

DOI 10.24412/2221-2574-2024-4-25-33

УДК 621.396: 528.835

МОДИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Сосновский Андрей Васильевич

кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина».

E-mail: a.v.sosnovsky@urfu.ru

Коберниченко Виктор Григорьевич

кандидат технических наук, доцент, профессор департамента радиоэлектроники и связи
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина».

E-mail: vgkobern@mail.ru

Адрес: 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Аннотация: Рассмотрены основные этапы интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) высокого разрешения при построении цифровых моделей рельефа. Ключевыми и наиболее сложными этапами являются фильтрация фазового шума и развёртывание фазы. Предложена модификация технологии интерферометрической обработки, в которой этапы фильтрации интерферограммы и развёртывания фазы выполняются параллельно друг другу, а затем результаты этапов объединяются. На реальных данных космической радиолокационной интерферометрической съёмки тестовых участков показано, что такой способ интерферометрической обработки обеспечивает более высокую точность получаемых цифровых моделей рельефа, чем при использовании классической технологии и классического метода развёртывания фазы. Также показано, что модификация обеспечивает высокую робастность по отношению к изменению параметров фильтров фазового шума.

Ключевые слова: радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА), РСА-интерферометрия, развёртывание фазы, фильтрация фазового шума, цифровые модели рельефа.

Введение

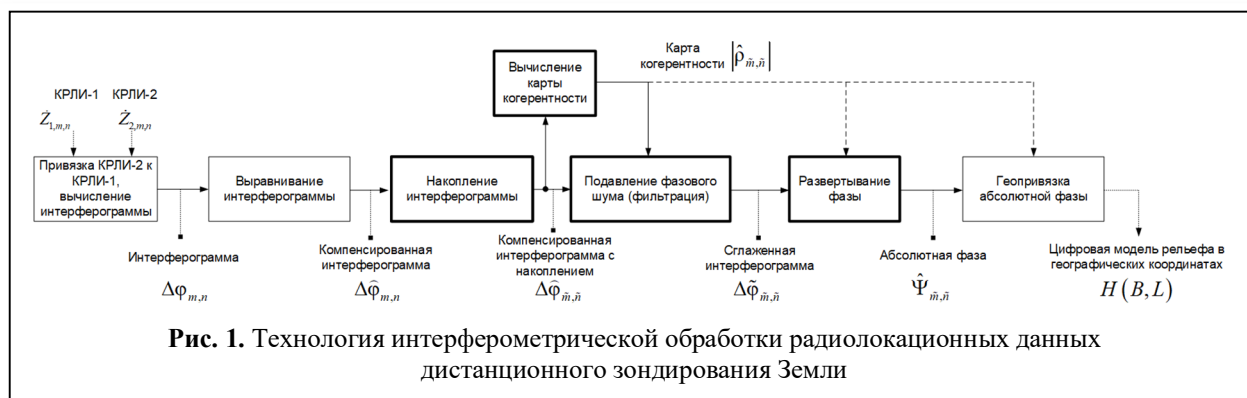
Одной из основных тенденций развития современных космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (РЭС ДЗЗ) стало широкое применение интерферометрической обработки данных для получения информации о рельефе местности и его изменениях.

Суть метода космической радиолокационной интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съёмкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами либо одной антенной на двух витках орбиты. Различают способы многопроходной или однопроходной интерферометрии с одним или несколькими космическими аппаратами на орбите. Метод космической радиолокационной интерферометрии сочетает в себе высокую

точность фазовых методов измерения дальности с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), что позволяет получать детальные цифровые модели рельефа (ЦМР, карты высот) по многократным радиолокационным наблюдениям [1–5].

Реализация интерферометрической обработки данных при разных режимах съёмки предусмотрена во всех современных космических РСА, включая перспективные российские космические комплексы «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р» [6–9].

Технология интерферометрической обработки включает несколько этапов преобразования радиолокационной информации, основными из которых являются формирование интерферограммы, подавление фазового шума и устранение неоднозначности фазовых измере-



ний — развёртывание фазы. Последняя процедура фазы является ключевой во всей структуре интерферометрической обработки. Для её осуществления используются различные эмпирические алгоритмы [5, 10–13].

