

Обнаружение движения устойчивых отражателей по серии спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности*

*Василейский А. С.¹, Карацуба Е. А.², Карелов А. И.¹, Кузнецов М. П.³,
Рейер И. А.²*

A.Vasileisky@gismps.ru, karacuba@mi.ras.ru, A.Karelov@gismps.ru,
mikhail.kuznecov@phystech.edu, reyer@forecsys.ru

1 — Центр внедрения космических технологий ОАО «НИИАС»

2 — Вычислительный центр им. Дородницына РАН

3 — Московский физико-технический институт

Набор устойчивых отражателей радиолокационного сигнала описан метрической конфигурацией их взаимного расположения и вектором их условных высот. По серии метрических конфигураций требуется определить движение некоторой части устойчивых отражателей относительно всего набора. В работе предложен алгоритм построения серии метрических конфигураций по зашумленным данным со спутниковых снимков земной поверхности и выявления связей между устойчивыми отражателями. Предложен метод обнаружения движения отражателей, исследованы его свойства. Метод проиллюстрирован синтетическими и реальными данными.

Ключевые слова: радиолокация, синтезированная апертура, SAR-интерферометрия, устойчивые отражатели, метрическая конфигурация.

The algorithm of persistent scatterers movement detection on the satellite radar images of the Earth surface*

*Vasileisky A. S.¹, Karatsuba E. A.², Karelov A. I.¹, Kuznetsov M. P.³,
Reyer I. A.²*

1 — Space Technology Application Center of NIIAS

2 — Dorodnitsyn Computing Centre

3 — Moscow Institute of Physics and Technology

A set of radar signal persistent scatterers is described with a metrics configuration of their mutual location and with their heights vector. Using the set of metrics configuration, the movement of subset of the persistent scatterers concerning the whole set should be detected. An algorithm of the set of metrics configuration construction using noisy satellite images of the Earth surface and an algorithm of the persistent scatterers relations detection have been suggested. A method of the persistent scatterers movement detection has been proposed and its properties have been analyzed. The method is illustrated by the synthetic and real data.

Keywords: radiolocation, synthetic aperture radar, SAR interferometry, persistent scatterers, metric configuration.

Введение

Радиолокационная интерферометрия является одним из наиболее эффективных способов дистанционного выявления смещений земной поверхности, вызванных оползнями,

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №11-07-13160.

землетрясениями, извержением вулканов, криогенными и карстовыми процессами. Этот метод находит все большее применение для мониторинга состояния протяженных инфраструктурных объектов топливно-энергетического и транспортного комплекса, например, объектов железнодорожной инфраструктуры, расположенных в зонах потенциально опасного воздействия геодинамических процессов.

Данная работа посвящена описанию и развитию методов, позволяющих оценивать смещение объектов с течением времени с использованием двух и более радиолокационных спутниковых снимков одного и того же участка земной поверхности.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (synthetic aperture radar — SAR) являются разновидностью активной аппаратуры дистанционного зондирования Земли [1, 2, 3, 4, 5], позволяющей осуществлять детальную съемку земной поверхности (с пространственным разрешением до 1 м) [6], с использованием относительно небольших антенн на борту космических аппаратов. Детальность изображений достигается путем искусственного увеличения эффективного размера бортовой антенны спутника при его орбитальном движении.

Аппаратура SAR-систем регистрирует амплитуду и фазу отраженного земной поверхностью радиолокационного сигнала. Принцип интерферометрии заключается в восстановлении цифровой модели поверхности путем анализа фазовых компонент двух или более SAR-снимков, сделанных из различных близко расположенных точек орбиты. Дифференциальная интерферометрия применяется для получения информации о малых изменениях ландшафта.

Ранее в работах [2, 3, 4, 7, 8, 9] были исследованы методы обработки фазовых компонент радиолокационных изображений для решения задачи интерферометрии. В основном земная поверхность представляет собой диэлектрическую среду со значительной вариацией характеристик, которая сильно зашумляет фазу сигнала при отражении, и простое сравнение фазовых компонент двух радиолокационных изображений является неэффективным методом для оценки смещений поверхности.

Для решения этой проблемы было разработано понятие устойчивых отражателей [2, 3] — объектов земной поверхности, для которых амплитудно-фазовые характеристики радиолокационного сигнала при отражении незначительно меняются со временем. Такими объектами могут являться металлические конструкции, здания и сооружения, а также открытые участки местности со слабо выраженным растительным покровом. На каждом из SAR-снимков одного и того же участка земной поверхности выделяется набор устойчивых отражателей и исследуется изменение фазы отраженного сигнала для каждого отражателя. По этому изменению фазы определяется сдвиг соответствующего участка земной поверхности.

