

УДК 621.396.11

# Применение методов векторной медианной фильтрации при обработке многоканальных радиолокационных дистанционного зондирования данных

**А. А. Курекин, В. В. Лукин, А. А. Зеленский**

Харківський авіаційний інститут ім. М. С. Жуковського

*Надійшла до редакції 17.09.96*

В роботі розглядається можливість використання методів векторної медіанної фільтрації при спільній обробці радіолокаційних зображень. Показано, що ефективним є підхід, оснований на двохетапних алгоритмах фільтрації, що дає змогу врахувати відмінність статистичних характеристик багатоканальних радіозображені та ефективно використовувати при фільтрації кореляційні властивості векторного сигналу. Розроблено векторний фільтр, що підвищує детальність зображень і усуває ефект несправжніх границь об'єктів, викликаний неточністю суміщення радіозображені. На тестових і реальних багатоканальних радіолокаційних зображеннях проведено аналіз ефективності запропонованих методів фільтрації.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при дистанционном зондировании Земли радиофизическими методами широко применяются комплексные многочастотные и многополяризационные радиолокационные системы, установленные на космических и авиационных носителях. Результаты эксплуатации космических радиолокационных систем ERS, JERS-1, SIR-C/X-SAR (Freeman, 1996), многочастотного самолетного радиолокационного комплекса МАРС (Калмыков, 1994) подтверждают высокую информативность данных, полученных через определенные промежутки времени на нескольких частотах при разных поляризациях и углах облучения поверхности. Многоканальные радиолокационные данные эффективно используются для мониторинга сельскохозяйственных и лесных угодий, определения влажности почв, снежного покрова, для решения ряда задач океанографии и геологии (Keydel,

1996). Применение многоканальных радиофизических измерений не только существенно повышает надежность анализа и интерпретации данных, но и позволяет использовать принципиально новые методы обработки радиолокационной информации. Так, по радиолокационным изображениям (РЛИ) одного и того же участка подстилающей поверхности, полученным через определенные промежутки времени может быть изучена динамика созревания урожая, образования и дрейфа морских льдов и т. д. Многополяризационные измерения в мм-диапазоне радиоволн используются в радиофизических методах определения влажности почвы и эродированности сельскохозяйственных угодий (Кулемин, 1995).

Использование многоканальных радиолокационных систем дистанционного зондирования (ДЗ) предъявляет определенные требования к алгоритмам обработки информации и требует разработки новых методов совместной фильтрации радиоизоб-

ражений. Целью данной работы является исследование возможности применения для многоканальных РЛИ методов векторной медианной фильтрации и ее модификаций, используемых при обработке цветных оптических изображений и в системах одновременной оценки нескольких параметров (Astola, 1990; Nikolaidis, 1995).

### СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Особенность большинства методов интерпретации многоканальных данных заключается в анализе соотношений и собственно значений интенсивностей объектов на РЛИ, полученных на различных частотах, при разных поляризациях и углах зондирования. Часто результаты радиолокационных измерений анализируются совместно с измерениями, выполненными в оптическом и ИК-диапазоне, а также радиометрическими данными. В результате использования дополнительной информации повышается достоверность дистанционных измерений и появляется возможность устранения неоднозначности интерпретации различных объектов, имеющих подобные отражательные свойства для одного из каналов.

Применение методов совместной обработки многоканальных радиоизображений требует осуществления предварительной обработки данных ДЗ. Прежде всего, изображения исследуемого участка поверхности должны быть геометрически совмещены друг с другом, т. е. представлены в едином масштабе и взаимно ориентированы. В многочастотных системах необходимость геометрической коррекции изображений связана с использованием в подсистемах формирования РЛИ раздельных антенн. Наличие погрешностей их ориентации приводит к смещению, изменению масштаба и повороту изображений друг относительно друга. Взаимные геометрические искажения наблюдаются также в РЛИ, полученных в разное время, и вызваны несовпадением траекторий движения носителя. Для геометрического совмещения изображений и их привязки к топографической карте часто используется метод «реперных точек» (Kulemin, 1994). Совмещение осуществляется по заранее заданной модели геометрических искажений РЛИ. Параметры необходимых преобразований определяются значениями координат «реперных точек», выбираемых совпадающими с контрастными, легко идентифицируемыми визуально объектами (мосты, пересечения дорог, изгибы рек и т. д.). Достоинствами такого подхода являются приемлемая для многих

приложений точность геометрического совмещения при низких вычислительных затратах, а также возможность оценки качества привязки по результатам совмещения «реперных точек». В большинстве случаев ошибка совмещения составляет 1–2 отсчета изображения (Kulemin, 1994), что примерно соответствует одному элементу разрешения, и вызвано такими факторами, как флуктуации траектории и скорости движения носителя, неточности определения координат «реперных точек» и т. д. Такие ошибки можно считать приемлемыми при раздельной обработке изображений, когда операция совмещения осуществляется с целью приведения координатной системы РЛИ к координатной системе топокарты. Однако при совместной обработке изображений ошибки взаимной привязки в 1–2 отсчета приводят не только к погрешностям определения координат объектов, но и могут стать причиной ошибочной интерпретации многоканальных данных на краях или границах объектов.

Так, при определении влажности и эродированности почв рассчитывается отношение ЭПР поверхности на горизонтальной и вертикальной поляризациях (Кулемин, 1995)

$$R = \sigma_{\text{ГГ}} / \sigma_{\text{ВВ}}. \quad (1)$$

Две буквы при  $\sigma$  обозначают поляризации излученного и принятого сигналов соответственно.

Ошибки совмещения РЛИ ГГ-поляризации с РЛИ ВВ-поляризации приводят к тому, что при расчете  $R$  на границах объектов наблюдаются ложные величины соотношения (1). Аналогичный эффект имеет место при обработке цветных оптических изображений (Tang, 1994). Предположим, что изображение представлено в цветовых координатах красного, синего и зеленого (система координат *RGB*). Если произвести смещение одного из компонентов изображения относительно других, на границах объектов появляются ложные цветовые значения, которых нет на исходном изображении. Такой эффект может наблюдаться, например, в результате передачи цветовых компонентов изображения по информационному каналу с различными временными задержками или при черезстрочном сканировании изображения. Эффект ложных границ также возникает при покомпонентной медианной фильтрации цветных изображений, поскольку при наличии шума медианному фильтру свойственно смещать границы перепадов относительно истинного значения и разрушать таким образом структуру изображения.

