

## **К вопросу мониторинга смещений земной поверхности методами радарной спутниковой интерферометрии**

**Е.А. Киселева, В.О. Михайлов, Е.И. Смольянинова, П.Н. Дмитриев**

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, 123242, Россия  
E-mail: e.kiseleva@ifz.ru*

При мониторинге смещений земной поверхности территорий с малым количеством техногенных, хорошо отражающих спутниковый сигнал объектов, критически важно разработать методику для выделения отражений от природных объектов, которые характеризуются невысокой амплитудой отраженного сигнала и недостаточной когерентностью на некоторых интерферометрических парах. В работе дан краткий критический обзор различных технологий, применяемых при обработке данных спутниковой радарной интерферометрии, в том числе наиболее перспективных методов совместного поиска устойчивых и распределенных отражателей APSI (Advanced Persistent Scatterer Interferometry). Рассмотрен метод адаптивной фильтрации амплитуды, разработанный в рамках идеологии APSI (Ferretti et al., 2011), и его реализация в виде модуля программного пакета StaMPS/MTI (Hooper, Segall, Zebker, 2007). Для Адлерского района г. Сочи приведены расчеты поля смещений по данным со спутника ALOS PALSAR в программном пакете StaMPS/MTI без использования каких-либо дополнительных обработок и с предварительным использованием алгоритма адаптивной фильтрации амплитуды. Число отражателей при использовании снимков после проведения предложенной в работе фильтрации амплитуды превысило 50 000, против 30 000 отражателей при использовании оригинальных снимков.

**Ключевые слова:** радары с синтезированной апертурой, интерферометрия, методы совместного поиска устойчивых и распределенных отражателей APSI

*Одобрена к печати: 25.09.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-122-132*

### **Введение**

В настоящее время в области радарной спутниковой интерферометрии наиболее активно развиваются методы совместного поиска устойчивых и распределенных отражателей APSI (Advanced Persistent Scatterer Interferometry). Выполненный в работе краткий критический обзор современных методов обработки спутниковых радарных снимков подтверждает актуальность развития именно этого направления. В работе рассмотрен метод адаптивной фильтрации амплитуды, разработанный в рамках идеологии APSI (Ferretti et al., 2011), его реализация в виде модуля программного пакета StaMPS/MTI (Hooper, Segall, Zebker, 2007). Дан пример практического применения метода для оползневых склонов в районе г. Большой Сочи.

**Краткий обзор существующих методов оценки смещений земной поверхности по данным спутниковых съемок радарными с синтезированной апертурой (спутниковая РСА-интерферометрия). Обоснование необходимости дальнейшего усовершенствования существующих методик**

*Метод дифференциальной РСА-интерферометрии (DInSAR)*

Интерферометрическая методика предполагает наличие пары снимков одного участка земной поверхности, полученных РСА с двух близких, локально параллельных орбит. При

обработке два изображения РСА совмещаются друг с другом так, чтобы идентифицировать пиксели, соответствующие одной области поверхности Земли (проводится так называемая корегистрация снимков) и далее вычисляется комплексная интерферограмма, каждый элемент которой равен произведению обратно рассеянного сигнала первого снимка и комплексно сопряженного сигнала второго снимка. Фаза каждого элемента комплексной интерферограммы ( $\Delta\varphi$ ) равна разности фаз двух снимков. Она прямо пропорциональна изменению расстояния от антенны интерферометра РСА до отражающей площадки на земной поверхности, но также зависит как от геометрии съемки и топографии, так и от ионосферной и атмосферной задержки (Bamler, Hartl, 1998; Hanssen, 2001), т. е.

$$\Delta\varphi = W(\Delta\varphi_{defo} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_n),$$

здесь  $\Delta\varphi_{topo}$  — набег фазы за счет обзора топографии под двумя разными углами;  $\Delta\varphi_{defo}$  — набег фазы за счет смещения отражающей поверхности за период между съемками;  $\Delta\varphi_{atm}$  — фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в атмосфере;  $\Delta\varphi_n$  — набег фазы, генерируемый электромагнитными шумами;  $W(.)$  — оператор свертки.

