

УДК: 004.93

## Определение движения объектов на земной поверхности методами SAR-интерферометрии

К. В. Рудаков<sup>1,a</sup>, Л. Н. Сандуляну<sup>2,b</sup>, А. А. Токмакова<sup>2,c</sup>,  
И. С. Ямщиков<sup>2,d</sup>, И. А. Рейер<sup>1,e</sup>, В. В. Стрижов<sup>1,f</sup>

<sup>1</sup>Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук,  
119333, Москва, ул. Вавилова, 40

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт,  
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

E-mail: <sup>a</sup> rudakov@ccas.ru, <sup>b</sup> liubov.sanduleanu@gmail.com, <sup>c</sup> aleksandra.tokmakova@gmail.com,  
<sup>d</sup> ilya.yamschikov@gmail.com, <sup>e</sup> reyer@forecsys.ru, <sup>f</sup> strijov@gmail.com

Получено 1 апреля 2015 г.,  
после доработки 8 июля 2015 г.

Для решения задачи определения движения инфраструктурных объектов на земной поверхности применяется метод SAR-интерферометрии. Этот метод основан на получении серии детальных спутниковых снимков одного и того же участка земной поверхности в разные моменты времени. Каждый спутниковый снимок содержит амплитудную и фазовую составляющие. Для определения движения используется изменение фазовой компоненты с течением времени. Предлагается метод выделения устойчивых отражателей на серии изображений и оценивания относительного сдвига объектов, соответствующих устойчивым отражателям.

Ключевые слова: радиолокация, синтезированная апертура антенны, SAR-интерферометрия, устойчивые отражатели

## Terrain objects movement detection using SAR interferometry

K. V. Rudakov<sup>1</sup>, L. N. Sanduleanu<sup>2</sup>, A. A. Tokmakova<sup>3</sup>, I. S. Yamschikov<sup>3</sup>, I. A. Reyer<sup>3</sup>,  
V. V. Strijov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dorodnicyn Computing Centre of RAS, 40 Vavilov st., Moscow, 119333, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, 141700, Russia

**Abstract.** — To determine movements of infrastructure objects on Earth surface, SAR interferometry is used. The method is based on obtaining a series of detailed satellite images of the same Earth surface area at different times. Each image consists of the amplitude and phase components. To determine terrain movements the change of the phase component is used. A method of persistent scatterers detection and estimation of relative shift of objects corresponding to persistent scatterers is suggested.

Keywords: radiolocation, synthetic aperture radar, SAR interferometry, persistent scatterers

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1047–1060 (Russian).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Программа повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг.) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 14-07-00852, 14-07-31045).

## Введение

Одной из важнейших задач дистанционного зондирования является выявление смещений объектов земной поверхности. Такими объектами являются, например, объекты железно-дорожной инфраструктуры, здания и сооружения. Для выявления смещений объектов используются наземные и спутниковые методы. Среди спутниковых методов выделяют методы SAR-интерферометрии [Bamler, Hartl, 1998; Costantini et al., 2003], с помощью которых появляется возможность замечать малейшие смещения объектов земной поверхности. В работе [Costantini et al., 2008] был разработан устойчивый к шуму метод выделения сдвигов, основывающийся на поиске взаимосвязанных пар точек, называемых устойчивыми отражателями. Метод пар устойчивых отражателей также позволяет выделять атмосферную составляющую шума из фазовой модели изображения.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой позволяют получать детальные изображения земной поверхности. Высокое разрешение снимков достигается путем искусственного увеличения эффективного размера бортовой антенны спутника при его орбитальном движении [Василейский и др., 2013].

Принцип SAR-интерферометрии заключается в следующем. Каждый пиксел спутникового снимка содержит информацию о действительной и мнимой части волны, отраженной от участка земной поверхности и принятой спутником [Bamler, Hartl, 1998; Ferretti et al., 2001; Hooper et al., 2004]. Таким образом, спутниковый снимок имеет две составляющие: действительную и мнимую часть, которые могут быть преобразованы в амплитудную (яркостную) и фазовую составляющие изображения. Отметим, что типичный размер участка земной поверхности в одном пикселе изображения превышает квадратный метр, что делает невозможным определение миллиметровых смещений по яркостной составляющей изображения. Для этой цели используется анализ фазовых составляющих набора снимков.

На основе набора фазовых составляющих SAR-изображений, полученных спутником в разные моменты времени (с периодичностью, например, один снимок в сутки), рассчитывается изменение фазовой составляющей с течением времени. Изменение фазовой составляющей связано линейной зависимостью с разностью хода волны, отраженной от поверхности и, таким образом, появляется возможность измерять вертикальные смещения объектов земной поверхности, сравнимые с длиной волны сигнала спутника, имеющей порядок нескольких сантиметров.

Основная трудность такого подхода заключается в том, что измерения фазовой составляющей зашумлены многими факторами, связанными с различным относительным положением спутника, атмосферными эффектами и диэлектрической проницаемостью среды, от которой происходит отражение волны. Для устранения этих проблемы было предложено понятие устойчивых отражателей [Ferretti et al., 2001]. Устойчивым отражателем называется такой участок земной поверхности, для которого фазовая характеристика отраженной волны меняется незначительно с течением времени. Было предложено измерять изменение фазы и, соответственно, разности хода для разреженного множества устойчивых отражателей на серии SAR-изображений и выявлять малейшие смещения земной поверхности именно для этого разреженного множества.

Таким образом, метод определения смещений объектов земной поверхности, предлагаемый в данной работе, состоит из следующих этапов. На первом этапе выполняется процедура совмещения SAR-изображений, полученных в разные моменты времени. Для каждого РСА-изображения выделяется система устойчивых отражателей. Составляется единая система отражателей для серии спутниковых изображений. Рассчитывается изменение фазового сдвига для серии изображений. Выделяются пары отражателей с наименьшим относительным изменением фазы. По относительному изменению фазы рассчитывается относительное изменение высоты земной поверхности.

