

УДК 528.71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ  
ЧАСТЬ 4. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА  
ПОСТОЯННЫХ РАССЕВАТЕЛЕЙ; КЛЮЧЕВЫЕ МОМЕНТЫ МЕТОДОВ  
SQUEESAR И STAMPS**

**А. А. Феокистов<sup>1</sup>, А. И. Захаров<sup>2</sup>, П. В. Денисов<sup>1</sup>, М. А. Гусев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Научный центр оперативного мониторинга Земли АО “Российские космические системы”,  
127490, Москва, ул. Декабристов, 51-25

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,  
141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 29 июня 2017 г.

**Аннотация.** Представлено детальное описание ключевых моментов двух вариантов метода постоянных рассеивателей, SqueeSAR и StaMPS, обеспечивающих решение задачи выявления динамики подстилающей поверхности с помощью технологии радарной интерферометрии в условиях сильной временной декорреляции отраженных сигналов. Метод SqueeSAR базируется на идее выявления статистически однородных пикселей, в результате чего выявляются подмножества точечных и распределенных рассеивателей и выполняется пространственно-адаптивная фильтрация последних, вследствие чего резко возрастает суммарный набор постоянных отражателей, что позволяет повысить эффективность решения задач дифференциальной радарной интерферометрии. В методе StaMPS процедура поиска постоянных рассеивателей в условиях сильной временной декорреляции использует предположение о пространственной коррелированности фазы, характеризующей процессы деформации объектов поверхности. Описаны результаты экспериментальной проверки методов и даны оценки их эффективности.

**Ключевые слова:** PCA, метод постоянных рассеивателей, постоянные рассеиватели, PS, распределенные рассеиватели, DS, SqueeSAR, StaMPS, DespecKS, RADARSAT, ERS-1, ERS-2. ASAR/ENVISAT.

**Abstract.** Detailed description of key features of such versions of persistent scatterers technique as SqueeSAR and StaMPS allowing the detection of scattering surface dynamics in the case of strong temporal decorrelation is presented. The SqueeSAR technique is a major step forward in persistent scatterers interferometry; it provides identification of distributed scatterers in addition to traditional point persistent scatterers according to their statistical behavior and subsequent joint processing. Significant increase of a total number of persistent scatterers leads to improvement of their spatial density and an efficiency of the surface dynamics detection. Another important contribution to the set of persistent scatterers interferometry techniques is so-called StaMPS algorithm; it proposes a novel persistent scatterers selection approach providing the identification of natural targets with low backscatter amplitude and stable phase in the supposition of spatial correlation of phases of backscatter from a cluster of neighboring surface elements. An estimation of SqueeSAR and StaMPS techniques efficiency is given briefly from a point of view of computational load and complexity of the processing chain implementation. An analysis carried out in the paper confirms the efficiency of SqueeSAR and StaMPS techniques, at the same time the results obtained form the basis for future additional experimental studies. The conclusion about mandatory utilization of the techniques under discussion in future Russian spaceborne SAR missions exploiting interferometry technology in Earth observation projects may be made.

**Key words:** SAR, persistent scatterers, PS, distributed scatterers, DS, PS techniques, SqueeSAR, StaMPS, DespecKS, RADARSAT, ERS-1, ERS-2, ASAR/ENVISAT.

## **1. Введение**

Исследованиям и разработке программно-алгоритмических средств интерферометрической обработки данных современных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с целью максимально полного извлечения информации о зондируемых земных средах уделяется большое внимание во всем мире. Данная работа завершает цикл публикаций, посвященных методу постоянных рассеивателей и его модификациям,

позволяющему снизить остроту проблемы временной декорреляции отраженных сигналов. В [1-3] представлено детальное описание ключевых моментов двух наиболее известных вариантов метода постоянных рассеивателей (Persistent Scatterers, PS) и результатов исследования его возможностей на примере модуля PS программного пакета SARscape и длинных временных серий изображений (1) PCA ASAR/ENVISAT по территории вблизи города Лас Вегас, США и (2) PCA PALSAR/ALOS по территории г. Москвы и Московской области. В [4-5] представлен аналогичный обзор ключевых моментов метода малых базовых линий (Small BASeline, SBAS) и результатов комплексных экспериментальных исследований возможностей этого метода на примере модуля SBAS программного пакета SARscape, двух длинных временных серий изображений PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS и данных спутниковых GPS-измерений по территории префектуры Тиба (Япония).

Метод PS – мощный инструмент дистанционного зондирования; улучшение статистики измерений за счет использования длинных временных серий изображений PCA позволяет резко ослабить влияние искажающих факторов и довести точность создаваемых цифровых моделей рельефа (ЦМР) до долей метра, цифровых карт скорости смещений (ЦКСС) – до долей миллиметра в год. Задача выявления подвижек и измерения рельефа решается для ограниченного набора PS, обеспечивающих достаточно сильный и устойчивый сигнал и наблюдаемых в большом количестве на урбанизированных территориях; однако результаты по естественным ландшафтам характеризуются крайне низкой плотностью обнаруженных PS. В рамках метода SBAS реализована возможность формирования пространственно "плотных" выходных продуктов по естественным ландшафтам, однако на урбанизированных территориях его возможности резко ограничены.