Ионосферные помехи часто проявляются в виде линейного тренда по всей интерферограмме и в этом случае легко распознаются и могут быть устранены (Samsonov, Tiampo, Rundle, 2008). Изменения температуры, плотности и влажности воздуха могут приводить к получению ложных смещений в направлении на спутник порядка нескольких сантиметров (Михайлов и др., 2014). Именно поэтому при исследовании медленных деформаций полезный сигнал на интерферограмме часто бывает трудно выделить на фоне интенсивных помех. Это обстоятельство ограничивает возможности метода дифференциальной интерферометрии случаями достаточно больших деформаций, как природного (землетрясения, оползни, деформации склонов вулканов), так и техногенного (просадки на разрабатываемых месторождениях, над тоннелями, шахтами) происхождения (Михайлов и др., 2010). Поэтому в настоящее время начали активно развиваться методы, основанные на использовании не отдельных пар, а серий (стека) снимков, позволяющие найти отражающие площадки, для которых влияние различных шумов на каждом снимке рассматриваемой серии минимально.

*Методы обработки серий снимков — методы поиска устойчивых и распределенных отражателей (Persistent Scatterer Interferometry, Distributed Scatterers Interferometry)*

Первое поколение таких методов — технология устойчивых отражателей PS (permanent или persistent scatterers), реализованная, например, в программных пакетах PSInSAR (Ferretti, Prati, Rocca, 2001) и DePSI. Технология используется для определения полей смещений территорий с большим числом устойчивых отражателей радарного сигнала, имеющих достаточно высокую когерентность на всей серии снимков. Временной ряд смещений ищется в заданном классе функций: линейной, периодической, Хевисайда и т. д. Второе поколение подобных методов разработано для оценки смещения и когерентных, и декоррелированных

пикселей. Последние называются распределенными отражателями DS (distributed scatterers), имеющими достаточно высокие значения когерентности лишь для некоторых интерферометрических пар снимков (подробнее об условиях потери когерентности можно посмотреть в работе (Bamler, Hartl, 1998)). Первые попытки оценки смещений для DS сделаны при разработке концепции метода малых базовых линий SBAS (Small BAselines Subsets, (Berardino et al., 2002)). Подход заключается в том, что для уменьшения эффекта декорреляции из всего набора возможных интерферометрических пар выбираются те, которые имеют малые базовые линии. Далее интерферограммы, построенные для выбранных пар снимков, разворачиваются и осредняются (так называемый multilooking). После этого восстанавливаются временные серии фазы каждого пикселя по отношению к снимку-мастеру. Очевидно, что достоверность процесса развертки имеет определяющее значение при реализации этого метода и именно на природных объектах, вследствие пространственной и временной декорреляции, выполнить развертку фазы наиболее сложно.

Некоторое промежуточное положение между этими двумя подходами занимает метод, предложенный А. Хупером и реализованный в программном пакете StaMPS/MTI (Hooper et al., 2007; Kampes, 2006). Метод основан на фазовой стабильности, как критерии выбора устойчивого отражателя, и позволяет уверенно идентифицировать устойчивые отражатели на природных объектах. Данный метод позволяет фильтровать высокочастотные по времени помехи, меняющиеся от снимка к снимку, что существенно подавляет не только аппаратные шумы, но и атмосферные, и орбитальные погрешности. При благоприятных условиях методы устойчивых отражателей позволяют оценивать средние скорости смещения земной поверхности или техногенных объектов с точностью до нескольких миллиметров в год.

Одной из основных проблем указанных методов является то, что пространственная плотность устойчивых отражателей на природных объектах оказывается недостаточной, что приводит к ошибкам развертки фазы (методы PSInSAR, DePSI). В методе SBAS ситуация осложняется тем, что требуется выполнять развертку фазы для всех пар снимков, выбранных для анализа, а их может быть более сотни. Кроме того, устойчивые отражатели, идентифицированные на природных объектах, зачастую характеризуются достаточно шумными временными сериями (методы StaMPS/MTI(PS), SBAS).

*Методы совместного поиска устойчивых и распределенных отражателей APSI  
(Advanced Persistent Scatterer Interferometry)*

Следующим шагом в развитии методов PS стали технологии (например, SqueeSAR, ILS SM-phase estimation и др.), которые за счет предварительной адаптивной фильтрации снимков делают возможным совместный поиск и высококогерентных, и распределенных отражателей. Это увеличивает число отражателей, в том числе и на природных объектах, повышает качество полученных результатов (Ferretti et al., 2011; Monti Guarnieri, Tebaldini, 2008; Lanari et al., 2013; Samiei-Esfahany et al., 2016; Wang, Li, Jiang, 2016).

