

УДК 528.71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
МЕТОДА МАЛЫХ БАЗОВЫХ ЛИНИЙ НА ПРИМЕРЕ
МОДУЛЯ SBAS ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА SARSCAPE
И ДАННЫХ PCA ASAR/ENVISAT И PALSAR/ALOS
ЧАСТЬ 1. КЛЮЧЕВЫЕ МОМЕНТЫ МЕТОДА**

А. А. Феоктистов¹, А. И. Захаров², М. А. Гусев¹, П. В. Денисов¹

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО “Российские космические системы”

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН

Статья получена 25 августа 2015 г.

Аннотация. Представлено детальное описание ключевых моментов метода малых базовых линий. Отмечены основные особенности алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета SARscape.

Ключевые слова: метод малых базовых линий, PCA, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, граф связи, атмосферный фазовый экран, ЦМР.

Abstract: Detailed description of small baselines technique is presented. Basic features of SBAS algorithm implementation in the SARscape package are described.

Key words: small baselines technique, SBAS, SAR, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, connection graph, atmospheric phase screen, DEM.

1. Введение

Поскольку созданию перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в планах Роскосмоса уделено особое внимание, исследование новых эффективных путей обработки радиолокационной информации, в том числе интерферометрической [1-2] и дифференциальной интерферометрической [3-4] обработки, является актуальным. Известно, что возможности классических методов интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки

данных PCA при измерении рельефа и подвижек отражающей поверхности существенно ограничены эффектами пространственной и временной декорреляции и атмосферных искажений [5]. Влияние указанных искажающих факторов позволяют резко ослабить интенсивно развиваемые современные модификации интерферометрических методов (такие, как метод постоянных рассеивателей, PS [6-7], и метод малых базовых линий, SBAS [8]), основанные на совместном использовании длинных временных серий изображений.

В рамках метода PS задача выявления подвижек отражающей поверхности и измерения рельефа решается для ограниченного набора пикселей с достаточно сильным устойчивым отраженным сигналом (постоянных рассеивателей), наблюдаемых в большом количестве на территориях типа городской застройки. В [9-10] представлено описание ключевых моментов двух наиболее известных вариантов метода PS и результатов исследования его возможностей на примере модуля PS программного пакета SARscape и тестового набора данных PCA ASAR/ENVISAT.

В данной работе представлен аналогичный обзор ключевых моментов метода SBAS (часть 1) и результатов комплексных экспериментальных исследований возможностей этого метода на примере модуля SBAS программного пакета SARscape, двух тестовых наборов данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS и данных подспутниковых GPS-измерений для одной точки, находящейся в пределах области "покрытия" земной поверхности изображениями PCA (часть 2).

Необходимо отметить, что в рамках данного метода интерферограммы формируются только для тех пар изображений, для которых величины нормальных компонент базовой линии и временных интервалов между съемками опорного и парного изображений интерферометрической пары (временных компонент базовой линии) достаточно малы, т.е. удовлетворяют заданным пороговым ограничениям (отсюда возникает название метода). Благодаря такому критерию формирования интерферометрических пар в методе SBAS снижается мешающее влияние пространственной и временной

декорреляции сигналов интерферометрической пары. Необходимо отметить также, что в рамках метода SBAS (в отличие от метода PS) сохраняется возможность формирования пространственно "плотных" выходных продуктов.

2. Ключевые моменты метода SBAS

2.1. Формирование наборов интерферограмм

Алгоритм основан на совместной обработке длинных временных серий из $N + 1$ изображения одной территории, полученных в повторяющейся геометрии съемки в хронологически упорядоченные моменты времени (t_0, \dots, t_N) . Во временной серии выбирается опорное изображение серии. Каждое из N оставшихся изображений совмещается с субпиксельной точностью с опорным изображением серии. Вводятся пороговые ограничения на величины нормальных и временных компонент базовой линии [8].

Необходимо отметить, что:

- при проведении расчета интерферограмм одновременно выполняется процедура выглаживания интерферограмм, в рамках которой осуществляется компенсация топографической компоненты фазы, связанной с высотой; значения высоты берутся из опорной цифровой модели рельефа (ЦМР) [5];
- предполагается, что для каждого изображения серии сформирована хотя бы одна интерферограмма; в противном случае изображение исключается, а набор хронологически упорядоченных моментов времени (t_0, \dots, t_N) соответствующим образом корректируется;
- общее количество сформированных интерферограмм принимается равным M ;
- из-за введенных пороговых ограничений серия изображений может оказаться разбитой на несколько не связанных наборов (SBAS-наборов) – интерферограммы для пар изображений из не связанных наборов отсутствуют [8].