Были предложены методы выделения устойчивых отражателей, основывающиеся на вероятностной модели отраженной волны [8, 10]. Вероятностная модель основывается на том, что волна, принятая радаром, описывается функцией, которая состоит из действительной и мнимой части. Каждая из этих частей зашумлена гауссианой с определенным значением дисперсии и скрыта для наблюдения. В каждой точке радар регистрирует амплитуду и фазу волны. Амплитуда принятой волны описывается нелинейной комбинацией действительной и мнимой части принятой волны (а именно, корнем из суммы их квадратов) и имеет распределения Релея [10]. Фаза также описывается нелинейной комбинацией действительной и мнимой части, и ее распределение записывается в виде интеграла ошибок. Таким образом, амплитуда и фаза зарегистрированного радиолокационного изобра-

жения в каждом пикселе являются зависимыми случайными величинами, зависящими от дисперсии шума.

Важным свойством данной вероятностной модели является то, что дисперсия фазы приблизительно совпадает с отношением дисперсии амплитуды к среднему. На этом факте основывается метод выделения устойчивых отражателей, описанный в [8]. Имея последовательность SAR-снимков одного и того же участка земной поверхности, для каждого пиксела изображения определяется последовательность значений амплитуды и фазы, т. е., выборка значений амплитуды и фазы. Устойчивыми отражателями являются точки изображения с большим средним и маленькой дисперсией амплитуды и небольшим разбросом фазы. Причем разброс фазы является функцией от дисперсии амплитуды, и не возникает необходимости работать с сильно зашумленным фазовым изображением для подсчета дисперсии фазы. Для определения устойчивого отражателя в каждом пикселе подсчитывается дисперсия амплитуды и осуществляется пороговое отсечение.

Также был предложен метод, основывающийся на описанной вероятностной модели и на определении устойчивого отражателя как пиксела с наибольшим значением SCR (signal-to-clutter ratio) [10]. По определению, SCR является отношением энергии волны в пикселе изображения к суммарной энергии соседних пикселей. Одним из методов оценки SCR является метод максимального правдоподобия, в котором функция распределения фазы зависит от параметра SCR. Правдоподобие максимизируется по параметру SCR для выборки значений фазы каждого пиксела изображения. В качестве устойчивых отражателей выбираются пиксели изображения с наибольшим значением SCR.

Перечисленные методы имеют ряд недостатков. Один из них заключается в том, что необходимо выполнять предобработку данных для устранения артефактов, вызванных влиянием атмосферы или перемещениями земной поверхности. После определения положения устойчивых отражателей для оценки их смещений необходимо учитывать относительные высоты отражателей. Кроме того, предложенные методы более устойчиво работают в местах сгущения отражателей на изображении и менее эффективно выделяют изолированные отражатели.

Для устранения перечисленных недостатков были предложены методы выявления устойчивых отражателей на последовательностях радиолокационных снимков на основе анализа графов [3]. Главным отличием этих методов от вышеперечисленных является то, что для пары снимков рассматриваются не отдельные пиксели или участки изображений, а их пары. Вводится понятие оценки когерентности каждой пары пикселей или отражателей. Каждой паре отражателей ставится в соответствие дуга, имеющая определенный вес в смысле оценки когерентности. Из всех дуг выбираются те, которые имеют наибольший вес. Пары отражателей, образующие дугу с наибольшим весом, являются устойчивыми отражателями. Причем оценка когерентности рассчитывается путем максимизации параметров, характеризующих относительную высоту и скорость смещения отражателей. При решении глобальной оптимизационной задачи в качестве решения вычисляются положения устойчивых отражателей и их смещения. Заметим, что этот метод является более вычислительно сложным за счет перебора всех пар пикселей. Предложены методы сокращения перебора, основанные на совместном анализе пикселей только в пределах заданной окрестности.

В данной работе предлагается метод построения системы устойчивых отражателей, дополняющий вышеуказанные методы и устраняющий некоторые их недостатки. Предлагается следующий трехшаговый алгоритм. На первом шаге устойчивые отражатели выделяются отдельно на амплитудных компонентах каждого из SAR-изображений последова-

тельности. При этом в качестве устойчивых отражателей выделяются однородные светлые области (в дальнейшем — блобы) на амплитудной составляющей. Для поиска блобов предложено использовать LOG-детектор [11, 12].

