УДК 004.932

МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НИЗКОДЕТАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДЗЗ

Ушенкин В.А., *в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., foton@rsreu.ru*

METHOD FOR HIGH-PRECISION TOPOGRAPHIC INTERFEROGRAM PROCESSING WITH USE OF LOW-DETAIL STEREOPHOTOGRAMMETRIC INFORMATION OBTAINED FROM OPTICAL REMOTE SENSING SYSTEMS

Ushenkin V.A.

The paper proposes a new method for high-precision processing of radar topographic interferograms with use of low-detail stereophotogrammetric information obtained from optical remote sensing systems. In comparison with traditional interferometry technologies, additional processing stages are introduced, which are fusion of reference low-detail stereophotogrammetric digital elevation models in order to reduce the number of artifacts and calculation of the phase corresponding to the fusion result, additional median filtering of the interferogram, rejection of areas with radar signal overlapping, identified using the reference stereophotogrammetric data with refinement based on interferogram phase analysis, rejection of shadow areas, identified using the reference stereophotogrammetric data with refinement based on amplitude analysis of the interferometric radar image pair, refinement of the interferometric base and correction of atmospheric phase distortions using the reference stereophotogrammetric data. The results of the proposed method obtained during processing of data from foreign radar satellites are presented.

Key words: synthetic aperture radar, radar image, interferogram, interferometric processing, digital terrain model, digital surface model, digital elevation model.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, радиолокационное изображение, интерферограмма, интерферометрическая обработка, цифровая модель рельефа, цифровая модель местности, цифровая модель высот.

Предлагается новый метод высокоточной обработки радиолокационных топографических интерферограмм с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации от оптико-электронных систем наблюдения Земли. По сравнению с традиционными технологиями интерферометрии вводятся дополнительные стадии обработки: комплексирование опорных низкодетальных стереофотограмметрических цифровых моделей высот с целью уменьшения количества артефактов и построение фазовой картины результата комплексирования; дополнительная медианная фильтрация интерферограммы; отбраковка областей переналожения радиолокационных сигналов, выявленных по опорным стереофотограмметрическим данным с уточнением на основе фазового анализа интерферограммы; отбраковка областей радиотени, выявленных по опорным стереофотограмметрическим данным с уточнением на основе амплитудного анализа интерферометрической пары изображений; уточнение интерферометрической базы и коррекция атмосферных искажений фазы по опорным стереофотограмметрическим данным. Приводятся результаты предложенного метода, полученные при обработке данных от зарубежных радиолокационных космических аппаратов.

Введение

Обработка топографических интерферограмм, полученных из пары изображений от космических систем радиолокационного наблюдения Земли, позволяет сформировать цифровую модель высот наблюдаемого участка земной поверхности: цифровую модель рельефа при отсутствии искусственных высотных объектов и лесного покрова или цифровую модель местности (поверхности) в противном случае [1].

Традиционно интерферометрическая обработка включает следующие этапы [1]:

1) определение параметров геометрического соответствия двух исходных комплексных радиолокационных изображений;

2) трансформацию дополнительного радиолокационного изображения в координаты основного;

3) формирование фазоразностного изображения – интерферограммы;

4) расчет интерферометрической базы;

5) вычитание из интерферограммы фазы плоского рельефа с учетом интерферометрической базы;

6) оценку когерентности – степени зашумленности фазы на интерферограмме;

7) фильтрацию шумов на интерферограмме;

8) развертывание фазы – восстановление истинных ее значений из свернутых по модулю 2π;

9) пересчет развернутой фазы в высоту с учетом интерферометрической базы;

10) трансформацию полученной матрицы высот в заданную картографическую проекцию.

Погрешности промежуточных результатов на выходе каждого этапа приводят к снижению точности конечной цифровой модели высот или даже к невозможности выполнения дальнейших этапов обработки. Поэтому акту-

альны исследования по модификации традиционной технологии интерферометрической обработки в части введения дополнительных этапов по устранению тех или иных погрешностей. Значительная часть искажающих факторов сильно коррелирует с высотой наблюдаемых объектов, поэтому для устранения этих факторов целесообразно привлечение опорных цифровых моделей высот, более грубых, чем формируемая в результате интерферометрической обработки. В настоящее время имеются два основных метода формирования цифровых моделей высот по спутниковым снимкам: радиолокационная интерферометрия и оптико-электронная стереофотограмметрия [2]. Для использования в качестве опорной информации при интерферометрической обработке предпочтительны стереофотограмметрические цифровые модели высот, поскольку они предоставляют дополнительные сведения об участках земной поверхности, сложных для радиолокационного наблюдения: высотной городской застройке и горной местности.