Главный шаг вперед в дальнейшем развитии метода PS связан с предложенным в [6] алгоритмом SqueeSAR. С целью преодоления ограничений метода PS предложено извлекать геофизические параметры не только от точечных рассеивателей, PS, но также и от так называемых распределенных

рассеивателей (Distributed Scatterers, DS), где многие соседние пиксели обладают близкими значениями отражающей способности, поскольку они принадлежат одной и той же цели (обычно не культивируемые земли с низкорослой растительностью или заброшенные или замусоренные территории). Вместо того, чтобы развивать гибридную цепь обработки, где два или более алгоритма последовательно применяются к одному набору данных с последующим объединением результатов, в рамках метода SqueeSAR проводится совместная обработка PS и DS с использованием традиционной PS-цепочки алгоритмов, но с соответствующим учетом различий в статистическом поведении PS и DS. В предположении, что данные PCA-изображений и рассчитываемые на их основе геофизические параметры являются общими для каждой статистически однородной выборки пикселей DS, проводится их совместная обработка, обеспечивающая возможности повышения как отношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR), так и точностных характеристик процедур оценки геофизических параметров. При этом с целью получения вектора оптимальных значений фазы DS связанная с каждой статистически однородной выборкой пикселей DS матрица когерентности соответствующим образом "сжимается" (Squeeze, отсюда название метода).

Другой важный вклад в развитие метода PS сделан в [7-9]. Предложен новый способ выбора PS, пригодный для поиска природных объектов с низкой амплитудой и стабильной фазой за счет использования свойств пространственной коррелированности фазы деформации (независимый поиск PS в каждой интерферограмме стека). Априорная информация о законе изменения деформации во времени, в отличие от других существующих методов PS-обработки, для идентификации PS не требуется. Метод ориентирован на проведение PS-анализа территории зон землетрясений, извержений вулканов, оползней и просадок, где (1) деформации земной поверхности имеют тенденцию быть эпизодическими и (2) существует возможность внезапной деформации с большой амплитудой. Работы привели к созданию одного из наиболее широко используемых программных пакетов StaMPS (STAnford Method for PS).

В данной работе представлено детальное описание ключевых моментов алгоритмов SqueeSAR и StaMPS с краткой оценкой эффективности.

## 2. Ключевые моменты метода SqueeSAR

### 2.1. Формирование статистически однородных выборок

В основе процедуры идентификации статистически однородных областей PCA-изображений лежит алгоритм пространственно-адаптивной фильтрации DespecKS [6,10]. Основные этапы:

*2.1.1. Формирование стека совмещенных PCA-изображений.* Формируется стек из  $N$  прецизионно (с субпиксельной точностью) совмещенных PCA-изображений длинной временной серии. Пусть  $\vec{d}$  и  $\vec{d}'$  вектор комплексных данных и вектор значений амплитуды произвольного пикселя  $P$ , соответственно:

$$\vec{d}(P) = [d_1(P), d_2(P), \dots, d_N(P)]^T \quad (1)$$

$$\vec{d}'(P) = [|d_1|(P), |d_2|(P), \dots, |d_N|(P)]^T \quad (2)$$

где  $d_i(P)$  – данные  $i$ -го PCA-изображения;  $T$  – транспонирование. Далее рассчитывается кумулятивная функция распределения  $S_N(X)$ :

$$S_N(X) = \begin{cases} 0, & \text{если } X < x_1 \\ \frac{k}{N}, & \text{если } x_k \leq X \leq x_{k+1} \\ 1, & \text{если } X \geq x_N \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_i$  –  $i$ -й элемент упорядоченной по величине совокупности значений  $|d_i|(P)$  – амплитуды пикселя  $P$ .

*2.1.2. Идентификация статистически однородных пикселей.* Для каждого пикселя  $P_0$  определяется окно оценки с центром в  $P_0$ , в котором должны быть идентифицированы все пиксели, имеющие те же статистические характеристики, что и  $P_0$ . Для оценки статистической однородности используется тест

Колмогорова-Смирнова (KS-тест) [11], который последовательно применяется к кумулятивным функциям распределения  $S_N^{P_0}(X)$  и  $S_N^{P_i}(X)$  значений амплитуды каждой из пар пикселей  $P_0, P_i$ , где  $P_i$  – произвольный пиксель в окне оценки. Рассчитывается максимальная величина  $D_N$  абсолютной разности между кумулятивными функциями распределения  $S_N^{P_0}(X)$  и  $S_N^{P_i}(X)$ :

$$D_N = \sqrt{N/2} \sup | S_N^{P_0}(X) - S_N^{P_i}(X) | \quad (4)$$

Считается, что два вектора  $P_0, P_i$  принадлежат той же самой генеральной совокупности, если  $D_N \leq t$ , где порог  $t$  зависит от заданного уровня значимости  $\alpha$  и может быть найден из условия:

$$\alpha = 1 - H(t), \quad H(t) = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} e^{-2n^2 t^2} \quad (5)$$

где  $H(t)$  – кумулятивная функция распределения Колмогорова-Смирнова (KS-распределения) [11]. В результате отбираются все пиксели в пределах окна оценки, которые можно считать статистически однородными (Statistically Homogeneous Pixels, SHP) с пикселем  $P_0$  – при заданном уровне значимости  $\alpha$ .

