленных в табл. 1 и 2, оптимальные значения β для ДКП-фильтра на основе (7) и (8) меньше, чем для фильтра на основе (6). Максимально достигнутые

значения всех метрик для варианта ДКП-фильтра на основе (7) и (8) хуже, чем для ДКП-фильтра на основе (6). В частности, максимальные значения PSNR и PSNR-HVS-M снизились примерно на 0,7 дБ. Причина заключается в методике оценивания локального СКО в блоках. При использовании выражения (6) предполагается, что σ_μ^2 априорно известно, и точность оценивания локального СКО определяется лишь точностью оценивания локального среднего. Оценка локального СКО согласно (8) оказывается менее точной, особенно в неоднородных блоках [15, 26], что приводит к заметному снижению эффективности фильтрации.

Эффективность локально-адаптивного фильтра на основе (7), (8) может быть повышена, если задействовать еще один механизм локальной адаптации [15, 26]. Его основная идея заключается в детектировании (распознавании) блоков, соответствующих неоднородным участкам обрабатываемого изображения. Для этого предложено использовать параметр, определяемый как

$$E_{mn} = (X_{mn}^{(58)} - X_{mn}^{(6)}) / (X_{mn}^{(48)} - X_{mn}^{(16)}) \quad (11)$$

где $X_{mn}^{(i)}$ i -я порядковая статистика выборки значений $D(n,m,k,l), k=0,\dots,7, l=0,\dots,7$ ДКП-коэффициентов. При расчете E_{mn} ДКП-коэффициент $D_{mn}(0,0)$, который соответствует постоянной составляющей, не учитывается. Если помехи пространственно-некоррелированы, то для однородных блоков коэффициенты $D(n,m,k,l), k=0,\dots,7, l=0,\dots,7$ вследствие нормализующего свойства ортогональных преобразования (каким является и ДКП) имеют гауссово распределение как при гауссовой плотности распределения вероятности (ППВ) помех в пространственной области [15, 26], так и при ППВ Релея. Последнее было подтверждено стандартными тестами на нормальность распределения [27].

Тогда на однородных участках среднее значение параметра E_{mn} примерно равно 2,0, а в блоках, содержащих неоднородности, оно заметно больше. Следовательно, анализируя E_{mn} , можно обнаруживать блоки, для которых с большой вероятностью локальные оценки $\hat{\sigma}(n,m)$ больше их истинных значений, вследствие чего ДКП-фильтр на основе (7), (8) смазывает обрабатываемое изображение. Соответствующий алгоритм локальной адаптации описывается как

$$T(n, m) = \begin{cases} \beta_1 \hat{\sigma}(n, m), & \text{если } E_{mn} > T_{DCT}; \\ \beta_2 \hat{\sigma}(n, m), & \text{если } E_{mn} < T_{DCT}, \end{cases} \quad (12)$$

где T_{DCT} – порог, $\beta_1 < \beta_2$.

Рекомендуемые параметры при пространственно-некоррелированных помехах: $T_{DCT}=2,3$, $\beta_1=2,6$, $\beta_2=1,1$. При использовании указанных значений параметров для ДКП-фильтра на основе (7), (8), (11), (12) для первого тестового изображения получены следующие значения метрик: PSNR=28,67 дБ, PSNR-HVS-M=26,91 дБ, MSSIM=0,929. Очевидно, что эти значения больше (лучше), чем максимальные значения соответствующих метрик в таблице 2, но немного меньше, чем максимальные значения в таблице 1. Следовательно, с одной стороны, при наличии априорных сведений о σ_{μ}^2 целесообразно их использовать при фильтрации. С другой стороны, ДКП-фильтр на основе (7), (8), (11), (12) позволяет обеспечить эффективность фильтрации, близкую к предельной, и при отсутствии каких-либо сведений о типе и статистических характеристиках помех.