2.2. Развертка фазы

В рамках метода SBAS используются развернутые значения фазы, для расчета которых запускается процедура так называемой развертки фазы, так как исходные значения фазы на интерферограмме лежат в диапазоне $[0, 2\pi]$, поскольку фаза гармонического сигнала может быть измерена только по модулю 2π [5]. В рамках процедуры развертки неизвестные компоненты фазы, кратные 2π , восстанавливаются. При этом используются только те пиксели, которые имеют когерентность выше заданного порогового значения, что позволяет исключить сильно зашумленные пиксели, которые не содержат существенной фазовой информации и могут оказать отрицательное воздействие на конечные результаты процедуры развертки. В работе [8] был исследован предложенный в [11] метод, который разработан для данных с высокой пространственной разреженностью. В этом методе неинформативные пиксели, находящиеся в областях с низкой когерентностью, "заполняются" на этапе интерполяции (осуществляемой в рамках триангуляции Delaunay [8]), начиная с данных с более высоким уровнем когерентности.

2.3. Устранение фазового пьедестала на интерферограммах

Для устранения фазового пьедестала (аддитивной константы), который по определению имеется у каждой интерферограммы [5], на изображении выбирается так называемый опорный пиксель, расположенный в области, которая может считаться стабильной; из фазы каждого пикселя интерферограммы вычитается одно и то же число (разное у разных интерферограмм), в результате чего фаза опорного пикселя должна оказаться равной нулю на всех интерферограммах.

2.4. Формулировка проблемы для случая одного SBAS-набора

Рассмотрим интерферограмму j ($j = 1, \dots, M$) в измеряемых в единицах пикселей координатах по азимуту и наклонной дальности (x, r) ; пусть интерферограмма построена для двух изображений, полученных в

моменты времени t_A и t_B . Значение фазы в точке (x, r) описывается выражением:

$$\delta\varphi_J(x, r) = \varphi_J(t_B, x, r) - \varphi_J(t_A, x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения РСА; $d(t_B, x, r)$ и $d(t_A, x, r)$ – накопленная деформация в направлении наклонной дальности (line-of-sight, LOS) для моментов времени t_B и t_A ; момент времени t_0 принимается за начало отсчета, вследствие чего $d(t_0, x, r) = 0$.

Тогда:

$$d(t_i, x, r) \quad (2)$$

$$\varphi(t_i, x, r) \quad (3)$$

суть искомые временные серии накопленной деформации и соответствующие фазы ($i = 1, \dots, N$).

На данном этапе из рассмотрения полностью исключены:

- эффекты пространственной и временной декорреляции и влияние теплового шума;
- фазовые ошибки, возникшие при удалении топографических компонент фазы – из-за ошибок в значениях высоты в опорной ЦМР;
- атмосферные фазовые искажения.

Эти упрощения будут устранены позже (см. раздел 2.6).

Поскольку последующий анализ проводится в попиксельном варианте, для простоты зависимость значений фазы от переменных (x, r) в последующих выражениях явно не выписывается. Вводятся две горизонтальные (транспонированные, символ T) вектор-строки. Первая содержит N

неизвестных значений фазы, связанных с деформацией рассматриваемого пикселя:

$$\vec{\varphi}^T = [\varphi(t_1), \dots, \varphi(t_N)] \quad (4)$$

Вторая содержит M известных значений фазы из рассчитанных интерферограмм:

$$\vec{\delta\varphi}^T = [\delta\varphi_1, \dots, \delta\varphi_M] \quad (5)$$

Далее вводятся две вспомогательные так называемые индексные вектор-строки:

$$\vec{IE}^T = [IE_1, \dots, IE_M] \quad \vec{IS}^T = [IS_1, \dots, IS_M] \quad (6)$$

элементами которых являются порядковые номера для времени съемок опорных и парных изображений интерферометрических пар, используемых при расчете каждой из M интерферограмм.

Очевидно, что:

$$\delta\varphi_J = \varphi(t_{IE_J}) - \varphi(t_{IS_J}) \quad (7)$$

Выражение (7) определяет систему из M уравнений для N неизвестных, которая может быть представлена в матричном виде:

$$\widehat{A}\vec{\varphi} = \vec{\delta\varphi} \quad (8)$$

где \widehat{A} – матрица размером $M \times N$, причем для элементов $A(j, i)$ любой строки j имеет место:

$$\begin{aligned}
 A(j, i) &= 1 && \text{для } i = IE_j, \\
 A(j, i) &= -1 && \text{для } i = IS_j, \\
 A(j, i) &= 0 && \text{в противном случае.}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Например, для случая серии из четырех изображений и набора из двух интерферограмм $\delta\varphi_1 = \varphi_3 - \varphi_1$ и $\delta\varphi_2 = \varphi_2 - \varphi_0$ матрица \hat{A} будет иметь следующий вид:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}
 \tag{10}$$

(в соответствии с (4) в матрице \hat{A} отсутствует столбец, соответствующий моменту времени t_0).

Очевидно – вид матрицы \hat{A} определяется набором сформированных интерферограмм. Утверждается [8], что если все изображения серии принадлежат одному единственному SBAS-набору, то $M \geq N$, а ранг матрицы \hat{A} равен N . Поэтому решение матричного уравнения (8) (методом наименьших квадратов) может быть представлено в виде:

$$\vec{\varphi} = \hat{A}^\# \vec{\delta\varphi}, \quad \hat{A}^\# = (\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T
 \tag{11}$$

Замечание. При описании процедур, реализующих данную операцию, обычно используется термин "инверсия" [8,12].