Важно подчеркнуть, что в большинстве своем имеющиеся на сегодняшний день технологии не настолько разработаны, чтобы их можно было непосредственно применять на территории России. Наличие достаточно мощного снежного покрова зимой, густой растительности или заболачивания летом и ряд других особенностей российской территории усложняют процесс обработки и интерпретации и требуют создания специальных технологий или существенной модификации перечисленных выше подходов. Для получения надежных результатов необходимо правильно выбрать стратегию обработки, эффективно подавить аппаратные помехи и ошибки, вызванные неточностью цифровой модели рельефа (ЦМР), учесть эффект замедления электромагнитных волн в атмосфере за счет влажности в тропосфере и заряженных частиц в ионосфере, оценить влияние снежного покрова и т. д. Очень перспективным представляется использование методики адаптивной (для уменьшения вероятности потери разрешения) фильтрации высокочастотных помех в амплитудной и фазовой частях радарного снимка до построения парных интерферограмм. Учитывая, что процесс обработки радарных снимков и поиска устойчивых отражателей очень сложен и включает большое количество различных процедур, крайне важным является создание такого модуля фильтрации, который можно было бы включить в широко используемые и детально протестированные открытые пакеты, каким является, например, StaMPS/MTI.

### **Предлагаемая методика поиска распределенных отражателей с использованием программного пакета StaMPS/MTI**

Алгоритм поиска устойчивых отражателей, реализованный в программном пакете StaMPS/MTI, состоит из нескольких последовательных этапов (см. (Hooper et al., 2007)):

Этап I: Предварительная обработка I — выбор снимка-мастера, корегистрация снимков, переинтерполяция снимков на сетку снимка-мастера.

Этап II: Предварительная обработка II — построение интерферограмм, геокодирование.

Этап III: Выбор пикселей — кандидатов в PS.

Этап IV: Основной этап — выбор устойчивых отражателей с проведением амплитудного и фазового анализа для оценки вероятности того, что конкретный пиксель является PS; развертка фазы, оценка ошибок и, наконец, оценка смещений для каждого PS.

Основная идея рассмотренного в данной статье подхода состоит в добавлении между первым этапом (корегистрация и переинтерполяция снимков на сетку снимка-мастера) и вторым этапом (построение интерферограмм) дополнительного модуля адаптивной фильтрации амплитудной и фазовой составляющих каждого снимка. Это обеспечивает возможность совместного выделения устойчивых и распределенных отражателей и не вносит значительных изменений в хорошо отработанный алгоритм поиска устойчивых отражателей, реализованный в пакете StaMPS/MTI. Данный подход предложен и реализован для метода PSInSAR в статье (Ferretti et al., 2011).

Дополнительный модуль, о котором говорилось выше, — это последовательное решение ряда задач:

- для каждого пикселя выделяются пространственно-связанные кластеры статистически однородных пикселей (далее СОП), проводится фильтрация амплитуды;
- для каждого пикселя выполняется фильтрация фазы в пределах найденных кластеров, т. е. вычисление значения фазы, исходя из двух условий: постоянства фазы на всем множестве СОП и соблюдения условия согласованности фазы (фазовой триангуляции по работе (Ferretti et al., 2011)) в терминах математического ожидания.

Задачи, сформулированные для дополнительного модуля в части выделения кластеров СОП и фильтрации амплитуды, реализованы нами в предположении, что поля смещений на природных ландшафтах характеризуются некоторой коррелированностью по пространству. Это позволяет выделить группы пикселей со сходным поведением и выполнить совместную обработку данных о смещениях таких пикселей.

### **Постановка задачи и алгоритм поиска пространственно-связанных кластеров статистически однородных пикселей. Пространственно-адаптивная фильтрация амплитуды**

Пусть имеем набор из  $N$  радарных снимков, переинтерполированных на сетку снимка-мастера. Для каждого пикселя  $P$  рассмотрим вектор комплексных данных

$$d(P) = (d_1(P), d_2(P), \dots, d_N(P))^T,$$

где  $d_i(P)$  — комплексное значение отраженного сигнала в пикселе  $P$  на  $i$ -м снимке.

