

УТОЧНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ БАЗЫ ПРИ КОСМИЧЕСКОЙ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКЕ ЗЕМЛИ ПО СИГНАЛУ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

Егошкин Н.А., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru;

Ушенкин В.А., м.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru.

BISTATIC SAR BASELINE ESTIMATION BY INTERFEROGRAM ANALYSIS

Egoshkin N.A., Ushenkin V.A.

The problem of spaceborne InSAR baseline estimation by interferogram analysis is considered. Two main parameters, which depend on baseline and need to be estimated, are selected. They are multiplicative factor of phase dependence on relief height and multiplicative factor of flat relief phase. The algorithms of these parameters high-precision estimation, which don't require interferogram phase unwrapping, are proposed.

Key words: interferogram, SAR imaging, digital elevation model, phase unwrapping, interferometric baseline.

Ключевые слова: интерферограмма, радиолокационная съемка, цифровая модель рельефа, развертывание фазы, пространственная интерферометрическая база.

Введение

Бистатическая радиолокационная съемка Земли из Космоса подразумевает использование двух антенн, разнесенных в пространстве. Вектор, соединяющий положения фазовых центров антенн в моменты времени, когда они снимают одну и ту же точку на поверхности Земли, принято называть пространственной базой.

В зависимости от ориентации вектора базы относительно траектории движения радиолокатора выделяют продольную и поперечную бистатические съемки. Продольная бистатическая съемка предназначена для селекции движущихся целей и в данной работе не рассматривается. Поперечная бистатическая радиолокационная съемка предназначена для построения высокодетальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) земной поверхности путем интерферометрической обработки изображений, полученных от двух антенн [1].

Существует три варианта проведения поперечной бистатической съемки (далее – интерферометрической съемки).

Первый вариант предусматривает использование одного радиолокатора с двумя антеннами на жесткой базе. Такая съемка выполнялась в 2000 г. шаттлом «Индевор» для построения глобальной ЦМР SRTM. Модуль и направление вектора базы в этом случае известны с высокой точностью, и их уточнение не требуется.

Второй вариант предусматривает использование двух радиолокаторов, расположенных на двух космических аппаратах, движущихся рядом друг с другом по параллельным траекториям. Указанный вариант съемки называется «тандемным» и используется в связке космических аппаратов TerraSAR-X и TanDEM-X. Модуль и направление вектора базы при «тандемной» съемке

Рассматривается задача уточнения пространственной базы при интерферометрической радиолокационной съемке Земли из Космоса путем анализа сигнала интерферограммы. Выделяется два основных параметра, зависящих от базы и подлежащих уточнению: мультипликативный коэффициент зависимости фазы на интерферограмме от высоты рельефа земной поверхности и коэффициент квазилинейного набега фазы плоского рельефа. Предлагаются алгоритмы высокоточной оценки значений указанных параметров, не требующие развертывания фазы на интерферограмме.

также известны с высокой точностью, поскольку для их определения используется дифференциальный режим навигационных систем.

Третий вариант подразумевает съемку одним радиолокатором при двух его пролетах над одной и той же местностью на разных витках орбиты (межвитковая интерферометрическая съемка). При этом траектории двух пролетов немного смещены друг от друга в Гринвичской системе координат, образуя пространственную базу. Межвитковая интерферометрическая съемка наиболее распространена, благодаря относительной простоте и дешевизне ее организации, однако при ней модуль и направление вектора пространственной базы известны недостаточно точно, поскольку из-за появившегося интервала времени между съемками двух изображений невозможно использовать дифференциальный режим навигационных систем.

Погрешности определения пространственной базы негативно сказываются на точности конечных и промежуточных результатов интерферометрической обработки.

Первым этапом интерферометрической обработки является пространственное совмещение двух изображений, полученных при съемке. Погрешность величины проекции вектора базы на вектор визирования, называемой параллельной базой, приводит к ошибке совмещения изображений, которая, тем не менее, может быть устранена путем корреляционно-экстремального уточнения параметров совмещения [2].

На втором этапе формируется интерферограмма –

матрица разностей фаз сигнала в одноименных пикселях совмещенных изображений. Фазоразностный сигнал интерферограммы принято для простоты называть фазой. Фаза на интерферограмме включает пять составляющих: фазовый шум, атмосферные искажения, фазу смещений земной поверхности (только при межвитковой интерферометрии), фазу плоского рельефа и топографическую фазу. Для построения ЦМР из фазы на интерферограмме вычлняют топографическую составляющую. При этом наличием атмосферных искажений и смещений земной поверхности пренебрегают, а шум устраняют путем фильтрации интерферограммы [1].

Фаза плоского рельефа $\varphi_{\text{плоск}}$ квазилинейно зависит от дальности R , пропорциональной номеру пикселя в строке интерферограммы:

$$\varphi_{\text{плоск}}(R) \approx K_{\text{плоск}}(B_{\perp}, f_1, f_1 - f_2)R, \quad (1)$$

где $K_{\text{плоск}}$ – коэффициент квазилинейной зависимости, зависящий от рабочих частот f_1 и f_2 радиолокатора, используемых при съемке двух изображений, и перпендикулярной базы B_{\perp} – проекции вектора пространственной базы на нормаль к вектору визирования.