2.5. Формулировка проблемы для случая нескольких не связанных SBAS-наборов

В случае, когда данные принадлежат нескольким не связанным между собой SBAS-наборам, ранг матрицы \hat{A} оказывается равным:

$$N - L + 1
 \tag{12}$$

где L – общее количество SBAS-наборов. В этом случае матрица $\widehat{\mathbf{A}}^T \widehat{\mathbf{A}}$ в (11) становится сингулярной (с равным нулю определителем), а система уравнений (8) имеет бесконечное множество решений [8].

Известно [13], что простое решение возникшей проблемы может быть реализовано методом сингулярного разложения матрицы (*SVD*). Данный подход позволяет получить оценку для псевдообратной матрицы, однако показано, что это может привести к значительным нарушениям непрерывности для получаемой временной серии совокупной деформации, следствием чего будет физически бессмысленный результат [8].

С целью получения физически более корректного решения матричное уравнение (8) модифицируется. Неизвестные значения фазы в (4) заменяются значениями средней скорости смещений между соседними съемками, благодаря чему можно записать такую вектор-строку:

$$\vec{v}^T = \left[v_1 = \frac{\varphi(t_1)}{t_1 - t_0}, \dots, v_N = \frac{\varphi(t_N) - \varphi(t_{N-1})}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (13)$$

Вместо (7) запишем новое уравнение:

$$\delta\varphi_J = \sum_{k=IS_J+1}^{IE_J} (t_k - t_{k-1})v_k \quad (14)$$

а вместо (8) запишем новое матричное уравнение:

$$\widehat{\mathbf{B}}\vec{v} = \overline{\delta\varphi} \quad (15)$$

где $\widehat{\mathbf{B}}$ – матрица размером $M \times N$, причем для элемента $B(j, k)$ имеет место:

$$\begin{aligned} B(j, k) &= (t_k - t_{k-1}) \text{ для } IS_j + 1 \leq k < IE_j \\ B(j, k) &= 0 \text{ в противном случае} \end{aligned} \quad (16)$$

В данном случае использование метода SVD не приводит к возникновению больших разрывов в окончательном решении [8].

В рамках представленной формулировки проблемы далее вводится "гладкая" полиномиальная временная модель для изменения фазового сигнала пикселей во времени. При этом соответствующая матрица становится не сингулярной и допускает простое решение через ее обращение (инверсию).

Например, предполагая кубическую зависимость для изменения фазового сигнала во времени:

$$\varphi(t_i) = \bar{v} \cdot (t_i - t_0) + \frac{1}{2} \bar{a} \cdot (t_i - t_0)^2 + \frac{1}{6} \Delta \bar{a} \cdot (t_i - t_0)^3 \quad (17)$$

с тремя неизвестными параметрами $\bar{v}, \bar{a}, \Delta \bar{a}$ для каждого пикселя (средней скорости, среднего ускорения и средней скорости изменения ускорения, соответственно) вместо (15) нетрудно получить новое матричное уравнение:

$$\widehat{\mathbf{D}} \widehat{\mathbf{M}} \vec{p} = \overline{\delta \varphi} \quad (18)$$

Вектор смещений \vec{p} и матрица $\widehat{\mathbf{M}}$ имеют следующий вид:

$$\vec{p}^T = [\bar{v}, \bar{a}, \Delta \bar{a}] \quad (19)$$

$$\widehat{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} t_1 - t_0 & \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} & \frac{(t_1 - t_0)^3}{6} \\ t_2 - t_1 & \frac{(t_2 - t_0)^2}{2} & \frac{(t_2 - t_0)^3}{6} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_N - t_{N-1} & \frac{(t_N - t_0)^2}{2} & \frac{(t_N - t_0)^3}{6} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Матрица $\widehat{\mathbf{D}}$ имеет размер $M \times N$, элемент $D(j, k)$ которой равен:

$$\begin{aligned}
 D(j, k) &= 1 \quad \text{для } k = IE_j \\
 D(j, k) &= -1 \quad \text{для } k = IS_j \\
 D(j, k) &= 0 \quad \text{в противном случае}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

При этом матричное уравнение (18) сводится к системе из M линейных уравнений с тремя неизвестными \bar{v} , \bar{a} , $\Delta\bar{a}$, достаточно элементарное решение которой описывается соотношением типа (11).