*2.1.3. Корректировка статистически однородных выборок.* Отбрасываются пиксели изображения, которые хотя и прошли KS-тест, но не являются смежными с  $P_0$  непосредственно или через другие SHP-пиксели. Данный этап уменьшает количество SHP-пикселей, идентифицируемых в рамках KS-теста, но он включен, чтобы увеличить вероятность того, что соседние пиксели принадлежат той же самой цели и имеют те же геофизические параметры. Пиксель  $P_0$  и все SHP-пиксели в пределах окна оценки, смежные с  $P_0$ , считаются статистически однородной выборкой, идентифицируемой в последующем как  $\Omega$ .

## 2.2. Статистическое описание распределенных рассеивателей

2.2.1. *Расчет матрицы когерентности статистически однородной выборки.* После идентификации всех SHP-пикселей статистически однородной выборки  $\Omega$  для пикселя  $P_0$  проводится нормировка векторов комплексных данных ( $E[|d_i|] = 1$ ) и рассчитывается матрица когерентности  $\hat{C}$  для полученной выборки:

$$\hat{C} = \frac{1}{N_S} \sum_{P \in \Omega} \vec{d}_{\text{нор}}(P) \cdot \vec{d}_{\text{нор}}^H(P) \quad (6)$$

где  $\vec{d}_{\text{нор}}(P)$  – нормированный вектор комплексных данных (1);  $N_S$  – объем статистически однородной выборки SHP-пикселей; точкой обозначено матричное произведение;  $H$  – эрмитово сопряжение.

2.2.2. *Формирование вектора значений фазы SHP-пикселей.* Поскольку рассчитываемые геофизические параметры должны быть общими для всех SHP-пикселей выборки, ключевая проблема состоит в оценке вектора из  $N$  значений фазы этих пикселей:

$$\vec{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T \quad , \quad (7)$$

связанных с электрической длиной пути РСА-сигнала в каждой съемке (включающей смещения из-за деформации) и оптимальным образом соответствующих рассчитанной матрице когерентности  $\hat{C}$ . Сами значения фазы могут быть оценены только с точностью до произвольной константы; поэтому без потери общности фаза первого изображения устанавливается в ноль.

2.2.3. *Формирование вспомогательной матрицы когерентности.* С целью создания корректной основы для этой оптимизации специальным образом "конструируется" вспомогательная матрица  $\hat{F}$ , которая является оценкой для матрицы когерентности  $\hat{C}$ :

$$\hat{F} = \hat{\Theta} \cdot \hat{C}' \cdot \hat{\Theta}^H \quad (8)$$

где  $\hat{\mathbf{F}}$ ,  $\hat{\Theta}$ ,  $\hat{\mathbf{C}}'$  – матрицы размером  $N \times N$ ;  $\hat{\mathbf{C}}'$  – симметричная вещественная матрица, элементы которой равны модулям соответствующих элементов рассчитанной матрицы когерентности  $\hat{\mathbf{C}}$ ;  $\hat{\Theta}$  – диагональная матрица, диагональные элементы которой содержат значения фазы вектора  $\vec{\theta}$  ( $\hat{\Theta}_{ii} = e^{j\theta_i}$ ).

2.2.4. *Оценка вектора значений фазы SHP-пикселей.* Процедура получения оценки для вектора  $\vec{\theta}$  по критерию максимума правдоподобия реализована на основе выражения:

$$\begin{aligned} \arg \max_{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N} \{ \exp[\text{trace}(\hat{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{C}})] \} = \\ = \arg \max_{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N} \{ \exp[\text{trace}(\hat{\Theta} \cdot \hat{\mathbf{C}}'^{-1} \cdot \hat{\Theta}^H \cdot \hat{\mathbf{C}})] \} \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\hat{\mathbf{F}}^{-1}$ ,  $\hat{\mathbf{C}}'^{-1}$  – матрицы, обратные матрицам  $\hat{\mathbf{F}}$ ,  $\hat{\mathbf{C}}'$ , а  $\text{trace}$  означает сумму диагональных элементов; в рамках данной процедуры находятся такие значения  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ , при которых достигается максимальное значение для суммы диагональных элементов произведения двух матриц  $\hat{\mathbf{F}}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{C}}$ .

### 2.3. Анализ качества полученной оценки для $\vec{\theta}$

После получения оптимального решения проводится анализ качества полученной оценки значений фазы  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ . В качестве критерия используется значение параметра  $\gamma_{\text{РТА}}$ , характеризующего степень "рассогласования" значений фазы  $\varphi_{nk}$  элементов матрицы когерентности  $\hat{\mathbf{C}}$ , рассчитанной для выборки  $\Omega$  (6), и соответствующих значений фазы  $\theta_n - \theta_k$  элементов матрицы  $\hat{\mathbf{F}}$  (8), являющейся оценкой для матрицы когерентности  $\hat{\mathbf{C}}$ :

$$\gamma_{\text{РТА}} = \frac{1}{N^2 - N} \sum_{n=1}^N \sum_{k \neq n}^N e^{j\varphi_{nk}} e^{-j(\theta_n - \theta_k)} \quad (10)$$

Параметр  $\gamma_{\text{РТА}}$  может рассматриваться как обобщение на случай DS когерентности по ансамблю интерферограмм  $\gamma$ , используемой при проведении стандартного PS-анализа (часть 1, формула (21) [1]).