Фаза плоского рельефа вычитается из сигнала интерферограммы для вычленения топографической составляющей фазы. При этом, если $K_{\text{плоск}}$ определен неточно, на интерферограмме остается паразитный квазилинейный набег фазы в направлении дальности. Паразитный набег фазы может также наблюдаться в направлении азимута (вдоль столбца интерферограммы). Он вызван малыми (сантиметровыми) изменениями величины абсолютной погрешности определения параллельной пространственной базы.

Топографическая фаза $\varphi_{\text{моно}}$ квазипропорциональна высоте h рельефа земной поверхности. При этом коэффициент пропорциональности $K_{\text{моно}}$ определяется величиной перпендикулярной базы B_{\perp} и рабочей частотой f_2 радиолокатора при съемке второго изображения:

$$\varphi_{\text{моно}}(h) \approx K_{\text{моно}}(B_{\perp}, f_2)h. \quad (2)$$

Таким образом, в случае неточного знания величины пространственной базы ЦМР в результате интерферометрической обработки содержит мультипликативную ошибку и паразитный набег высоты вдоль направлений дальности и азимута.

Основным подходом к уточнению пространственной базы является сравнение полученной ЦМР с опорной информацией о рельефе. Паразитный набег высоты оценивается путем соотнесения с опорой высот в пикселях ЦМР, имеющих различное положение по дальности и азимуту. Мультипликативная ошибка выявляется путем сравнения ширины диапазона высот на полученной ЦМР с шириной диапазона высот опоры [3].

Указанный подход имеет недостаток, связанный с тем, что отличия полученной ЦМР от опоры могут быть вызваны не только погрешностью базы, но и ошибками развертывания фазы интерферограммы, которое заключается в восстановлении истинного диапазона значений топографической фазы из отсчетов интерферограммы, принадлежащих диапазону от $-\pi$ до π радиан,

путем прибавления к каждому из них некоторого целого количества фазовых периодов (2π радиан) [4]. Кроме того, в работе [5] показано, что в наиболее сложных случаях для правильного развертывания фазы может понадобиться привлечение опорного рельефа и пересчет его в опорную топографическую фазу. Следовательно, при развертывании фазы уже необходимо с высокой точностью знать пространственную базу и $K_{\text{моно}}$.

Цель настоящей работы – построение алгоритмов высокоточной оценки $K_{\text{плоск}}$ и $K_{\text{моно}}$ по интерферограмме, не прошедшей процедуру развертывания фазы. При этом уточнение $K_{\text{плоск}}$ и $K_{\text{моно}}$ должно выполняться независимо, поскольку на точности $K_{\text{моно}}$ отражаются только погрешности B_{\perp} , а на точности $K_{\text{плоск}}$ – еще и нестабильность рабочей частоты радиолокатора, из-за которой высока погрешность определения $f_1 - f_2$.

Предварительное уточнение фазы плоского рельефа

Перед уточнением B_{\perp} и $K_{\text{моно}}$ нужно добиться, чтобы хотя бы на небольшом фрагменте интерферограммы величина паразитного набег фазы по дальности и азимуту была пренебрежимо мала. Поэтому необходимо выполнить предварительное уточнение фазы плоского рельефа.

Для уточнения следует вычлнить из сигнала интерферограммы остаточную фазу опорного рельефа, определяющую паразитный набег. Для этого авторы предлагают размыть и проредить интерферограмму до разрешения опорной низкодетальной ЦМР, а затем выполнить вычитание фазы опорного рельефа.

Для размытия может применяться любой сглаживающий фильтр, например, фильтр Гаусса. Ключевой особенностью является его применение не к фазе φ , а к комплексному сигналу $e^{j\varphi}$:

$$\varphi_{\text{разм } mn} = \arg \left(\sum_k \sum_l G_{kl} e^{j\varphi_{m+k, n+l}} \right), \quad (3)$$

где G – фильтр Гаусса.

Прореженная интерферограмма с вычтенной фазой опорного рельефа формируется следующим образом:

$$\hat{\varphi}_{mn} = \arg e^{j(\varphi_{\text{разм } [mK_y], [nK_x]} - \varphi_{\text{моно}}(h_{on mn}))}, \quad (4)$$

где $\hat{\varphi}$ – фаза на прореженной интерферограмме, $[x]$ – операция округления x до ближайшего целого, $\varphi_{\text{моно}}(h_{on mn})$ – фаза опорного рельефа $h_{on mn}$.

Размытие интерферограммы позволяет удалить топографическую фазу, вызванную мелкими деталями рельефа, а вычитание $\varphi_{\text{моно}}(h_{on mn})$ – удалить топографическую фазу, вызванную крупными элементами рельефа. В результате сигнал на прореженной интерферограмме представляет собой сумму атмосферных искажений, фазы смещений, остаточной фазы плоского рельефа и остаточной низкодетальной топографической фазы.