Предлагаемый алгоритм используется для определения смещений земной поверхности для набора снимков, полученных системой COSMO-SkyMed. Некоторые изображения, полученные спутниками этой системы, располагаются в открытом доступе по адресу: <http://www.cosmoskymed.it/en/index.htm>.

Введем систему обозначений, используемую в работе:

$\mathbf{Z}_t, \Phi_t$  — матрицы амплитудной и фазовой характеристик SAR-изображения в момент времени  $t$ ;

$\mathbf{H}$  — матрица высот земной поверхности, соответствующей SAR-изображению;

$z_t, \phi_t, h : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^1$  — функции яркости, фазы и высоты, поставленные в соответствие изображению, задаваемому матрицами  $\mathbf{Z}_t, \Phi_t, \mathbf{H}$ ; отметим, что волна, принимаемая радаром спутника в момент времени  $t$ , представляется формулой  $z_t(x, y) \exp(i\phi_t(x, y))$ ;

$\mathbf{R}_t$  — бинарная матрица, элемент  $\mathbf{R}_t(x, y)$  которой указывает на расположение устойчивого отражателя в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ ;

$\mathbf{R}_{\mathcal{T}}, \Phi_{\mathcal{T}}, \mathbf{Z}_{\mathcal{T}}$  — набор матриц для множества отсчетов времени  $\mathcal{T} = \{t\}$ , соответствующих времени съемки SAR-изображения, e.g.  $\mathbf{R}_{\mathcal{T}} = \{\mathbf{R}_t, t \in \mathcal{T}\}$ ; отметим, что набор матриц  $\mathbf{H}_{\mathcal{T}}$  является скрытым для наблюдения;

$\bar{\mathbf{R}}$  — агрегированная матрица устойчивых отражателей по всем снимкам  $t \in \mathcal{T}$ ;

$\Psi$  — матрица, соответствующая изображению географической карты земной поверхности;

$\mathcal{I} = \{i(x, y)\}$  — нумерованный набор устойчивых отражателей,  $\mathcal{I}_t$  — набор устойчивых отражателей для момента времени  $t \in \mathcal{T}$ ;

$\alpha_t$  — вектор параметров спутника в момент времени  $t$ , необходимых для формирования изображения: азимут, высота, базовая линия;

$\xi_t(x, y)$  — вертикальное смещение точки земной поверхности в момент  $t$  относительно нулевого отсчета времени, выраженное в единицах высоты  $\mathbf{H}$ ; рассматриваются только относительные смещения, т. е. величины смещений относительно смещения фиксированной точки земной поверхности;

$\Xi_t$  — матрица относительных смещений высот, набор из  $\xi_t(x, y)$ ;

$\rho((i, j), (i', j'))$  — метрика или другая функция близости, определенная на координатах точек изображения;

$\Gamma_t$  — матрица размера  $|\mathcal{I}_t| \times |\mathcal{I}_t|$ , значение  $\Gamma_t(i, j)$  которой равно разности фаз отражателей  $i$  и  $j$  в момент времени  $t$ ,  $\Gamma_t(i, j) = \varphi_t(i) - \varphi_t(j)$ .

Предлагаемая процедура определения сдвигов земной поверхности разделяется на следующие этапы.

1. Совмещение изображений,

$$\mathbf{Z}_t^*, \Phi_t^* \rightarrow \mathbf{Z}_t, \Phi_t,$$

таким образом, что каждой координате  $(x, y)$  соответствует одна и та же точка поверхности на каждом снимке.

2. Совмещение фотографий поверхности с картой высот и географической картой,

$$\mathbf{H}, \Psi, \mathbf{Z}_{t=1} \rightarrow \mathbf{H}, \Psi.$$

3. Поиск системы устойчивых отражателей на каждом снимке по отдельности,

$$\mathbf{Z}_t, \Phi_t \rightarrow \mathbf{R}_t, t \in \mathcal{T}.$$

4. Совмещение найденных систем устойчивых отражателей,

$$\mathbf{R}_{\mathcal{T}} \rightarrow \bar{\mathbf{R}}.$$

5. Определение фазового сдвига для системы отражателей,

$$\Phi_t, \bar{\mathbf{R}} \rightarrow \mathcal{I} = \{i(x, y)\}, \Gamma_t, t \in \mathcal{T}.$$

6. Определение относительных вертикальных сдвигов отражателей,

$$\Gamma_t, \alpha \rightarrow \Xi_t \{\xi_t(x, y)\}, t \in \mathcal{T}.$$

7. Уточнение движения отражателей с помощью метрических конфигураций,

$$\Gamma_t, \rho \rightarrow \Xi_t \{\xi_t(x, y)\}, t \in \mathcal{T}.$$

8. В качестве дополнения рассматривается альтернативный метод обнаружения движения,

$$\mathbf{Z}_{\mathcal{T}}, \Phi_{\mathcal{T}} \rightarrow \bar{\mathbf{R}}.$$

## Совмещение изображений

На первом этапе задана серия SAR-изображений  $\{\Phi_{\mathcal{T}}^*, \mathbf{Z}_{\mathcal{T}}^*\}$ , полученных напрямую от спутника. Знак «\*» означает, что изображения, вообще говоря, не являются сведенными, то есть одному и тому же элементу матрицы  $(i, j)$  на разных изображениях соответствуют разные участки земной поверхности. Для дальнейшей обработки серии изображений необходимо провести процедуру их *совмещения*.