Кроме того, методы раздельной фильтрации не учитывают корреляционных свойств компонентов сигнала, что вызывает искажение совместного изо-

бражения. Так, например, при использовании покомпонентного медианного фильтра, не имеющего стабильных точек (по терминологии, используемой в книге Хуанг (1984), поскольку значение векторного сигнала на выходе фильтра не всегда совпадает с одним из входных векторов, наблюдается нарушение структуры изображения (Astola, 1990).

Для устранения подобного эффекта в некоторых работах предлагается декоррелировать изображения, используя преобразование Карунена—Лоэва, что позволяет использовать методы покомпонентной фильтрации (Hunt, 1984). Однако большее распространение получили методы векторной медианной фильтрации, которые являются результатом развития методов обработки на основе порядковых статистик применительно к многоканальным сигналам (Tang, 1993а).

Рассмотрим свойства методов векторной медианной фильтрации и особенности представления многоканальных радиолокационных данных, позволяющие найти ряд интересных аналогий и новых применений.

Известно, что при представлении многоканальных РЛИ в виде отдельных изображений возникают трудности их визуального анализа. Однако если провести аналогию между компонентами многоканального РЛИ (например, изображений, отличающихся по частоте или поляризации) и тремя *RGB*-составляющими цветного изображения, становится очевидным, что трехканальное РЛИ может быть представлено как цветное изображение (Richards, 1986). Для этого необходимо провести геометрическое совмещение РЛИ и отождествить каждое изображение с соответствующим цветовым компонентом. Такая форма представления 3-канальных РЛИ является более компактной при визуализации и удобной при интерпретации. Аналогичным образом методы векторной фильтрации цветных оптических изображений и многоканальных сигналов могут быть использованы при обработке многоканальных РЛИ.

Отметим, что к настоящему времени предложено множество ранговых алгоритмов векторной фильтрации: модифицированные медианные фильтры (Tang, 1991); фильтр усеченного среднего (Estola, 1994); адаптивные ранговые фильтры (Alshatti, 1994); алгоритм векторных оценок на основе градиентного поиска (Tang, 1993б) и т. д. Некоторые из них обладают важными для обработки РЛИ свойствами. Например, предложенный Tang (1994) многоэтапный векторный фильтр позволяет устраниить на изображении эффект «ложных границ», вызываемый в многоканальных РЛИ ошибками совмещения, а также подчеркнуть резкие перепады.

Однако многие алгоритмы векторной фильтрации, являясь эффективными для обработки оптических изображений, не могут непосредственно использоватьсь для решения рассматриваемой в данной работе задачи. Основной трудностью применения векторной медианной фильтрации для обработки РЛИ является существенное различие статистических характеристик помеховой составляющей сигналов и слабая взаимная корреляция изображений (Зеленский, 1994), в то время как составляющие цветного оптического изображения характеризуются высокой взаимной корреляцией и аналогичными статистическими свойствами шумов. Таким образом, при выборе векторного фильтра необходимо учитывать возможность его адаптации к особенностям помех РЛИ.

Наиболее подходящими для фильтрации многоканальных РЛИ с нашей точки зрения являются предложенный Astola (1990) векторный медианный гибридный фильтр, а также его модификация — многоэтапный фильтр, предложенный в работе (Tang, 1994). Особенность этих фильтров заключается в разбиении окна фильтрации на субокна, что дает возможность выполнить раздельную предварительную фильтрацию компонентов многоканального изображения. Кроме того, такие фильтры по сравнению с векторными медианными фильтрами требуют значительно меньших вычислительных затрат. Однако эти фильтры ориентированы на обработку оптических изображений и не могут использоваться для многоканальных РЛИ без учета их характеристик и требований к алгоритмам фильтрации.

#### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ РЛИ И ТРЕБОВАНИЯ К АЛГОРИТМУ СОВМЕСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Поскольку выбор эффективного алгоритма фильтрации определяется характеристиками обрабатываемых сигналов, следует рассмотреть некоторые особенности многоканальных РЛИ. Вопросам изучения характеристик радиоизображений, формируемых радиолокатором бокового обзора (РБО) и радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) посвящено множество работ (Ахметьянов, 1987; Белокуров, 1990; Lukin, 1993). Тем не менее, отметим здесь некоторые важные особенности, которые должны учитываться в алгоритмах фильтрации РЛИ.

1. Одновременное наличие нескольких типов помех: мультиплексивных, аддитивных, импульсных. Доминирующее влияние оказывают мульти-

пликативные помехи (спекл-шум).

2. Проявление мультиплакативных помех определяется структурой системы формирования изображений (СФИ) — числа накапливаемых отсчетов, вида системы: РБО, РСА. Для СФИ РБО закон распределения мультиплакативных помех близок к нормальному. В системах РСА закон распределения помех для однородного участка зависит от числа взглядов и методики представления данных. Если изображение сформировано одновзглядовым РСА, закон распределения помех экспоненциальный или релеевский при представлении данных в виде модульного значения. Для многовзглядовых РСА мультиплакативные помехи характеризуются  $\gamma$ -распределением (Ахметьянов, 1987).

3. На однородных участках соседние отсчеты, как правило, являются коррелированными. Интервал корреляции занимает 2—4 отсчета изображения, что должно учитываться при выборе размеров окна фильтра.

4. Отсутствие полной и достоверной априорной информации о характеристиках объектов подстилающей поверхности, их форме и размерах, а также широкий диапазон контрастов на изображении.

5. Наличие малоразмерных и протяженных объектов, резких перепадов.

6. Низкий уровень взаимной корреляции между исходными РЛИ в многочастотных системах ДЗ, использующих мм-, см- и дм-диапазоны радиоволн. Наиболее коррелированными являются изображения мм- и см-диапазонов — коэффициент корреляции  $R \approx 0.6$ . Наименьшая степень корреляции наблюдается между мм- и дм-изображениями, для которых  $R \approx 0.2$ . Фильтрация РЛИ приводит к увеличению коэффициента корреляции на 20—70 % (Зеленский и Лукин, 1994).

Требования к алгоритму фильтрации также определяются целями обработки изображений. Для большинства задач это

- высокая эффективность подавления спекл шума на однородных участках изображения;
- устранение импульсных помех;
- сохранение малоразмерных объектов и минимальное искажение границ;
- низкие вычислительные затраты.