Остаточная низкодетальная топографическая фаза вызвана погрешностью $\Delta K_{\text{моно}}$ коэффициента пропор-

циональности топографической фазы высоте и представляет собой значительно уменьшенную по амплитуде фазу опорного рельефа $\frac{\Delta K_{mono}}{K_{mono}} \varphi_{mono}(h_{on mn})$. Ее наличие на интерферограмме не позволяет выполнить высокоточную оценку $K_{плоск}$, но в то же время она достаточно мала для того, чтобы выполнить приближенную оценку $K_{плоск}$.

Поскольку развертывание фазы на прореженной интерферограмме не выполнялось, то непрерывная фазовая поверхность не получена, а следовательно, нет возможности выполнить ее аппроксимацию плоскостью. В то же время, если предположить, что разность фаз в соседних пикселях прореженной интерферограммы не превышает половину периода, то можно оценить градиент фазы как:

$$\hat{G}_{mnx} = \arg e^{j(\hat{\varphi}_{m,n+1} - \hat{\varphi}_{mn})}, \quad \hat{G}_{mny} = \arg e^{j(\hat{\varphi}_{m+1,n} - \hat{\varphi}_{mn})}. \quad (5)$$

Поскольку атмосферные искажения, остаточная фаза плоского рельефа и большая часть остаточной топографической фазы носит плавный характер, то оценки \hat{G}_{mnx} и \hat{G}_{mny} будут совпадать с истинным градиентом фазы практически во всех пикселях прореженной интерферограммы, и лишь в малом количестве пикселей оценки будут отличаться от истинного градиента на целое количество периодов. Следовательно, величину паразитного набега фазы можно приближенно оценить по средневзвешенной оценке градиента фазы:

$$G_{cpx} = \frac{\sum_m \sum_n w_{mn} \hat{G}_{mnx}}{\sum_m \sum_n w_{mn}}, \quad G_{cpy} = \frac{\sum_m \sum_n w_{mn} \hat{G}_{mny}}{\sum_m \sum_n w_{mn}}. \quad (6)$$

Веса w_{mn} предлагается задавать в соответствии со средней когерентностью на фрагменте исходной интерферограммы, приходящемся на mn -й пиксель прореженной интерферограммы. Это позволяет отбраковать участки низкой когерентности, в которых вместо сигнала содержится только коррелированный шум, оставшийся после фильтрации. Для большей точности оценки паразитного набега фазы можно считать нулевой когерентность сигнала в участках на исходной интерферограмме, в которых наиболее вероятен фазовый разрыв (т.е. изменение фазы за один пиксель более чем на половину периода). Критерий для выявления таких участков предложен в работе [4].

Предварительная поправка к $K_{плоск}$ определяется следующим образом:

$$\Delta K_{плоск} = \frac{G_{cpx}}{\Delta R}, \quad (7)$$

где ΔR – шаг по дальности на прореженной интерферограмме.

По результатам предварительной оценки паразитного набега фазы прореженная интерферограмма корректируется следующим образом:

$$\hat{\varphi}_{mn}^* = \arg e^{j(\hat{\varphi}_{mn} - G_{cpx}n - G_{cpy}m + \varphi_{mono}(h_{on mn}))}, \quad (8)$$

где $\hat{\varphi}^*$ – фаза на скорректированной интерферограмме, основной составляющей которой является низкодета-

льная топографическая фаза. Также $\hat{\varphi}^*$ включает атмосферные искажения, фазу смещений и малый паразитный набег, оставшийся после предварительной оценки.

Уточнение перпендикулярной пространственной базы

Уточнение K_{mono} предлагается выполнять на основе сравнения статистических характеристик низкодетаальной топографической фазы $\hat{\varphi}^*$ и фазы опорного рельефа.

В результате выполнения предварительного уточнения фазы плоского рельефа паразитный набег фазы $\hat{\varphi}^*$ вдоль строки (столбца) интерферограммы, как правило, не превышает 1-2 периодов. Такая величина набега не позволяет достоверно собрать статистику по всей прореженной интерферограмме, но в малой области радиусом в несколько пикселей набег влияет только на среднее значение фазы $\hat{\varphi}^*$ и практически не влияет на ее среднеквадратическое отклонение (СКО). Аналогичные рассуждения можно провести относительно влияния атмосферных искажений. Поэтому в настоящей работе предлагается сравнивать оценки СКО низкодетаальной топографической фазы и фазы опорного рельефа по малым фрагментам на прореженной интерферограмме.

При вычислении СКО предполагается, что в рамках малого фрагмента разность развернутой низкодетаальной топографической фазы и фазы опорного рельефа колеблется в пределах одного периода. Исходя из этого предположения в рамках каждого малого фрагмента оценивается с точностью до постоянной развернутая топографическая фаза:

$$\hat{\varphi}_{разв kl}^* = \varphi_{mono}(h_{on kl}) + \arg e^{j(\hat{\varphi}_{kl}^* - \varphi_{mono}(h_{on kl}) - \varphi_{cpx mn})}, \quad (9)$$

где $\varphi_{cpx mn} = \arg \left(\sum_{k=m-r}^{m+r} \sum_{l=n-r}^{n+r} e^{j(\hat{\varphi}_{kl}^* - \varphi_{mono}(h_{on kl}))} \right)$, r – радиус

малого фрагмента.