Два пикселя  $P_1$  и  $P_2$  будем считать статистически однородными, если нулевая гипотеза ( $H_0$ ), что  $d(P_1)$  и  $d(P_2)$  являются выборками из одной генеральной совокупности, не может быть отвергнута на уровне значимости  $\alpha$ . Для оценки статистической однородности предлагается использовать двухвыборочный критерий Смирнова (см. (Большев, Смирнов, 1983)), называемый также критерием Колмогорова-Смирнова. Одним из основных преимуществ данного критерия является надежность его применения в случае, если  $N \geq 8$  (Stephens, 1970). Так как количество радарных снимков на различные районы России часто ограничено, данное преимущество является решающим. Критерий Смирнова применяется для оценки однородности выборок, содержащих вещественные значения, а не комплексные, как в нашем случае. По аналогии с традиционными методами выбора PS, в которых начальная оценка стабильности пикселя проводится по амплитудным данным (Ferretti, Prati, Rocca, 2001; Ноорер et al., 2007), критерий однородности Смирнова будет далее применяться для оценки статистической однородности векторов значений амплитуды отраженного сигнала.

Пусть имеется набор  $N$  радарных снимков. Для каждого пикселя  $P$  будем далее рассматривать упорядоченную по возрастанию последовательность значений амплитуды

отраженного сигнала  $|d|$ :  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$ . Эмпирическая функция распределения, построенная по выборке  $x_1, x_2, \dots, x_N$  согласно работе (Большев, Смирнов, 1983) имеет вид:

$$F_N^P(X) = \begin{cases} 0, & X < x_1, \\ \frac{k}{N}, & x_k \leq X < x_{k+1}, \\ 1, & X > x_N, \end{cases}$$

где  $x_k$  —  $k$ -й элемент упорядоченной последовательности значений амплитуды,  $k = 1, 2, \dots, N$ .

Чтобы определить, являются ли два пикселя  $P_1$  и  $P_2$  статистически однородными (т.е. являются ли они выборкой из одной генеральной совокупности), вычисляется статистика критерия Смирнова:

$$D_N = \sqrt{\frac{N}{2}} \cdot \sup_x |F_N^{P_1}(x) - F_N^{P_2}(x)|,$$

где  $F_N^{P_1}(x)$  и  $F_N^{P_2}(x)$  — эмпирические функции распределения, построенные по двум выборкам объемом  $N$  для пикселей  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

Гипотеза  $H_0$  отвергается, если фактически наблюдаемое значение статистики  $D_N$  больше критического  $D_N^{кр}$ , т.е.  $D_N > D_N^{кр}$ , и принимается в противном случае.

При малых объемах выборок ( $N \leq 20$ ) критические значения для заданных уровней значимости критерия можно найти в специальных таблицах. При  $N \rightarrow \infty$  (а практически уже при  $N \geq 50$ ) распределение статистики  $D_N$  сводится к распределению Колмогорова:

$$P(D_N \leq t) = H(t) = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} e^{-2n^2 t^2},$$

которое не зависит от вида эмпирической функции распределения данных. В этом случае, задавая уровень значимости  $\alpha$ , из условия  $\alpha = H(t)$  находим критическое значение.

*Алгоритм выделения пространственно-связанного кластера СОП* для каждого пикселя  $P$  и фильтрации амплитуды в пределах найденного кластера заключается в следующем:

1. Задается размер окна, в котором для каждого пикселя  $P$  будет проведен поиск СОП и пороговое значение  $N^r$  — количество пикселей, статистически однородных с данным, при достижении которого в дальнейшем будет проводиться осреднение амплитуды.

2. Для каждого пикселя  $P$  с использованием двухвыборочного критерия Смирнова в окне поиска выделяется пространственно-связанный кластер СОП  $\Omega$ .

3. В пределах найденного кластера  $\Omega$  проводится процедура адаптивной фильтрации амплитуды стека снимков, а именно:

–  $\hat{d}_i(P) = |d|_i(P)$ , если количество элементов множества  $\Omega$  не превышает заданного порогового значения;

–  $\hat{d}_i(P) = \sum_{\Omega} |d|_i(P) / |\Omega|$  — простое осреднение, если количество элементов множества  $\Omega$  превышает пороговое значение.