Развёртывание фазы является задачей высокой вычислительной сложности из-за неизбежного присутствия на радиолокационных интерферограммах большого количества областей разрыва фазы (в первую очередь при съёмке городской территории — зданий и сооружений).

Для обеспечения высокой точности развёртывания фазы требуется учитывать взаимное расположение точек разрыва фазы, из-за чего большинство алгоритмов развёртывания имеют, по меньшей мере, квадратичную вычислительную сложность (по отношению к количеству точек разрыва фазы). Фильтрация интерферограммы, которая в классической технологии интерферометрической обработки выполняется перед развёртыванием фазы, не только подавляет фазовый шум, но и позволяет снизить размерность задачи развёртывания фазы за счёт существенного уменьшения количества разрывов фазы. Однако даже при корректно выбранных параметрах фильтров фазового шума фильтрация приводит к стиранию мелких деталей фазы (и, соответственно, получаемой ЦМР) и к «склеиванию» интерференционных полос с образованием новых разрывов фазы, что, в свою очередь, приводит к снижению точности результатов интерферометрической обработки.

Целью работы является исследование возможности модификации технологии интерферометрической обработки путём параллельного выполнения развёртывания фазы и фильтрации фазового шума и последующего объединения результатов этих этапов, а также оценка точности получаемых результатов для такой модификации.

Технологии интерферометрической обработки

Исходными данными для интерферометрической обработки являются два комплексных радиолокационных изображения (КРЛИ), полученных РСА с двух параллельных орбит, расположенных на малом расстоянии (для космической съёмки — до нескольких километров) друг от друга.

Классическая технология интерферометрической обработки при построении ЦМР включает в себя следующие этапы (рис. 1): совмещение (попиксельная взаимопривязка) двух КРЛИ и формирование интерферограммы путём поэлементного перемножения двух комплексных РЛИ; компенсацию фазового набега от опорной поверхности (выравнивание фазы); межэлементное некогерентное накопление; фильтрация (подавление) фазового шума; устранение фазовой неоднозначности — развёртывание фазы; пересчёт абсолютных (развёрнутых) фаз в высоты рельефа и геопривязка (переход от полётной системы координат КА к географической) [14].

Математическое описание исходной интерферометрической фазы (интерферограммы) в

дискретных координатах («Путевая дальность — Наклонная дальность») включает составляющие фазы, связанные с рельефом местности (топографическая фаза — $\Psi_{m,n}$), его изменениями за время между радиолокационными съёмками (дифференциальная топографическая фаза — $\Delta\varphi_{D,m,n}$), изменением условий распространения радиоволн в атмосфере — $\Delta\varphi_{atm,m,n}$ и фазовый шум $\Delta\varphi_{noise,m,n}$:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{m,n} &\approx W\{\Psi_{m,n} - \Delta\varphi_{D,m,n} + \\ &+ \Delta\varphi_{atm,m,n} + \Delta\varphi_{noise,m,n}\}, \\ \Psi_{m,n} &= 4\pi/\lambda \times \Delta R_{m,n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m, n — координаты элементов (пикселей) интерферограммы; $\Delta R_{m,n}$ — разность минимальных (на траверзе) наклонных дальностей от РСА до элемента поверхности при первой и второй съёмках; $W\{\cdot\}$ — оператор свёртывания фазы в интервал однозначности $[-\pi \dots +\pi]$.

Основными задачами интерферометрической обработки являются подавление фазового шума и развёртывание фазы. Последнее представляет собой процесс преобразования картины двумерной относительной фазы, принимающей значения только в интервале $[-\pi \dots +\pi]$, в картину абсолютной фазы, диапазон принимаемых значений для которой не ограничен. Этот этап до сих пор остаётся самым проблемным этапом интерферометрической обработки, т.к. подобная задача в принципе не имеет однозначного решения. Для развёртывания фазы разработано несколько десятков алгоритмов, основанных на аппарате из различных областей современной математики: теории векторных полей (метод вставки ветвей отсечения, метод функций Грина), теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод минимальной стоимости потока), теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, метод нелинейной стохастической фильтрации и др.), решении больших систем уравнений (метод наименьших квадратов), генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п. Основной подход к решению этой задачи заключается в интегрировании фазового градиента вдоль какой-