Во многом для существующих методов фильтрации одноканальных РЛИ рассмотренные требования являются противоречивыми. Например, широко используемый медианный фильтр устраняет импульсные помехи, но не сохраняет малоразмерных и протяженных объектов. Линейный фильтр успешно подавляет мультиплакативные помехи, но сглаживает границы. Эффективными с нашей точки зрения являются аддитивные нелинейные мето-

ды фильтрации (фильтры Ли, Фроста, сигма-фильтр), обеспечивающие компромисс между подавлением шума и сохранением границ. Для фильтрации импульсных помех при одновременном подавлении спекл-шума целесообразно использовать аддитивные алгоритмы на основе порядковых статистик (Lukin, 1995). Однако при фильтрации многоканальных изображений перспективным, на наш взгляд, является многоэтапный подход, основанный на комбинации методов раздельной аддитивной фильтрации каждого изображения и их последующей векторной фильтрации.

## МНОГОЭТАПНАЯ ВЕКТОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Развитие методов векторной медианной фильтрации основывается на представлении многоканальных данных в виде векторов и оценке центров их распределения. Одной из таких оценок является вектор среднего значения. Однако при фильтрации оценка среднего приводит к размытию границ объектов и не обладает устойчивостью к выбросам. Более эффективным подходом является использование оценок, основанных на обобщении понятий порядковых статистик и упорядочивания данных, используемых в одноканальных фильтрах на основе порядковых статистик. Поскольку векторные отсчеты не могут быть упорядочены как в одноканальном варианте (когда медиана является центральным отсчетом упорядоченной выборки), предложен иной подход.

Известно, что в скалярном варианте медиана имеет минимальную сумму расстояний к другим отсчетам выборки и может быть вычислена без операции упорядочивания выборки (Tang, 1993a). Такое определение медианы применимо также и к векторным отсчетам. Кроме того, требуется, чтобы векторная медиана обладала следующими свойствами: имела устойчивые точки; совпадала с обычной медианой, когда размерность векторного сигнала  $p = 1$ ; чтобы отсутствовали на выходе медианного фильтра отсчеты, отсутствующие на его входе. Следовательно, требуется, чтобы векторная медиана совпадала с одним из отсчетов в окне фильтра и имела минимальную сумму расстояний к остальным отсчетам.

Обозначим отсчеты  $p$ -канального изображения вектором

$$\mathbf{x}(\mathbf{n}) = (x_1(n_1, n_2), x_2(n_1, n_2), \dots, x_p(n_1, n_2)),$$

где  $n_1$  — номер строки, а  $n_2$  — номер столбца многоканального изображения. Используя векторное представление, введем операцию медианы (As-

tola, 1990). Обозначим  $\mathbf{x}_{\text{vm}}$  векторную медиану  $N$  многоканальных отсчетов векторов  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N \in W$ . Тогда

$$\mathbf{x}_{\text{vm}} = \min_{\mathbf{x}_{\text{vm}} \in W} \sum_i \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|, \quad (2)$$

где  $\|\cdot\|$  обозначает норму  $L$ ,  $W$  — окно фильтра,  $N$  — количество отсчетов в окне (выбирается нечетным).

По определению векторной медианы значение  $\mathbf{x}_{\text{vm}}$  выбирается из входных отсчетов, попавших в окно фильтра. Этим объясняется наличие у векторной медианы стабильных точек (Tang, 1993а). Норма расстояния между отсчетами  $L$  определяется в соответствии с законом распределения помех таким образом, чтобы оценка сигнала  $\mathbf{x}_{\text{vm}}$  соответствовала максимуму апостериорной плотности вероятности. Так, для гауссовского распределения  $L$  соответствует возведенному в квадрат евклидову расстоянию, а для симметричного экспоненциального распределения — линейному расстоянию.

Поскольку выходным значением медианного фильтра является один из входных отсчетов, векторная медиана имеет ограниченные возможности в подавлении помех. Для повышения эффективности подавления помех аналогично КИХ (конечная импульсная характеристика) медианным гибридным фильтрам, в (Astola, 1990) предложен векторный медианный гибридный фильтр (ВМГФ), объединяющий векторную медиану с КИХ субфильтрами. На рис. 1 изображен трехточечный ВМГФ, выходным значением которого является векторная медиана выходных сигналов субфильтров. Поскольку количество субфильтров значительно меньше числа отсчетов в окне  $W$ , ВМГФ по сравнению с медианным фильтром требует значительно меньших вычислительных затрат. Использование в ВМГФ субфильтров позволяет осуществить его модификацию применительно к многоканальным РЛИ, для которых помехи компонентов сигнала отличаются своими характеристиками. Целесообраз-

но заменить КИХ субфильтры более эффективными для РЛИ адаптивными фильтрами на основе порядковых статистик (сигма-фильтр, фильтр Ли, Фроста).

Комбинирование векторной медианы с субструктурами позволяет также повысить детальность фильтруемого изображения за счет сокращения длины перепадов сигнала и границ объектов (Tang, 1993а). В алгоритме фильтрации предлагается использовать свойство векторной медианы, согласно которому на перепаде сигнала медиана является центральным отсчетом в окне фильтра. В том случае, если текущий отсчет является векторной медианой, выполняется операция повышения детальности, в противном случае текущий отсчет не изменяется. Для подавления помех, как и в модификации ВМГФ, используются адаптивные субфильтры и векторная медиана вычисляется по отфильтрованным отсчетам. Возможные варианты расположения окон субфильтров показаны на рис. 2.

При расположении субфильтров в соответствии с рис. 2, *a*, векторная фильтрация позволяет подчеркнуть вертикальные перепады, а в случае рис. 2, *b* — горизонтальные перепады изображения. Расположение рис. 2, *c* объединяет предыдущие варианты.

Процедура фильтрации состоит из следующих этапов:

- предварительная фильтрация;
- определение направления, в котором сигнал изменяется наиболее интенсивно;
- подчеркивание перепада, если центральный отсчет в окне фильтра является векторной медианой.

Рассмотрим процедуру формирования многоэтапного фильтра (ММФ), позволяющего учитывать особенности многоканальных РЛИ.

