

УДК 621.396:53.08

ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА МНОГОВЗГЛЯДОВЫХ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

В.В. Лукин, д-р техн. наук, Н.Н. Пономаренко, И.В. Пискорж, С.В. Поденкова

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

Рассмотрены особенности вторичной обработки многовзглядовых РСА-изображений и последовательности кадров УЗ-изображений в целях повышения их качества. Показано, что целесообразно выполнять как накопление нескольких изображений, так и их последующую фильтрацию. Для тестовых и реальных данных проведен сравнительный анализ эффективности ряда методов накопления и фильтрации и даны соответствующие практические рекомендации по их применению.

* * *

Розглянуто особливості вторинної обробки багатопоглядових РСА-зображень і послідовності кадрів УЗ-зображень з метою підвищення їх якості. Показано, що доцільно виконувати як накопичення кількох зображень, так і їх наступну фільтрацію. Для тестових і реальних даних проведено порівняльний аналіз ефективності ряду методів накопичення й фільтрації та надано відповідні практичні рекомендації щодо їх застосування.

* * *

The peculiarities of post-processing of multi-look SAR-images and ultrasound image sequence with the aim of their enhancement are considered. It is shown that it is expedient to apply both the several image storing and their further filtering. For test and real data the comparison analysis of several methods of image storing and filtering is performed and the practical recommendations concerning their application are given.

Введение

Системы формирования изображений (СФИ), осуществляющие когерентную обработку принимаемых сигналов, обладают рядом преимуществ. В частности, радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) обеспечивают пространственное разрешение, которое при той же несущей частоте зондирующего сигнала практически недостижимо при использовании радиолокаторов с реальной апертурой [1]. Когерентные СФИ широко используются и в медицинских приложениях – примером могут служить ультразвуковые (УЗ) системы визуализации В-режима [2].

Вместе с тем изображениям, которые получают в когерентных СФИ, присущи и определенные недостатки. Одним из основных является присутствие спекла - мультипликативной помехи высокой интенсивности в общем случае с негауссовой плотностью распределения вероятности (ПРВ) [1,2]. Наличие спекла существенно затрудняет как визуальный анализ, так и автоматическую интерпретацию фор-

мируемых изображений и обуславливает целесообразность применения различных методов вторичной обработки (фильтрации) изображений в когерентных СФИ [1-3]. В то же время негауссовость ПРВ и мультипликативный характер помехи существенно ограничивает круг применимых методов фильтрации [4].

Кроме или совместно с фильтрацией для повышения качества изображений рассматриваемого класса применимы и другие методы, например использование режима формирования многовзглядовых изображений в радиолокационных СФИ [1,3] (если такой режим предусмотрен для данного РСА) или временной обработки (совместной обработки нескольких последовательно получаемых кадровых изображений) в УЗ диагностических системах [2,5] непрерывного действия.

Учитывая низкое качество исходных одновзглядовых РСА-изображений и однокадровых УЗ-изображений, представляется разумным комплексно использовать все возможные методы повышения их

качества. Однако при этом возникает ряд вопросов, связанных с выбором или разработкой наиболее эффективных методов, которые должны быть применены на этапах совместной обработки нескольких изображений и их фильтрации. При этом, несмотря на многие аналогии для радиолокационных и УЗ-изображений [4], есть и существенные различия.

Первое – для РСА-изображений зондируемую сцену обычно можно для разных взглядов считать неподвижной [3], в то время как для последовательности УЗ-изображений от кадра к кадру имеют место постепенные смещения границ объектов, особенно заметные при небольшой частоте сканирования, что при обычном усреднении нескольких последовательных УЗ-изображений может привести к существенному смазыванию границ и деталей [2,5]. При этом смещения границ разных или даже одного и того же объекта происходят в разных направлениях (с изменением размеров объектов), что затрудняет использование сравнительно простых методов, предусматривающих компенсацию движения [2].

Второе отличие заключается в том, что если к вторичной обработке многовзглядовых РСА-изображений требования к времени обработки обычно не являются особо жесткими [3,4], то при обработке последовательности УЗ-изображений быстроедействие алгоритмов часто критично, что дополнительно ограничивает круг известных применимых методов и вынуждает учитывать этот аспект при разработке новых, которые, соответственно, должны быть достаточно простыми и эффективными в вычислительном плане.

В связи с изложенным выше целью данной статьи является анализ применимости и эффективности известных и разработка новых методов совместной обработки и фильтрации многовзглядовых и последовательно получаемых изображений в радиолокационных и ультразвуковых медицинских когерентных СФИ.