либо траектории, охватывающей все элементы интерферограммы. В дискретной постановке задачи такое развёртывание осуществляется путем вычисления разностей фаз соседних элементов $\delta\varphi_{m,n}$ со свёртыванием их в интервал однозначности и последующим суммированием полученных разностей:

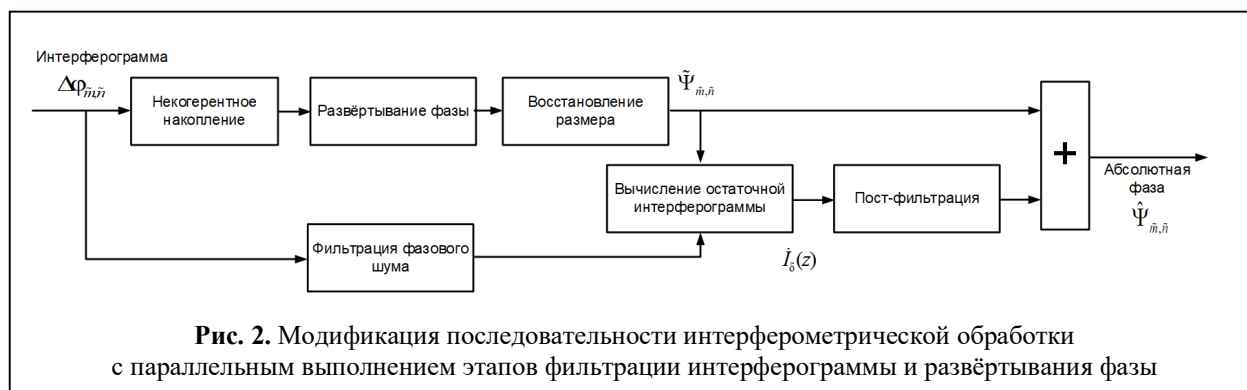
$$\begin{aligned} \delta\varphi_{m,n} &= W\{\Delta\varphi_{m,n} - \Delta\varphi_{m-mi,n-nj}\}, \\ \Psi_{m,n} &= \delta\varphi_{m,n} + \delta\varphi_{m-mi,n-nj}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $mi = 1, nj = 0$ при развёртывании интерферограммы по направлению вниз по вертикали (по столбцам), либо $mi = 0, nj = 1$ при развёртывании вправо по горизонтали (по строкам).

Решение задачи осложняется наличием на интерферограмме разрывов фазы — нарушений непрерывности интерферограммы, при которых возникает зависимость результата развёртывания от направления суммирования разностей (2). В точках разрыва фазы нарушается условие равенства нулю суммы разностей фаз на элементарном замкнутом контуре.

При подавлении фазового шума на этапе фильтрации будут, среди прочего, наблюдаться такие эффекты, как вымывание мелких деталей рельефа и «склеивание» близко расположенных интерференционных полос, что приводит к снижению точности результата обработки. Влияние фазового шума на работу алгоритмов развёртывания фазы имеет разнонаправленный характер. С одной стороны, он порождает подавляющую часть разрывов фазы на интерферограммах, что должно осложнять работу алгоритмов развёртывания. С другой стороны, из-за малого радиуса корреляции шума (не более нескольких отсчётов интерферограммы) такие разрывы могут быть легко устранены простыми логическими операциями без существенного влияния на точность результата обработки. Отсюда возникает целесообразность рассмотрения возможности полной или частичной перестановки порядка выполнения операций развёртывания фазы и фильтрации интерферограммы.

Далее рассматриваются два возможных варианта такой перестановки: полная переста-



новка и параллельное выполнение этапов фильтрации и развёртывания.

В полной перестановке фильтрация фазового шума производится для восстановленной после развёртывания абсолютной фазы.

В параллельной модификации (рис. 2) фильтрация интерферограммы и развёртывание фазы производятся независимо друг от друга, а далее вычисляется разностная интерферограмма между полученными результатами. Для снижения вычислительной сложности развёртывания зашумлённой интерферограммы используется межэлементное некогерентное накопление интерферограммы с малыми коэффициентами накопления (не более 4×4), после развёртывания фазы размер интерферограммы абсолютной фазы $\hat{\Psi}_{m,l}$ восстанавливается до прежних значений.