2.6. Учет фазовых искажений, исключенных из рассмотрения в разделе 2.4

В разделе 2.4 анализировалось упрощенное уравнение для фазы (1), в котором учитывались только фазовые компоненты, связанные с накопленной деформацией в направлении наклонной дальности. В более реалистичном варианте выражение для фазы может быть представлено в виде [8]:

$$\begin{aligned}
 \delta\varphi_J(x, r) &= \varphi_J(t_B x, r) - \varphi_J(t_A x, r) \approx \\
 &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B x, r) - d(t_A x, r)] + \frac{4\pi B_{\perp J} \Delta h}{\lambda r \sin\vartheta} + \\
 &+ [\Phi_{atm}(t_B x, r) - \Phi_{atm}(t_A x, r)] + \Delta n_j
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

В правой части уравнения (22) присутствуют три дополнительных компоненты фазы по сравнению с (1). Первая из них, т. е. $(4\pi/\lambda)(B_{\perp J} \Delta h / r \sin\vartheta)$, возникает при удалении топографической компоненты из-за возможной ошибки Δh в значении высоты из опорной ЦМР (так называемая остаточная высота [9-10]); влияние этого артефакта зависит от нормальной компоненты базовой линии $B_{\perp J}$, расстояния цели от датчика r и от угла падения ϑ .

Вторая компонента $[\Phi_{atm}(t_B x, r) - \Phi_{atm}(t_A x, r)]$ возникает из-за возможных атмосферных изменений между съемками в моменты времени t_A и

t_B и часто называется атмосферным фазовым экраном [9-10].

Наконец, последняя компонента Δn_j описывает фазовый вклад, вызванный пространственной и временной декорреляцией (в рамках метода SBAS влияние этих эффектов минимизируется за счет пороговых ограничений на размеры базовых линий) и эффектами теплового шума.

Необходимость учета дополнительных факторов приводит к достаточно очевидному обобщению матричного уравнения (18):

$$\widehat{D} \widehat{M} \vec{p} + \Delta h \cdot \vec{C} + \vec{\varphi}_A + \overline{\Delta n}_j = \overline{\delta \varphi} \quad (23)$$

где:

$$\vec{C}^T = [(4\pi/\lambda)(B_{\perp 1}/r \sin \vartheta), \dots, (4\pi/\lambda)(B_{\perp M}/r \sin \vartheta)] \quad (24)$$

$$\vec{\varphi}_A^T = [\varphi_{A1}, \dots, \varphi_{AM}] \quad (25)$$

$$\overline{\Delta n}_j^T = [\Delta n_1, \dots, \Delta n_M] \quad (26)$$

Для устранения атмосферных искажений выполняется атмосферная коррекция; при проведении расчетов используются процедуры низкочастотной пространственной (одновременно подавляющие шумовую компоненту Δn_j) и высокочастотной временной фильтрации, разработанные в рамках метода PS [6-7, 9-10].

В итоге матричное уравнение (23) сводится к системе из M линейных уравнений с теми же тремя неизвестными $\vec{v}, \vec{a}, \Delta \vec{a}$, что и в случае (18), плюс остаточная высота Δh ; решение также может быть получено в виде (11).

Достаточно детальное описание одного из вариантов практической реализации описанного метода представлено в следующем разделе – на примере алгоритма, реализованного в модуле SBAS программного пакета SARscape [12].

3. Основные особенности алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета SARscape

3.1. Формирование графа связи

На начальном этапе обработки определяется комбинация пар изображений для последующего формирования интерферограмм. Очевидно, что для $N + 1$ изображений теоретически максимальное количество интерферограмм равно $(N + 1) * N/2$. Основная задача, решаемая на данном этапе, состоит в предварительном выборе комбинации наиболее "надежных" интерферограмм, которые, после ряда уточнений, используются в блоках инверсии в качестве входных измерений [12].

В зависимости от типа датчика рекомендуется устанавливать пороговое значение для нормальной компоненты базовой линии в диапазоне 45-50% от критической величины. Выбор порогового значения для временной базовой линии зависит от исследуемой территории. Для засушливых областей оно может быть выбрано вплоть до 500-800 дней (приблизительно 2 года или больше). Для влажной области с плотной растительностью этот параметр должен быть значительно уменьшен, поскольку когерентность между парами с большим временным разделением будет отсутствовать. В некоторых случаях следует выбирать только один сухой сезон. Необходимо иметь в виду, что возможна ситуация, когда когерентность имеет более высокие значения при интервале в один год (тот же сезон), чем при интервале в месяц.

Учитывается также разность центральных частот доплеровских центроидов опорного и парного изображений интерферометрических пар. Те пары, для которых разность центральных частот доплеровских центроидов больше, чем полоса доплеровских частот эхо-сигнала, автоматически исключаются.

Для получения более надежных результатов стандартное применение модуля SBAS требует, чтобы все SBAS-наборы, не связанные с основным, были отвергнуты. В случае необходимости (активацией опции Allow

Disconnected Blocks) модуль SBAS может объединять все SBAS-наборы; при этом для возможных промежутков времени между отдельными частями серии (соответствующими разным SBAS-наборам) предусмотрено использование интерполяции на основе временной модели для изменения фазового сигнала во времени, выбираемой в рамках процедуры первой инверсии, раздел 3.5 (линейной, квадратической или кубической).

Предусмотрена возможность использования одного из двух вариантов развертки: стандартной 2D-развертки или 3D-развертки. Считается, что метод 3D-развертки более надежен, поскольку в этом случае при проведении развертки для участков интерферограмм с низкой когерентностью дополнительно используется временная информация. Однако отмечается, что для эффективного использования этого метода должно быть доступно как минимум 12-15 съемок; в противном случае есть риск того, что процесс может не сойтись к правильному решению [12].