## 2.4. Алгоритм SqueeSAR

Резюмируем вышеизложенное. Основная задача алгоритма SqueeSAR – провести предварительную обработку данных PCA таким образом, чтобы и PS-пиксели, и DS-пиксели могли обрабатываться с использованием стандартных средств PS-обработки (часть 1, [1]); ключевые моменты:

*2.4.1. Формирование статистически однородных выборок.* Обработка стека прецизионно совмещенных PCA-изображений длинной временной серии. В основе процедуры обработки лежит алгоритм процедуры пространственно-адаптивной фильтрации, раздел 2.1. Для каждого пикселя формируется статистически однородная выборка  $\Omega$ ;  $N_S$  – объем выборки.

*2.4.2. Формирование набора DS.* Определяются как DS все SHP-пиксели из выборок  $\Omega$ , для которых  $N_S$  больше, чем задаваемый порог. Цель введения данного порога – оставить PS вне процедуры пространственно-адаптивной фильтрации DS.

*2.4.3. Расчет выборочной матрицы когерентности.* Для каждой из отобранных выборок оценивается выборочная матрица когерентности  $\hat{C}$  и вектор  $\vec{\theta}$ , содержащий  $N$  значений фазы DS-пикселей, раздел 2.2.

*2.4.4. Анализ качества полученной оценки для  $\vec{\theta}$ .* Проводится анализ качества полученной оценки для  $\vec{\theta}$ , раздел 2.3. Для каждой выборки  $\Omega$  рассчитывается значение параметра  $\gamma_{RTA}$  (10), являющегося обобщением на случай DS когерентности по ансамблю интерферограмм.

*2.4.5. Корректировка набора DS.* Отбираются только выборки со значениями параметра  $\gamma_{RTA}$ , превышающими задаваемый порог. Значения фазы всех DS-пикселей из отобранных выборок заменяются их оптимальными значениями из векторов  $\vec{\theta}$ .

*2.4.6. Стандартная PS-обработка.* Выполняется обработка "модернизированных" длинных временных серий PCA-изображений (включая DS-пиксели) стандартными средствами PS-обработки (часть 1, [1]).

## 2.5. Экспериментальная оценка эффективности

Для проведения экспериментальной оценки эффективности разработанного алгоритма был выбран покрытый интенсивной растительностью преимущественно горный участок с размерами приблизительно  $20 \times 25 \text{ км}^2$  на территории Альпийского региона (сложный объект с точки зрения возможностей проведения интерферометрической обработки). Обработана длинная временная серия из 65 изображений PCA RADARSAT, полученных с апреля 2003 г. до марта 2008 г. на нисходящих орбитах. Обработка проведена с использованием (1) стандартных средств PS-обработки и (2) нового SqueeSAR-алгоритма. Показано, что введение порогового значения для объема статистически однородной выборки  $N_S = 20$  позволило сохранить не измененными значения фазы более, чем у 95% PS, имеющих значения когерентности по ансамблю интерферограмм  $\gamma \geq 0,8$ , и резко повысить плотность измеряемых точек – с 85 до  $450 \text{ 1/км}^2$ . Это, в свою очередь, позволило лучше определить конфигурацию оползней и даже идентифицировать новые, ранее не обнаруженные стандартным PS-методом. Другое важное преимущество нового подхода касается "качества" временных серий смещений PS и DS и является следствием того обстоятельства, что при увеличении пространственной плотности измеряемых точек атмосферные эффекты лучше оцениваются и удаляются. Однако, с вычислительной точки зрения усовершенствования с использованием алгоритма SqueeSAR требуют затрат времени обработки приблизительно в четыре раза больше, чем стандартный PS-анализ. Дополнительные затраты времени на обработку – пока главный недостаток нового подхода [6].

## 3. Ключевые моменты метода StaMPS

### 3.1. Формирование стека интерферограмм

Стандартным образом (часть 1, раздел 2.1.1 [1]) формируется стек из  $N + 1$  PCA-изображений длинной временной серии; выбирается опорное изображение серии; каждое из  $N$  оставшихся изображений совмещается с субпиксельной точностью с опорным изображением и формируется стек из  $N$  интерферограмм.

### 3.2. Формирование набора кандидатов в постоянные рассеиватели

Как и в рамках стандартного PS-подхода (часть 1, раздел 2.1.2 [1]), набор кандидатов в постоянные рассеиватели (PSC Candidates, PSC) формируется с использованием индекса дисперсии амплитуды  $D_A$ , но со значительно более высоким значением (обычно в районе 0,4-0,6), что приводит к тому, что огромное большинство отобранных PSC не является PS-пикселями [7-8].