Разностная интерферограмма подвергается дополнительной обработке — пост-фильтрации (гауссовая фильтрация с низкочастотной АЧХ) — для уменьшения влияния низкочастотных флуктуаций [12] и, соответственно, уменьшения размеров областей разрыва фазы. Далее полученный результат суммируется с абсолютной фазой.

Описанный подход позволяет избежать влияния «склеивания» интерференционных полос на процесс развёртывания фазы и сохранить мелкие детали рельефа. Также при таком подходе сохраняются спектральные характеристики интерферограммы, прошедшей процесс фильтрации (сглаженной интерферограммы), что позволяет корректно сопоставлять резуль-

таты трёх рассматриваемых последовательностей обработки.

Эксперимент

Для экспериментальной оценки точности получаемых результатов использовались радиолокационные данные, полученные PCA PALSAR космического аппарата ALOS ($\lambda = 23,5$ см). Данные представлены тремя интерферометрическими парами комплексных радиолокационных изображений. КРЛИ получены при горизонтальной поляризации излучённой волны. Съёмки производились в летний сезон, временной интервал между съёмками во всех случаях — 46 суток. Тестовые участки с холмистым или низкорным рельефом содержали как естественные формы рельефа, так и его антропогенные изменения (карьеры, отвалы, открытые горные разработки), а также участки растительности разного типа (хвойные и лиственные леса, болота, сельскохозяйственные угодья), объекты с различной отражательной способностью радиоволн (водная поверхность, опоры линий электропередач, железные и автомобильные дороги, городская застройка). Эталонные данные о высотах рельефа представлены высотными отметками рельефа участков съёмки.

Первые этапы интерферометрической обработки (взаимопривязка, вычисление и выравнивание интерферограммы), а также развёртывание фазы методом минимальной стоимости потока (MCF) выполнялись в программном комплексе SARscape, последующие этапы классической и модифицированных техноло-

гий выполнялись в среде MATLAB с использованием собственных программных процедур. Оценка точности получаемых результатов производилась на основе ранее предложенной методики оценивания точности восстановления абсолютных фаз и высот цифровых моделей рельефа при различных наборах параметров алгоритмов обработки [15, 16]. Результаты измерений представлены в виде характеристик точности – экспериментальных зависимостей среднеквадратичного отклонения высоты от её эталонных значений — $\sigma_H(F_{sk})$, где F_{sk} — значения частот среза двумерной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра фазового шума. F_{sk} измеряется в количестве пикселей, равному радиусу АЧХ в пределах частоты среза.

Исследовалась точность восстановления для трёх вариантов интерферометрической обработки:

- классическая обработка;
- модификация обработки с полной перестановкой этапов развёртывания фазы и фильтрации интерферограммы;
- модификация обработки с параллельным выполнением этапов фильтрации и развёртывания фазы.

Для фильтрации интерферограммы во всех случаях использовался двумерный гауссовый фильтр с равными частотами среза АЧХ по путевой и наклонной дальностям. Эта же частота выступала в качестве варьируемого параметра F_{sk} .

Для развёртывания фазы использовался алгоритм рекурсивного выравнивания встречного вихревого поля фазы (ВВПФ) [12, 15]. Результаты также сравнивались с развёртыванием фазы по методу минимальной стоимости потока [11, 12] при классической интерферометрической обработке.

Для уменьшения объёма вычислений перед обработкой производилось межэлементное некогерентное накопление интерферограмм. Для интерферограммы №1 в эксперименте по сравнению модификаций технологии интерферометрической обработки использовался ко-

эффициент некогерентного накопления 32×8 (путевая дальность \times наклонная дальность), а для интерферограмм №2 и 3 — 16×8 . В эксперименте по сравнению точности полученных результатов с алгоритмом развёртывания фазы по методу минимальной стоимости потока использовались коэффициенты некогерентного накопления 4×1 и 4×2 , соответственно.

Результаты

Полученные в результате эксперимента характеристики точности высот $\sigma_H(F_{sk})$ для рассматриваемых модификаций представлены на рис. 3 и рис. 4.

Из характеристик, представленных на рис. 3, можно сделать следующие выводы.