На выходе процедуры формируется так называемый граф связи. В координатах (1) дата съемки и (2) относительное положение (значение нормальной компоненты расстояния между орбитами каждой из съемок и орбитой опорного изображения серии) отображаются вершины графа (соответствующие отдельным съемкам) и ребра (связи), соответствующие совокупности выбранных пар изображений. Отображаются также все исключенные снимки, которые не были использованы при формировании ни одной интерферограммы. Существует ряд требований, предъявляемых к общей конфигурации графа, в случае не выполнения которых рекомендуется скорректировать входные параметры обработки и провести повторный запуск процедуры [12].

3.2. Формирование рабочей области

Если зона деформации земной поверхности известна и ее размеры значительно меньше размеров кадра, рекомендуется сосредоточить внимание только на этой области, что позволит значительно сократить время обработки.

Размеры рабочей области рекомендуется выбирать несколько больше, чем реальные размеры зоны деформации, так как используемые при проведении обработки фильтры могут сформировать "пограничные" эффекты. Среди этих фильтров особое внимание следует обратить на низкочастотный пространственный фильтр, используемый при проведении атмосферной коррекции; его окно на земной поверхности может иметь размеры вплоть до нескольких км (обычно по умолчанию 1,2 км); по этой причине должна быть предусмотрена буферная зона в 2-3 км вокруг реальной области интереса [12].

3.3. Формирование интерферограмм

На этом этапе в соответствии со значениями параметров по умолчанию, а также значениями параметров, заданными на двух предыдущих этапах обработки, последовательно выполняются процедуры: (1) расчета набора свернутых интерферограмм, (2) фильтрации интерферограмм и (3) развертки фазы с формированием выходного набора развернутых интерферограмм (элементарные сведения по этим вопросам могут быть найдены, например, в [5]).

Перед запуском определяются параметры усреднения интерферограмм; рекомендуется, чтобы получаемый на выходе пиксель имел почти квадратную форму с размерами, примерно равными худшему из разрешений по дальности и азимуту.

Кроме того, выбирается значение еще одного важного параметра – уровня декомпозиции (Decomposition level, DCL), минимальное значение которого равно нулю. При каждом увеличении уровня декомпозиции на единицу происходит формирование еще одной дополнительной свернутой интерферограммы с пониженной частотой выборки, при этом каждая новая интерферограмма "сжимается" в три раза по каждой координате по сравнению с предыдущей. Развертка фазы интерферограмм выполняется, начиная с интерферограмм с самой низкой частотой выборки. При проведении развертки интерферограмм, имеющих более высокое пространственное разрешение,

используются предыдущие результаты развертки, что, как утверждается, обеспечивает возможности достаточно эффективного устранения многочисленных артефактов, обычно возникающих в рамках процедуры выглаживания интерферограмм при значительной разности в пространственном разрешении опорной ЦМР и данных РСА. Детали, потерянные при развертке файлов с пониженной частотой выборки, восстанавливаются на последующих шагах с дополнительным использованием интерферограмм с более высокой частотой выборки (возвращающих исходное разрешение). Критически важный момент – пониженная частота выборки не должна приводить к "слипанию" соседних интерференционных полос, поскольку в этом случае при последующем использовании файлов с повышенной частотой выборки используемый алгоритм не способен восстановить точное исходное число циклов фазы 2π .

Предусмотрена возможность изменения сделанного ранее, раздел 3.1, выбора между методами 2D-развертки и 3D-развертки.

При проведении фильтрации интерферограмм используется один из трех фильтров: Adaptive, Voxcar, Goldstein. Первые два ориентированы на пары изображений с высоким уровнем когерентности, тогда как фильтр Goldstein особенно эффективен в случае сильно зашумленных интерферограмм (практические возможности этого фильтра были достаточно детально исследованы ранее при анализе зоны землетрясения в Японии [3-4]).

Важнейшая задача, решаемая на этапе формирования интерферограмм – обеспечить условия для формирования на выходе наилучшего набора развернутых интерферограмм, при этом, если необходимо, следует повторно "подстроить" заново наиболее существенные параметры обработки. Для успешного решения этой задачи рекомендуется провести детальный анализ в диалоговом режиме:

- наборов свернутых интерферограмм – после проведения фильтрации и
- наборов развернутых интерферограмм.

Этот анализ имеет фундаментальное значение. С его помощью выявляются различные нежелательные артефакты, проблемы с данными (например, неточные параметры орбит), некогерентные пары и т.д.. Кроме того, может быть установлено (или подтверждено) местоположение участков с подвижками отражающей поверхности [12].