Выше анализ проведен в предположении, что помехи пространственно некоррелированы. Если же имеет место пространственная коррелированность помех, то необходимо при фильтрации учитывать и этот факт [17]. Отметим, что к настоящему времени разработаны автоматические методы оценивания типа и статистических характеристик помех [28], а также их пространственного спектра в ДКП-области [29].

Проведем теперь аналогичный анализ для второго тестового изображения. Здесь необходимо отметить, что нами использовалось не стандартное изображение Boat, приведенное на рис. 2, а его масштабированный вариант. Все значения стандартного изображения, которые лежат в пределах 0-255, были уменьшены в три раза. Затем было смоделировано изображение, искаженное спекл-шумом с ПРВ Рэлея, которое также было представлено в виде массива 8-битовых целых чисел. Указанное преобразование исходного тестового изображения было проведено с целью минимизации влияния эффектов насыщения при моделировании помех на точность анализа эффективности фильтрации. Был учтен тот факт, что для значений $I_{ij}^s = I_{ij}^{true} \mu_{ij}$ при распределении μ_{ij} согласно закону Рэлея крайне редко (с вероятностью меньше, чем 0,002) выполняется условие $I_{ij}^s > 3I_{ij}^{true}$.

Результаты моделирования для ДКП-фильтра на основе (6) и двух модификаций фильтра Ли представлены в табл. 3.

Укажем, что для исходного (зашумленного) изображения значения этих метрик таковы:

PSNR=20,49 дБ, PSNR-HVS-M=22,57 дБ и MSSIM=0,682.

Таблица 3

Значения метрик для второго тестового изображения (для ДКП-фильтра на основе (6) и двух вариантов фильтра Ли)

β	PSNR, дБ	PSNR-HVS-M, дБ	MSSIM
2,0	30,45	29,50	0,894
2,2	31,89	30,08	0,910
2,4	32,93	30,37	0,920
2,6	33,57	30,44	0,925
2,8	33,82	30,35	0,926
3,0	33,89	30,19	0,925
3,2	33,84	30,01	0,924
Ли 5x5	25,56	25,83	0,793
Ли 7x7	25,74	26,59	0,811
МЛи5x5	28,31	25,56	0,842
МЛи7x7	28,52	25,92	0,863

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показывает следующее:

1. Как и для первого тестового изображения, значения β , при которых наблюдаются максимумы различных метрик для ДКП-фильтра на основе (6), не совпадают; для PSNR максимум наблюдается при $\beta \approx 3,0$, а для MSSIM и PSNR-HVS-M максимумы имеют место соответственно при $\beta \approx 2,8$ и $\beta \approx 2,6$.

2. Значения PSNR в результате фильтрации возросли примерно на 13 дБ, а значения PSNR-HVS-M – всего на 7-8 дБ.

3. Если до фильтрации значения PSNR-HVS-M немного больше, чем PSNR, то после фильтрации имеет место обратное.

4. Применение модифицированного фильтра Ли и размера скользящего окна 7x7 вместо 5x5 пикселей приводит к улучшению PSNR.

5. Значения PSNR-HVS-M для обычного фильтра Ли больше, чем PSNR, то есть в обработанном изображении имеют место эффекты маскирования. Для модифицированного фильтра Ли, наоборот, PSNR-HVS-M меньше, чем PSNR.

6. Эффективность фильтра Ли (обеих модификаций) гораздо ниже, чем для ДКП-фильтра на основе (6) при β порядка 2,6, в соответствии со всеми тремя метриками.