1. В области средних и больших значений частоты среза АЧХ фильтра фазового шума F_{sk} (более 200 пикселей) для разных исходных данных результаты для модификации с параллельным выполнением этапов либо совпадают с результатами для классической технологии (различие составляет от 1 до 7% и имеет разнонаправленный характер). Для модификации с полной перестановкой этапов фильтрации и развёртывания различие в точности составляет до 9% и также имеет разнонаправленный характер.

2. В области низких значений F_{sk} погрешности измерений высот для классической технологии и модификации с полной перестановкой этапов резко возрастают из-за чрезмерного сглаживания абсолютной фазы и «вымывания» деталей рельефа. В то же время для модификации с параллельным выполнением этапов точность либо остаётся прежней, либо даже увеличивается (на 8,8% для интерферограммы №1). Снижение точности наступает при чрезмерно низких значениях F_{sk} (менее 70...100 пикселей).

3. Наилучшие точности для всех трёх интерферограмм достигаются при использовании модификации с параллельным выполнением этапов обработки, и они достигаются при значениях F_{sk} от 85 до 100 пикселей. Для интерферограммы №1 эта точность на 8,2% превос-

ходит точности, достигающиеся двумя другими реализациями технологии, а для интерферограмм №2 и №3 — совпадает с точностью, достигаемой классической технологией при отдельных значениях F_{sk} .

Из результатов сравнения развёртывания фазы по алгоритму ВВПФ с использованием модификации с параллельным выполнением этапов и классической технологии при использовании алгоритма развёртывания фазы MCF (рис. 4), можно сделать следующие выводы:

1. В области средних и больших значений частоты среза АЧХ фильтра фазового шума F_{sk} (более 200 пикселей) погрешности измерения высот для обеих технологий сопоставимы для интерферограмм №2 и №3. Для интерферограммы №1 погрешности измерения высот значительно больше (на 49%), чем при использовании модификации. Причиной ухудшения точности в этом случае является «срыв» алгоритма развёртывания фазы, порождающий значительные артефакты.

2. В области пониженных значений F_{sk} (100...200 пикселей) погрешности измерений высот для модификации с полной перестановкой этапов сохраняются приблизительно на том же уровне, что и для более высоких частот. В то же время, соответствующие погрешности для классической обработки и алгоритма развёртывания MCF резко возрастают.

3. Диапазон оптимальных значений частоты F_{sk} сместился к величинам 100...200 пикселей по отношению к результатам предыдущего эксперимента, что связано с использованием меньших коэффициентов