1. Обработка многовзглядовых РСА-изображений

1.1. Модельные представления

Рассмотрим сначала несколько упрощенный (идеализированный) случай. Предположим, что одновременно выполняются следующие условия:

1) каждое k -е одновзглядовое изображение имеет вид

$$I_k(i, j) = I_k^t(i, j)\mu_k(i, j), \quad (1)$$

где i и j - индексы отсчетов, $I_k^t(i, j)$ - истинное изображение, $\mu_k(i, j)$ - мультипликативная помеха с математическим ожиданием (МО), равным единице, относительной дисперсией $\sigma_\mu^2 = 0,273$ и рэлеевской ПРВ; влиянием аддитивных помех можно пренебречь; импульсные помехи также отсутствуют;

2) мультипликативные помехи пространственно некоррелированы для каждого одновзглядового изображения и независимы для разных k ;

3) для всех k значения $I_k^t(i, j)$ для каждого ij - го отсчета одинаковы, т.е. зондируемая сцена неизменна и одновзглядовые изображения идеально совмещены между собой (ошибками совмещения можно пренебречь).

1.2. Возможные методы вторичной обработки

Существует большое число возможных методов вторичной обработки совокупности одновзглядовых изображений вида (1). Во-первых, их разнообразие обусловлено возможностью как сначала выполнять фильтрацию каждого одновзглядового изображения, а затем их совместную обработку, так и поступать наоборот. Во-вторых, при фильтрации и совместной обработке применимо достаточно большое количество различных методов. Поэтому ограничимся рассмотрением некоторого числа вариантов, анализ

которых по причинам, изложенным ниже, представляется целесообразным.

Самым простым методом совместной обработки $I_k(i, j), k = 1, K$ с получением в итоге изображения $I_\Sigma(i, j)$ является обычное усреднение [3]

$$I_\Sigma(i, j) = \left(\sum_{k=1}^K I_k(i, j) \right) / K. \quad (2)$$

Другие методы совместной обработки основываются на использовании порядковых статистик [3,6]; из них наиболее простым является вычисление медианы [3]

$$I_{med}(i, j) = med_k(I_k(i, j), k = 1, K). \quad (3)$$

В [3] такой метод предлагается применять в целях устранения импульсных помех, в [6] показано, что он может быть полезен и для уменьшения степени негативного влияния боковых лепестков аппаратной функции в многочастотных СФИ. Однако в случае, когда спекл имеет рэлеевскую ПРВ, медиана не совпадает со средним [2] и для обеспечения несмещенности среднего уровня (3) необходимо модифицировать ее к виду

$$I_{med}(i, j) = C med_k(I_k(i, j), k = 1, K), \quad (4)$$

где C - поправочный коэффициент, который, например, для $K=3$ примерно равен 1,03, а для $K=5$ - 1,04.

Отметим, что после выполнения операций (2), (3) или (4) относительная дисперсия остаточных мультипликативных помех заметно (в $(0,6 \dots 1,0)K$ раз) уменьшается и закон их распределения становится ближе к нормальному, что расширяет круг фильтров, которые могут быть применены на этапе фильтрации [4].

Однако, поскольку анализируются возможности реализации фильтрации как до, так и после операций (2), (3) или (4), то в качестве варианта рассмотрим применение фильтра Ли [7]. Выбор именно этого фильтра обусловлен целым рядом причин. Важнейшей является то, что фильтр Ли пригоден для вторичной обработки изображений с различными

ПРВ мультипликативных помех - как несимметричных относительно МО, так и гауссовых. Это позволяет применять его к исходным однозглядовым РСА-изображениям и для обработки $I_\Sigma(i, j)$ или $I_{med}(i, j)$ при условии подстановки соответствующего значения относительной дисперсии мультипликативных помех. Фильтр Ли обладает неплохим компромиссом свойств в плане эффективности подавления спекла на однородных участках, сохранения границ, малоразмерных объектов и текстурных признаков [3,4,8]. Кроме того, он часто используется и в рамках двух- и многоэтапных процедур фильтрации РСА-изображений [9,10].

Таким образом, имеется возможность сравнить между собой четыре следующие процедуры:

Процедура 1 - обработка с использованием фильтра Ли каждого однозглядового изображения и их последующее усреднение (2).

Процедура 2 - обработка с использованием фильтра Ли каждого однозглядового изображения и далее применение операции (3).