5. Примеры для визуального анализа

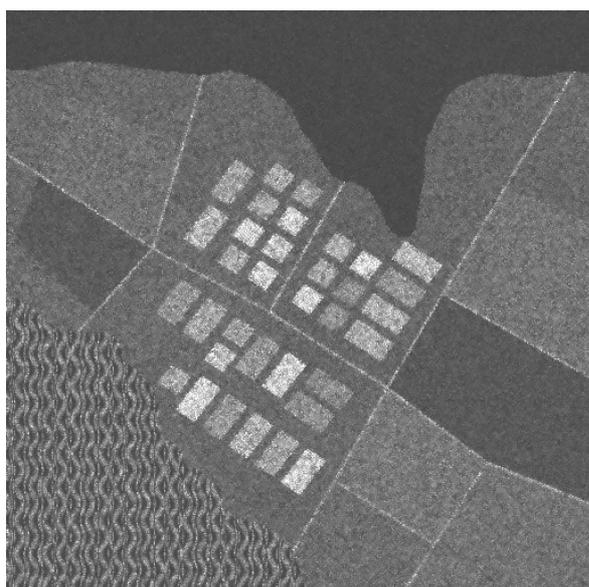
Приведем несколько примеров обработки тестового

вых изображений. На рис. 3, а показано первое тестовое изображение после добавления спекл-шума с ПРВ Рэлея и применения фильтра Ли [5] с размером скользящего окна 5x5 пикселей. С одной стороны, остаточный шум хорошо заметен, но, с другой стороны, границы, малоразмерные объекты и текстура сохранены неплохо. На рис. 3, б приведено выходное изображение для модифицированного фильтра Ли [25] с размером скользящего окна 7x7 пикселей. Степень подавления помех на однородных участках возросла, но выходное изображение выглядит более «смазанным».

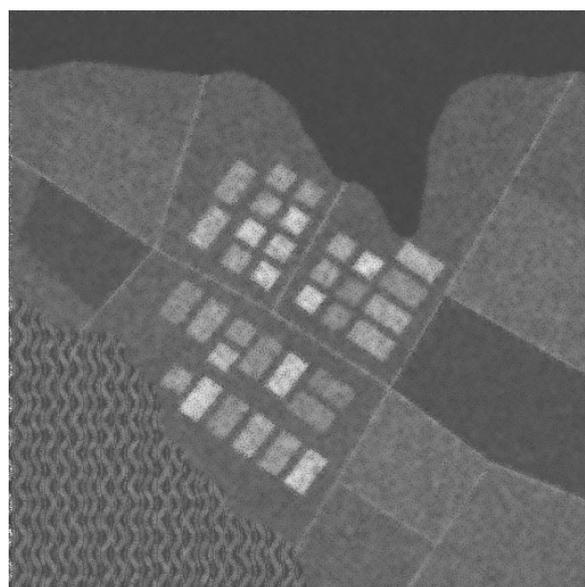
Метрики PSNR и MSSIM (см. данные в табли-

це 1) указывают на то, что качество изображения на рис. 3,б выше, чем на рис. 3,а. Метрика PSNR-HVS-M показывает обратное. На наш взгляд, для визуального анализа более пригодно изображение на рис. 3,а, поэтому авторы склонны в большей степени доверять метрике PSNR-HVS-M.

Первое тестовое зашумленное изображение приведено на рис. 4, а. Его сравнение с результатами обработки несколькими вариантами фильтра Ли на рис. 3 показывает, что благодаря фильтрации достигается улучшение визуального качества (особенно для изображения на рис. 3,а), хотя и не слишком большое.

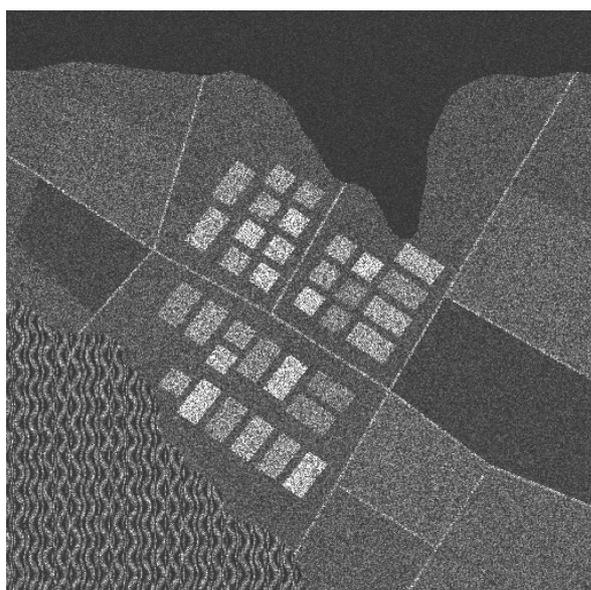


а



б

Рис. 3. Изображения на выходе обычного фильтра Ли (5x5) и модифицированного фильтра Ли (7x7)