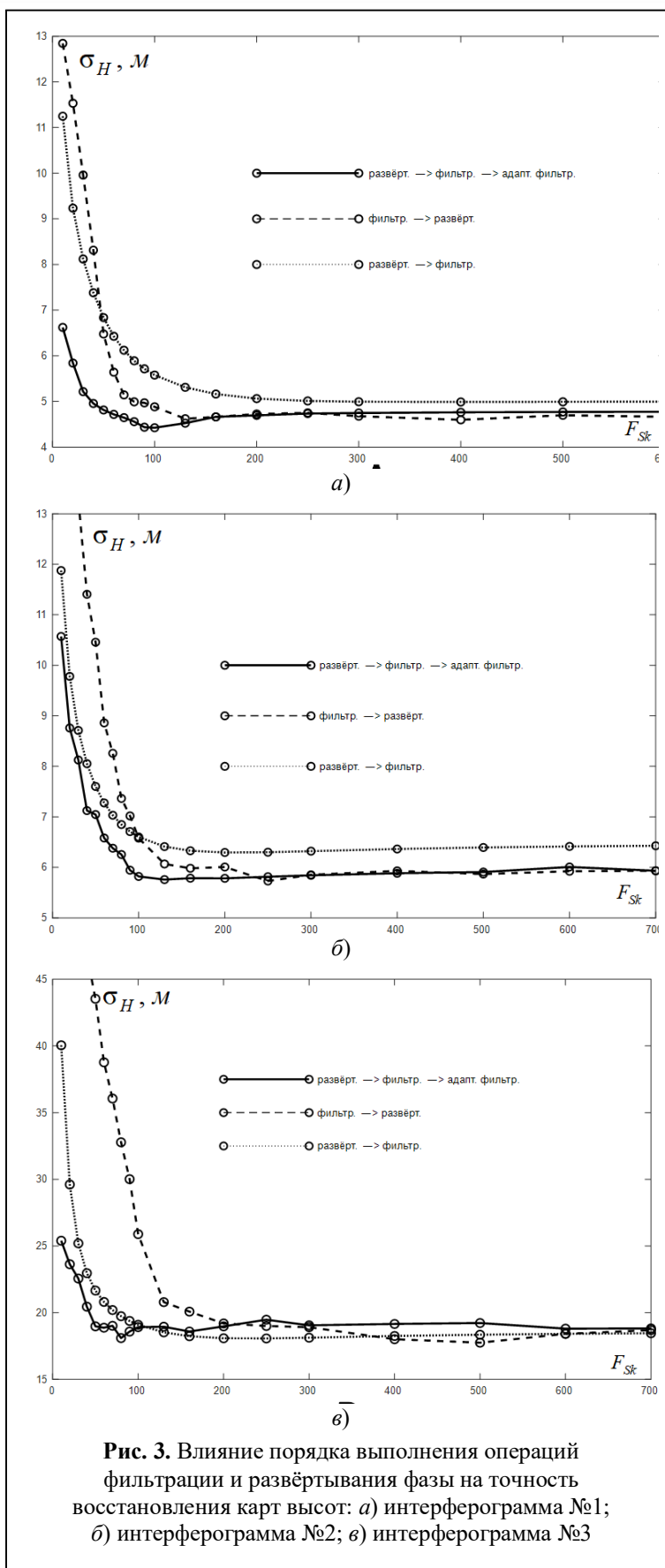


Рис. 3. Влияние порядка выполнения операций фильтрации и развёртывания фазы на точность восстановления карт высот: а) интерферограмма №1; б) интерферограмма №2; в) интерферограмма №3