Для выполнения процедуры совмещения изображений используются только яркостные (амплитудные) части снимков,  $\mathbf{Z}_{\mathcal{T}}^*$ . Процедура совмещения выполняется следующим образом: сначала для совмещения пары изображений  $(\mathbf{Z}_{t_1}; \mathbf{Z}_{t_2})$  требуется найти набор особых точек, а затем использовать композицию  $g_{ij} : R^2 \rightarrow R^2$  преобразований поворота, растяжения, поворота и сдвига. Метод поиска особых точек является стандартным и описан в следующем разделе. Композиция преобразований записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} g(\mathbf{w}) : \mathbf{x} &\rightarrow \mathbf{x}^{(*)}, \text{ где } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{x}^{(1)} &= \begin{pmatrix} \cos w_1 & -\sin w_1 \\ \sin w_1 & \cos w_1 \end{pmatrix} \mathbf{x}; \\ \mathbf{x}^{(2)} &= \begin{pmatrix} w_2 & 0 \\ 0 & w_3 \end{pmatrix} \mathbf{x}^{(1)}; \\ \mathbf{x}^{(3)} &= \begin{pmatrix} \cos w_4 & -\sin w_4 \\ \sin w_4 & \cos w_4 \end{pmatrix} \mathbf{x}^{(2)}; \\ \mathbf{x}^{(*)} &= \mathbf{x}^{(3)} + \begin{bmatrix} w_5 \\ w_6 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Зададим целевую функцию для оценки качества совмещения изображений:

$$S(\mathbf{w}) = \sum_k (x_k^j - g(x_k^i))^2,$$

где  $x_k^i$  означает  $k$ -ю опорную точку на  $i$ -ом изображении.

Получим оптимизационную задачу вида

$$\hat{\mathbf{w}} = \underset{\mathbf{w} \in \mathbb{R}^6}{\operatorname{argmin}} S(\mathbf{w}).$$

Отметим, что необходимо выбрать опорное изображение  $Z_{i'}$ , по отношению к которому ищется набор преобразований для всего набора снимков. Опорное изображение можно выбирать как по экспертным оценкам, так и по описанному выше алгоритму: сначала каждое изображение считается опорным, а затем рассматривается суммарная ошибка после сведения всех изображений.

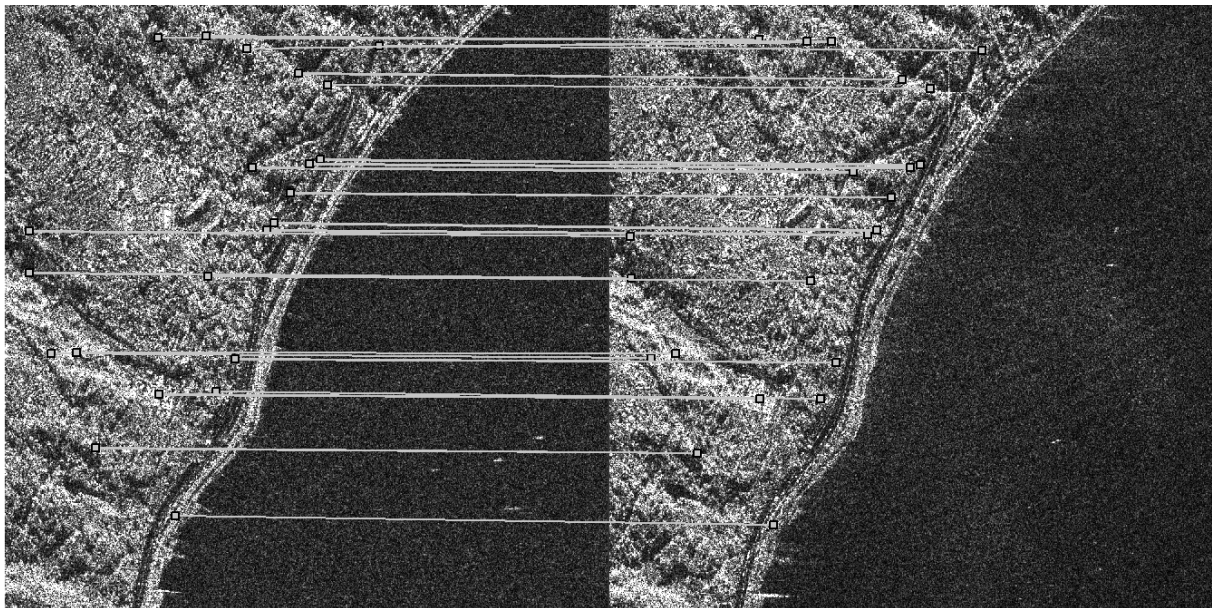


Рис. 1. Сведение изображений

На рисунке 1 показан этап сведения изображений: для двух космических снимков одной и той же земной поверхности проиллюстрирован набор ключевых точек, по которым осуществляется преобразование одного изображения в другое.

## Совмещение карты высот и географической карты с серией изображений

На втором этапе выполняется процедура совмещения карты высот  $\mathbf{H}$  и географической карты  $\Psi$  с серией совмещенных снимков  $Z_{i'}$ . Для упрощения рассматривается один снимок  $Z_{i'}$  из серии, выбранный опорным на предыдущем этапе.

Отличие от предыдущего этапа заключается в том, что в силу специфики географической карты и карты высот ключевые точки на обеих картах выделяются вручную (это могут быть пересечения рек, вершины гор и др.). Затем к географической карте и карте высот применяется композиция преобразований поворота, растяжения, поворота и сдвига, как это было сделано при совмещении снимков между собой. Начальное приближение для нахождения параметров композиции преобразований предлагается брать исходя из примерного совмещения вручную.

На рисунке 2 показано совмещение опорного снимка с картой высот, на рисунке 3 — с географической картой.