### 3.3. Анализ фазы PSC

*3.3.1. Выражение для свернутой фазы PSC.* Фазы интерферограмм, используемых при проведении анализа, свернуты по модулю  $2\pi$ ; оценка стабильности фазы проводится для каждого PSC; при проведении оценки используется следующее выражение для свернутой фазы  $\psi_{x,i}$  пикселя  $x$  в интерферограмме  $i$ :

$$\psi_{x,i} = W\{\phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \phi_{S,x,i} + \phi_{T,x,i} + \phi_{N,x,i}\} \quad (11)$$

где  $\phi_{D,x,i}$  – фаза из-за смещения пикселя;  $\phi_{A,x,i}$  – фаза атмосферных искажений;  $\phi_{S,x,i}$  – фаза орбитальных ошибок;  $\phi_{T,x,i}$  – остаточная топографическая фаза из-за ошибок ЦМР и фаза из-за отклонения фазового центра пикселя от его физического центра;  $\phi_{N,x,i}$  – фаза временной и пространственной декорреляции, ошибок совмещения и теплового шума;  $W\{\cdot\}$  – оператор свертки.

Пиксели, которые ищутся как PS – это те, у которых член  $\phi_{N,x,i}$  является достаточно малым и не скрывает полностью сигнал деформации.

*3.3.2. Расчет средних значений фазы.* Предполагается, что первые четыре члена уравнения доминируют над последним, шумовым членом, мешая определить, какие рассеиватели являются постоянными. Кроме того, предполагается, что  $\phi_{D,x,i}$ ,  $\phi_{A,x,i}$ ,  $\phi_{S,x,i}$  пространственно коррелированы в пределах локальной окрестности пикселя  $x$ , и что средние после усреднения в

пределах этой окрестности значения  $\phi_{T,x,i}$ ;  $\phi_{N,x,i}$  равны нулю. В стартовой версии пакета StaMPS реализован простейший вариант формирования средних по окрестности значений фазы – как усреднение фазы по всем PSC в пределах круглого участка с центром в пикселе  $x$  [7].

Однако корректный выбор линейных размеров участка для усреднения фазы PSC требует знания радиуса пространственной корреляции; поэтому в окончательной версии пакета StaMPS применен метод, основанный на использовании БПФ и модифицированного пространственно-частотного фильтра Goldstein [12], что позволяет автоматически "адаптироваться" к любому градиенту фазы в представленных данных. Адаптивная часть фильтра определяет полосу пропускания для доминирующей пространственной частоты в фазе PSC. Выборка значений комплексной фазы PSC формируется для ячеек сетки с размерами, для которых предполагается небольшое изменение фазы (обычно 40-100 м); проводится суммирование (в пределах каждой ячейки) комплексных значений фазы PSC с весами, учитывающими отношение сигнал/шум. БПФ применяется к сетке размером 32x32 или 64x64 ячейки, в зависимости от того, на каком расстоянии ожидается, что фаза пикселей PSC останется пространственно коррелированной [8].

3.3.3. *Анализ разности значений фазы.* Значение фазы после фильтрации  $\tilde{\psi}_{x,i}$  – это свернутая оценка пространственно коррелированных частей каждого из членов в правой части уравнения (11), поэтому вычитание  $\tilde{\psi}_{x,i}$  из  $\psi_{x,i}$  и повторная свертка дает:

$$W\{\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i}\} = W\{\phi_{D,x,i}^u + \phi_{A,x,i}^u + \phi_{S,x,i}^u + \phi_{T,x,i}^u + \phi_{N,x,i}^u\} \quad (12)$$

где  $\phi^u$  обозначает пространственно не коррелированную часть  $\phi$ . Предполагается, что  $\phi_{D,x,i}^u$ ,  $\phi_{A,x,i}^u$ ,  $\phi_{S,x,i}^u$  будут малыми, поскольку большая часть их спектра находится в области более низких пространственных частот. Обозначая их сумму через  $\delta_{x,i}$ , имеем:

$$W\{\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i}\} = W\{\phi_{T,x,i}^u + \phi_{N,x,i}^u + \delta_{x,i}\} \quad (13)$$

Остаточная топографическая фаза из-за ошибок ЦМР и фаза из-за отклонения для пикселя его фазового центра от его физического центра  $\phi_{T,x,i}$  пропорциональна перпендикулярному компоненту базовой линии  $B_i$  [7,8]:

$$\phi_{T,x,i}^u = B_i K_{T,x} \quad (14)$$

где  $K_{T,x}$  – константа пропорциональности. Подставляя это выражение в уравнение (13):

$$W\{\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i}\} = W\{B_i K_{T,x} + \phi_{N,x,i}^u + \delta_{x,i}\} \quad (15)$$

методом наименьших квадратов проводится оценка значения  $K_{T,x}$  для пикселя  $x$ , так как не предполагается, что  $B_i$  может коррелировать с  $\phi_{N,x,i}^u$  или  $\delta_{x,i}$ .