3.3.1. Анализ свернутых интерферограмм. При проведении анализа свернутых интерферограмм должны быть выявлены интерферограммы, характеризующиеся наличием большого количества параллельных интерференционных полос (скорее всего, свидетельствующих о значительных погрешностях в орбитальных параметрах), а также "размытостью" в направлении наклонной дальности (обычно являющейся следствием недостаточно корректной работы процедуры совмещения для этого направления). Если в наборе обнаружено только несколько таких интерферограмм, они могут быть удалены. В противном случае, если таких интерферограмм много, рекомендуется установить причину возникновения проблемы, а соответствующий этап обработки должен быть выполнен заново с самого начала.

Также должны быть выявлены интерферограммы с очень низкой когерентностью (с полным отсутствием четких интерференционных полос). Стандартная причина – слишком большая временная (сказываются фенологические изменения) и/или пространственная базовая линия. Такие пары должны быть удалены; второй вариант – усилить степень фильтрации шумов соответствующим изменением параметров фильтра. Она должна быть усилена, если слишком много интерферограмм демонстрируют наличие областей с низкой когерентностью и ослаблена, если было потеряно необходимое пространственное разрешение.

Для выбора наилучших значений параметров в ряде случаев рекомендуется дополнительно провести обычную интерферометрическую обработку отдельных представительных пар с использованием стандартных инструментов интерферометрии (модуль INSAR).

Выявляются также интерферограммы с эффектами, связанными с проявлением атмосферных искажений (обычно имеющих достаточно характерные текстурные признаки) и остаточной топографии (вследствие ошибок опорной ЦМР; искажения проявляются прежде всего на интерферограммах с большими значениями нормальной компоненты базовой линии). Необходимо отметить, что эти артефакты должны быть значительно ослаблены в рамках первой и второй инверсии, разделы 3.5 и 3.6.

Наконец, именно на этом этапе обнаруживаются участки со смещением земной поверхности, которое проявляется при больших временных компонентах базовых линий (связанная со смещениями фаза линейно зависит от временной компоненты базовой линии) [12].

3.3.2. Анализ развернутых интерферограмм. При проведении анализа развернутых интерферограмм должны быть выявлены "плохо развернутые" интерферограммы, характеризующиеся наличием отделенных от остальной части изображения фрагментов с кратными 2π скачками фазы (так называемые "острова"). Влияние искажений данного типа на конечные результаты обработки зависит от процента интерферограмм, имеющих подобные проблемы, и от местоположения обнаруженных "островов": если они находятся далеко от участков со смещением земной поверхности, результаты обработки могут быть отредактированы в конце. Чтобы быстрее находить плохо развернутые пары, предусмотрено использование специальной палитры цветов. При проведении анализа рекомендуется использовать процедуру построения "сечений" по обеим координатам.

После завершения проверки может быть увеличено или уменьшено пороговое значение когерентности, используемое при проведении развертки фазы. Оно должно быть увеличено, если присутствует слишком много развернутых шумовых областей, и уменьшено – в случае недостаточного "покрытия" области интереса [12].

3.3.3. Анализ степени корректности использованного значения уровня декомпозиции. При обработке данных современных РСА, имеющих

пространственное разрешение порядка нескольких метров, на свернутых интерферограммах может возникнуть большое количество остаточных топографических "шумовых" полос из-за низкого разрешения используемой опорной ЦМР (например, ЦМР SRTM имеет разрешением 90 м). Такие полосы могут создать серьезные проблемы на этапе развертки фазы. При использовании значения уровня декомпозиции, равного единице, возникает серьезная угроза возникновения большого количества "островов", имеющих значительные размеры. Этот эффект обычно исчезает при использовании более высокого уровня декомпозиции (равного двум) но в этом случае возникает другая угроза – это может привести к локальной потере непрерывности развернутой фазы там, где информативные интерференционные полосы оказываются слишком частыми.

В силу этих обстоятельств считается целесообразным использовать следующую стратегию. На данном этапе обработки при проведении развертки уровень декомпозиции рекомендуется устанавливать равным единице. Вторая развертка проводится на этапе первой инверсии, раздел 3.5; эта развертка выполняется на интерферограммах, у которых удалены фазовые компоненты, сформированные на основе первых оценок скорости смещения и остаточной топографии. В этом случае частота интерференционных полос обычно оказывается более низкой, что делает допустимым увеличение уровня декомпозиции до двух.

После возможного дополнительного этапа развертки с адаптированными параметрами рекомендуется проведение дополнительной проверки новых развернутых файлов с последующим удалением "плохих" интерферограмм [12].

3.4. Коррекция орбитальных ошибок

Коррекция фазовых искажений, связанных с орбитальными ошибками, проводится с использованием опорных точек местности (ОТМ), выбираемых на файлах развернутой фазы.

Основные критерии для выбора местоположения ОТМ:

- не должно быть никаких интерференционных полос, связанных с ошибками топографии опорной ЦМР;
- не должно быть никаких полос, связанных со смещениями; следовательно, необходимо оставаться достаточно далеко от зоны деформации (если она известна); это является еще одной причиной того, чтобы выбирать размеры рабочей области значительно большими, чем реальные размеры зоны деформации;
- по умолчанию скорость смещения выбранных ОТМ предполагается равной нулю, за исключением тех случаев, когда априори известно точное значение этой скорости (полученное с помощью наземных GPS-измерений);
- не должно быть никаких скачков фазы; если ОТМ окажется расположенной на изолированном фазовом "острове" (из-за ошибок развертки фазы), это может интерпретироваться программой как "перекос фазы" и приводить к некорректным результатам.