а



б

Рис. 4. Первое (а) и второе (б) тестовые изображения, искаженные спекл-шумом

Второе тестовое изображение до фильтрации приведено на рис. 4, б. Очевидно, что оно характеризуется низким визуальным качеством вследствие присутствия интенсивного спекла.



Рис. 5. Изображение на выходе ДКП-фильтра на основе (6) при $\beta = 2,6$



Рис. 6. Изображение на выходе модифицированного фильтра Ли с окном 7x7 пикселей.

Выходные изображения для ДКП-фильтра на основе (6) с «оптимальным» $\beta = 2,6$ и модифицированного фильтра Ли с окном 7x7 пикселей приведены соответственно на рис. 5 и 6. Подавление спекла очевидно для обоих выходных изображений, но более высокое визуальное качество наблюдается при использовании ДКП-фильтра.

Систематизируя представленные в данном и предыдущем подразделах результаты, отметим сле-

дующее. Применение фильтрации позволяет повысить качество однозглядовых РСА-изображений в соответствии не только с традиционными метриками СКОш и ПОСШ, но и метриками, учитывающими визуальное качество (MSSIM и PSNR-HVS-M), причем вторая метрика более адекватно характеризует визуальное качество обработанных изображений. Использование ДКП-фильтра на основе (6) при условии заранее известной дисперсии мультипликативных помех позволяет существенно повысить эффективность обработки по сравнению с фильтром Ли (а также рядом других более современных методов фильтрации РСА-изображений [4]). Хорошим практическим решением является использование ДКП-фильтра с полным перекрытием блоков и значением параметра $\beta \approx 2,5$. С точки зрения более высокого визуального качества целесообразно в первую очередь обеспечивать лучшее сохранение границ и деталей, чем стремиться к более эффективному подавлению помех на однородных участках. Не исключено, что при визуализации обработанного изображения целесообразно применять предварительное гомоморфное преобразование, подобное гамма-коррекции, чтобы облегчить труд дешифровщиков.

Заключение

В соответствии с тремя различными метриками проанализирована эффективность фильтрации однозглядовых РСА-изображений, искаженных пространственно-некоррелированным спеклом. Показано, что использование ДКП-фильтров, ориентированных на подавление мультипликативных помех, позволяет достичь существенного повышения качества обработанных изображений, в том числе и визуального. Проведено сравнение ДКП-фильтра с модификациями фильтра Ли и продемонстрированы преимущества ДКП-фильтра, дана практическая рекомендация по установке порогов.

В будущем планируется проанализировать эффективность и применимость более сложных ДКП-фильтров, в частности, метода обработки с поиском подобных блоков [24]. Особое внимание будет уделено рассмотрению особенностей подавления пространственно-коррелированного спекл-шума.

Литература

1. Oliver C. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images* / C. Oliver, S. Quegan – SciTech Publishing. – 2004. – 464 p.
2. Solbo S. *Homomorphic Wavelet-based Statistical Despeckling of SAR Images* / S. Solbo, T. Eltoft // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2004. – № 4. – Vol. GRS-42. – P. 711-721.