Для сравнения оценок СКО низкодетаальной топографической фазы $\hat{\varphi}^*$ и фазы опорного рельефа вычисляется их отношение:

$$\delta K_{mono mn} = \frac{\sigma_{\hat{\varphi}^* mn}}{\sigma_{on mn}} = \quad (10)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{k=m-r}^{m+r} \sum_{l=n-r}^{n+r} \hat{\varphi}_{разв kl}^{*2}}{(2r+1)^2} - \left(\frac{\sum_{k=m-r}^{m+r} \sum_{l=n-r}^{n+r} \hat{\varphi}_{разв kl}^*}{(2r+1)^2} \right)^2} \div \sqrt{\frac{\sum_{k=m-r}^{m+r} \sum_{l=n-r}^{n+r} \varphi_{mono}^2(h_{on kl})}{(2r+1)^2} - \left(\frac{\sum_{k=m-r}^{m+r} \sum_{l=n-r}^{n+r} \varphi_{mono}(h_{on kl})}{(2r+1)^2} \right)^2},$$

где $\sigma_{\hat{\varphi}^* mn}$ и $\sigma_{on mn}$ – оценки СКО низкодетаальной топографической фазы $\hat{\varphi}^*$ и фазы опорного рельефа, вычисленные по фрагменту с центром в mn -м пикселе прореженной интерферограммы.

Поскольку $\sigma_{\hat{\varphi}^* mn}$ и $\sigma_{on mn}$ оцениваются по малой выборке, погрешность $\delta K_{mono mn}$ достаточно высока. Получить оценку отношения СКО с приемлемой точностью предлагается путем усреднения $\delta K_{mono mn}$ по большому количеству фрагментов. Усреднение допустимо, поскольку B_{\perp} и ее относительная погрешность практически не изменяются за время съемки. При этом следует отбраковать те фрагменты, в которых мало $\sigma_{on mn}$ (меньше порога σ_{min}), поскольку при этом становится велико влияние атмосферных искажений и фазы смещений на значение $\delta K_{mono mn}$. Для повышения точности оценки при усреднении можно учитывать веса w_{mn} , использованные ранее в (6), и значение $\sigma_{on mn}$:

$$\delta K_{mono} = \frac{\sum_{mn, \sigma_{on mn} \geq \sigma_{min}} w_{mn} \sigma_{on mn} \delta K_{mono mn}}{\sum_{mn, \sigma_{on mn} \geq \sigma_{min}} w_{mn} \sigma_{on mn}}. \quad (11)$$

Уточненные значения перпендикулярной пространственной базы B_{\perp}^* и зависящего от нее коэффициента K_{mono}^* пропорциональности топографической фазы высоте рельефа вычисляются следующим образом:

$$B_{\perp}^* = B_{\perp} \delta K_{mono}, \quad K_{mono}^* = K_{mono} \delta K_{mono}. \quad (12)$$

После уточнения B_{\perp} и K_{mono} следует скорректировать фазу опорного рельефа:

$$\varphi_{mono}^*(h_{on kl}) = \varphi_{mono}(h_{on kl}) \delta K_{mono}. \quad (13)$$

При больших относительных погрешностях B_{\perp} и больших перепадах высоты рельефа ширина диапазона значений остаточной топографической фазы в ряде фрагментов может превышать один период. В этом случае неправильно оценивается развернутая низкодетальная топографическая фаза $\hat{\varphi}_{разв}^*$, что негативно отражается на точности δK_{mono} . Поэтому описанную процедуру уточнения B_{\perp} и K_{mono} целесообразно выполнять итерационно, до тех пор, пока значение δK_{mono} не станет близко к единице.

Окончательное уточнение фазы плоского рельефа

Для окончательного уточнения необходимо вычле-

нить из прореженной интерферограммы остаточную фазу плоского рельефа:

$$\hat{\varphi}_{mn}^{**} = \arg e^{j(\hat{\varphi}_{mn}^* - \varphi_{mono}^*(h_{on mn}))}. \quad (14)$$

Помимо остаточной фазы плоского рельефа, $\hat{\varphi}^{**}$ содержит только атмосферные искажения и фазу смещений, поскольку остаточная топографическая фаза устранена на предыдущем этапе. Поэтому $\hat{\varphi}^{**}$ может использоваться для высокоточной оценки величины паразитного набега фазы.

Оценка величины набега на основе усреднения градиента фазы недостаточно точна, поскольку аппроксимация сигнала линейной функцией по среднему градиенту слишком чувствительна к шумам в крайних отсчетах, что для одномерного случая иллюстрирует рис. 1. Гораздо большую устойчивость к шумам в крайних отсчетах проявляет аппроксимация по методу наименьших квадратов (МНК), однако ее реализация для неразвернутой фазы связана с рядом проблем.