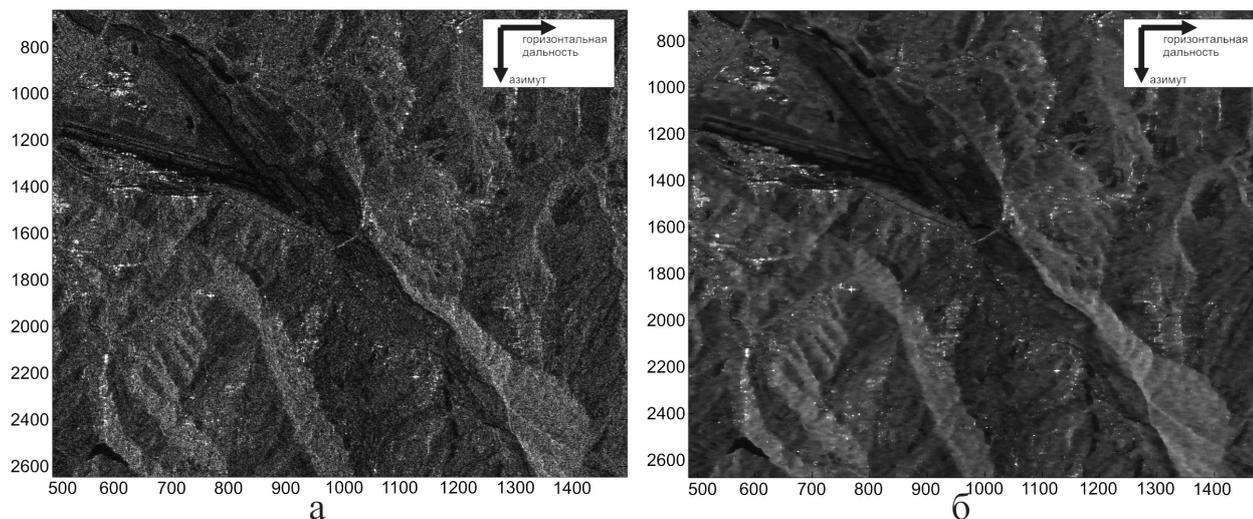
Данный алгоритм реализован в виде пакета программ, написанных на языке MatLab, поскольку программный пакет StaMPS/MTI, в который данные программы встраиваются в дальнейшем, также написан на этом языке.

Отметим, что реализация и апробирование на реальных данных статистических методов фильтрации фазы в пределах найденных кластеров СОП в данной статье не рассматриваются.

### Пример расчетов на реальных данных

Тестовые расчеты проводились по 19 снимкам ALOS PALSAR (восходящая орбита, трек 588) на территорию Адлерского района г. Большой Сочи.

После завершения корегистрации снимков и переинтерполяции всех снимков на сетку снимка-мастера были выделены кластеры статистически однородных пикселей. При этом были использованы следующие параметры: размер окна для поиска —  $11 \times 11$  пикселей (около 1 га), пороговое значение — 30 пикселей. На *рис. 1* показана амплитуда первого снимка из серии из 19 снимков до и после проведенной пространственно-адаптивной фильтрации (фрагмент полного снимка).



*Рис. 1. Амплитуда снимка ALOS PALSAR трек 588А до (а) и после (б) предварительно проведенной пространственно-адаптивной фильтрации (фрагмент полного снимка)*

Количество пространственно-связанных СОП для того же фрагмента снимка, посчитанное для каждого пикселя, приведено на *рис. 2*.

Далее были построены интерферограммы и завершен совместный поиск и устойчивых, и распределенных отражателей в программном пакете StaMPS/MTI. Всего было найдено 51 513 отражателей (в данном случае это и высококогерентные, и распределенные устойчивые отражатели). Поле средних скоростей смещений в направлении на спутник для найденных устойчивых отражателей показано на *рис. 3а*. Также были проведены расчеты в пакете

StaMPS/MTI без использования дополнительного модуля. Всего было найдено 30069 устойчивых отражателей (рис. 3б). Таким образом, количество устойчивых отражателей (здесь это уже суммарное количество и устойчивых, и распределенных отражателей), полученное после проведения предварительной пространственно-адаптивной фильтрации амплитуды для серии снимков, сделанных со спутника ALOS PALSAR, значительно увеличилось. На рис. 3а более четко видны области интенсивных смещений, часть таких областей идентифицирована только на рис. 3а.