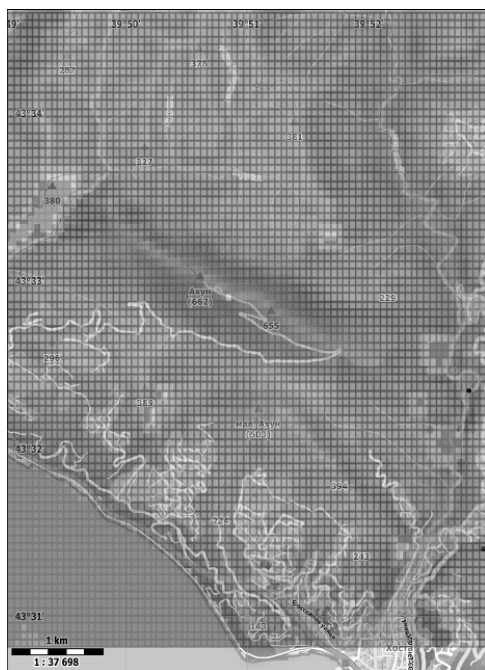


Рис. 2. Совмещение с картой высот

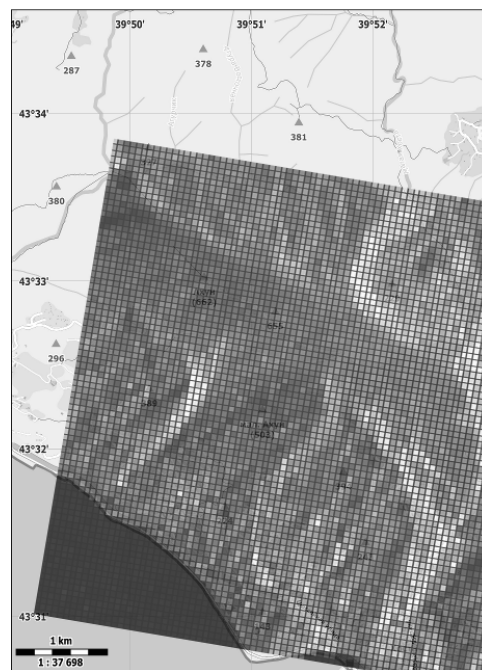


Рис. 3. Совмещение с географической картой

## Поиск устойчивых отражателей (светлых пятен)

В этом разделе опишем процедуру поиска устойчивых отражателей на изображении, которые используются, во-первых, для совмещения серии изображений и, во-вторых, для определения фазового сдвига на серии изображений. Устойчивый отражатель характеризуется малым значением дисперсии фазы в зависимости от снимка. Будем моделировать устойчивые отражатели яркими светлыми пятнами на амплитудной составляющей изображения. Каждый пиксель яркого пятна является комплексным числом и несет значения амплитуды и фазы принятого сигнала. Требуется на монохромном изображении выделить светлые пятна — однородные яркие участки с резким изменением градиента яркости на границе. Методы поиска таких пятен (*blob detection*) широко исследованы [Marr, Hildreth, 1980; Mikolajczyk, Schmid, 2004].

Метод строится для поиска ярких пятен на изображении  $\mathbf{Z} = \{z_{ij}\}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ , где  $z_{ij} \in B$  — яркость пиксела. Здесь  $B \in \mathbb{R}_+$  — возможные значения яркости.

Алгоритм получает на вход одно амплитудное изображение  $\mathbf{Z}$  и, возможно, набор параметров. На выходе требуется получить бинарную матрицу  $\mathbf{R}$ , в которой единицам соответствуют центры найденных пятен (индекс  $t$  опущен из соображений краткости).

Для выявления светлых пятен используем LoG-детектор (Laplacian-of-Gaussian, лапласиан гауссиана) [Marr, Hildreth, 1980]. В этом алгоритме производится свертка изображения со второй производной гауссиана и затем на получившемся изображении находятся локальные минимумы. Они будут соответствовать светлым пятнам на изображении.

В предлагаемом алгоритме для поиска пятен различного размера вычисляется множество сверток изображения с масками с различным параметром. На всех свертках точки, соответствующие центрам ярких пятен, будут являться локальными минимумами. При этом минимальное значение яркости будет достигаться на свертке с маской с параметром, равным радиусу светлого пятна.

Для устойчивости к шуму предлагается искать локальные минимумы на изображении  $\overline{\text{conv}}$ , которое определяется как  $\overline{\text{conv}}(i, j) = \min_{k=1, \dots, k} (\text{conv}_k(i, j))$ .

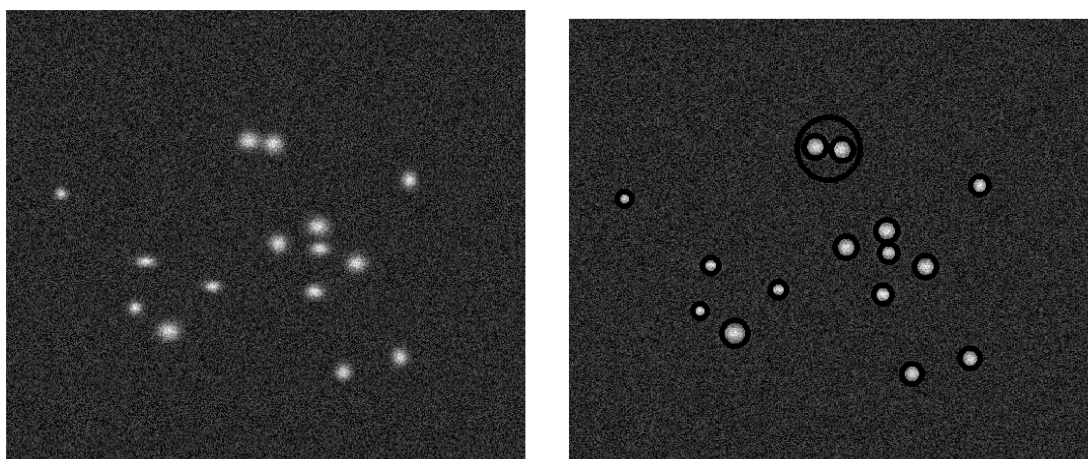


Рис. 4. Пример работы алгоритма

А также среди найденных пятен отсекаются те, интенсивность которых близка к интенсивности шумов.