В случае развернутой фазы $\hat{\varphi}_{разв}^{**}$ оценка величины паразитного набега по МНК сводится к нахождению псевдорешения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} \varphi_0 + G_x n + G_y m = \hat{\varphi}_{разв mn}^{**} \end{cases} \quad (15)$$

Нахождение псевдорешения в этом случае тривиально и выполняется путем однократного набора статистики по интерферограмме и решения СЛАУ из трех уравнений с тремя неизвестными φ_0 , G_x и G_y .

В случае же неразвернутой фазы $\hat{\varphi}^{**}$ оценка величины паразитного набега по МНК сводится к нахождению псевдорешения системы трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} \arg e^{j(\varphi_0 + G_x n + G_y m - \hat{\varphi}_{mn}^{**})} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Нахождение псевдорешения системы (16) возможно только с помощью численных итерационных методов. При этом на каждой итерации для расчета невязок необходим сбор статистики по прореженной интерферограмме, требующий достаточно большого объема вычислений.

Еще одной проблемой является то, что невязки в системе (16) начинают монотонно уменьшаться только тогда, когда паразитный набег фазы вдоль строки (столбца) интерферограммы становится меньше периода. При большей величине набега невязки остаются практически постоянными из-за периодичности функции $e^{j\varphi}$.

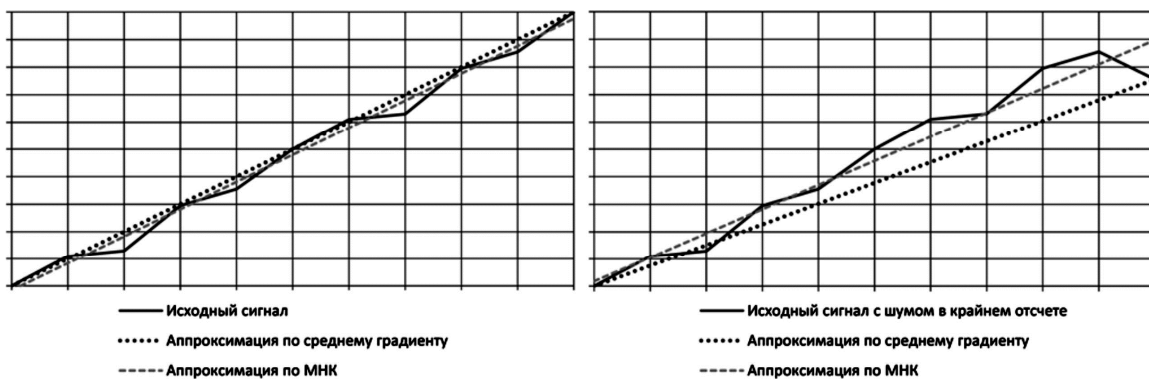
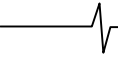


Рис. 1. Влияние шумов в крайних точках на точность аппроксимации по среднему градиенту и по МНК



Таким образом, если паразитный набег фазы превышает период, его оценка с погрешностью, меньшей периода, возможна только путем полного перебора всех возможных значений набег в целое количество периодов.

Если предположить, что в результате предварительной оценки паразитный набег фазы вдоль строки (столбца) интерферограммы не превышает по модулю K_{\max} периодов (как правило, это 1–2 периода), то количество вариантов для перебора составляет $(2K_{\max} + 1)^2$.

Значения G_x и G_y для каждого варианта определяются как:

$$G_x(K_x) = \frac{2\pi K_x}{N-1}, \quad G_y(K_y) = \frac{2\pi K_y}{M-1}, \quad (17)$$

где $K_x, K_y = -K_{\max}, K_{\max}$ – величина паразитного набег вдоль строки (столбца) в периодах, M и N – размеры раstra прореженной интерферограммы.

Значения φ_0 для каждой комбинации $G_x(K_x)$ и $G_y(K_y)$ определяются следующим образом:

$$\varphi_0(K_x, K_y) = \arg \left(\sum_m \sum_n e^{j(\varphi_{mn}^{**} - G_x(K_x)n - G_y(K_y)m)} \right). \quad (18)$$

Среди всех полученных троек $\varphi_0(K_x, K_y)$, $G_x(K_x)$ и $G_y(K_y)$ выбирается такая тройка $\varphi_{0\min 0}$, $G_{x\min 0}$ и $G_{y\min 0}$, для которой минимальна сумма квадратов невязок системы (16). При этом целесообразно проконтролировать, что для выбранной тройки средний квадрат невязок существенно меньше $\pi^2/3$. Значение среднего квадрата невязок, сопоставимое с $\pi^2/3$, говорит о том, что ни один из вариантов не соответствует истинному паразитному наклону (с точностью, меньшей периода) и следует повторить перебор для большего значения K_{\max} .

После успешного выполнения полного перебора становится возможным итерационное приближение к истинному значению паразитного набег.