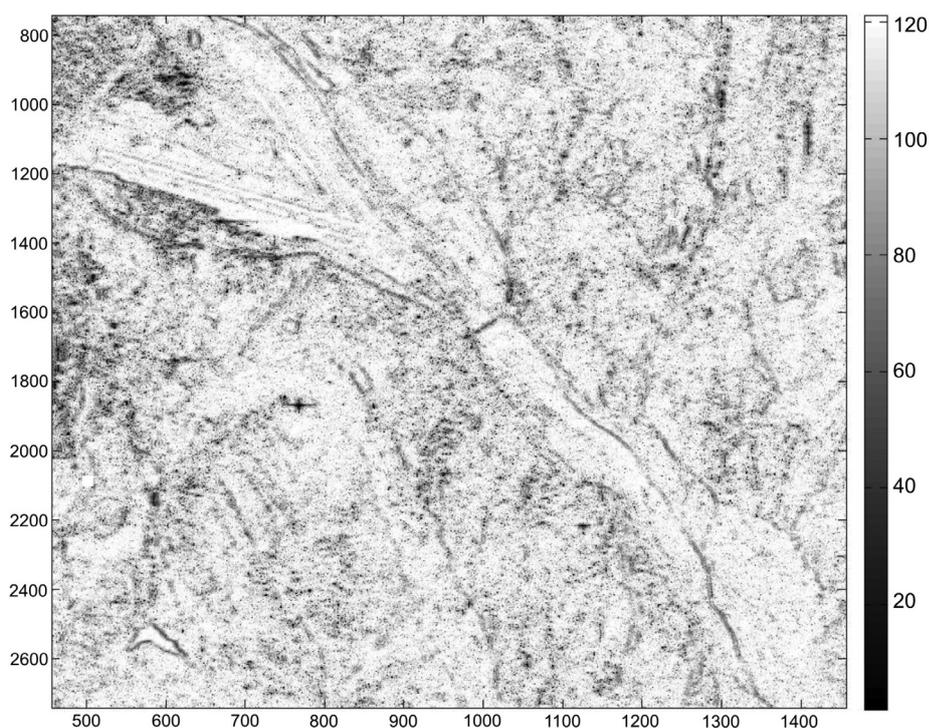


Рис. 2. Число СОП, вычисленных для каждого пикселя по стеку из 19 снимков ALOS PALSAR (восходящая орбита, трек 588) с использованием критерия Смирнова

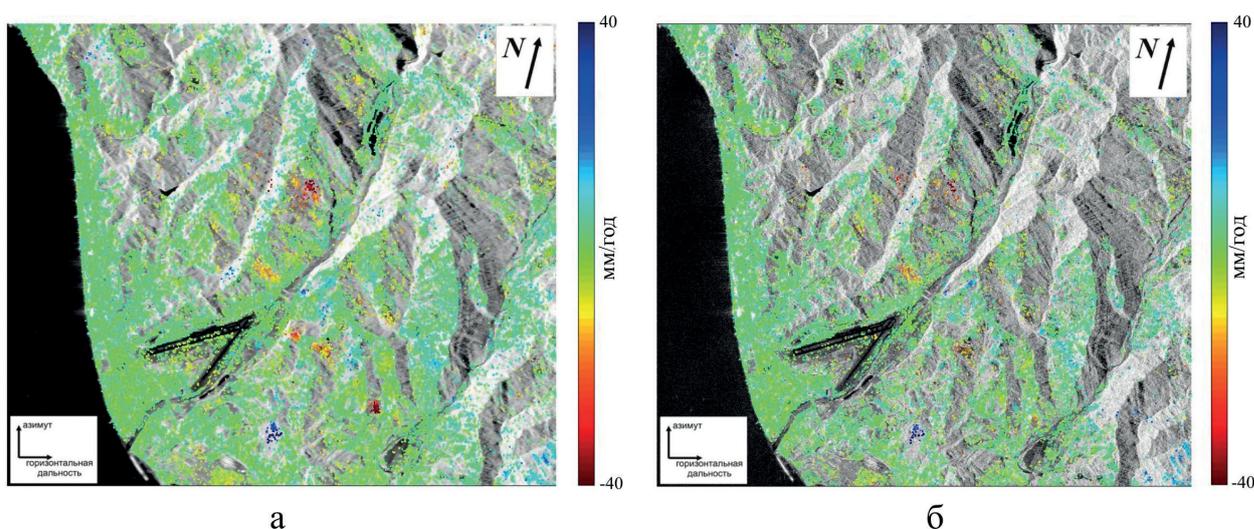


Рис. 3. Поле средних скоростей смещений в направлении на спутник в радарных координатах (азимут — горизонтальная дальность), посчитанное в пакете StaMPS/MTI: а) — с предварительно проведенной пространственно-адаптивной фильтрацией амплитуды (51513 высококогерентных устойчивых и распределенных отражателей); б) — без использования дополнительного модуля (30069 устойчивых отражателей)