3. Touzi R. *A Review of Speckle Filtering in the Context of Estimation Theory* / R. Touzi // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2002. – № 11. – Vol. 40. – P. 2392-2404.
4. Oktem R. *Locally Adaptive DCT Filtering for Signal-Dependent Noise Removal* / R. Oktem, K. Egiazarian, V. Lukin, N. Ponomarenko, O. Tsymbal // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2007. – Article ID 42472. – 10 p
5. Lee J. S. *Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images* / J. S. Lee // *Computer Vision, Graphics, Image Processing*. – 1981. – Vol. 17. – P. 24-32.
6. *Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery* / J.S. Lee, J.H. Wen, T.L. Ainsworth, et al. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2009. – № 1. – Vol. 47. – P. 202-213.
7. *A Novel Speckle Filter for SAR Images Based on Information-theoretic Heterogeneity Measurements* / Z. Chen, J. Zhu, C. Li, Y. Zhou // *Chinese Journal of Aeronautics (Elsevier Science Direct)*. – 2009. – Vol. 22. – P. 528-534.
8. Wang Z. *Mean squared error: love it or leave it? - A new look at signal fidelity measures* // Z. Wang, A.C. Bovik // *IEEE Signal Processing Magazine*. – Jan. 2009. – P. 98-117.
9. *TID2008 – A Database for Evaluation of Full-Reference Visual Quality Assessment Metrics* // N. Ponomarenko, V. Lukin, A. Zelensky, K. Egiazarian, J. Astola, M. Carli, F. Battisti / M.: *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2009. – No 10. – С. 30-45.
10. Ponomarenko N. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions* // N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin / *Proceedings of the Third International Workshop on Video Processing and Quality Metrics, Scottsdale, Arizona, USA, January 2007*. – P. 4. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
11. Wang Z. *Multi-scale Structural Similarity for Visual Quality Assessment* / Z. Wang, E.P. Simoncelli, A.C. Bovik // *Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. – 2003. – Vol. 2. – P. 1398-1402.
12. Larson E.C. *Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy* / E.C. Larson, D.M. Chandler // *Journal of Electronic Imaging*. – 2010. – No 1. – Vol. 19. – P. 011006-1-011006-21.
13. Foi A. *Pointwise Shape-Adaptive DCT Image Filtering and Signal-Dependent Noise Estimation: Thesis for the degree of Doctor of Technology* / Alexandro Foi. – Tampere University of Technology, Tampere, (Finland). – 2007. – 194 p.
14. *3D DCT Based Filtering of Color and Multichannel Images* / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, A.A. Zelensky, P.T. Koivisto, K.O. Egiazarian // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2008. – No 15. – P. 1369-1392.
15. *Removal of non-stationary noise by DCT based locally adaptive filtering* / V.V. Lukin, D.V. Fevralev, S.K. Abramov, N.N. Ponomarenko, S.S. Krivenko, O.B. Pogrebnyak, K.O. Egiazarian, J.T. Astola, I. Djurović // *Теоретические и практические аспекты цифровой обработки сигналов в информационно-телекоммуникационных системах, под ред. В.И. Марчука*. – Шахты, Россия. – 2009. – С. 11-42.
16. *Local adaptive filtering of images corrupted by nonstationary noise* / V.V. Lukin, D.V. Fevralev, N.N. Ponomarenko, O.B. Pogrebnyak, K.O. Egiazarian, J.T. Astola // *SPIE Proceedings of the Conference Image Processing: Algorithms and Systems VII*. – Jan. 2009. – San Jose, USA. – Vol. 7245. – 2009. – P. 724506-724506-12.
17. *Pre-filtering of multichannel remote sensing data for agricultural bare soil field parameter estimation* / N. Ponomarenko, V. Lukin, I. Djurovic, M. Simeunovic // *Proceedings of BioSense 2009, oct. 2009*. – Novi Sad, Serbia. – 2009. – 4 p.
18. *Local Transform-based Denoising for Radar Image Processing* / K.O. Egiazarian, V.P. Melnik, V.V. Lukin, J.T. Astola // *Proceedings of IS&T/SPIE International Conference on Nonlinear Image Processing and Pattern Analysis XII*. – Jan. 2001, San Jose, CA, USA. – SPIE Vol. 4304. – P. 170-178.
19. Klaine L. *An Integro Differential Method for Adaptive Filtering of Additive or Multiplicative Noise* / L. Klaine, B. Vozel, K. Chehdi // *Proceedings of ICASSP*. – 2005. – P. 1001-1004.
20. Achim A. *SAR Image Denoising via Bayesian Wavelet Shrinkage Based on Heavy-Tailed Modeling* / A. Achim, P. Tsakalides, A. Bezerianos // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – № 8. – Vol. 21. – P. 1773-1784.
21. *PSNR-HVS-M download page [Электронный ресурс]* - Режим доступа: <http://www.ponomarenko.info/psnrhvs.htm> (7.05.2010).
22. *MeTriX MuX Visual Quality Assessment Package download page [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: http://foulard.ece.cornell.edu/gaubatz/matrix_mux/ (7.05.2010)
23. Лукин В.В. *Исследование потенциальной эффективности фильтрации изображений на основе дискретного косинусного преобразования* / В.В. Лукин, Д.В. Февралев, Н.Н. Пономаренко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 4 (38). – С. 17-24.
24. Dabov K. *Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering* // K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian / *IEEE Transactions on Image Processing*. – Aug. 2007. – № 8. – Vol. 16. – P. 2080-2095.
25. Lee J. S. *Refined Filtering of Noise Using Local Statistics* / J. S. Lee // *Computer Graphics and Image Processing*. – 1983. – № 24. – P. 259-269.
26. Коваленко Ю. Н. *Исследование эффективности фильтрации цветных изображений с использованием различных метрик* / Ю.Н. Коваленко, В.В. Лукин, Д.В. Февралев // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – № 1 (42). – С. 51-59.
27. Бендат Дж. *Прикладной анализ случайных данных* / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