Обозначим  $W[m, n]$  отсчеты многоканального изображения, попавшие в окно субфильтра с центром в точке  $(m, n)$ . Будем использовать расположе-

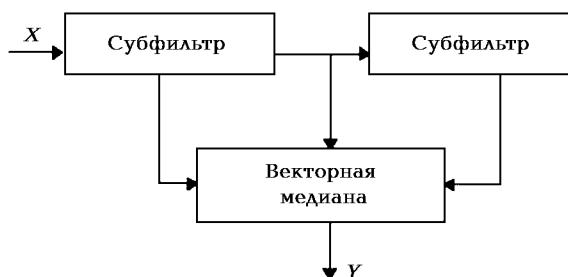


Рис. 1. Структурная схема медианного гибридного фильтра

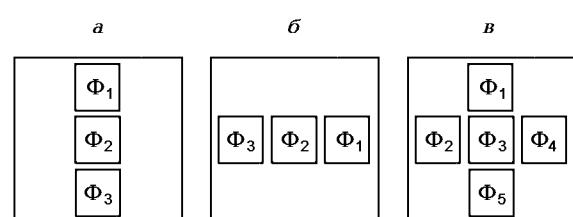


Рис. 2. Возможные варианты расположения субфильтров

ние субфильтров, показанное на рис. 2, б, поскольку в данном случае фильтрация позволяет подчеркнуть перепады сигнала как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Обозначим

$$\begin{aligned} y_1 &= \Phi_1(x_i), & x_i \in W[m, n - K], \\ y_2 &= \Phi_2(x_i), & x_i \in W[m - K, n], \\ y_3 &= \Phi_3(x_i), & x_i \in W[m, n], \\ y_4 &= \Phi_4(x_i), & x_i \in W[m + K, n], \\ y_5 &= \Phi_5(x_i), & x_i \in W[m, n + K], \end{aligned}$$

где  $\Phi_j(x_i)$ ,  $j = 1, 2, \dots$  — субфильтры, а  $K$  — расстояние между центральным отсчетом и центрами субфильтров. Субфильтры  $\Phi_j(x_i)$  осуществляют предварительную обработку каждой составляющей многоканального РЛИ в отдельности и выбираются таким образом, чтобы обеспечить эффективную фильтрацию помех при сохранении мелких деталей изображения. Затем, для повышения надежности обнаружения перепадов производится дополнительная фильтрация линейным фильтром с окном размерами  $3 \times 3$  элемента:

$$\begin{aligned} z_1 &= L\Phi_1(y_i), & y_i \in LW[m, n - K], \\ z_2 &= L\Phi_2(y_i), & y_i \in LW[m - K, n], \\ z_3 &= L\Phi_3(y_i), & y_i \in LW[m, n], \\ z_4 &= L\Phi_4(y_i), & y_i \in LW[m + K, n], \\ z_5 &= L\Phi_5(y_i), & y_i \in LW[m, n + K], \end{aligned}$$

где  $L\Phi_j(y_i)$ ,  $j = 1, 2, \dots$ , — линейные фильтры с окном  $LW$ . Обозначим

$$\begin{cases} z_1^* = z_1, & y_1^* = y_1 \text{ при } \|z_2 - z_4\| < \|z_1 - z_5\|, \\ z_1^* = z_2, & y_1^* = y_2 \text{ при } \|z_2 - z_4\| \geq \|z_1 - z_5\|, \\ z_2^* = z_5, & y_2^* = y_5 \text{ при } \|z_2 - z_4\| < \|z_1 - z_5\|, \\ z_2^* = z_4, & y_2^* = y_4 \text{ при } \|z_2 - z_4\| \geq \|z_1 - z_5\|, \\ z_3^* = z_3, & y_3^* = y_3, \end{cases}$$

Для краткости введем параметры  $d_{i-j}$ :

$$\begin{cases} d_{1-2} = \|z_1^* - z_2^*\|, \\ d_{1-3} = \|z_1^* - z_3^*\|, \\ d_{2-3} = \|z_2^* - z_3^*\|. \end{cases}$$

Значение отсчета на выходе ММФ  $y_{MMF}$  определяется по следующему алгоритму:

$$y = \begin{cases} y_1^*, & \text{при } z_3^* = VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*), \\ & d_{1-3} < d_{2-3}, d_{1-2} > t; \\ y_2^*, & \text{при } z_3^* = VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*), \\ & d_{1-3} \geq d_{2-3}, d_{1-2} > t; \\ y_3^*, & \text{при } z_3^* \neq VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*); \\ & \text{или при } d_{1-2} \leq t, \end{cases}$$

где  $VM(\cdot)$  обозначает операцию векторной медианы (2);  $t$  — константа, определяющая чувствительность фильтра к перепадам. Значение  $t$  определяется минимальную интенсивность перепада сигнала, при которой будет осуществляться его подчеркивание. Норма  $\|\cdot\|$  выбирается на основе закона распределения помех на выходе предварительных фильтров. В силу центральной предельной теоремы можно считать, что после предварительной фильтрации помехи имеют гауссовское распределение. Это подтверждает и анализ гистограмм для реальных данных. Тогда по критерию максимума апостериорной плотности вероятности оптимальным для векторной медианы является квадрат расстояния Махalanобиса (Nikolaidis, 1995):

$$\|z_1 - z_2\|_M^2 = (z_1 - z_2)^T \Sigma^{-1} (z_1 - z_2),$$

где  $\Sigma$  — ковариационная матрица отсчетов многоканального изображения.

Поскольку помехи отдельных РЛИ можно считать взаимно некоррелированными, то ненулевыми в ковариационной матрице будут только диагональные элементы, равные дисперсии помех на выходе линейных субфильтров  $L\Phi_j(y_i)$ . Учитывая мультиплективный характер помех РЛИ, значение дисперсии помех на выходе фильтра  $i$ -й составляющей изображения может быть получено из выражения

$$\sigma_{fi}^2 = K_{fi} \sigma_{0i}^2 z_i^2.$$

Здесь  $\sigma_{0i}^2$  — относительная дисперсия помех, определяемая по однородному участку изображения, а  $z_i$  — интенсивность сигнала в  $i$ -м канале. Коэффициент  $K_{fi}$  позволяет учесть степень подавления помех при фильтрации.

Значения коэффициентов подавления помех субфильтрами в каждом канале могут быть различными в зависимости от используемого алгоритма фильтрации и определяются в результате расчетов или численного моделирования. При этом следует учитывать особенности используемого фильтра: адаптивные свойства при фильтрации резких перепадов и малоразмерных объектов, изменение характеристик в зависимости от параметров помех и т. д.