## Заключение

В предположении, что поле смещений на природных объектах обладает некоторой коррелированностью (гладкостью) по пространству, предложена методика поиска распределенных отражателей, которая может быть включена в существующее открытое программное обеспечение. Выделение групп пикселей со сходным поведением и выполнение совместной обработки данных о смещениях таких пикселей позволяет повысить соотношение сигнал/шум и, следовательно, улучшить качество оценки полей смещений. Этот метод обладает преимуществом перед простыми методами фильтрации (multilooking), где осредняются пиксели, которые могут не принадлежать одному и тому же объекту. В рамках этой методики разработан алгоритм выделения кластеров пикселей, которые могут быть отнесены к одной статистической совокупности. В пределах этих кластеров осуществлена фильтрация амплитуды. Алгоритм реализован в виде программного модуля, который удалось встроить в стандартный граф обработки радарных спутниковых снимков программного пакета StaMPS/MTI. Результаты тестирования показали, что количество устойчивых отражателей (здесь это суммарное количество и устойчивых, и распределенных отражателей), полученное после проведения предварительной пространственно-адаптивной фильтрации амплитуды для серии из 19 снимков, сделанных со спутника ALOS PALSAR, увеличилось более чем в полтора раза. Число отражателей при использовании снимков после проведения предложенной в работе фильтрации амплитуды превысило 50 000, против 30 000 отражателей при использовании оригинальных снимков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00937).

## Литература

1. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
2. *Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н.М., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Известия РАН. Сер. Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
3. *Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А.* Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи // Известия РАН. Сер. Физика Земли. 2014. № 4. С. 120–130.
4. *Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. Vol. 14 (4). P. R1–R54.
5. *Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transact. Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. No. 11. P. 2375–2383.
6. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. No. 1. P. 8–20.
7. *Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric datastacks: Squeasar // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. No. 9. P. 3460–3470.
8. *Hanssen R.* Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2001. 328 p.
9. *Hooper A., Segall P., Zebker H.* Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo, Galapagos // J. Geophysical Research. 2007. Vol. 112. B07407. DOI: 10.1029/2006JB004763.
10. *Kampes B.M.* Radar interferometry: persistent scatterer technique. Springer, 2006. 220 p.
11. *Lanari R., Manzo M., Pepe A., Yang Y., Tizzani P., Zeni G.* A full exploitation of the enhanced SBAS-DInSAR approach in volcanic and seismogenic areas // Proc. IGARSS 2013. Melbourne 21–26 July 2013.

12. Monti Guarnieri A., Tebaldini S. On the exploitation of target statistics for sar interferometry applications // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. No. 11. P. 3436–3443.
13. Samiei-Esfahany S., Martins J.E., van Leijen F., Hanssen R.F. Phase Estimation for Distributed Scatterers in InSAR Stacks Using Integer Least Squares Estimation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54. No. 10. P. 5671–5686.
14. Samsonov S.V., Tiampo K.F., Rundle J.B. Application of DInSAR GPS optimization for derivation of three dimensional surface motion of the southern California region along the San Andreas fault // Computers and Geosciences. 2008. Vol. 34. P. 503–514.
15. Stephens M.A. Use of the Kolmogorov-Smirnov, Cramér-Von Mises and related statistics without extensive tables // J. Royal Statistical Society. Ser. B (Methodological). 1970. Vol. 32. No. 1. P. 115–122.
16. Wang M., Li T., Jiang L. Monitoring reclaimed lands subsidence in Hong Kong with InSAR technique by persistent and distributed scatterers // Natural hazards. 2016. Vol. 81. No. 1. P. 541–543.