Введем дополнительные обозначения:

- $\mathbf{Z}$  – входное изображение;
- $\mathbf{R}$  – матрица, совпадающая по размеру с  $\mathbf{Z}$ , с элементами  $r_{ij} \in \{0, 1\}$ , в которой единицы соответствуют центрам ярких пятен;
- $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_k)$  – набор возможных радиусов ярких пятен среди которых ведется поиск;
- $G(x, y, \sigma)$  – гауссиана с центром в  $(x, y)$  и параметром  $\sigma$ ;
- $\hat{G}(x, y, \sigma)$  – нормированная гауссиана:  $\hat{G}(x, y, \sigma) = \sigma^2 G(x, y, \sigma)$ ;
- $\nabla \hat{G}(x, y, \sigma)$  – вторая производная нормированной гауссианы;
- $Convolution(img_1, img_2)$  – функция свертки изображений  $img_1$  и  $img_2$ ;
- $Conv = (conv_1, \dots, conv_k)$  – множество сверток.

**Вход:**  $\mathbf{Z}, \mathbf{r}$

**Выход:**  $\mathbf{R}$

```

01:  $\mathbf{R} \leftarrow \mathbf{0}^{m \times n}$ 
02: // создаем набор сверток с различными масками
03: для всех  $r_k$  в  $\mathbf{r}$ 
04:    $conv_k \leftarrow Convolution(\mathbf{Z}, \nabla \hat{G}(x, y, r_k))$ 
05:  $\overline{conv} \leftarrow \min(conv_1, \dots, conv_k)$ 
06: для всех  $(i, j)$  в  $[1, \dots, m] \times [1, \dots, n]$ ,
07:   если  $(i, j)$  – точка локального минимума в  $\overline{conv}$ , то
08:      $\mathbf{R}_{ij} \leftarrow 1$ 
09: // отбрасываем шумовые пятна
10: для всех  $(i, j)$  – центры пятен,
11:   если  $\overline{conv}(i, j) > \text{median}(\overline{conv}) + 0.1 \left( \max_{(p,q) \in \text{blobs\_centers}} \overline{conv}(p, q) - \text{median}(\overline{conv}) \right)$ , то
12:      $\mathbf{R}(i, j) = 0$ 
    
```

## Пошаговые примеры

В этом разделе приведены пошаговые иллюстрации работы алгоритма на примере изображения с одним ярким пятном в центре и шумом интенсивностью 0.3 яркости пятна.

1. Исходное изображение (рис. 5).

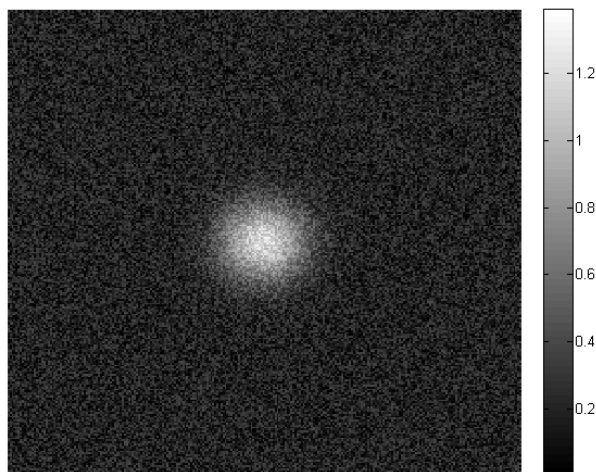


Рис. 5. Исходное изображение

2. Вычисляются свертки изображения с масками с различными параметрами (рис. 6).

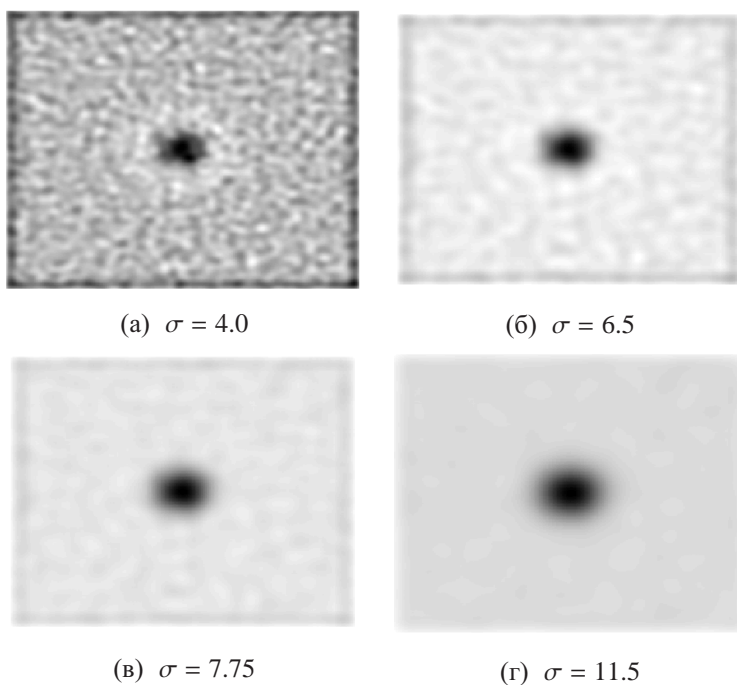


Рис. 6. Свертки с различными масками

3. Вычисляется изображение:  $\overline{conv}(i, j) = \min_{k=1, \dots, k} (conv_k(i, j))$  (рис. 7).