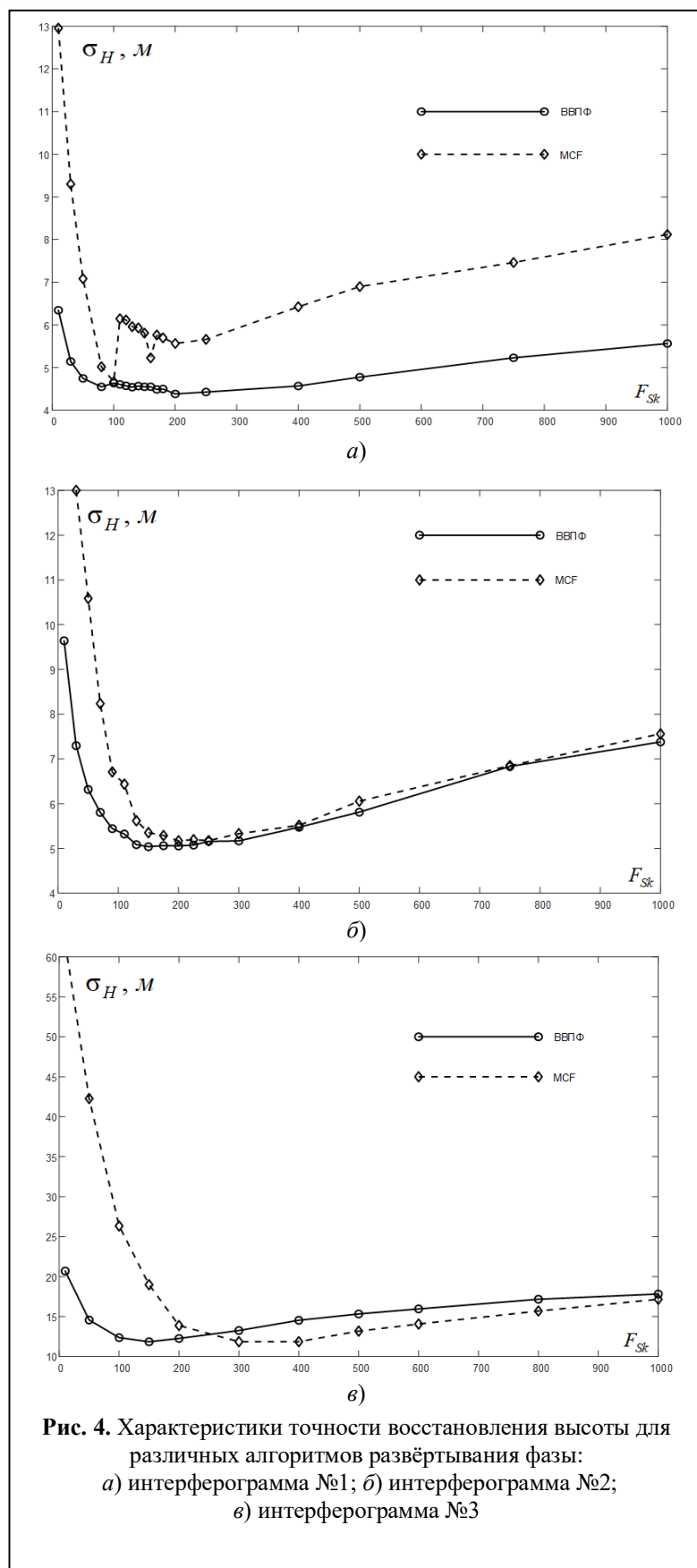


Рис. 4. Характеристики точности восстановления высоты для различных алгоритмов развёртывания фазы:
 а) интерферограмма №1; б) интерферограмма №2;
 в) интерферограмма №3

некогерентного накопления и, соответственно, с более высоким уровнем фазового шума.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модификация с параллельным выполнением этапов фильтрации интерферограммы и развёртывания фазы не только повышает точность результатов обработки, но и увеличивает её робастность, по крайней мере, в отношении процедуры фильтрации фазового шума. Диапазон значений частоты среза фильтра, при котором достигаются наилучшие точности, значительно расширяется, что делает менее критичным выбор этого параметра при наперед неизвестных характеристиках сцен.

Выводы

В работе предложена модификация технологии интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли, направленная на повышение точности получаемых цифровых моделей рельефа земной поверхности и заключающаяся в параллельном выполнении этапов подавления фазового шума и развёртывания интерферограммы с последующим объединением результатов. Эффективность предложенной модификации исследована с помощью характеристик точности высот цифровой модели рельефа для нескольких алгоритмов развёртывания фазы и при различных параметрах фильтров фазового шума. В результате показано, что такая модификация обеспечивает на 8% лучшую точность цифровой модели рельефа по

сравнению с классической технологией, а также в целом обеспечивает большую робастность по отношению к изменению параметров фильтров фазового шума.

Работа выполнена в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования № 075-03-2023-006 от 16.01.2023 (номер темы FEUZ-2023-0015).

Литература

1. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 676 с.
3. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. Vol. 14. No. 4. Pp. 1–54.
4. Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodrigues E. et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry // Proceedings of the IEEE. 2000. Vol. 88. No. 3. Pp. 333–382.
5. Hanssen R.F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2002. 326 p.
6. Костров В.В., Ракитин А.В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. №4. С. 11–31.
7. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Космический аппарат «Кондор-Э» и его возможности // Исследование Земли из космоса. 2017. №3. С. 85–95.
8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Все-

российские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06.2016 г.). Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 16–36.

9. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Костюк Е.А., Ракитин А.В. Перспективы интерферометрической оценки рельефа местности космическим комплексом «Кондор-ФКА» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №3(27). С. 4–16.

10. Yu H., Lan Y., Yuan Zh., Xu J., Lee H. Phase Unwrapping in InSAR. A review // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2019. №7. Pp. 40–58.

11. Chen C.W., Zebker H.A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. 2000. Vol. 17. No. 3. Pp. 401–414.

12. Chen C.W. Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry // A dissertation... doctor of philosophy [Электронный ресурс]. URL: https://web.stanford.edu/group/radar/people/Curtis_thesis_cpdf_print.pdf (дата обращения: 20.09.2024).

13. Сосновский А.В. Исследование и модификация метода формирования встречного вихревого поля для развертывания фазы // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Vol. 5. № 3. Pp. 239–257.

14. Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 5(28). С. 194–208.

15. Сосновский А.В. Повышение эффективности этапов интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли из космоса: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 2.2.16. Екатеринбург, 2023. 143 с.