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО МНОГОЭТАПНОГО ФИЛЬТРА

Поскольку алгоритм фильтрации состоит из двух этапов (предварительная покомпонентная фильтрация и векторная фильтрация), свойства ММФ во многом определяются характеристиками субфильтров (алгоритмов обработки, используемых на первом этапе). Поэтому рассмотрим свойства предварительной и векторной фильтрации как отдельные факторы, определяющие основные свойства ММФ.

**Подавление импульсных помех.** Поскольку выходное значение ММФ является выходным значением одного из субфильтров, подавление импульсных помех в основном определяется свойствами субфильтров. При этом наибольшее влияние при подавлении помех оказывает центральный субфильтр.

**Подавление флюктуационных помех** также во многом определяется субфильтрами и зависит от выбора порога чувствительности к перепадам  $t$ . Так, при увеличении значения  $t$  векторный фильтр на втором этапе будет оказывать все меньшее влияние и результаты фильтрации определяются свойствами субфильтров.

**Сохранение малоразмерных и протяженных объектов** зависит от свойств субфильтров сохранять мелкие детали изображения, поскольку в случае отличия выходного значения центрального субфильтра от значений остальных субфильтров, результат фильтрации определяется центральным субфильтром.

**Подчеркивание перепадов сигнала.** Обозначим через  $M$  размер окна субфильтров, а через  $K$  — расстояние между ними. Рассмотрим наклонный перепад векторного сигнала:

$$x_i = \begin{cases} D_1, & i \leq 0, \\ r_i, & 0 < i \leq L, \\ D_2, & L < i, \end{cases}$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — векторные константы,  $r_i$  — последовательность отсчетов перепада,  $r_0 = D_1$ ,  $r_{L+1} = D_2$ ,  $L$  — длина перепада сигнала. При  $t = 0$  ММФ преобразует наклонный перепад сигнала протяженностью  $L < (2K - M)$  в ступенчатый перепад. Пусть центр окна ММФ находится в отсчете  $k$ .

При  $k < L/2$  выполняется неравенство

$$\|z_1^* - z_3^*\| < \|z_2^* - z_3^*\|.$$

При  $k > L/2$  имеем

$$\|z_1^* - z_3^*\| > \|z_2^* - z_3^*\|$$

При  $0 < k \leq L$  соответственно

$$z_3^* = VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*).$$

Тогда при  $k < L/2$  выход ММФ равен  $y_1^* = D_1$ , а при  $k > L/2$  получаем  $y_2^* = D_2$ .

Нетрудно показать, что если  $L > (2K - M)$ , ММФ позволяет сократить длину перепада сигнала до значения  $L' = [L - (2K - M)]$ .

Приведенные свойства ММФ позволяют сформулировать некоторые рекомендации относительно выбора алгоритмов предварительной фильтрации. Как и при обработке одноканальных радиолокационных изображений, используемые субфильтры должны сохранять мелкие детали изображения, эффективно подавлять помехи и обладать устойчивостью к выбросам. Имеющийся у авторов опыт позволяет рекомендовать использовать модифицированный сигма-фильтр (Зеленский и Мельник, 1995) для обработки РБО-изображений и двухэтапный алгоритм на основе фильтра Ли и КИХ-медианного гибридного фильтра при обработке РСА-изображений (Kalmykov, 1996).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ММФ

Проиллюстрируем эффективность предлагаемого алгоритма фильтрации на тестовых и реальных трехканальных радиоизображениях.

В качестве тестового изображения выбрана мозаичная модель, состоящая из набора плоских участков с различной формой, площадью, интенсивностью, что позволяет проанализировать эффективность подавления помех на однородных участках изображения, а также степень сохранения границ объектов и специфические искажения их формы. В модели изображения учитывается зависимость отражающих свойств объектов ДЗ от длины радиоволн путем варьирования величины контрастов объектов над фоном. Для визуального анализа тестового изображения разработано программное обеспечение, позволяющее представлять трехканальное РЛИ на цветном мониторе в RGB-системе цветовых координат. На рис. 3 в монохромном отображении показано исходное тестовое трехчастотное РЛИ, содержащее: малоразмерные объекты диаметром 5 дискретных отсчетов; протяженный объект шириной 5 отсчетов; объекты с различной пространственной конфигурацией, размеры которых превышают размер окна фильтра.

Для моделирования ошибок геометрического совмещения РЛИ и исследования возможностей устранения эффекта, вызванного неточностью совмещения, два компонента исходного изображения смешены относительно третьего на 1 пиксель в противоположных направлениях. Для изучения