Процедура 3 - применение усреднения (2) для однозглядовых изображений и обработка $I_\Sigma(i, j)$ с использованием фильтра Ли.

Процедура 4 - применение операции (4) для однозглядовых изображений и обработка $I_{med}(i, j)$ с использованием фильтра Ли.

1.3. Сравнительный анализ эффективности рассматриваемых процедур

Исследование проводилось для тестового искусственного изображения размером 512x512 пикселей, показанного на рис. 1 и содержащего однородные и квазиоднородные участки, различные малоразмерные и протяженные объекты, а также участок с явно выраженной текстурой.

В качестве количественных критериев, характеризующих эффективность обработки при использовании рассматриваемых процедур, применялось пи-

ковое соотношение сигнал-шум (ПССШ), рассчитываемое для всего изображения

$$\text{ПССШ} = 10 \lg(255^2 / \sigma^2), \quad (5)$$

где σ^2 – среднеквадратическая ошибка (предполагается, что изображения представлены в виде массивов 8-битовых целых чисел), а также относительная дисперсия остаточных помех на однородных участках изображения после обработки $\sigma_{ост}^2$.

Размер скользящего окна фильтра Ли во всех экспериментах был равен 5x5 пикселей.

Результаты расчета ПССШ и $\sigma_{ост}^2$, полученные для $I'_k(i, j)$ в виде тестового изображения, показанного на рис. 1, при рэлеевской ПРВ помех (рис. 2) для трех однозглядовых изображений и использовании для их обработки **процедур 1 - 4** приведены в табл. 1. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. В соответствии с критерием ПССШ наиболее эффективна **Процедура 3**, превосходящая остальные процедуры на 0,4 ... 1,1 дБ в первую очередь благодаря гораздо лучшему сохранению границ и деталей (хотя для **Процедуры 1** имеет место даже несколько меньшее значение $\sigma_{ост}^2$); это хорошо заметно при сравнении обработанных изображений, показанных на рис. 3 (при использовании **Процедуры 1**) и на рис. 4 (при использовании **Процедуры 3**).

2. **Процедуры 1 и 3**, предполагающие использование усреднения (2), при обработке изображений неподвижных сцен более эффективны, чем **процедуры 2 и 4**, основанные на расчете медианы (3) или (4), как в плане обеспечения более высокого ПССШ, так и меньшего уровня остаточных флуктуаций на однородных участках.

Если вместо фильтра Ли при вторичной обработке использовать какие-либо другие фильтры, например, локально-адаптивные [8,11], то и в этом случае применение усреднения (2) до фильтрации является наиболее эффективной процедурой. Это обусловлено тем, что эффективность локально-

адаптивной фильтрации существенно зависит от надежности классификации окрестностей пикселей на локально-пассивные (однородные участки) и локально-активные (соответствующие границам, малоразмерным объектам и текстуре). Надежность такой классификации тем выше, чем больше «контраст» локально-активных участков по отношению к помехам. Благодаря предварительному усреднению такой «контраст» повышается, и для усредненных изображений локально-активные участки выявляются с большей надежностью, чем на исходных однозглядовых, которые характеризуются большими значениями параметра σ_{μ}^2 [11].

Таблица 1.
Показатели эффективности различных процедур вторичной обработки нескольких однозглядовых изображений

Тип процедуры	ПССШ, дБ	$\sigma_{ост}^2$
Процедура 1	29,61	0,0168
Процедура 2	29,01	0,0211
Процедура 3	30,03	0,0194
Процедура 4	28,88	0,0286

2. Результаты обработки взаимно смещенных изображений

Проведем сравнительный анализ эффективности рассматриваемых процедур вторичной обработки в предположении, что не все значения $I'_k(i, j)$ одинаковы для разных однозглядовых изображений, т.е. что зондируемая сцена для разных взглядов (или кадров) не остается неизменной. При этом возможно очень большое количество вариантов изменений – взаимных смещений изображений $I'_k(i, j)$ (для разных k), трансформаций границ объектов и т.д. В связи с этим ограничимся рассмотрением одного достаточно простого и легко моделируемого варианта – смещения истинного изображения «по диагонали» на один или два пиксела от одного изображения (кадра) к другому.