Цель работы – модификация традиционной технологии интерферометрической обработки с целью повышения точности формируемых цифровых моделей высот.

Комплексирование опорных низкодетальных стереофотограмметрических цифровых моделей высот с целью уменьшения количества артефактов

В настоящее время доступен ряд глобальных цифровых моделей высот низкого разрешения (порядка 30 м), сформированных в том числе путем стереофотограмметрической обработки, например, ASTER GDEM [3] и ALOS World 3D 30 [4]. Данные модели содержат меньше артефактов в горных районах с крутым наклоном рельефа и в участках высотной городской застройки, чем интерферометрические модели. Однако главной проблемой стереофотограмметрических моделей являются искажения высот в участках, закрытых при оптической съемке облачностью или располагающихся в области тени от облака. Такие участки, как правило, маскируются, однако алгоритмы идентификации облачности отрабатывают неидеально, поэтому на распространяемых стереофотограмметрических моделях высот содержится небольшое количество неотбракованных искажений.

Другой особенностью стереофотографических моделей являются высоты малоконтрастных объектов. Например, при формировании ALOS World 3D 30 такие объекты признавались водной поверхностью, и им назначалась некоторая фиксированная высота, даже если в реальности объект содержит перепады высот.

Благодаря тому, что различные модели высот получены из разных источников (съемки разными космическими аппаратами в разное время), расположение артефактов на них в целом не совпадает. Следовательно, появляется возможность повышения точности опорных данных о высоте объектов участка земной поверхности путем комплексирования нескольких цифровых моделей высот.

Алгоритм комплексирования цифровых моделей высот предложен в [5]. В нем выполняется выявление ошибочного выделения водной поверхности по критерию, что на большей части береговой линии высота воды не должна превышать высоту берега. Идентификация неотбракованной облачности осуществляется на основе сопоставления комплексируемых моделей высот и выявления областей их наиболее сильных различий. При этом ошибочными признаются данные той модели высот, для которой градиент высоты на границе выявленной области оказывается больше. После выявления артефактов выполняется объединение неотбракованных участков комплексируемых моделей высот с обеспечением бесшовной стыковки на границах участков. Бесшовная стыковка основана на вычислении разности высот на комплексируемых моделях и ее интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний. В результате формируется опорная стереофотограмметрическая модель с существенно уменьшенным числом артефактов. Остаются лишь артефакты, одинаково расположенные на всех комплексируемых моделях.

Результат комплексирования используется в качестве опорной модели высот для совмещения интерферометрической пары радиолокационных изображений [6], а также пересчитывается в фазовую картину опорного рельефа для последующего использования при обработке интерферограммы.

Уточнение перпендикулярной интерферометрической базы

Для вычитания фазы плоского рельефа и пересчета фазы в высоту требуется с высокой точностью знать величину перпендикулярной интерферометрической базы – проекции расстояния между двумя точками радиолокационного наблюдения на ось, перпендикулярную к вектору скорости орбитального движения и оси визирования. В противном случае на интерферограмме остается квазилинейный набег фазы вдоль строки, а на результирующей модели высот, помимо квазилинейного набега, появляется мультипликативная ошибка. Современные отечественные навигационные приборы не позволяют измерить величину перпендикулярной интерферометрической базы с сантиметровой точностью при двухпроходной интерферометрической съемке [7], поэтому требуется уточнение базы в ходе наземной обработки.

В [8] предложен алгоритм уточнения пространственной интерферометрической базы на основе сопоставления сигнала топографической интерферограммы и фазовой картины опорной низкодетальной цифровой модели высот. Уточнение происходит в три этапа: сначала приближенно устраняется основная составляющая квазилинейного набега остаточной фазы плоского рельефа, затем устраняется мультипликативная ошибка пересчета фазы в высоту и, наконец, окончательно устраняется квазилинейный набег фазы. Поскольку алгоритм работает не с окончательной моделью высот, а с интерферограммой, его можно интегрировать в технологическую схему интерферометрической обработки перед этапом развертывания фазы, что позволяет улучшить результаты этого этапа за счет устранения искажений обрабатываемой информации.