*3.3.4. Формирование значения параметра фазовой стабильности.* После получения оценки для  $K_{T,x}$  и вычитания  $B_i K_{T,x}$  из левой и правой частей уравнения (15):

$$W\{\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i} - B_i K_{T,x}\} = W\{\phi_{N,x,i}^u + \delta_{x,i}\} \quad (16)$$

формируется значение параметра  $\gamma_x$ , которое используется в рамках метода StaMPS в качестве меры фазовой стабильности пикселя  $x$  и, следовательно, индикатором того, является ли данный пиксель PS-пикселем:

$$\gamma_x = (1/N) \left| \sum_{i=1}^N \exp \{j(\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i} - B_i K_{T,x})\} \right| \quad (17)$$

где  $N$  – число интерферограмм.

### 3.4. Формирование стартового набора PS

Далее запускается итерационная процедура формирования стартового набора PS. Для каждого PSC вычисляется разность значений фазы, оценивается  $K_{T,x}$  и вычисляется  $\gamma_x$ , уравнения (12-17). Как правило, значения  $\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i} - V_i K_{T,x}$  в (17) не будут малы, так как в сигнале от большинства "локальных" PSC будет доминировать шум. Статистически, однако, пиксели с более высокими значениями  $\gamma_x$  с большей вероятностью будут являться PS-пикселями. Повторно исключая PSC с низкими значениями  $\gamma_x$ , заново вычисляя значения фазы  $\tilde{\psi}_{x,i}$  после фильтрации (используя только оставшиеся PSC) повторно вычисляется  $\gamma_x$  для каждого PSC. После каждой итерации вычисляется среднеквадратическое отклонение для  $\gamma_x$ ; когда оно перестает уменьшаться, считается, что решение сошлось, и алгоритм формирования стартового набора PS прекращает итерации.

### 3.5. Формирование финального набора PS

Формирование финального набора PS основано на рассчитанных значениях  $\gamma_x$ . Любой пиксель со случайной фазой имеет конечную вероятность иметь высокое значение  $\gamma_x$ , и поэтому процедура выбора PS является вероятностной. Определяется пороговое значение  $\gamma_x^{\text{thresh}}$ , которое максимизирует число истинных PS, при этом сохраняя долю случайных фазовых пикселей (ложные PS) ниже заданного значения  $q$ , приемлемого для конкретного приложения.

Кумулятивная функция распределения  $p(\gamma_x)$  для  $\gamma_x$  является взвешенной суммой кумулятивных функций распределения для ложных PS,  $p_r(\gamma_x)$ , и для истинных PS,  $p_{PS}(\gamma_x)$ :

$$p(\gamma_x) = (1 - \alpha)p_r(\gamma_x) + \alpha p_{PS}(\gamma_x) \quad (18)$$

где  $\alpha$  – доля истинных PS в сформированном стартовом наборе PS, см. ниже. Нужно найти такое  $\gamma_x^{\text{thresh}}$ , что:

$$(1 - \alpha) \int_{\gamma_x^{\text{thresh}}}^1 p_r(\gamma_x) d\gamma_x / \int_{\gamma_x^{\text{thresh}}}^1 p(\gamma_x) d\gamma_x = q \quad (19)$$

Кумулятивная функция распределения  $p(\gamma_x)$  оценивается на основе сформированного стартового набора PS;  $p_r(\gamma_x)$  моделируется генерацией псевдо-PS со случайной фазой с последующим вычислением значения  $\gamma_x$ . Для получения предварительной оценки значения параметра  $\alpha$  используется то обстоятельство, что при низких значениях  $\gamma_x$  ( $\gamma_x < 0,3$ )  $p_{PS}(\gamma_x) \approx 0$ , поскольку истинные PS характеризуются высоким уровнем когерентности, в силу чего:

$$\int_0^{0,3} p(\gamma_x) d\gamma_x = (1 - \alpha) \int_0^{0,3} p_r(\gamma_x) d\gamma_x \quad (20)$$

Так как риск ложных результатов классификации увеличивается с увеличением дисперсии амплитуды  $D_A$ , далее с целью повышения точности расчетов пороговое значение  $\gamma_x^{\text{thresh}}$  рассматривается как функция дисперсии амплитуды  $D_A$ . При этом сначала по значениям полученных для стартового набора PS оценок значений дисперсии амплитуды  $\hat{D}_{A,x}$  формируется одномерная гистограмма (по крайней мере по  $10^4$  пикселей для каждого значения), а далее для каждого значения сформированной одномерной гистограммы формируется гистограмма для второго измерения ( $\gamma_x$ ). Эта процедура позволяет сформировать оценку  $p(\gamma_x, \hat{D}_{A,x})$  для двумерной функции распределения вероятности значений  $\gamma_x$  и  $\hat{D}_{A,x}$ . Для каждого значения  $\hat{D}_{A,x}$  оцениваются: (1)  $\alpha$  – доля пикселей, которые являются PS-пикселями, и (2) зависящее от  $\hat{D}_{A,x}$  пороговое значение  $\gamma_x^{\text{thresh}}(\hat{D}_{A,x})$ , сохраняющее долю случайных фазовых пикселей (ложные PS) ниже определенного, приемлемого для конкретного приложения значения  $q$ .