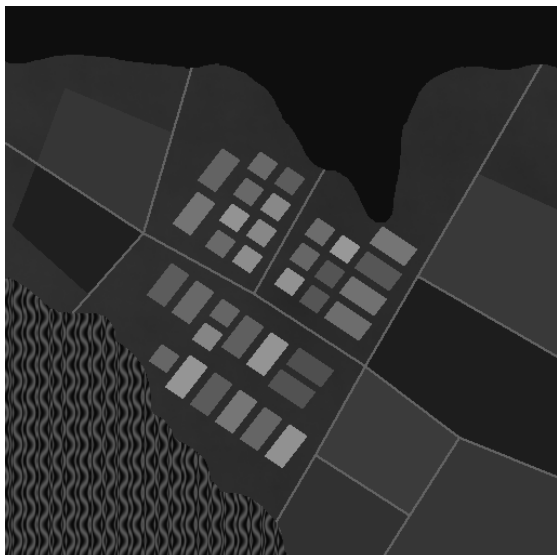


Рис. 1. Истинное тестовое изображение

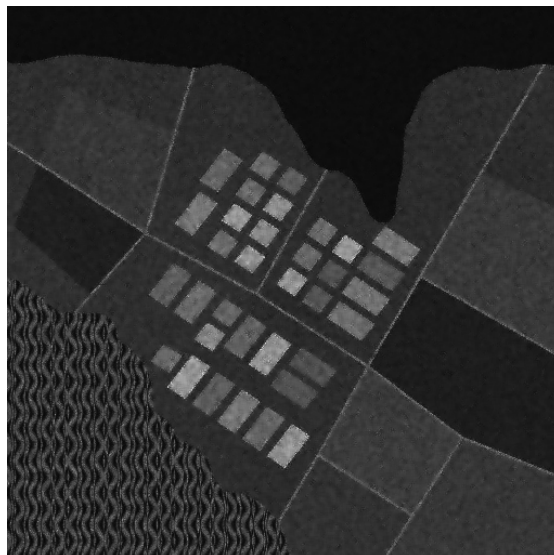


Рис. 4. Результат применения Процедуры 3

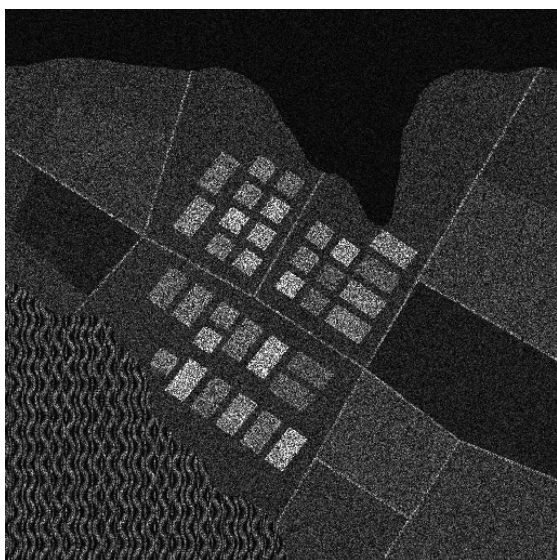


Рис. 2. Зашумленное однозглядовое изображение

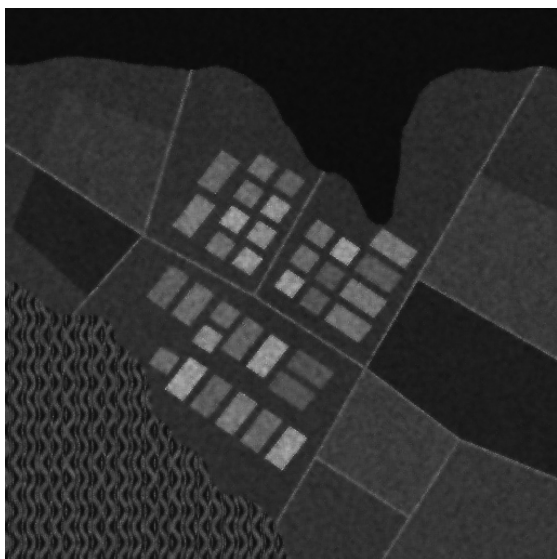


Рис. 3. Результат применения Процедуры 1

При этом благодаря наличию в тестовом изображении границ и протяженных объектов с различной пространственной ориентацией эффекты различий значений пикселей проявляются в разной степени и в плане локальной эффективности вторичной обработки, и визуально.

Моделирование проводилось для $K=3$, а ПССШ рассчитывалось относительно истинного изображения с $k=2$. При обработке последовательности УЗ изображений это соответствует методике, в соответствии с которой для формирования выходного изображения для некоторого l -го кадра учитываются (обрабатываются) изображения l -го, $(l-1)$ -го и $(l+1)$ -го кадров [2]. Рассматривались случаи взаимного сдвига изображений на один или на два элемента. Результаты численного моделирования представлены в табл. 2.