16. Сосновский А.В. Оценивание точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №7. DOI:10.30898/1684-1719.2021.7.9.

Поступила 20 октября 2024 г.

English

MODIFICATION OF THE DATA PROCESSING TECHNOLOGY OF SPACE SAR-INTERFEROMETRY

Andrey Vasilyevich Sosnovsky — PhD in Engineering, Associate Professor, Radio Engineering and Telecommunications Department, Ural Federal University.

E-mail: a.v.sosnovsky@urfu.ru

Viktor Grigoryevich Kobernichenko — PhD in Engineering, Professor, Radio Engineering and Telecommunications Department, Ural Federal University.

E-mail: vgkobern@mail.ru

Address: 620002, Russian Federation, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Abstract: The main stages of interferometric data processing of space high-resolution synthetic aperture radars (SAR) in the construction of digital terrain models are considered. The key and most difficult steps are phase noise filtering and phase deployment. A modification of the interferometric processing technology is proposed, in which the stages of filtering the interferogram and phase deployment are performed in parallel with each other, and then the results of the stages are combined. Based on real data from the space radar interferometric survey of test sites, it is shown that this method of interferometric processing provides higher accuracy of the digital terrain models obtained than using classical technology and the classical phase deployment method. It is also shown that the modification provides high robustness with respect to changes in the parameters of phase noise filters.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), InSAR, phase unwrapping, phase noise filtering, digital elevation model.

References

1. *Shkolny L.A., Tolstov E.F. et al.* Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images. Moscow: Publishing House of the VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
2. *Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.* Space-borne Earth Surveillance Radar Systems. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
3. *Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems. 1998. Vol. 14. No. 4. Pp. 1–54.
4. *Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodrigues E. et al.* Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE. 2000. Vol. 88. No. 3. Pp. 333–382.
5. *Hanssen R.F.* Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2002. 326 p.
6. *Kostrov V.V., Rakitin A.V.* Radar space segment of remote sensing of the Earth in 2023: status and development trends. Radio engineering and telecommunication systems. 2023. No. 4. Pp. 11–31.
7. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Karpov O.A., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E.* Spacecraft "Kondor-E" and its capabilities. Exploring the Earth from Space. 2017. No. 3. Pp. 85–95.
8. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V., Neronsky L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E.* Results and lessons of flight tests of the RSA of the small spacecraft "Kondor-E". VI All-Russian Armand Readings: Radiophysical methods in remote sensing of environment: VII All-Russian Scientific Conf. (31.05–02.06.2016). Murom: IPC MI VIGU, 2016. Pp. 16–36.
9. *Babokin M.I., Efimov A.V., Kostyuk E.A., Rakitin A.V.* Prospects for interferometric assessment of the terrain by the space complex "Kondor-FKA". Radio engineering and telecommunication systems. 2017. No. 3(27). Pp. 4–16.
10. *Yu H., Lan Y., Yuan Zh., Xu J., Lee H.* Phase Unwrapping in InSAR. A review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2019. No. 7. Pp. 40–58.
11. *Chen C.W., Zebker H.A.* Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. 2000. Vol. 17. No. 3. Pp. 401–414.
12. *Chen C.W.* Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry. A dissertation... doctor of philosophy [Electronic Source]. URL: https://web.stanford.edu/group/radar/people/Curtis_thesis_cpdf_print.pdf (access date: 20.09.2024).
13. *Sosnovsky A.V.* Investigation and modification of the inversed vortex phase field method for phase unwrapping. Ural Radio Engineering Journal. 2021. No. 5(3). Pp. 239–257. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.003.
14. *Kobernichenko V.G., Sosnovsky A.V.* Particular qualities of digital elevation maps generation in interferometric SAR technology. SPIIRAS Proceedings. 2013. No. 5(28). Pp. 194–208.
15. *Sosnovsky A.V.* Improving the efficiency of interferometric processing stages of satellite radar remote sensing of the Earth data: PhD thesis. Ekaterinburg: Ural Federal University. 2023. 143 p.
16. *Sosnovsky A.V.* Accuracy estimation of the absolute phase recovery in interferometric synthesized aperture radars data processing. Journal of Radio Electronics. 2021. No. 7. DOI:10.30898/1684-1719.2021.7.9.