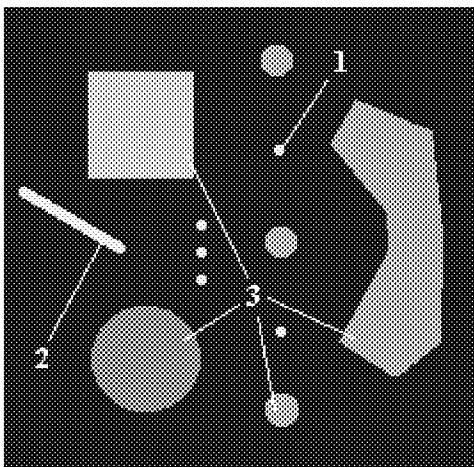


Рис. 3. Исходное тестовое изображение

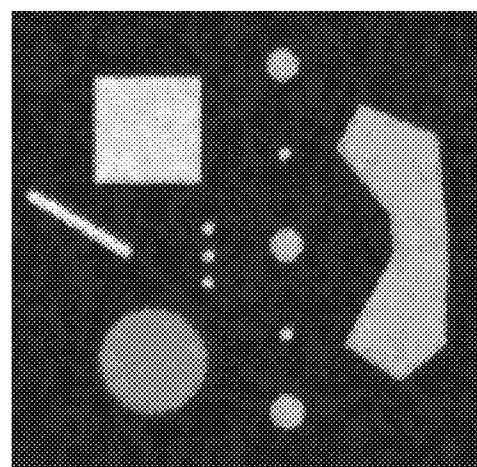


Рис. 5. Тестовое РЛИ после покомпонентной фильтрации

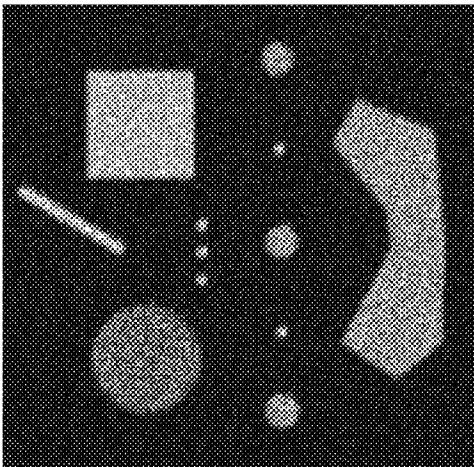


Рис. 4. Модель трехканального РЛИ

эффекта подчеркивания перепадов сигнала произведено «размытие» исходного изображения линейным фильтром  $3 \times 3$ . Моделирование помеховой обстановки осуществлено в соответствии с характеристиками помех реальных РЛИ. Так, для изображений, моделирующих РЛИ РБО мм- и см-диапазонов помехи выбраны в виде некоррелированного мультиплексивного нормального шума с относительными дисперсиями  $\sigma_{0\text{мм}}^2 = 0.005$  и  $\sigma_{0\text{см}}^2 = 0.015$ . Изображение, моделирующее одновзглядовый РСА дм-диапазона характеризуется мультиплексивным шумом с рэлеевским законом распределения и относительной дисперсией  $\sigma_{0\text{дм}}^2 = 0.273$ .

На рис. 4 в монохромном отображении представлена модель зашумленного тестового изображения. С целью эффективного подавления спекла и импульсных помех, а также сохранения малоразмерных и протяженных объектов для мм- и см-изобра-

жений на этапе предварительной фильтрации использован модифицированный сигма-фильтр с размерами окна  $7 \times 7$  элементов (Зеленский, 1995). Для дм-изображения применен алгоритм, основанный на двухэтапной обработке фильтром Ли с окном  $7 \times 7$  элементов и медианным гибридным фильтром (модификация 3LH+) (Kalmykov, 1996) с окном  $5 \times 5$  пикселов.

На рис. 5 показано изображение, полученное в результате предварительной покомпонентной фильтрации тестового изображения. После раздельной фильтрации на тестовом РЛИ наблюдается эффект «ложных границ», а также смазанность перепадов сигнала. Следующий этап фильтрации заключается в обработке изображения, представленного на рис. 5, предлагаемым векторным фильтром. Учитывая величину характерных ошибок геометрического совмещения РЛИ в 1–2 отсчета, размер окна векторного фильтра выбран равным  $W = 5 \times 5$  отсчетов. Величина коэффициента чувствительности фильтра  $t$  определяется характеристиками субфильтров и интенсивностью перепадов сигнала на границе объектов. Коэффициенты подавления помех субфильтрами определены экспериментальным путем по тестовым изображениям и обобщены для однородных и активных участков. Для мм- и см-изображений  $K_{f1} = K_{f2} = 0.035$ , а для дм-изображений —  $K_{f3} = 0.018$ .

На рис. 6 приведено контурное изображение, иллюстрирующее операцию векторной фильтрации. При отсутствии в окне фильтрации перепада сигнал на выходе векторного фильтра определяется центральным субфильтром, а при обнаружении перепада — одним из боковых субфильтров, расположение которых показано на рис. 2, в. Выбор для каждого отсчета изображения одного из субфильт-

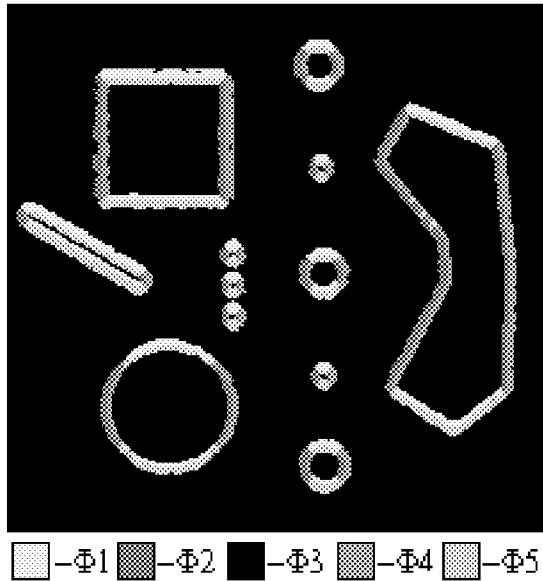


Рис. 6. Контурный препарат тестового изображения

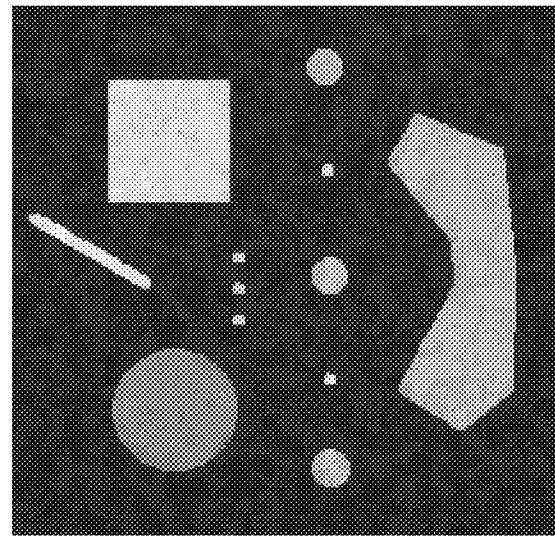


Рис. 7. Тестовое РЛИ после векторной фильтрации

ров иллюстрируется на рис. 6 различными значениями яркости.

На рис. 7 представлено изображение, полученное в результате векторной фильтрации. Из визуального анализа рис. 7 следует, что использование векторного фильтра позволяет подчеркнуть границы объектов и устраниить эффект ошибок совмещения.

Для количественной оценки результатов фильтрации тестовых изображений использованы следующие показатели:

$$\begin{aligned}\eta_s &= \sqrt{\frac{1}{K_G} \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} (I_{i,j}^m - \hat{I}_{i,j}^m)^2}, \quad i, j \in G, \\ \eta_A &= \frac{1}{K_G} \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} |I_{i,j}^m - \hat{I}_{i,j}^m|, \quad i, j \in G, \\ R &= \left( \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} I_{i,j}^m \hat{I}_{i,j}^m \right) / \sqrt{\left( \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} I_{i,j}^{m2} \right) \left( \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} \hat{I}_{i,j}^{m2} \right)},\end{aligned}$$

где  $\eta_s$  и  $\eta_A$  — соответственно среднее квадратичное и модульное отклонения между исходным  $I_{i,j}^m$  и отфильтрованным  $\hat{I}_{i,j}^m$  изображениями;  $G$  обозначает анализируемую область,  $K_G$  — количество отсчетов, попавших в  $G$ , а  $m$  — номер компонента многоканального РЛИ;  $R$  — коэффициент корреляции между исходным и отфильтрованным изображениями. Значения качественных показателей для вариантов раздельной и векторной фильтрации приведены в таблице.