Итерационное приближение предлагается осуществлять следующим образом. На каждой i -й итерации формируется 9 возможных троек:

$$G_{xi}(K_{xi}) = G_{x\min i-1} + \frac{2\pi K_{xi}}{2^i(N-1)}, \quad (19)$$

$$G_{yi}(K_{yi}) = G_{y\min i-1} + \frac{2\pi K_{yi}}{2^i(M-1)},$$

$$\varphi_{0i}(K_{xi}, K_{yi}) = \arg \left(\sum_m \sum_n e^{j(\varphi_{mn}^{**} - G_{xi}(K_{xi})n - G_{yi}(K_{yi})m)} \right),$$

где $K_{xi}, K_{yi} = -1, 1$.

Из указанных троек выбирается тройка $\varphi_{0\min i}$, $G_{x\min i}$ и $G_{y\min i}$, которая обеспечивает наименьшую сумму квадратов невязок системы (16).

Максимальная величина уточнения паразитного

набег фазы вдоль строки и столбца на каждой последующей итерации сокращается в 2 раза. Итерации прекращаются на i_{\max} -й итерации, когда $2\pi / (2^{i_{\max}} |K_{\text{моно}}^*|)$ становится меньше заданного порога, например, равно $0,2\pi$.

Окончательная поправка к $K_{\text{плоск}}$ определяется как:

$$\Delta K_{\text{плоск}}^* = \Delta K_{\text{плоск}} + \frac{G_{x\min i_{\max}}}{\Delta R}, \quad (20)$$

а уточненное значение коэффициента квазилинейной зависимости фазы плоской земли от дальности определяется как:

$$K_{\text{плоск}}^* = K_{\text{плоск}} + \Delta K_{\text{плоск}}^*. \quad (21)$$

При необходимости можно оценить величину относительной нестабильности рабочей частоты радиолокатора, вычислив $(f_1 - f_2) / f_1$ путем обращения зависимости

$$K_{\text{плоск}}^*(B_{\perp}^*, f_1, f_1 - f_2).$$

Для большей точности оценки $\Delta K_{\text{плоск}}^*$ классический МНК может быть заменен на весовой МНК. Алгоритм окончательного уточнения фазы плоского рельефа при этом не изменится, просто вместо обычной суммы квадратов невязок системы (16) будет вычисляться взвешенная сумма. В качестве весов целесообразно взять w_{mn} , использовавшиеся в (6) при предварительной оценке.

Экспериментальные исследования

Выполнены экспериментальные исследования предложенных выше алгоритмов на натурной информации от космических аппаратов (КА) RadarSat-2 и TerraSAR-X. Примеры результатов работы предложенных алгоритмов представлены на рис. 2-4, где:

а – сигнал φ исходной интерферограммы;

б – сигнал $\hat{\varphi}$ прореженной интерферограммы;

в – сигнал $\arg e^{j(\hat{\varphi}^* - \varphi_{\text{моно}}(h_{\text{он}}))}$ прореженной интерферограммы после предварительного уточнения фазы плоского рельефа;

г – сигнал $\hat{\varphi}^{**}$ прореженной интерферограммы после уточнения перпендикулярной пространственной базы;

д – сигнал прореженной интерферограммы после окончательного уточнения и устранения фазы плоского рельефа (основные составляющие сигнала: фаза смещений и атмосферные искажения).

Цветовая шкала, в которой представлены сигналы, приведена на рис. 5. Черным цветом помечены участки, получившие нулевые веса w_{mn} .

Выполнена оценка точности полученных результатов. Для этого выполнялось высокоточное развертывание фазы и формирование ЦМР с учетом полученных оценок $K_{\text{моно}}^*$ и $K_{\text{плоск}}^*$, а затем традиционным способом оценивались и пересчитывались в фазу паразитный набег высоты на полученной ЦМР и отличие СКО полученной высоты от СКО опорного рельефа. Результаты оценки приведены в табл. 1, из которой видно, что абсолютная погрешность оценки паразитного набег фазы предложенным алгоритмом не превышает $0,12\pi$ радиан, или $0,06$ фазового периода, а погрешность оценки B_{\perp}