Прежде всего, при наличии взаимного смещения обращает на себя внимание резкое ухудшение ПССШ по сравнению со случаем неподвижной сцены (см. табл. 1) при использовании любой из рассматриваемых процедур вторичной обработки. При смещении на один элемент снижение значений ПССШ имеет порядок 2 ... 2,7 дБ, а при смещении на два пикселя – уже на 2,5 ... 3,4 дБ, т.е. ПССШ имеют такой же уровень значений, как и при обра-

ботке фильтром Ли только одного, l -го, изображения (27,3 дБ, $\sigma_{\text{от}}^2=0,048$). При этом для исходных однозглядовых изображений ПССШ равен 19,0 дБ.

Таблица 2.

Показатели эффективности различных процедур вторичной обработки трех взаимно сдвинутых однозглядовых изображений

Тип процедуры	ПССШ, дБ (один элем.)	ПССШ, дБ (два элем.)
Процедура 1	27,40	26,70
Процедура 2	27,41	27,00
Процедура 3	27,30	26,59
Процедура 4	26,78	26,17

Интересно также, что при наличии взаимного сдвига **Процедура 3** перестает быть наиболее эффективной, причем с увеличением сдвига различие между ПССШ для наилучшей по этому критерию **Процедуры 2** и **Процедуры 3** возрастает. Визуальный анализ полученных выходных изображений показывает, что основная причина (как и можно было ожидать) заключается в том, что при использовании медианной операции (3) имеет место гораздо меньшее размытие границ и малоразмерных объектов, чем при использовании обычного усреднения (2) взаимно сдвинутых изображений. При этом важно отметить, что для совпадающих однородных участков однозглядовых (однокадровых) изображений, где не сказываются эффекты размытия границ, наилучшее подавление помех обеспечивает **Процедура 1**. **Процедура 4**, как следует из анализа данных, приведенных в табл. 1 и 2, во всех случаях является наихудшей.

Результаты анализа свидетельствуют о целесообразности комбинирования **Процедур 1, 2 и 3** в целях использования преимуществ каждой из них. Одним из простейших вариантов является следующий. На первом этапе проводится обработка каждого однозглядового изображения фильтром Ли. На втором этапе выполняется (для каждого обработанного изображения отдельно) детектирование локально-активных участков путем расчета относительной локальной дисперсии [4] и ее сравнения с порогом. В результате получают K бинарных кон-

турных препаратов $M_k(i,j)$, для которых $M_k(i,j)$ принимает ненулевые (равные единице) значения, если соответствующие значения относительной локальной дисперсии превосходят порог. Далее осуществляют формирование обобщенного препарата $M_{\Sigma}(i,j)=M_1(i,j)\vee M_2(i,j)\vee M_3(i,j)$. На последнем этапе возможны два пути учета полученного бинарного препарата $M_{\Sigma}(i,j)$:

Процедура 5: для ij -го пикселя выходное изображение формируют в соответствии с **Процедурой 1**, если $M_{\Sigma}(i,j)=0$ или в соответствии с **Процедурой 2**, если $M_{\Sigma}(i,j)=1$;

Процедура 6: для ij -го пикселя выходное изображение формируют в соответствии с **Процедурой 1**, если $M_{\Sigma}(i,j)=0$, или присваивают значение изображения на выходе фильтра Ли для l -го кадра, если $M_{\Sigma}(i,j)=1$.

Предложенные процедуры очень просты и обладают высоким быстродействием, поскольку просты все используемые операции (фильтрация и вычисление относительной локальной дисперсии реализуются в скользящем окне с применением рекуррентных алгоритмов) и возможно использование конвейерной обработки данных. При использовании современных компьютеров или процессорных блоков для изображений, содержащих сотни тысяч пикселей, для фильтрации и выделения локально-активных областей необходимо время порядка сотых долей секунды, т.е. обработка реализуема в реальном времени.

Применение **Процедуры 5** для неподвижных сцен обеспечивает ПССШ, равное 29,24 дБ, при сдвиге изображений на один отсчет ПССШ=27,5 дБ, на два отсчета – 27,01 дБ. Если же используется **Процедура 6**, то для неподвижных сцен ПССШ=28,3 дБ, при сдвиге на один отсчет - 28,0 дБ, на два отсчета – 27,8 дБ. Таким образом, **Процедура 5** немного проигрывает наилучшим **Процедурам 1 - 4** при неподвижных сценах, но несколько превосходит наилучшие из них при наличии сдвигов. **Проце-**

дура 6 при неподвижных сценах уступает по эффективности всем процедурам, но обеспечивает явный выигрыш при изменении границ объектов во времени.