### 3.6. Исключение боковых лепестков

Для исключения боковых лепестков делается предположение, что в смежных отобранных PS-пикселях доминирует один и тот же рассеиватель, в

силу чего в этом случае отбрасываются все PS-пиксели кроме того, который имеет самое высокое значение  $\gamma_x$ .

### 3.7. Развертка фазы

Как только сформирован финальный набор PS, все другие пиксели отбрасываются; используются исходные свернутые значения фазы интерферограмм  $\psi_{x,i}$  из уравнения (11), в которых дополнительно проводится (1) вычитание остаточной топографической фазы из-за ошибок ЦМР и фазы из-за отклонения фазового центра пикселя от его физического центра,  $B_i K_{T,x}$ , и (2) повторная свертка:

$$W\{\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i} - B_i K_{T,x}\} \quad (21)$$

Поскольку фазы интерферограмм, используемых в процедурах формирования наборов PSC и PS, свернуты по модулю  $2\pi$ , для восстановления фазы деформации,  $\phi_{D,x,i}$ , значения фазы должны быть развернуты и оценены некоторые дополнительные искажения. В стартовой версии пакета StaMPS реализована относительно простая стратегия, в рамках которой выполняется пространственная развертка для разностей фазы между каждой соседней (по времени) парой интерферограмм [7]. Однако, поскольку имеются три измерения для фазовых данных, (два по пространству и одно по времени), в окончательной версии пакета StaMPS используется набор трехмерных алгоритмов развертки, описанных в [13] и обеспечивающих получение более надежных результатов [8].

После развертки могут оставаться пространственно коррелированные искажения, которые маскируют фазу деформации  $\phi_{D,x,i}$  и существенно искажают результаты. Пространственно коррелированные искажения разделяется на коррелированные во времени (вклад основного изображения, который присутствует в каждой интерферограмме) и на те, которые, как ожидается, не должны быть коррелированными во времени (вклады вспомогательных изображений). Искажения оцениваются по отдельности с использованием

комбинации низкочастотной пространственной фильтрации и высокочастотной фильтрации по оси времени, что в целом достаточно близко тому, как это описано в (часть 1, разделы 2.1.7 и 3 [1]).

### 3.8. Экспериментальная оценка эффективности

Экспериментальная оценка эффективности стартовой версии пакета StaMPS проведена на примере длинной временной серии из 22 изображений (нисходящие орбиты), полученных с помощью PCA ERS-1 и ERS-2 в интервале между 1992 и 2000 г.г. по кальдере (котловине) вулкана Long Valley, восточная Калифорния, США. Область без искусственных объектов с природными объектами с низкой амплитудой рассеяния; характеризуется деформациями с нерегулярной скоростью смещений. Удалось добиться высокой плотности обнаруженных PS средняя плотность  $44 \text{ PS}/\text{км}^2$  с уровнем достоверности 95%. Для сравнения – результаты обработки с использованием стандартного PS-подхода [14] показали, что плотность PS, идентифицированных на большей части представляющего интерес региона, была  $<0.1 \text{ PS}/\text{км}^2$ , что, естественно, слишком мало для получения достоверных результатов [7].

Эффективность окончательной версии пакета StaMPS продемонстрирована на примере двух длинных временных серий изображений PCA ERS-1 и ERS-2 по кальдере вулкана Alcedo (архипелаг Галапагос), полученных между июнем 1992 и январем 2001 г.г (15 изображений с нисходящих орбит и 14 изображений с восходящих). На изображениях, полученных между октябрём 1997 г. и январем 2001 г., сигнал деформации был выделен и развернут; установлено, что для всего временного интервала с 1997 по 2001 г.г. деформация в значительной степени ограничена пределами кальдеры. Скорость дефляции (проседания кальдеры) примерно постоянна в этом временном интервале. По наборам данных восходящих и нисходящих орбит рассчитаны картосхемы средних значений скорости для каждого PS. Анализ полученных картосхем с использованием цепи Маркова, метода Монте-Карло и априорной информации позволил оценить апостериорное распределение вероятности значений параметров модели для

эллипсоидального источника дефляции; установлено, что дефляция кальдеры вызвана процессами охлаждения и кристаллизации (с уменьшением объема) резервуара жидкой магмы, находящегося на глубине около 2,2 км и имеющего форму квазигоризонтального вытянутого эллипсоида. Установлено также, что смещения PS, расположенных на внутренних склонах на западной стороне кальдеры, возникли из-за оползней. Остаточные (после вычитания дефляции) скорости разложены на компоненты движения в восточном и субвертикальном направлениях и сопоставлены с локальным уклоном местности, что позволило установить наличие дополнительного вертикального смещения PS. Учитывая, что доминантные рассеватели в пределах каждого PS наиболее вероятно являются крупными валунами, высказано предположение о возможности их дополнительного проседания [8].