Необходимо отметить, что использование достаточно большого количества ОТМ (несколько десятков) позволяет добиться заметного повышения точностных характеристик выходных продуктов за счет эффективного усреднения ошибок опорной ЦМР (по высоте).

Далее должен быть сделан выбор между двумя методами коррекции: *Orbital refinement* и *Residual Phase refinement*. Первый метод считается более точным, поскольку при проведении коррекции параметров орбит используется физическая модель орбиты. Второй метод просто удаляет перекося фазы, непосредственно оцениваемый по двумерным массивам развернутой фазы. Этот метод является менее строгим, но в целом рекомендуется использовать именно его, так как он в среднем дает более надежные и устойчивые результаты [12].

3.5. Первая инверсия

В рамках данного этапа проводится предварительная оценка векторов смещений \vec{p} и остаточной топографии Δh [12].

Предусмотрена возможность выбора одной из трех моделей изменения фазового сигнала во времени (17): линейной, квадратической или кубической. В рамках линейной модели оценивается только средняя скорость смещения \bar{v} ; в рамках второй дополнительно рассчитывается среднее ускорение \bar{a} , третьей – еще и средняя скорость изменения ускорения $\Delta\bar{a}$. Считается, что самая надежная модель – линейная; для получения достоверных результатов при использовании квадратической или кубической модели необходимы высокая избыточность графа связи и высокий уровень когерентности интерферограмм. Поэтому в отсутствие достоверной априорной информации относительно характера поведения смещений во времени наилучший выбор – линейная модель. В любом случае после выполнения второй инверсии, раздел 3.6, анализируются временные серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ и в случае, если идентифицируется закон изменения, близкий к квадратичному или кубическому, предусмотрена возможность повторного выполнения обработки с использованием более "адекватной" модели.

Предварительная оценка векторов смещений \vec{p} и остаточной топографии Δh выполняется на основе "упрощенного" варианта уравнения (23), а именно:

$$\widehat{D} \widehat{M} \vec{p} + \Delta h \vec{C} = \overline{\delta\varphi} \quad (27)$$

в котором не учитываются компоненты $\vec{\varphi}_A$ и $\overline{\Delta n_j}$ (атмосферная коррекция и фильтрация шумов выполняются на следующем этапе 3.6). Модель для изменения фазового сигнала во времени – линейная.

Выполняется вторая развертка – на свернутых интерферограммах, но после расчета и удаления фазовых компонент, связанных с предварительно оцененными смещениями и остаточной топографией. Поскольку считается, что в этом случае понижается частота интерференционных полос (по сравнению с первой разверткой), уровень декомпозиции увеличивается до двух. После выполнения второй развертки программное обеспечение автоматически добавляет обратно во вновь полученные развернутые интерферограммы фазовые компоненты, связанные со смещениями.

После завершения расчетов перед переходом к последующим этапам обработки рекомендуется провести еще одну проверку (аналогично описанной ранее в разделе 3.3.2) новых развернутых файлов и удалить "плохие" и бесполезные интерферограммы [12].

3.6. Вторая инверсия

На выходе данного этапа обработки рассчитываются уточненные значения векторов смещений \vec{p} , а также временные серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ для каждого ($i = 1, \dots, N$).

Предварительно выполняется атмосферная коррекция – с использованием процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации, раздел 2.6. После устранения атмосферных искажений:

- выполняется уточненный расчет значений векторов смещений \vec{p} (возможна коррекция сделанного ранее, раздел 3.5, выбора линейной модели изменения фазового сигнала во времени);
- проводятся расчеты временных серий накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ (2), поскольку становятся доступными измерения фазы сигнала $\varphi(t_i, x, r)$ (3).

Кроме того, выполняется проверка того, насколько хорошо выбранная модель изменения фазового сигнала во времени соответствует реально рассчитанным временным сериям накопленной деформации $d(t_i, x, r)$. Необходимые оценки проводятся с использованием распределения хи-квадрат; результаты формируются в виде дополнительного слоя – для проведения визуального анализа. По результатам анализа может быть принято решение об изменении выбранной модели смещений и повторного выполнения расчетов. Можно отметить, что, в принципе, для этих целей может использоваться и процедура расчетов значений когерентности по ансамблю изображений [6-7, 9-10].

Необходимо отметить, что большие пространственные смещения с высокой временной декорреляцией (например, в случае землетрясения) могут быть ошибочно интерпретированы программой как атмосферные артефакты и, следовательно, удалены. По этой причине рекомендуется провести сравнительный визуальный анализ временных серий накопленной деформации $d(t_i, x, r)$, полученных до и после атмосферной коррекции [12].