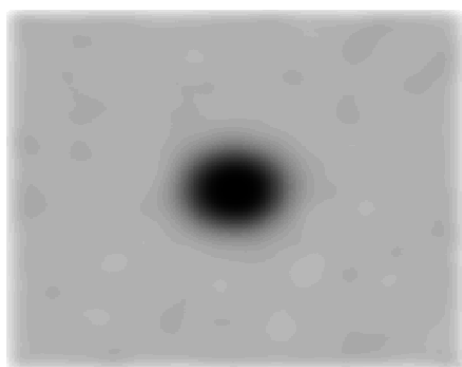


Рис. 7.  $\overline{conv}(i, j)$

4. На полученном изображении находятся локальные минимумы (рис. 8).

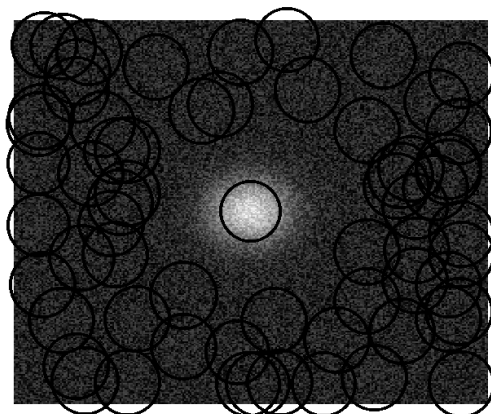


Рис. 8. Шумовые яркие пятна

5. Отфильтровываются шумовые пятна (рис. 9).

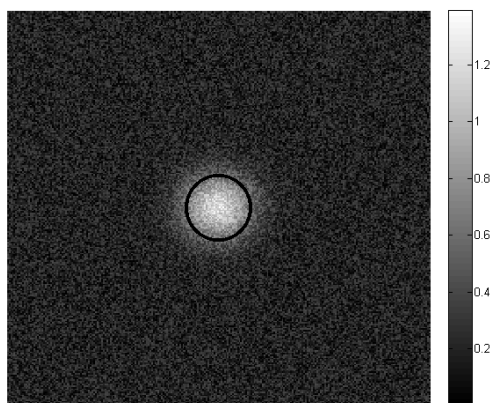


Рис. 9.  $\overline{conv}(i, j)$

На рисунке 10 показаны выделенные алгоритмом устойчивые отражатели для пары реальных снимков.

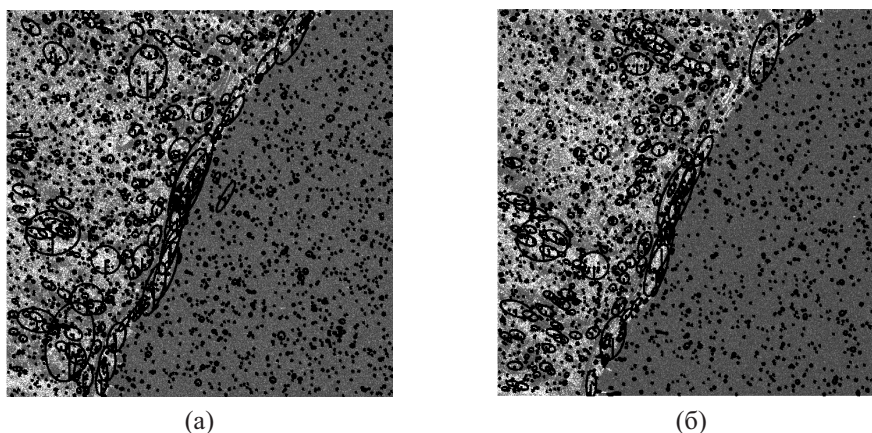


Рис. 10. Устойчивые отражатели для реальных снимков

### Совмещение устойчивых отражателей

В данном разделе опишем процедуру построения единой системы отражателей  $\bar{\mathbf{R}}$  по рассчитанному ранее набору систем отражателей  $\mathbf{R}_{\mathcal{T}}$ . Будем строить единую систему отражателей по принципу ближайших соседей:

$$\bar{\mathbf{R}}'(x, y) = \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{|\mathcal{T}|} \mathbf{R}_t(x, y) \circ G(x, y, \sigma_t),$$

где  $\circ$  — значок свертки. Заметим, что в случае  $\sigma_t = \text{const}$  значение  $\bar{\mathbf{R}}'(x, y)$  является усредненным значением суммарной системы отражателей с учетом ближайших соседей точки с координатами  $(x, y)$ . На практике рассматривается именно случай  $\sigma_t = \text{const}$  для разных значений  $\sigma_t$ . После выполнения процедур усреднения и свертки составляется бинарная матрица  $\bar{\mathbf{R}}$ , в которой единичные элементы выбираются по пороговому значению  $h$ :

$$\bar{\mathbf{R}}(i, j) = \begin{cases} 1, & \bar{\mathbf{R}}'(x, y) \geq h, \\ 0, & \bar{\mathbf{R}}'(x, y) < h. \end{cases}$$

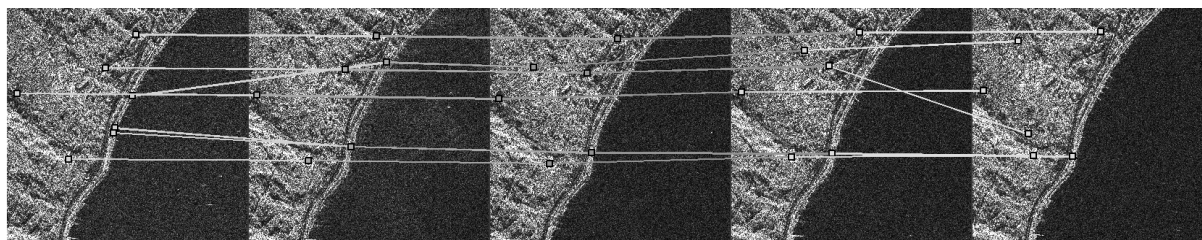


Рис. 11. Совмещение отражателей

На рисунке 11 показана процедура совмещения систем устойчивых отражателей. Основная часть шумовых отражателей отсеивается, оставляя единую устойчивую конфигурацию отражателей.