Отбраковка областей переналожения радиолокационных сигналов, выявленных по опорным стереофотограмметрическим данным

Развертывание фазы является наиболее сложным этапом интерферометрической обработки и сводится к некорректно поставленной задаче восстановления истинных значений фазы по относительным значениям, свернутым по модулю 2π и отличающимся от истинных на некоторое целое количество периодов волны излучения. Данная задача имеет бесконечное множество решений, только одно из которых соответствует истинным высотам наблюдаемых объектов. Для выбора этого решения применяются различные эвристические предположения, которые редко нарушаются реальным рельефом, но могут часто нарушаться из-за остаточных искажений сигнала интерферограммы, поданного на вход процедуры развертывания фазы. Поэтому необходима наиболее тщательная подготовка интерферограммы перед развертыванием фазы на ней. В работе предлагаются дополнительные этапы отбраковки искажений сигнала интерферограммы, направленные на улучшение точности развертывания фазы и результирующей цифровой модели высот.

Одним из источников искажений является эффект переналожения сигналов из-за перепадов высот наблюдаемых объектов и бокового радиолокационного обзора. Для развертки изображения вдоль строки используется увеличение наклонной дальности, однако для высотных объектов наклонная дальность уменьшается, из-за чего сигнал от более высоких объектов накладывается на сигнал от более низких. Амплитуда сигнала в результате переналожения усиливается, а фаза претерпевает некоторые искажения, характер которых зависит от соотношения радиояркостей высотных и низких объектов.

Для качественного выявления областей переналожения необходимо знание высот наблюдаемых объектов, которые и являются искомыми величинами при интерферометрической обработке. В то же время можно приближенно найти расположение областей переналожения за счет привлечения низкодетальных опорных стереофотограмметрических данных.

Приближенная карта переналожений может быть составлена при трансформации опорной модели высот в систему координат основного радиолокационного изображения интерферометрической пары.

В ходе трансформации для каждого пикселя основного радиолокационного изображения находится высота точки пересечения окружности с радиусом, равным наклонной дальности, и центром в позиции космического аппарата, лежащей в плоскости, перпендикулярной к скорости движения, и поверхности, описываемой опорной моделью высот. Для этого:

– для некоторой высоты h выполняется геодезическая привязка пикселя с получением широты и долготы $(B(h), L(h))$;

– из опорной цифровой модели высот извлекается значение высоты $h_{\text{опор}}(B, L)$;

– выполняется численное решение уравнения:

$$h - h_{\text{опор}}(B(h), L(h)) = 0. \quad (1)$$

В области переналожения уравнение (1) имеет несколько корней. Это можно выявить путем его численного решения с разными начальными условиями.

Таким образом, предлагается следующий алгоритм составления карты переналожений:

1) для каждой строки основного радиолокационного изображения в направлении увеличения наклонной дальности последовательно находятся трансформированные высоты; для пикселя строки с минимальной дальностью в качестве начального значения для решения уравнения (1) выбирается минимально возможное значение высоты, а для последующих пикселей – значение высоты, найденное для предыдущего пикселя;

2) шаг 1 повторяется, но уже в направлении уменьшения наклонной дальности, при этом для пикселя с максимальной дальностью в качестве начального значения для решения уравнения (1) выбирается максимальное возможное значение высоты, а для последующих пикселей – значение высоты, найденное для предыдущего пикселя;

3) пиксели, для которых высоты, найденные на шагах 1 и 2, отличаются сильнее, чем на величину погрешности, признаются принадлежащими области переналожения.

Сигнал в пикселях интерферограммы, принадлежащих выявленным областям переналожения, отбраковывается путем назначения ему нулевых весовых коэффициентов на этапе развертывания фазы. Результирующая цифровая модель высот в данных областях будет содержать пропуски данных. Для получения полных данных о высотах наблюдаемого участка земной поверхности требуется организация радиолокационных интерферометрических съемок с разных ракурсов, например, с восходящего и нисходящего витков орбиты или с разными углами визирования. Результаты интерферометрической обработки данных таких съемок могут быть объединены в единую мозаичную модель высот с минимумом пропусков данных.

Отбраковка областей радиотени

Участкам, попавшим в радиотень, обычно соответствуют слабый уровень сигнала на радиолокационном изображении и низкая когерентность на интерферограмме. Такие участки отбраковываются в традиционной технологии интерферометрической обработки по критерию низкой когерентности.

Однако возможны ситуации, когда сигнал в области радиотени будет иметь достаточно высокую когерентность, при этом не описывая реальные высоты наблюдаемых объектов. Первая ситуация – это коррелированный характер шума. Вторая ситуация – в области радиотени из-за слабого уровня полезного сигнала может быть различим ослабленный сигнал от боковых лепестков антенны радиолокатора, из-за азимутальной неоднозначности соответствующий не текущим наблюдаемым объектам, а объектам, смещенным на несколько километров вдоль трассы космического аппарата.