Как следует из значений качественных показателей, для однородных участков тестового изображе-

#### Результаты фильтрации тестовых изображений

Используемый метод фильтрации	Показатели качества фильтрации	Область расчета качественных показателей $G$		
		Однородный участок	Окрестности границ	По всему изображению
Раздельная фильтрация	$\eta_A$	0.909	7.376	1.723
	$\eta_s$	1.725	12.606	4.755
	$R$	0.9984	0.9605	0.9895
Векторная фильтрация	$\eta_A$	0.908	3.063	1.179
	$\eta_s$	1.723	7.242	3.033
	$R$	0.9984	0.9875	0.9958

ния значения параметров практически идентичны, и эффективность фильтрации полностью определяется свойствами субфильтров. На участках, соответствующих окрестностям границ объектов 1, 2, 3 (рис. 3), после векторной фильтрации наблюдается значительное увеличение корреляции. Параметр  $\eta_A$  уменьшается в 2.4 раза, а  $\eta_s$  — в 1.74 раза, что свидетельствует о увеличении сходства между исходным и обработанным изображениями.

Проиллюстрируем применение векторного фильтра для обработки реальных многоканальных РЛИ. На рис. 8 в монохромном отображении представлено трехчастотное РЛИ мм-, см- и дм-диапазонов предоставленное нам для обработки харьковским Центром радиофизического зондирования Земли НАНУ и НКАУ.

Как следует из рис. 8, трехканальное РЛИ имеет высокий уровень помех и содержит малоразмерные объекты. На рис. 9 показаны результаты раздельной фильтрации модифицированным сигма-фильт-

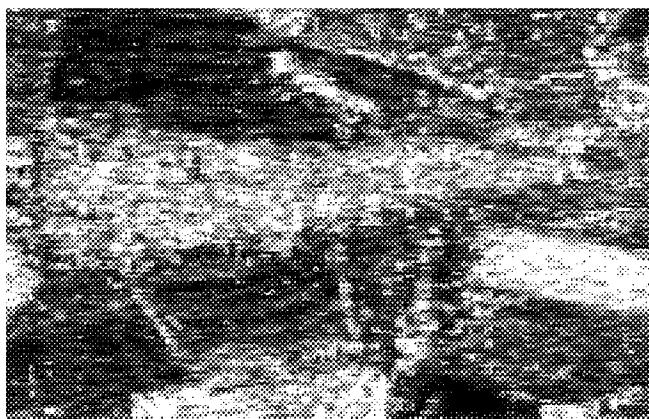


Рис. 8. Трехчастотное РЛИ, полученное многоцелевой системой ДЗ

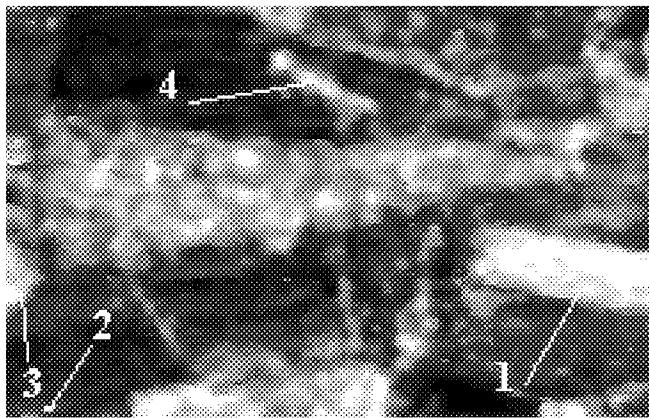


Рис. 9. Результаты покомпонентной фильтрации трехчастотного РЛИ

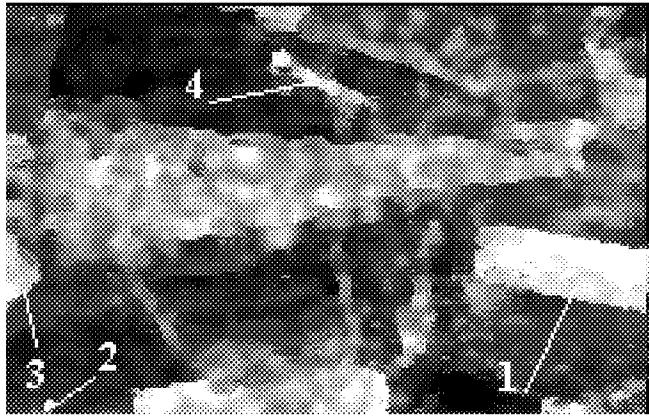


Рис. 10. Результаты векторной фильтрации трехчастотного РЛИ

ром мм-, см-составляющих, а также фильтром Ли и медианным гибридным фильтром дм-составляющей. При раздельном рассмотрении мм-, см- и дм-изображений наблюдаются четкие границы контрастных объектов, однако при совместном ото-

брожении (рис. 9) границы объектов 1, 3 размыты, что свидетельствует о наличии ошибок взаимной привязки компонент трехканального РЛИ.

На рис. 10 показано изображение, обработанное векторным фильтром. Наблюдаются четкие границы и перепады на объектах 1 и 3. Сравнение с рис. 9 свидетельствует о сохранении векторным фильтром малоразмерного объекта 2 и протяженного объекта 4. Отсутствие на обработанном изображении импульсных помех объясняется рабочими свойствами предлагаемого метода фильтрации.

Представленные результаты обработки реальных трехчастотных РЛИ, а также количественные оценки обработанных тестовых изображений свидетельствуют о преимуществах методики векторной обработки многоканальных РЛИ по сравнению с традиционными методами покомпонентной фильтрации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что предложенный метод векторной фильтрации многоканальных РЛИ обладает рядом преимуществ по сравнению с методами раздельной фильтрации. Многоэтапная схема обеспечивает высокую эффективность подавления помех, обладает устойчивостью к выбросам и объединяет достоинства методов векторной и раздельной фильтрации. Из экспериментальных результатов следует, что многоэтапный фильтр по эффективности подавления помех не уступает алгоритмам раздельной фильтрации и сохраняет мелкие детали изображения. Использование корреляционных связей между компонентами изображения позволяет устраниить эффекты, связанные с ошибками геометрического совмещения. Свойство подчеркивания границ облегчает визуальное восприятие изображения и повышает надежность алгоритмов выделения контуров, определения формы и размеров объектов.