Эффективность применения предложенной **Процедуры 6** к реальным УЗ-изображениям демонстрируется рис. 5-8. На рис. 5-7 показаны три последовательных кадра, при визуальном анализе которых очевидны как высокий уровень помех на однокадровых УЗ-изображениях, так и эффекты смещения во времени границ объектов. Результирующее (выходное) изображение, соответствующее однокадровому изображению на рис. 6, показано на рис. 8. Хорошо видно, что спекл на однородных участках существенно подавлен, а границы объектов – достаточно четкие, что может способствовать более надежной интерпретации изображения.



Рис. 5. Первый кадр УЗ-изображения

Отметим, что анализ, проведенный для однородных участков реальных последовательных УЗ изображений, подтвердил правильность предположения о некоррелированности спекл-флуктуаций. Однако статистические характеристики помех на реальных изображениях несколько отличаются от модельных.



Рис. 6. Второй кадр УЗ-изображения



Рис. 7. Третий кадр УЗ-изображения



Рис. 8. Выходное УЗ-изображение второго кадра

3. Заключение

Показано, что в зависимости от того, изменяемой или неизменяемой (и в какой степени) является зондируемая сцена, наибольшей эффективностью совместной вторичной обработки нескольких изображений могут обладать различные методы (процедуры). Предложен простой и практически реализуемый метод учета возможного смещения границ объектов. На наш взгляд, потенциал подхода не исчерпан и возможно дополнительное повышение его эффективности, в частности, за счет более детального совместного анализа поведения показателей локальной активности с оцениванием характеристик локальных сдвигов, использования других методов фильтрации изображений и т.д.

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта № 1659 УНТЦ.

Литература

1. Curlander J.C., McDonough R.N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. – New York: John Wiley&Sons, 1991. - 647 p.
2. Evans A.N., Nixon M.S. Biased Motion-Adaptive Temporal Filtering for Speckle Reduction in Echocardiography, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, - 1996, - Vol. 15, - No 1, - p. 39-50.
3. Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. - №1. - С. 70-81.
4. Зеленский А.А., Кулемин Г.П., Лукин В.В., Мельник В.П. Локально-адаптивные устойчивые алгоритмы обработки радиоизображений. – X., 1993. - 39 с. -(Препр./ НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники; 93-143).
5. Chirungrueng C., Suvichakorn A. Fast image preserving noise reduction for ultrasound images // *IEEE Trans. on Nuclear Science*. - Vol. 48. - № 3. Огту 2001. - P. 849-854.
6. Kurekin A. A., Lukin V. V., Lukina I. S., Zelensky A.A. Image Enhancement Using Signal Spectral Abundance // *Proc. of Europ. Symp. SPIE on Satellite Remote Sensing II*. - Paris (France), 1995. – SPIE Vol. 2585. - P. 162-170.
7. Lee J.-S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images // *Comp. Vision, Graphics, Image Processing*. - 1981. - V. 17. - P. 24-32.
8. Lukin V.V., Tsymbal O.V. MM-band Radar Image Filtering with Texture Information Preservation // *Proceedings of the Fourth International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves”*. - Kharkov (Ukraine), 2001. - Vol.1. - P. 435-437.
9. Lukin V., Chemerovsky V., Melnik V., Peltonen S., Kuosmanen P. Iterative Procedures for Nonlinear Filtering of Images // *Proceedings of the IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. -Antalya (Turkey). - 1999. - Vol. 1. - pp. 432-436.
10. Melnik V. P., Lukin V. V., Egiazarian K., Astola J. A Method of Speckle Removal in One-Look SAR Images Based on Lee Filtering and Wavelet Denoising // *Proceedings of NORSIG2000*. - Kolmarden (Sweden), 2000. - P. 243-246.
11. Melnik V.P., Lukin V.V., Zelensky A.A., Astola J.T., Kuosmanen P. Local Activity Indicators: Analysis and Application to Hard-Switching Adaptive Filtering of Images // *Optical Engineering Journal*. - 2001. - No 8. – P. 1441-1455.

Поступила в редакцию 28.03.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Зеленский А.А., Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", г.Харьков; д-р техн. наук, профессор Кулемин Г.П., главный научный сотрудник ИРЭ НАН Украины, г. Харьков.