#### **4. Заключение**

Возможности метода PS измерять миллиметровые смещения поверхности Земли из космоса демонстрировались многими командами исследователей и подтверждены сотнями высококачественных научных публикаций. Более 20 подходов описаны в [15], но их число еще больше и будет увеличиваться в будущем. Многочисленные применения широко используют основные преимущества метода PS: (1) возможность глобального обзора явлений деформации за счет охвата обширных территорий – до 100x100 км<sup>2</sup> одним кадром в режиме маршрутной съемки и до 250x250 км<sup>2</sup> в режиме широкополосной съемки; (2) возможность измерений в индивидуальных инфраструктурах с локальной оценкой деформации, что особенно эффективно при использовании данных X-диапазона с высоким пространственным разрешением; (3) уникальная способность изучать явления деформации, произошедшие в прошлом – с использованием исторических архивов данных РСА.

В последние 15 лет большое внимание привлекла проблема валидации результатов PS-обработки, которая оказалась ключом для принятия метода PS на

научном, технологическом и коммерческом уровне [15]. Основной объем активности в области валидации базируется на сравнении скорости деформации и временных серий смещений с независимыми оценками, полученными с использованием средств, обеспечивающих более высокие точностные характеристики, угловых отражателей, средств теодолитного нивелирования и GPS [15]. Интересные результаты получены в рамках TerraFirma Validation Project [15,16] на основе перекрестного сравнения результатов, полученных разными командами исследователей с использованием громадных наборов данных PCA ERS и ASAR/ENVISAT. Для среднеквадратичных отклонений (1) разности значений скорости смещений  $\sigma_{vel}$  и (2) разности амплитуды из временных серий накопленной деформации  $\sigma_{TSeries}$  были получены следующие оценки:

$$\sigma_{vel} = 0,4 \div 0,5 \text{ мм/год} \quad (22)$$

$$\sigma_{TSeries} = 1,1 \div 4 \text{ мм} \quad (23)$$

Важно отметить, что эти оценки включают различие результатов, полученных в рамках разных PS-технологий, основанных на тех же самых входных стеках данных. Они отражают тот факт, что PS-технологии являются вычислительно сложными технологиями обработки, а потому, вследствие принимаемых в разных технологиях допущений, в них закладываются разные ошибки, что может приводить к несколько разным результатам.

Необходимо отметить, что при интерпретации результатов PS-технологий следует иметь в виду, что существует важное различие между данными о деформации, регистрируемыми в рамках метода PS, и данными, полученными методами геодезии и топографии. Последние используют "стратегически" расположенные точки, т. е. специально выбранные точки для того, чтобы оптимально характеризовать изучаемое явление деформации. С помощью PS-технологий, с другой стороны, формируется выборка, основанная на тех рассеивателях, которые обеспечивают устойчивое во времени отражение.

Поэтому связь между данными дистанционного зондирования и изучаемым явлением деформации должна внимательно анализироваться в каждом конкретном случае. Поскольку использование результатов PS-технологий обычно находится в руках "не-экспертов", которые могут игнорировать тот факт, что некоторые свойства PS-продуктов не имеют ничего общего с другими методами измерения деформации, необходимы: (1) повышение уровня сотрудничества между PS-экспертами и людьми, отвечающими за интерпретацию и использование PS-продуктов и (2) подготовка документов с описанием всех основных характеристик и особенностей PS-продуктов [15].

Проведенные исследования возможностей методов SqueeSAR и StaMPS подтверждают их эффективность и позволяют сделать заключение об обязательности реализации этих методов в перспективных программных комплексах интерферометрической обработки данных будущих отечественных космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли.

### **Литература**

1. Феокистов 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>
2. Феокистов 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>
3. Феокистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 3. Основные результаты обработки методом PS данных PCA PALSAR/ALOS по территории Московского региона // Журнал

радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. №7.

URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul16/7/text.html>

4. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. 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 // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. №9.

URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.html>.

5. Феоктистов А.А., Захаров А. И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARscape и данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. №9.

URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/2/text.html>.

6. Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A., 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // IEEE TGRS 49 (9), 3460-3470.

7. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // Geophys. Res. Lett. 31 (23).

8. A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos // Geophys. Res., 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.

9. Andrew Hooper, A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches // Geophys. Res. Lett., 35, L16302, doi:10.1029/2008GL034654.

10. R. Touzi, A review of speckle filtering in the context of estimation theory // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 40, no. 11, pp. 2392-2404, Nov. 2002.

11. M. A. Stephens, Use of the Kolmogorov-Smirnov, Cramér-Von Mises and related statistics without extensive tables // J.R. Stat. Soc. Ser. B (Methodological), vol. 32, no. 1, pp. 115-122, 1970.

12. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No 9. P. 1-9.

13. Hooper, A., Zebker, H.A., 2007. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series // JOSA A 24 (9), 2737-2747.

14. Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, pp. 8-20.

15. Crosetto, M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115 (2016), pp. 78-89.

16. Crosetto, M., Monserrat, O., Bremmer, C., Hanssen, R., Capes, R., Marsh, S., 2009. Ground motion monitoring using SAR interferometry: quality assessment // Eur. Geol. 26, pp. 12-15.

**Ссылка на статью:**

А. А. Феоктистов, А. И. Захаров, П. В. Денисов, М. А. Гусев. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 4. Основные направления развития метода постоянных рассеивателей; ключевые моменты методов SQUEESAR И STAMPS. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/5/text.pdf>