В рассмотренных ситуациях в части областей радиотени остается неотбракованным сигнал, из-за искажений

плохо согласующийся с окружающим его полезным сигналом, что негативно отражается на точности развертывания фазы, причем из-за сложности этой процедуры ошибки, до развертывания локализованные в пределах области радиотени, могут распространиться и за ее пределы.

Поэтому целесообразно в дополнение к отбраковке по критерию низкой когерентности ввести в технологическую схему интерферометрической обработки этап выявления и отбраковки областей радиотени.

Так же, как и в случае с переналожениями, для выявления затенений можно привлечь низкодетальную опорную стереофотограмметрическую модель высот. Выявление выполняется следующим образом.

После трансформации опорной модели высот в систему координат основного радиолокационного изображения для каждого i -го пикселя становится известна тройка геодезических координат $(B_i, L_i, h_{\text{опор}}(B_i, L_i))$, из которой, зная орбиту космического аппарата, можно рассчитать угол α_i между направлением от объекта на радиолокатор и локальной вертикалью.

Поскольку космические радиолокаторы ведут обзор в боковом направлении с минимальным отклонением от перпендикуляра к вектору скорости, расчет затенений можно выполнять с приемлемой точностью вдоль строки радиолокационного изображения без учета значения доплеровского центроида и положения максимума диаграммы направленности антенны радиолокатора по азимуту.

Поэтому для пикселей каждой строки в направлении увеличения наклонной дальности рассчитывается высота затенения более близкими объектами. Если для i -го пикселя окажется, что его высота $h_{\text{опор}}(B_i, L_i)$ меньше высоты затенения $h_{\text{т}i}$, пиксель признается принадлежащим области радиотени. Высота затенения следующего пикселя вычисляется как

$$h_{\text{т}i+1} = \max(h_{\text{опор}}(B_i, L_i), h_{\text{т}i}) - \Delta R_{\text{н}} \cos\alpha_i, \qquad (2)$$

где $\Delta R_{\text{н}}$ – шаг пикселя по наклонной дальности.

Найденная таким образом маска затенений является приближенной из-за низкой детальности опорной стереофотограмметрической модели высот. Для ее уточнения предлагается амплитудный анализ результата усреднения двух изображений интерферометрической пары.

В пределах пикселей, первоначально отмеченных как теневые, оценивается средняя амплитуда сигнала. Затем выполняется размытие бинарной маски затенений скользящим средним, апертура которого выбирается в соответствии с отношением пространственных разрешений низкодетальной стереофотограмметрической модели высот и радиолокационных изображений.

Для пикселей, в которых размытая маска затенений принимает значение, большее нуля, выполняется фильтрация спекл-шума в малом окне. Если после фильтрации спекл-шума амплитуда сигнала в пикселе не превышает ранее рассчитанную среднюю амплитуду теневого сигнала, умноженную на коэффициент запаса, немного больший единицы, пиксель окончательно признается теневым. Сигнал в таких пикселях интерферограммы отбраковывается путем назначения нулевых весовых коэффициентов на этапе развертывания фазы.

Отбраковка областей переналожения радиолокационных сигналов, выявленных путем фазового анализа сигнала интерферограммы

Маска переналожений, построенная по опорным стереофотограмметрическим данным, является недостаточно точной из-за их низкой детальности, поэтому она может не охватывать некоторую часть реальных переналожений, искажающих сигнал интерферограммы. Часть этих остаточных переналожений, характеризующуюся наиболее сильными искажениями, можно дополнительно выявить путем анализа фазы на интерферограмме.

Не все изменения фазы вдоль строки интерферограммы допустимы с точки зрения геометрической модели интерферометрической съемки. Изменение фазы, соответствующее резкому уменьшению высоты в направлении увеличения наклонной дальности, является недопустимым, поскольку в этом случае более дальний пиксель должен был бы попасть в область радиотени и не содержать полезный сигнал. Если же оба пикселя не отнесены к теневым, то это означает, что фаза на интерферограмме искажена.

Алгоритм дополнительной отбраковки областей переналожения радиолокационных сигналов следующий.