### Определение фазового сдвига для системы отражателей

С помощью набора фазовых составляющих изображений  $\Phi_{\mathcal{T}}$ , а также найденной матрицы  $\bar{\mathbf{R}}$  построим систему отражателей  $\mathcal{I}$  и систему фазовых сдвигов  $\Gamma_t$ .

Построим начальный набор отражателей  $\mathcal{I}_0 = \{i(x, y)\}$  — индексное множество пикселей изображения, соответствующее единицам матрицы  $\bar{\mathbf{R}}$ . Это множество является начальным, поскольку система отражателей до этого этапа выбиралась только по амплитудной составляющей и может содержать шумовые элементы.

Составим набор матриц разностей фаз, соответствующий индексному множеству отражателей  $\mathcal{I}_0$ . Для каждого момента времени  $t$  построим квадратную матрицу  $\Gamma_t$  размером  $|\mathcal{I}_0| \times |\mathcal{I}_0|$  такую, что

$$\Gamma_t(i, j) = \phi_t(i) - \phi_t(j),$$

где  $\phi_t(i) = \Phi_t(x_i, y_i)$ ,  $i \in \mathcal{I}_0$ . Будем называть пару отражателей  $(i, j)$  устойчивой, если соответствующий элемент  $\Gamma_t(i, j)$  меняется в зависимости от номера кадра  $t$  незначительно. Чтобы оценить изменение разности фаз, построим матрицу  $\Delta$ , такую, что

$$\Delta = \sum_{t=1}^{|\mathcal{T}|-1} (\Gamma_{t+1} - \Gamma_t).$$

Пары отражателей, соответствующие малым элементам матрицы  $\Delta$ , будем считать устойчивыми парами. Отражатели, соответствующие большим элементам матрицы  $\Delta$ , будем считать шумовыми и исключим из рассмотрения, оставляя, таким образом, множество  $\mathcal{I}$  нешумовых отражателей.

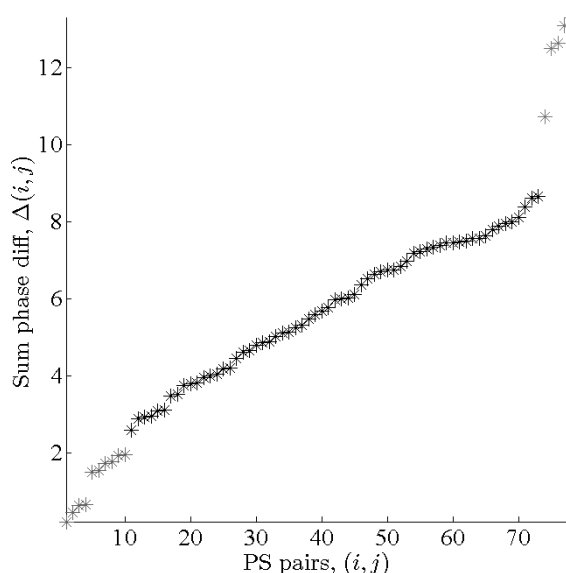


Рис. 12. Элементы матрицы  $\Delta$ , соответствующие суммарной разнице фаз для пар отражателей

На рисунке 12 проиллюстрированы элементы матрицы  $\Delta$  в порядке возрастания. Точки, выделенные серым цветом в левой части, соответствуют устойчивым парам отражателей. Серые точки в правой части признаны шумовыми отражателями и исключаются из дальнейшего рассмотрения.

**Вычисление сдвигов подвижных отражателей относительно неподвижных.** Располагая системой отражателей  $\mathcal{I}$ , а также набором матриц разностей фаз  $\Gamma_t$ , рассчитаем относительный сдвиг подвижных отражателей  $\xi_t(i(x, y))$ .

Пусть  $\mathcal{A}_1 \subset \mathcal{I}$  — индексы подвижных отражателей,  $\mathcal{A}_2 \subset \mathcal{I}$  — индексы неподвижных отражателей, выделенных на предыдущем этапе. Будем считать, что неподвижные отражатели не меняют своего положения в пространстве:  $\xi_t(i(x, y)) = 0, i \in \mathcal{A}_2$ , тогда как сдвиг подвижных отражателей будем вычислять как средний сдвиг относительно неподвижных отражателей:

$$\xi_t(i(x, y)) = \frac{1}{|\mathcal{A}_2|} \sum_{j \in \mathcal{A}_2} (\Gamma_t(i, j) - \Gamma_0(i, j)), i \in \mathcal{A}_1.$$

## Уточнение движения отражателей с помощью метрических конфигураций

Располагая системой отражателей  $\mathcal{I}$ , а также набором матриц разностей фаз  $\Gamma_t$ , требуется предложить алгоритм восстановления сдвига земной поверхности:

$$f : \bar{\mathbf{R}} \times \Gamma_t \longrightarrow \Xi_t \{ \xi_t(x, y) \}.$$

Смоделируем величину разности фаз  $\delta\phi_{a,i}$ , зависящую от пары точек (отражателей)  $a$ , следующим образом:

$$\delta\phi_{a,i} = \frac{4\pi}{\lambda} [\alpha B_i \delta h_a + \varepsilon_{a,i}]_{2\pi}.$$

В этой формуле известными параметрами являются длина волны  $\lambda$  и пространственная база радара  $B_i$ , которые соответствуют расстоянию между двумя положениями радара в разные моменты съемки;  $\varepsilon_{a,i}$  — шумовая составляющая. Неизвестный параметр  $\delta h_a$  отвечает за относительный сдвиг двух отражателей, связанных дугой  $a$ .