3.7. Орторектификация и преобразование в формат shape-файлов

Для всех результатов, полученных в рамках этапов первой и второй инверсии, выполняется процедура орторектификации (преобразования в выбранную картографическую проекцию с использованием значений высот, взятых из опорной ЦМР).

Смещения и скорости могут быть спроектированы на одно из трех направлений:

- произвольное направление, задаваемое в диалоговом режиме углами уклона и азимута;
- вертикальное направление;
- направление максимального уклона, рассчитываемое для каждого пикселя с использованием ЦМР (в этом случае необходимо использовать очень точную ЦМР).

Выбранное направление (первый вариант) должно соответствовать известному априори реальному направлению смещения. Для получения достоверных результатов это направление смещения должно быть известно с высокой точностью. Если это не так, рекомендуется оставить результаты для первоначального направления наклонной дальности (LOS).

Геокодированные растровые результаты конвертируются: (1) в векторный shape-файл, пригодный, например, для анализа в рамках ArcGIS и (2) в формат kml, пригодный для визуализации в рамках Google Earth. Преобразование применяется только к пикселям, удовлетворяющим выбранным ограничениям по точности и когерентности по ансамблю изображений [12].

3.8. Редактирование графа связи

Эта процедура предназначена для того, чтобы скорректировать созданный граф связи, раздел 3.1. Она может использоваться всякий раз, когда принимается решение удалить изображение или, более часто, некоторые слишком зашумленные или некорректно развернутые интерферограммы. Редактирование графа связи выполняется для улучшения выходных продуктов за счет использования меньшего числа интерферограмм, но имеющих более высокий уровень точности.

3.9. Использование результатов наземных GPS-измерений

В модуле SBAS предусмотрена возможность импорта результатов наземных GPS-измерений. Программное обеспечение позволяет выполнить: (1) необходимую низкочастотную фильтрацию данных по времени; (2) автоматическое формирование выборки, содержащей GPS-измерения только для набора дат, соответствующих датам съемки обрабатываемой временной серии РСА-изображений; (3) пересчет смещений на направление наклонной дальности. Результаты оформляются в виде shape-файла, который в зависимости от сделанного выбора содержит разности (относительно первого GPS-измерения) для значений высоты или для расстояний по направлению наклонной дальности.

В одновременно создаваемом xml-файле содержатся прецизионные координаты GPS-датчика.

4. Выводы

Представлено детальное описание ключевых моментов метода малых базовых линий. Отмечены основные особенности итерационного алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета SARscape. В алгоритме заложены возможности выполнения большого объема интерактивных процедур, связанных с необходимостью проведения визуально-инструментального анализа промежуточных и конечных результатов, корректировки сделанного выбора алгоритмов и их параметров и повторного запуска процесса обработки

(а также удаления интерферограмм с высоким уровнем шумов и наличием неустраняемых артефактов), вследствие чего возникают жесткие требования к уровню профессиональной подготовки операторов.

Проведенный анализ теоретических основ и возможностей метода SBAS, а также особенностей его реализации в модуле SBAS программного пакета SARscape явился основанием для проведения эксперимента по изучению практических возможностей метода SBAS с помощью указанного программного пакета и с использованием тестового набора данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS и данных подспутниковых GPS-измерений.

Литература

1. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. – М.: ООО «ДоМира», 2011. – Т. 8. – Номер 2. – С. 310-317.
2. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. – М.: ООО «ДоМира», 2012. – Т. 9. – № 2. – С. 106-110.
3. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Анализ предельных возможностей оценки деформации земной поверхности в зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. по данным PCA ASAR/ENVISAT с использованием программного пакета SARscape // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». – Муром, 26-28 июня 2012 г. – (CD-ROM). – С. 258-263.

4. Феоктистов А.А., Денисов П.В., Гусев М.А. Практический опыт интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed, ALOS/PALSAR и ASAR/ENVISAT // Материалы IX научно-технической конференции "Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли". Геленджик, 17-21 сентября 2012 г. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП "ГНПРКЦ "ЦСКБ-ПРОГРЕСС" – НПП "ОПТЭК", 2012. – С. 240-244.
5. Захаров А.И., Яковлев О.И, Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли. Радиолокационное зондирование поверхности // М.: КРАСАНД, 2012. – С. 248.
6. Ferretti A., Prati C. and Rocca F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, pp. 2202-2212.
7. Ferretti A., Prati C. and Rocca F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, pp. 8-20.
8. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., and Sansosti E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, pp. 2375-2383.
9. Феоктистов А.А., Захаров А. И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 1. Ключевые моменты метода постоянных рассеивателей // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/5/text.html>
10. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/6/text.html>

11. Costantini M. and Rosen P.A., 1999. A generalized phase unwrapping approach for sparse data // Proc. IGARSS, Hamburg, Germany, pp. 267-269.
12. SBAS workflow, 2013 // SBAS tutorial. Ver. 2.0. ITT Visual Information Solutions. Pearl East Circle. Boulder CO. – 92 P.
13. Strang G., 1988. Linear algebra and its applications // Orlando, FL: Harcourt Brace Jovanovich.