Из (2) следует, что максимально допустимое уменьшение высоты за один пиксель интерферограммы равняется $\Delta R_{\text{н}} \cos\alpha_i$. С помощью геометрической модели интерферометрической съемки, описывающей зависимость фазы от высоты $\varphi(h)$ после уточнения перпендикулярной пространственной базы, находится предельно допустимое приращение фазы за один пиксель:

$$\Delta\varphi_{\text{мин}i} = \varphi(h_{\text{опор}}(B_i, L_i) - \Delta R_{\text{н}} \cos\alpha_i) - \varphi(h_{\text{опор}}(B_i, L_i)).$$

Одновременно по сигналу интерферограммы вычисляется свернутая по модулю 2π конечная разность свернутой фазы $\varphi_{\text{св}}$ в соседних пикселях:

$$G_{xi} = \arg\exp(j \cdot (\varphi_{\text{св}i+1} - \varphi_{\text{св}i})),$$

где j – мнимая единица.

Если $G_{xi} < \Delta\varphi_{\text{мин}i}$ и $\varphi'(h) > 0$ или $G_{xi} > \Delta\varphi_{\text{мин}i}$ и $\varphi'(h) < 0$, пиксель отбраковывается.

Дополнительная медианная фильтрация интерферограммы

Перед выполнением развертывания фазы должен быть максимально отфильтрован фазовый шум на интерферограмме. Наиболее качественное удаление шума среди известных алгоритмов обеспечивает алгоритм Голдштейна [9, 10], основанный на адаптивной полосовой фильтрации. Однако после применения фильтра Голдштейна остается небольшое количество импульсных шумов. Они приводят к увеличению количества так называемых сингулярных точек на интерферограмме, в которых нарушается свойство потенциальности поля фазового градиента, свернутого по модулю 2π. Для восстановления потенциального поля фазового гради-

ента на этапе развертывания фазы выполняется попарное соединение разноименно заряженных сингулярных точек линиями разрыва фазы, вдоль которых истинный фазовый градиент превышает половину периода волны излучения. Чем больше будет сингулярных точек, тем дольше будет выполняться развертывание фазы и тем выше вероятность возникновения ошибки, когда для проведения линии разрыва будет выбрана не та пара точек.

В то же время в [11] предложена адаптация медианного фильтра, позволяющая его применять к периодическому фазовому сигналу интерферограммы. Поэтому в технологическую схему интерферометрической обработки целесообразно добавить этап дополнительной медианной фильтрации интерферограммы, позволяющей устранить остаточный импульсный шум, снизить количество сингулярных точек и тем самым упростить последующее развертывание фазы.

Адаптация медианного фильтра основана на преобразовании периодических значений фазы на интерферограмме к упорядочиваемым значениям. В основу преобразования положено предположение, что в пределах малой окрестности полезный сигнал интерферограммы изменяется практически линейно, т.е. его отклонения от аппроксимирующей линейной зависимости не превышают половину фазового периода. Поэтому медианная фильтрация интерферограммы для каждого малого фрагмента заключается в построении линейной аппроксимации сигнала, вычитании из сигнала полученной аппроксимации, применении медианного фильтра к результату вычитания и обратного прибавления линейной аппроксимации.

Устранение атмосферных искажений и развертывание фазы

В [11, 12] предложен подход к развертыванию фазы на основе анализа сюжета интерферограммы и привлечения опорной низкодетальной модели высот, гарантирующий, что ошибки развертывания фазы будут распространяться не более, чем на несколько пикселей низкодетальных опорных данных. В [13] точность подхода была дополнительно увеличена за счет добавления процедуры уточнения положения фазовых разрывов с целью уменьшения локальных ошибок. Для корректной работы развертывания фазы в соответствии с таким подходом на интерферограмме должны отсутствовать атмосферные искажения фазы.

Если интерферограмма получена по данным синхронной интерферометрической съемки (интерферометрия с жесткой базой или в режиме «тандем»), отсутствие атмосферных искажений фазы гарантируется условиями съемки. Если же интерферограмма получена по данным двухпроходной интерферометрической съемки, требуется дополнительная фильтрация атмосферных искажений [13, 14].

За счет того, что состояние атмосферы изменяется в пространстве плавно, основные атмосферные искажения сосредоточены в низкочастотной составляющей сигнала интерферограммы, которая априорно известна по низкодетальным стереофотограмметрическим моделям высот. Поэтому устранение атмосферных искажений заключается в подавлении низких частот на результате вычитания из интерферограммы фазовой картины опорной стереофотограмметрической модели высот.

Предлагаемый метод интерферометрической обработки

Предлагаемый метод интерферометрической обработки базируется на введении дополнительных этапов, рассмотренных выше, в технологическую схему, представленную на рисунке 1.