Используем данные о расстояниях между отражателями для выбора определенного количества оптимальных в некотором смысле дуг. Для этого предлагается построить остовное дерево  $G^*(\bar{\mathbf{R}})$  для полного графа, заданного системой устойчивых отражателей. Полученное остовное дерево и будет задавать оптимальный набор дуг  $A$ .

Введем понятие когерентности  $\gamma_a$ , связанной с дугой  $a \in A$ :

$$\gamma_a = \max_{\delta h_a, \delta v_a} \left| \sum_{i=1}^k w_{a,i} e^{j\varepsilon_{a,i}} \right|,$$

где  $j$  — комплексная единица.

Располагая множеством пар отражателей  $A$ , рассчитаем относительные высоты и скорости движения отражателей, решив задачу оптимизации для всех пар отражателей:

$$\gamma_a = \max_{\delta h_a, \delta v_a} \left| \sum_{i=1}^k w_{a,i} \exp \left( j \left[ \delta\phi_{a,i} - \frac{4\pi}{\lambda} \alpha B_i \delta h_a \right] \right) \right|.$$

Найденное значение  $\delta h_a$  относительного сдвига отражателей однозначно характеризует отображение  $\hat{\eta}$  — географическое смещение отражателей.

На рисунке 13 показано относительное движение отражателей на земной поверхности. Круглая отметка означает смещение вверх, квадратная — относительное смещение вниз. Отметим, что выделено сравнительно небольшое число отражателей, однако выделенная система является устойчивой.

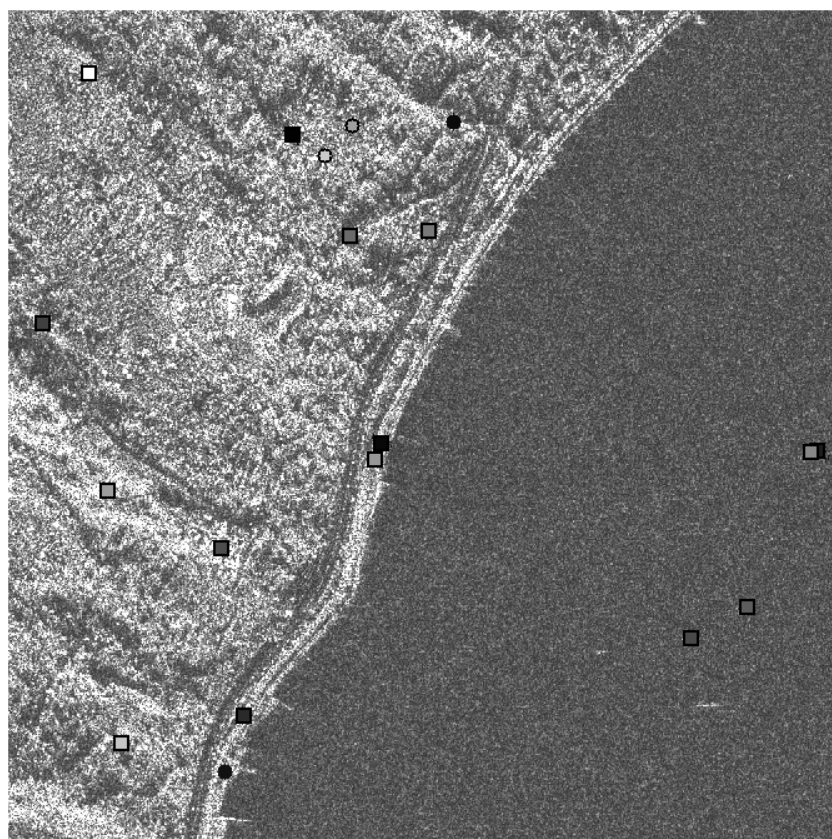


Рис. 13. Движение устойчивых отражателей на земной поверхности

## Заключение

Решена задача обнаружения сдвигов устойчивых отражателей SAR-изображений участка земной поверхности. Предложен алгоритм выделения системы отражателей на наборе амплитудных составляющих изображений. Предложена процедура уточнения системы отражателей с использованием фазовых компонент изображений. Разработана процедура восстановления относительных вертикальных сдвигов системы отражателей с течением времени. Получены адекватные результаты на синтетических и реальных данных.

## Список литературы

- Василейский А. С., Карацуба Е. А., Карелов А. И., Кузнецов М. П., Рейер И. А. Обнаружение движения устойчивых отражателей по серии спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности // Машинное обучение и анализ данных. — 2013. — Т. 1, № 5. — С. 489–504.
- Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. — 1998. — Vol. 14. — P. R1–R54.
- Costantini M., Minati F., Quagliarini A., Schiavon G. A New Method for Baseline Calibration in SAR Interferometry // Proceedings of the FRINGE 2003 Workshop (ESA SP-550). — 2003.
- Costantini M., Minati F., Quagliarini A., Schiavon G. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images // Geoscience and Remote Sensing Symposium. — 2008. — Vol. 2. — P. 449–452.

- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent Scatterers in SAR Interferometry // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. — 2001. — Vol. 39. — P. 8–20.
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // Geophysical Research Letters. — 2004. — Vol. 31.
- Marr D., Hildreth E. C.* Theory of Edge Detection // Proc. R. Soc. Lond. B. — 1980. — Vol. 207. — P. 187–217.
- Mikolajczyk K., Schmid C.* Scale & Amp: Affine Invariant Interest Point Detectors // Int. J. Comput. Vision. — 2004. — Vol. 60, no. 1. — P. 63–86.