28. Абрамов С.К. Проблемы и методы автоматического определения характеристик помех на изображениях // С.К. Абрамов, А.А. Зеленский, В.В. Лукин / *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – №2 (35). – С. 25-34.

29. Пономаренко Н.Н. Метод слепой оценки на изображениях характеристик аддитивного Гауссова шума с неравномерным спектром / Н.Н. Пономаренко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 2 (59). – С. 82-90.

Поступила в редакцию 7.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов» В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ ОДНООГЛЯДОВИХ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ МЕТРИК

О.О. Зеленський, В.В. Лукін, Д.В. Февральов, С.С. Кривенко

Досліджено ефективність кількох методів фільтрації однооглядових РСА-зображень на базі дискретного косинусного перетворення (ДКП). У дослідженні використано традиційні метрики та метрики, які враховують візуальну якість зображень. Встановлено, що оптимальна у відповідності з цими метриками ефективність ДКП-фільтрації досягається при різних значеннях настроявальних параметрів фільтру. Показано, що для забезпечення високої візуальної якості основну увагу слід приділяти збереженню границь та деталей. Відповідно до цього критерія ДКП-фільтри не поступаються фільтру Лі та суттєво переважають його по ефективності придушення завад на однорідних ділянках.

Ключевые слова: РСА-зображення, ефективність фільтрації, метрики.

FILTERING EFFICIENCY ANALYSIS FOR SINGLE-LOOK SAR IMAGES USING DIFFERENT METRICS

A.A. Zelensky, V.V. Lukin, D.V. Fevralev, S.S. Krivenko

Efficiency analysis is carried out for several methods of single-look SAR image filtering based on discrete cosine transform (DCT). In the study, conventional metrics and the ones that take into account image visual quality have been used. It is established that DCT based filtering efficiency optimal with respect to these metrics is reached for different values of filter tunable parameters. It is shown that for providing high visual quality the main attention should be paid to preservation of edges and fine details. In this sense, the DCT base filters are not worse than the Lee filter but they sufficiently outperform the Lee filter in noise suppression efficiency in homogeneous image regions.

Key words: SAR-images, filtering efficiency, metrics.

Зеленский Александр Алексеевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Прием, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: azelens@mail.ru.

Лукин Владимир Васильевич – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Прием, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: lukin@xai.kharkov.ua.

Февральев Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, н.с. каф. «Прием, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: fevralev_@mail.ru.

Кривенко Сергей Станиславович – аспирант каф. «Прием, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: krivenkos@inbox.ru.