Используются следующие сокращения:

ИП – интерферометрическая пара комплексных радиолокационных изображений;

ПГС – параметры геометрического соответствия изображений;

УПГС – уточненные ПГС;

СИП – совмещенная интерферометрическая пара изображений;

И – интерферограмма;

ПВИ – предварительно выравненная интерферограмма;

ПОТФ – предварительно рассчитанная фазовая картина опорного рельефа (опорная топографическая фаза);

В – матрица весовых коэффициентов;

ВИ – окончательно выравненная интерферограмма;

ОТФ – окончательно рассчитанная опорная топографическая фаза;

ФВИ – фильтрованная выравненная интерферограмма;

ДФВИ – дополнительно фильтрованная выравненная интерферограмма;

ОВ – матрица окончательных весовых коэффициентов;

РИ – разностная интерферограмма;

КРИ – скорректированная разностная интерферграмма (для синхронной съемки совпадает с РИ);

РРФ – разностная развернутая фаза;

РФ – развернутая фаза;

МВ – матрица высот в системе координат основного радиолокационного изображения;

ЦМВ – результирующая цифровая модель высот;

ООВ – ортотрансформированная матрица окончательных весовых коэффициентов, описывающая полноту и качество сформированной ЦМВ.

Классическая схема интерферометрической обработки не включает этапы 1, 12, 13, 15 и отбраковку переналожений и затенений на этапе 8. Этап 10 в классической схеме или не выполняется, или выполняется менее точно без использования опорной информации, или выполняется после интерферометрической обработки по уже сформированной модели высот. В работе [15] предложен метод интерферометрической обработки на основе развертывания фазы в соответствии с [11, 12], добавления в классическую схему этапа 1 и привлечения опорной информации на этапе 10. Предлагаемый в настоящей работе метод отличается этапами 12, 13, 15, отбраковкой переналожений и затенений на этапе 8, и уточнением положения фазовых разрывов с целью уменьшения локальных ошибок на этапе 16.