Предложенный метод фильтрации может быть использован для обработки многоканальных радиолокационных изображений различного типа (многополяризационных, многочастотных) и позволяет повысить качество обработки и достоверность интерпретации данных дистанционного зондирования.

Ахметьянов В. Р., Пасмурев А. Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубежная радиоэлектроника.—1987.—№ 1.—С. 70—81.

Белокуров А. А. Методы сглаживания спектр-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности // Зарубежная радиоэлектроника.—1990.—№ 6.—С. 26—35.

Зеленский А. А., Кулемин Г. П., Лукин В. В., Мельник В. П.

- Локально-адаптивные устойчивые алгоритмы обработки радиоизображений. — Харьков, 1993.—37 с.—(Препринт / АН Украины. ИРЭ; № 93-8).
- Зеленский А. А., Лукин В. В. Обработка многочастотных изображений: подход, методы и алгоритмы // Современная радиолокация: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Киев: НИЦ «АНПРЭЛ» 1994.—С. 77—80.
- Зеленский А. А., Мельник В. П., Пономаренко Н. Н. Модифицированный двухпроходный сигма-фильтр для мультиплексивного нормального шума // Тез. докл. Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». — Туапсе, 1995.—С. 108.
- Калмыков А. И., Фукс И. М. Проблемы рассеяния радиоволн подстилающей поверхностью в задачах дистанционного зондирования // Современная радиолокация: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Киев, 1994.—С. 10—15.
- Хуанг Т. С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г. Дж. и др. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. — М.: Радио и связь, 1984.—224 с.
- Alshatti W., Bolon P., Lambert P. A Class of nonlinear vector filters application to multi-spectral image filtering // SIGNAL PROCESSING VII: Theories and applications / Eds M. Holt, C. Cowan, P. Grant, W. Sandham. — 1994.
- Astola J., Haavisto P., Neuvo Y. Vector median filters // Proc. IEEE.—Apr. 1990.—78.—P. 678—689.
- Estola Kari-Pekka. Multivariate median and trimmed mean filters // SIGNAL PROCESSING VII: Theories and applications / Eds M. Holt, C. Cowan, P. Grant, W. Sandham. — 1994.
- Freeman A., Evans D., Zyl J. J. SAR Applications in the 21st century // Proc. Intern. Conf. EUSAR96, Konigswinter, Germany, 26—28 March, 1996. — Berlin: Verlag, 1996.—P. 25—30.
- Hunt B. R. Karhunen-loeve multispectral image restoration, part I: Theory // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Proc.—1984.—vol. ASSP-32(3).—P. 592—599.
- Kalmykov A. I., Lukin V. V., Zelensky A. A. Some techniques and algorithms of SAR image enhancement on stages of primary and secondary signal processing // Proc. Intern. Conf. EUSAR96, Konigswinter, Germany, 26—28 March, 1996. — Berlin: Verlag, 1996.—P. 135—138.
- Keydel W. SAR techniques and technology, its present state of the art with respect to user requirements // Proc. Intern. Conf. EUSAR96, Konigswinter, Germany, 26—28 March, 1996. — Berlin: Verlag, 1996.—P. 19—24.
- Kulemin G. P., Kurekin A. A., Lukin V. V., Zelensky A. A. MM-wave multichannel remote sensing radar systems and algorithms of image processing // Digest of Intern. Conf. ICMWFST'94, Guanzhou, China. Aug. 1994.—P. 359—362.
- Kulemin G. P., Kurekin A. A., Lukin V. V., Zelensky A. A. Soil moisture and erosion degree estimation from multichannel microwave remote sensing data // Remote sensing for agriculture, forestry and natural resources // Proc. SPIE/EUROPTO Ser., Sept., Paris, 1995 / Eds Edwin T. Engman, Gerard Guyot, Carlo Marino. — Paris, 1995.—2585.—P. 144—155.
- Lukin V. V., Miao Zhenjiang, Yuan Baozong. Multifrequency remote sensing radar images processing and analysis // Proc. 1993 IEEE Region 10 Intern. Conf. Computers, Communication and Automation. — 1993, October 19—21. — Beijing, China.—P. 1042—1045.
- Lukin V. V., Kurekin A. A., Melnik V. P., Zelensky A. A. Application of order statistic filtering to multichannel radar image processing // Proc. of IS&T/SPIE Symp. on Electronic Imaging: Science and Technology. — San Jose, California, USA. — Feb. 5—10, 1995.—Vol. 2424A.—P. 302—312.
- Nikolaidis N., Pitas I. Optimal multichannel L filters based on reduced ordering // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Proc. / Ed. I. Pitas. — Neos Marmaras, Halkidiki, June 1995.—Vol. II.
- Richards J. A. Remote sensing digital image analysis. An introduction. — Berlin: Springer, 1986.—281 p.
- Tang K. Nonlinear multivariate signal processing with application to color image processing: Thesis for the degree of doctor of technology. University of technology. — Tampere.—1993. — 282 p.
- Tang K., Astola J., Neuvo Y. Multivariate estimate based on gradient search // Inter. Conf. Image Proc.: Theory and applications, 14—16 June, San Remo, Italy, 1993. — Elsevier Science Publ. B. V., 1993.—P. 279—282.
- Tang K., Astola J., Neuvo Y. Multichannel edge enhancement in color image processing // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, October 1994. — Vol. 4.—N 5.
- Tang K., Neuvo Y. A Class of vector median filters with the extended forms // The Intern. Conf. on Digital Signal Proc., 4—6 Sept., Florence, Italy, 1991. — Elsevier Science Publ. B. V., 1991.—P. 288—293.

---

#### APPLICATION OF VECTOR MEDIAN FILTERING METHODS TO MULTICHANNEL REMOTE SENSING RADAR DATA PROCESSING

**A. A. Kurekin, V. V. Lukin, and A. A. Zelenskii**

A possibility to apply the vector median filtering methods to joint processing of radar images is considered. It is shown that an approach based on two-stage filtering algorithms is efficient and allows one to take into account differences in multichannel radar image statistical characteristics and correlation properties of vector signals. The vector filter elaborated possesses edge-enhancing properties and permits elimination of the effect of false object edges caused by the errors of superimposing mutual radar images. The proposed filtering methods are analyzed on the basis of simulated and real multichannel radar images.