## On monitoring surface displacements of natural terrains using SAR interferometry

E.A. Kiseleva, V.O. Mikhailov, E.I. Smolianinova, P.N. Dmitriev

*O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia  
E-mail: e.kiseleva@ifz.ru*

For SAR monitoring of surface displacements of territories with lack of good reflectors of radar signals it is extremely important to work out a technique to reveal signals reflected from natural terrains. These signals are characterized by low amplitude and poor coherence for some interferometric pairs. We present critical analysis of different InSAR methods, including those which are the most promising to identify both Persistent and Distributed scatterers (APSI — Advanced Persistent Scatterer Interferometry). We discuss the method of adaptive amplitude filtration which was developed in the framework of the APSI technology (Feretti et al., 2011) and its implementation as the StaMPS/MTI (Hooper et al., 2007) module. We present fields of surface displacement rates for the Adler region of Sochi calculated using ALOS PALSAR images by means of the StaMPS/MTI software applying of the proposed adaptive filtration of amplitude and without any preliminary processing. Application of adaptive filtering of amplitude permitted us to increase the number of Persistent Scatterers from 30000 to 50000.

**Keywords:** INSAR, Persistent and Distributed Scatterers, APSI

*Accepted: 25.09.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-122-132*

### References

1. Bol'shev L.N., Smirnov N.V., *Tablitsy matematicheskoi statistiki* (Tables of mathematical statistics), Moscow: Nauka, 1983, 416 p.
2. Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Diaman M., Shapiro N.M., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Polyakov S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Sovmestnaya interpretatsiya dannykh differentsial'noi sputnikovoi interferometrii i GPS na primere Altaiskogo (Chuiskogo) zemletryaseniya 27.09.2003 g. (Joint interpretation of INSAR and GPS — case study of Altai (Chuisk) earthquake 27.09.2003), *Izvestiya RAN, Ser. Fizika Zemli*, 2010, No. 2, pp. 3–16.
3. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Yu.S., Dorokhin K.A., Timoshkina E.P., Khairtdinov S.A., Nekotorye problemy monitoringa opolznevnykh protsessov s ispol'zovaniem sputnikovyykh radarnykh snimkov s razlichnoi dlinoi volny na primere dvukh opolznevnykh sklonov v raione Bol'shogo Sochi (Some problems of monitoring landsliding using SAR acquisitions with different wavelengths: case study of two landslides in the Big Sochi area), *Izvestiya RAN. Ser. Fizika Zemli*, 2014, No. 4, pp. 120–130.
4. Bamler R., Hartl P., Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 1998, Vol. 14, No. 4, pp. R1–R54.
5. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, No. 11, pp. 2375–2383.
6. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20.

7. Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A., A new algorithm for processing interferometric datastacks: Squeesar, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 9, pp. 3460–3470.
8. Hanssen R., *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2001, 328 p.
9. Hooper A., Segall P., Zebker H., Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo, Galapagos, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, B07407. DOI: 10.1029/2006JB004763.
10. Kampes B.M., *Radar interferometry: persistent scatterer technique*, Springer, 2006, 220 p.
11. Lanari R., Manzo M., Pepe A., Yang Y., Tizzani P., Zeni G., A full exploitation of the enhanced SBAS-DInSAR approach in volcanic and seismogenic areas, *Proc. IGARSS 2013*, Melbourne 21–26 July 2013.
12. Monti Guarnieri A., Tebaldini S., On the exploitation of target statistics for sar interferometry applications, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 11, pp. 3436–3443.
13. Samiei-Esfahany S., Martins J.E., van Leijen F., Hanssen R.F., Phase Estimation for Distributed Scatterers in InSAR Stacks Using Integer Least Squares Estimation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 10, pp. 5671–5686.
14. Samsonov S.V., Tiampo K.F., Rundle J.B., Application of DInSAR GPS optimization for derivation of three dimensional surface motion of the southern California region along the San Andreas fault, *Computers and Geosciences*, 2008, Vol. 34, pp. 503–514.
15. Stephens M.A., Use of the Kolmogorov-Smirnov, Cramér-Von Mises and related statistics without extensive tables, *J. Royal Statistical Society, Ser. B (Methodological)*, 1970, Vol. 32, No. 1, pp. 115–122.
16. Wang M., Li T., Jiang L., Monitoring reclaimed lands subsidence in Hong Kong with InSAR technique by persistent and distributed scatterers, *Natural hazards*, 2016, Vol. 81, No. 1, pp. 541–543.