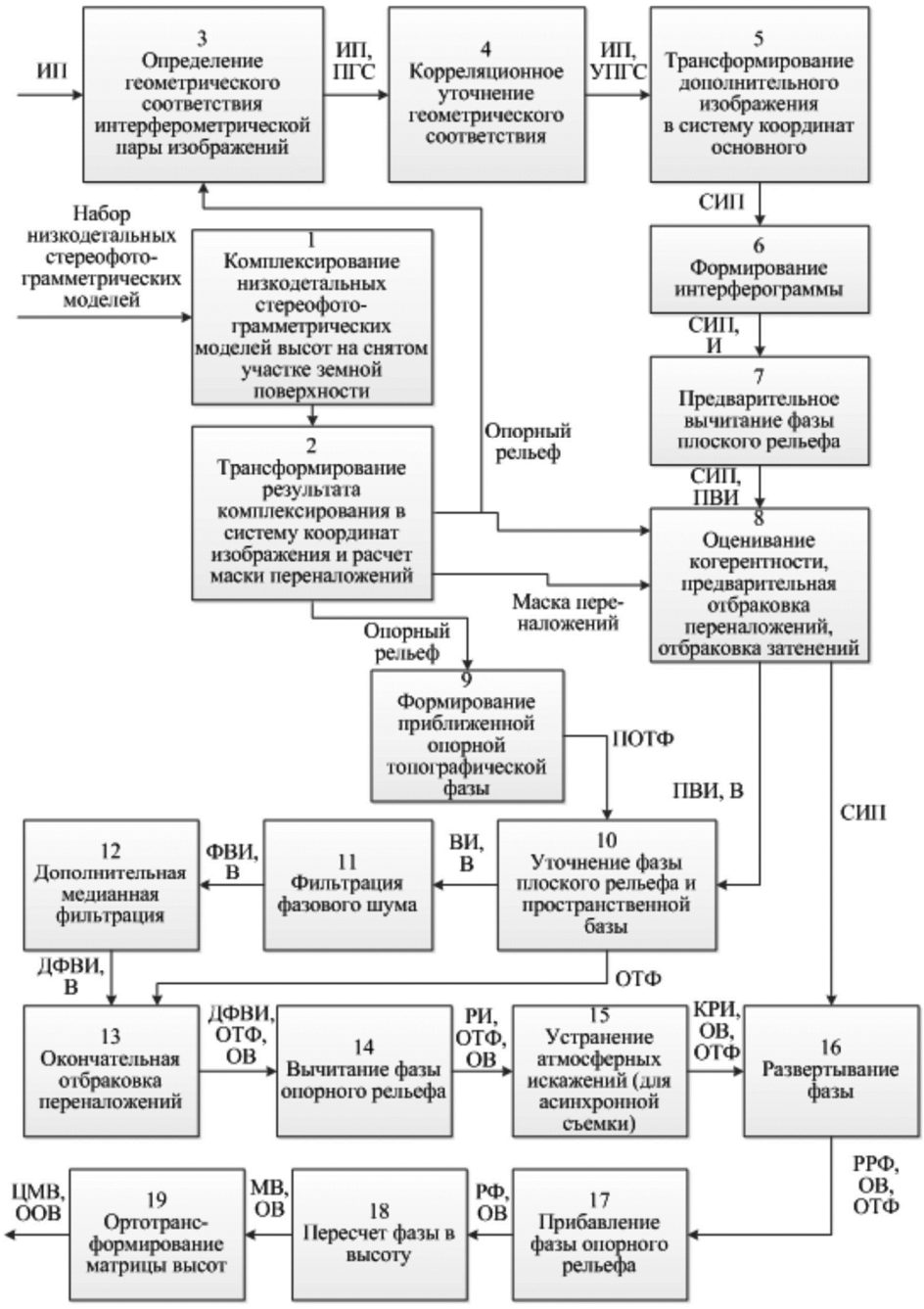


Рисунок 1 – Модифицированная технологическая схема интерферометрической обработки

Экспериментальные исследования

Проведены экспериментальные исследования предложенного метода в сравнении с методом [15], который в среднем в 5 раз превосходит по точности традиционные технологии, с использованием имеющихся в открытом доступе интерферометрических пар от зарубежных космических аппаратов:

1) окрестности скалы Улуру, Австралия, космический аппарат «TerraSAR-X»;

2) г. Финикс, Аризона, США, космический аппарат «Radarsat-2»;

3) Большой Каньон, США, космический аппарат «TerraSAR-X».

В исследовании участвовали 5 вариантов технологической схемы интерферометрической обработки:

1) технологическая схема в соответствии с методом [15] (далее – технология [15]);

2) технология [15] с добавлением этапа 15;

3) технология [15] с добавлением этапа 15 и дополнительной фильтрации (этап 12);

4) технология [15] с добавлением этапа 15 и дополнительных операций по отбраковке переналожений и затенений (этапы 8 и 13);

5) технологическая схема согласно предлагаемому методу, представленная на рисунке 1.

В ходе исследований оценивались:

1) количество сингулярных точек $N_{\text{ст}}$ в сигнале интерферограммы, поданной на вход процедуры развертывания фазы;

2) количество итераций $N_{\text{ит}}$ на самом трудоемком этапе развертывания фазы в рамках подхода [11–13] – этапе окончательной идентификации областей с длин-

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Технологическая схема обработки	Показатель	Номер интерферометрической пары		
		1	2	3
Технология [15]	$N_{ст}$	14516	147675	300769
	σ_h, м	3,342	4,802	18,69
	$N_{ит}$	77	66	417
Технология [15] с коррекцией атмосферных искажений	$N_{ст}$	14479	147526	303416
	σ_h, м	2,369	2,092	6,400
	$N_{ит}$	53	39	82
Технология [15] с коррекцией атмосферных искажений и дополнительной фильтрацией	$N_{ст}$	3024	30575	139371
	σ_h, м	2,396	1,909	6,069
	$N_{ит}$	53	38	87
Технология [15] с коррекцией атмосферных искажений и отбраковкой переналожений и радиотеней	$N_{ст}$	3732	45716	21123
	σ_h, м	1,855	1,880	5,223
	$N_{ит}$	28	23	28
Предлагаемая технологическая схема	$N_{ст}$	83	1941	575
	σ_h, м	1,818	1,724	4,956
	$N_{ит}$	34	27	32

ными линиями разрыва фазы;

3) точность сформированной ЦМВ в виде среднеквадратичного отклонения σ_h высот на ней от опорных высот.

Для обеспечения сопоставимости оценок во всех вариантах технологической схемы для развертывания фазы использовался подход [11, 12], модифицированный в [13].

Величина σ_h обусловлена как ошибками интерферометрической обработки, так и большей детальностью сформированной ЦМВ по сравнению с опорной стереофотограмметрической моделью высот и может рассматриваться как верхняя граница ошибки интерферометрической обработки. Для обеспечения сопоставимости оценок σ_h для разных технологий их расчет выполнялся только по пикселям, не отбракованным в рамках всех сопоставляемых технологий.