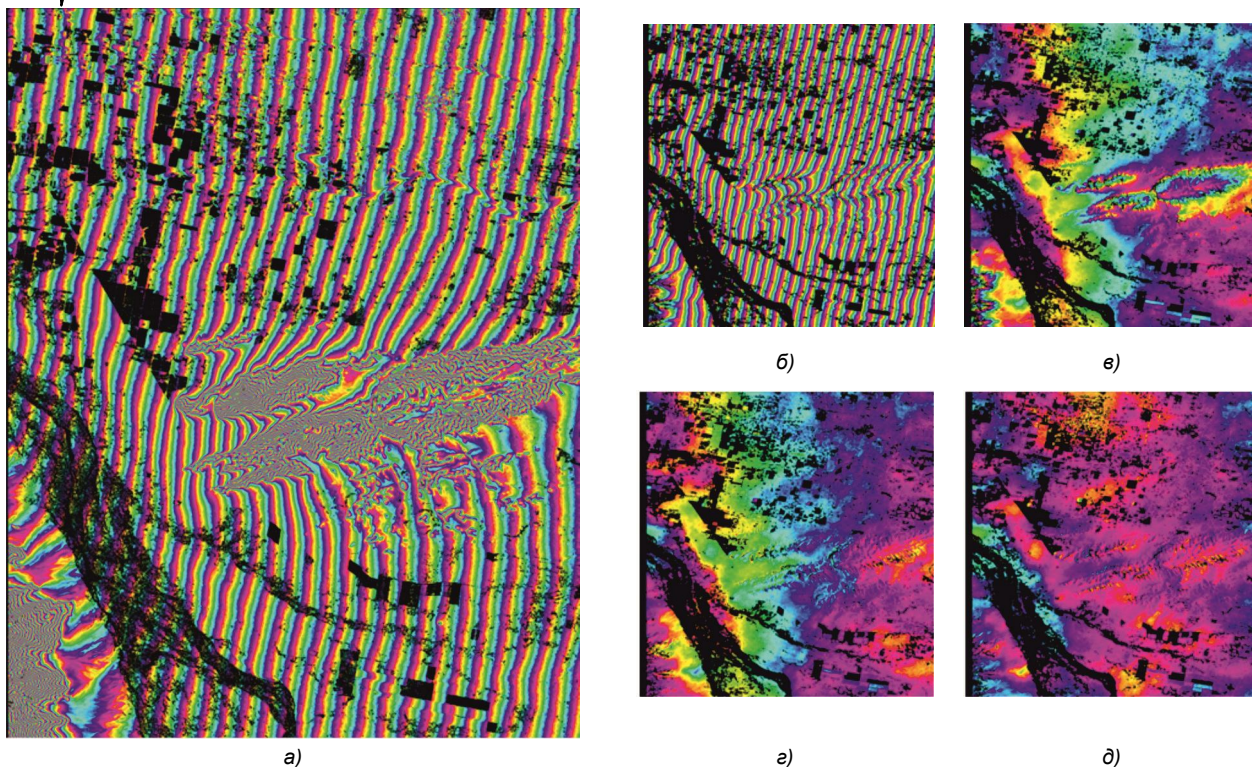


Рис. 2. Результаты уточнения фазы плоского рельефа и перпендикулярной пространственной базы для интерферограммы города Финикс, США, КА RadarSat-2, 4–28 мая 2008 г.

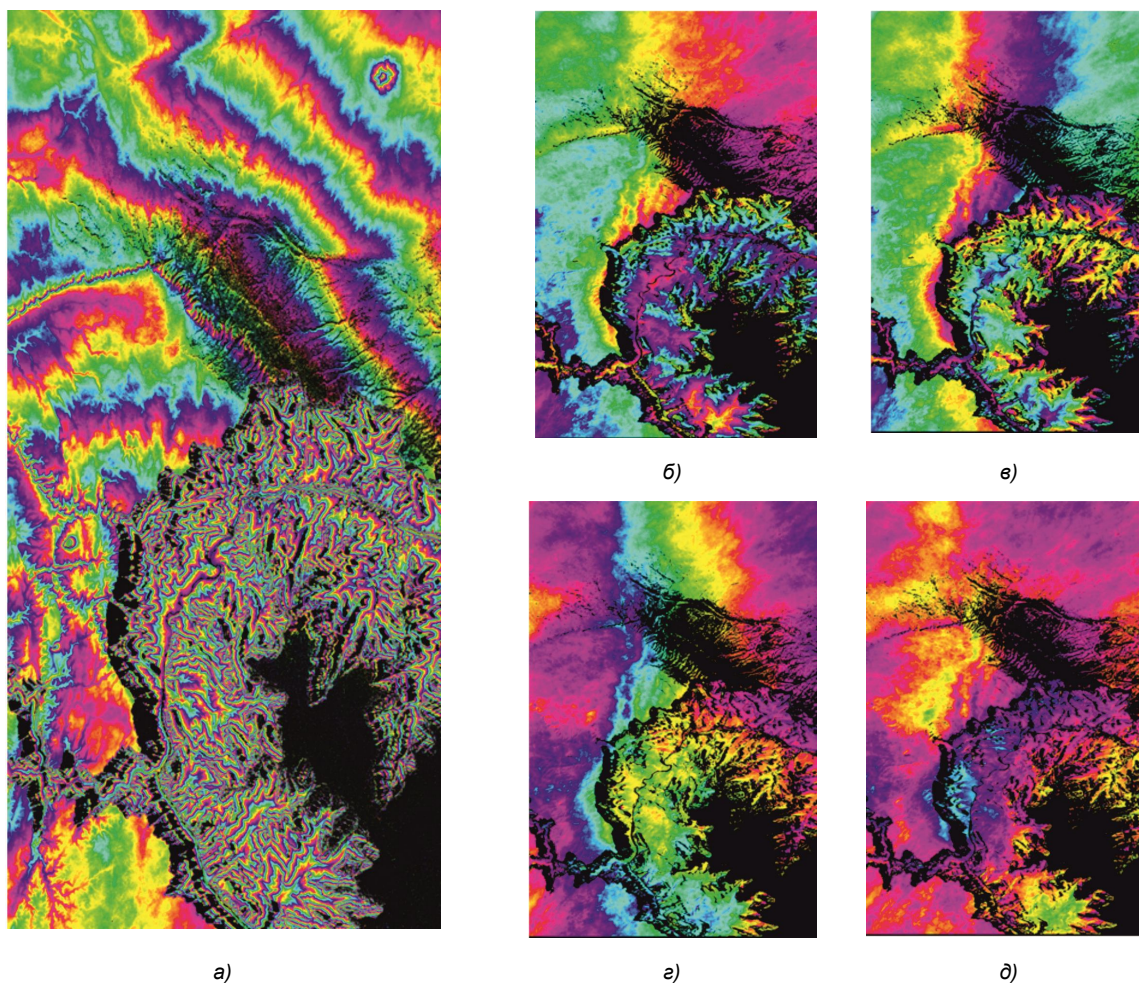
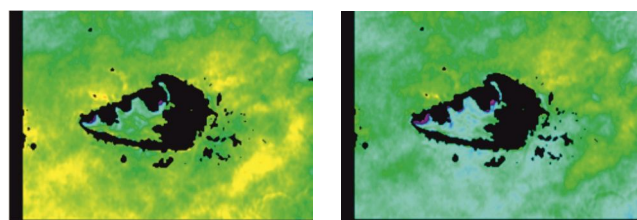
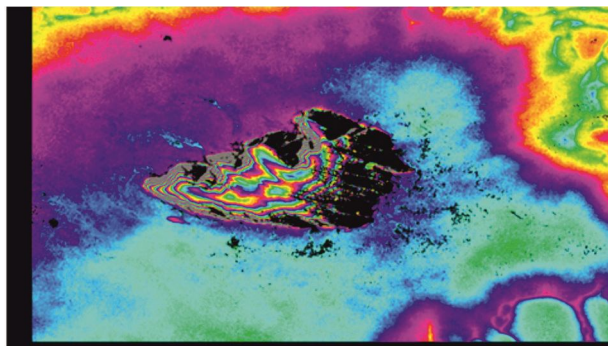
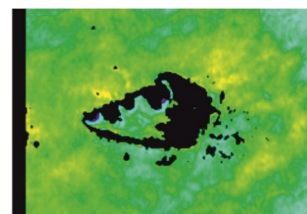
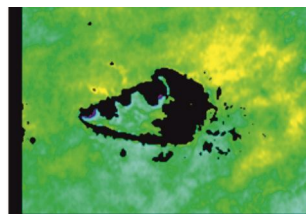