В таблице 1 приведены полученные оценки. Из таблицы видно, что предлагаемый метод приводит к повышению точности интерферометрической обработки в 1,8 – 3,8 раза, а также к сокращению вычислений на этапе развертывания фазы в 2,3 – 13 раз по сравнению с методом [15]. Поскольку метод [15] точнее традиционных технологий интерферометрии в среднем в 5 раз, можно считать, что метод, предлагаемый в настоящей работе, превосходит их по точности примерно в 9 – 19 раз. При этом добавление в технологическую схему и коррекции атмосферных искажений, и дополнительной фильтрации, и отбраковки переналожений с радиотенями приводит к большему положительному эффекту, чем добавление только части из этих операций.

Заключение

Предложенный метод интерферометрической обработки за счет добавления дополнительных операций медианной фильтрации шумов, коррекции атмосферных искажений и отбраковки переналожений и затенений с учетом низкодетальной стереофотограмметрической информации позволяет в 1,8 – 3,8 раза повысить точность формирования цифровой матрицы высот и в 2,3 – 13 раз ускорить наиболее трудоемкий этап интерферометрии – развертывание фазы – по сравнению с лучшим из известных методов, а следовательно, и примерно в 9 – 19 раз превзойти по точности традиционные технологии интерферометрии.

Литература

1. Гусев С.И., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Цифровая обработка данных радиолокационного зондирования Земли из космоса: учебное пособие / под ред. В.В. Еремеева, В.А. Ушенкина. М.: Курс, 2021. 248 с.

2. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств. Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 44-49.

3. Cuartero A., Felicisimo A.M., Ariza F.J. Accuracy of DEM generation from Terra-ASTER stereo data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004, vol. 35. Part B2, pp. 559-563.

4. Tadono T., Nagai H., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by Alos PRISM. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016, vol. 41. Part B4. pp. 157-162.

5. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексирование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности. Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 13-17.

6. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации. Вестник РГРТУ. 2015. № 51. С. 72–79.

7. Егошкин Н.А. Обработка бортовой навигационной информации для высокоточной оперативной коррекции космических изображений. Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 23-29.

8. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Уточнение пространственной базы при космической бистатической радиолокационной съемке Земли по сигналу интерферограммы. Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. С. 42-48.

9. Goldstein R.M., Werner C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters. 1998, vol. 25 (21). pp. 4035-4038.

10. Baran I., Stewart M.P., Kampes B.M., Perski Z., Lilly P. A modification to the Goldstein radar interferogram filter // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003, vol. 41(9), pp. 2114-2118.

11. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 21-31.

12. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли. Радиотехника. 2016. № 11. С. 120-127.

13. Ушенкин В.А. Алгоритмы высокоточной обработки интерферометрической информации от систем дистанционного зондирования Земли на основе 3D-анализа наблюдаемой сцены: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2017. 165 с.

14. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 320 с.

15. Егошкин Н.А. Методы высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли: дис. … докт. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2019. 323 с.

НОВЫЕ КНИГИ



Воскресенский Д.И., Добычина Е.М.

Цифровые антенные решетки: Монография. М.: Изд-во Радиотехника, 2020 г. 240 с.: ил.

Рассмотрен новый класс антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиолокационных комплексов, позволяющих повысить энергетический потенциал за счет использования новых методов оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой точности формирования амплитудно-фазового распределения с помощью предложенной системы автоматической калибровки. Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей цифрового диаграммообразования и точностных характеристик калибровки макета цифровой решетки.

Для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями в области разработки, создания и применения цифровых решеток в современных радиоэлектронных системах. Может быть рекомендована в качестве учебного пособия студентам радиотехнических специальностей, а также аспирантам и магистрантам по направлениям «Радиотехника», «Радиофизика и электроника».

У в а ж а е м ы е а в т о р ы !

Редакция научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов» просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- *Текст – текстовый редактор Microsoft Word, формулы – в редакции MathType.*
- *Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.*
- *Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.*
- *Название статьи на русском и английском языках.*
- *Рукопись статьи сопровождается: краткой аннотацией на русском и английском языках; номером УДК; сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, должность, ученая степень, телефоны, электронная почта); ключевыми словами на русском и английском языках; актом экспертизы (при наличии в вашей организации экспертной комиссии).*

2) Требования к иллюстрациям:

- *Векторные (схемы, графики) – желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.*
- *Растровые (фотографии, рисунки) – М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.*