Рис. 3. Результаты уточнения фазы плоского рельефа и перпендикулярной пространственной базы для интерферограммы Большого Каньона, США, КА TerraSAR-X, 10-21 марта 2008 г.



б)

е)



г)

д)

а)

Рис. 4. Результаты уточнения фазы плоского рельефа и перпендикулярной пространственной базы для интерферограммы заповедника Улуру, Австралия, КА TerraSAR-X, 12–23 февраля 2009 г.



Рис. 5. Цветовая шкала представления сигнала интерферограммы

Таблица 1. Остаточный паразитный набег высоты и отличия СКО высоты от СКО опорного рельефа из-за погрешности оценки перпендикулярной интерферометрической базы

Параметр	Интерферограмма		
	Финикс	Большой Каньон	Улуру
Остаточный паразитный набег высоты по дальности (вдоль строки), м	1,8	-0,2	1,5
Остаточный паразитный набег высоты по азимуту (вдоль столбца), м	-2,2	-3,1	0,6
Остаточный паразитный набег фазы по дальности, радиан	-0,097π	0,003π	-0,081π
Остаточный паразитный набег фазы по азимуту, радиан	0,119π	0,043π	-0,032π
СКО высоты опорного рельефа, м	81,5	393,8	65,9
СКО высоты на полученной ЦМР, м	81,9	397,8	66,5
СКО фазы опорного рельефа, радиан	4,41π	5,43π	3,56π
СКО развернутой топографической фазы, радиан	4,43π	5,48π	3,59π

приводит к отличию СКО топографической фазы от СКО фазы опорного рельефа не более чем на 0,05π радиан, или 0,025 фазового периода.

Заключение

Предложенные алгоритмы позволяют до этапа развертывания фазы интерферограммы оценить величину фазы плоского рельефа и устранить ее паразитный набег с точностью до 0,06 фазового периода, а также оценить перпендикулярную интерферометрическую базу и уравнивать СКО топографической фазы и фазы опорного рельефа с точностью до 0,025 фазового периода. За счет этого становится возможным привлечение опорного рельефа для более точного развертывания фазы.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под. ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

2. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 72-79.

3. Ren K., Prinnet V., Shi X., Wang F. Comparison of satellite baseline estimation methods for interferometry applications // Proc. of IGARSS'03. 2003. Vol. 6. P. 3821-3823.

4. 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.

5. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка высокодетальной информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 206-207.