На втором шаге алгоритм сопоставляет найденные на разных снимках последовательности системы отражателей. Второй шаг логически разделяется на два этапа. На первом этапе для каждой последовательной пары снимков сопоставляются друг с другом соответствующие им системы отражателей. При этом используются идеи известного на практике подхода SIFT [13]. Рассматривается многомерное пространство отражателей одной картинки (отражатель задается градиентным признаковым описанием), и для каждого отражателя второй картинки отыскивается ближайший к нему отражатель из построенного пространства. При этом алгоритм является неустойчивым к выбросам, то есть находит много избыточных связей между отражателями. Для решения этой проблемы на втором этапе выполняется построение метрических конфигураций систем отражателей [14, 15], и из построенных связей между отражателями убираются те, которые наихудшим образом влияют на качество сопоставления метрических конфигураций. Данный подход позволяет решить проблему возможного относительного сдвига отражателей и смещения изображений.

На третьем шаге рассчитываются относительные скорости смещения устойчивых отражателей. При этом используются идеи, описанные в [3]. Таким образом, отличие предлагаемого подхода от приведенного выше графового алгоритма состоит в поиске системы отражателей на первом и втором шаге. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована на наборе синтетических данных.

Постановка задачи обнаружения устойчивых отражателей

Математическая модель набора SAR-изображений. Введем необходимые обозначения. Рассмотрим изображения — матрицы размера $m \times n$ яркостей (соответствующих амплитудной компоненте) $\mathbf{Z}$, высот $\mathbf{H}$ и фаз $\mathbf{\Phi}$. Элементы z_{ij} , h_{ij} , φ_{ij} этих матриц принадлежат множеству $\mathbb{R}_+^1$.

Целочисленные величины — индексы i, j матриц поставлены в соответствие точкам x, y отрезков $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$:

$$x = x(i), \quad y = y(j), \quad i \in \{1, \dots, m\}, \quad j \in \{1, \dots, n\}.$$

Соответствие задано таким образом, что величины x, y измеряются в метрах и интерпретируются в рамках данной задачи как координаты (x, y) некоторой картографической проекции, соответствующей изображениям $\mathbf{Z}, \mathbf{H}, \mathbf{\Phi}$.

Изображению, задаваемому матрицами $\mathbf{Z}, \mathbf{H}, \mathbf{\Phi}$, поставлены в соответствие функции яркости, высоты и фазы $z, h, \varphi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^1$.

При этом в виде измерений задан набор матриц $\{\mathbf{\Phi}_i\}_{i=1}^k$, $\{\mathbf{Z}_i\}_{i=1}^k$, где i -я матрица соответствует радиолокационному снимку номер i . Набор матриц $\{\mathbf{H}_i\}_{i=1}^k$ скрыт для наблюдения.

Задача поиска устойчивых отражателей. Рассмотрим матрицу $\Sigma = \|\sigma^2(i, j)\|$ размеров $m \times n$, описывающую расположение устойчивых отражателей на изображениях. Этой матрице поставлена в соответствие функция $\sigma^2 : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^1$. Эта матрица является единственной для всего набора снимков. Она является скрытой для наблюдения. Элемент $\Sigma(i, j)$ в каждой точке является дисперсией отраженной волны. Будем считать, что меньшее значение дисперсии $\sigma^2(x, y)$ означает меньшее воздействие шумов различного вида на

волну, отраженную участком поверхности, соответствующим точке (x, y) и, как следствие, большую достоверность нахождения устойчивого отражателя в точке (x, y) .

Предполагается, что функции $\{\varphi_i(x, y), z_i(x, y)\}_{i=1}^k$, задающие набор изображений, зависят от функции дисперсий $\sigma^2(x, y)$ следующим образом. Если в некоторой точке (x', y') значение дисперсии мало:

$$\sigma^2(x', y') < \varepsilon,$$

то разброс величин $\{\varphi_i(x', y')\}_{i=1}^k$ и $\{z_i(x', y')\}_{i=1}^k$ в точке (x', y') является небольшим по i , а среднее значение яркости $E_i z_i(x', y') > \delta$ в точке (x', y') является большим некоторой наперед заданной величины δ . Точку (x', y') такого вида будем считать устойчивым отражателем.

Исходя из этого, зададим множество устойчивых отражателей R_ε в качестве точек с маленьким значением дисперсии отраженной волны:

$$R_\varepsilon = \{(x, y) | \sigma(x, y) < \varepsilon\}.$$

Задача поиска устойчивых отражателей ставится следующим образом. Будем исходить из того, что отражатели являются точками с высоким значением амплитуды $E_i z_i(x', y') > \delta$, и искать их в виде светлых пятен (односвязных областей, в которые можно вписать круг радиусом ξ). Имея набор матриц $\{\mathbf{Z}_i\}_{i=1}^k$, требуется найти оценку матрицы Σ и описать множество устойчивых отражателей R_ε .

Задача восстановления сдвига земной поверхности. Предполагается, что на скрытый набор матриц высот $\{\mathbf{H}_i\}_{i=1}^k$ действует некоторое отображение η , задающее сдвиг земной поверхности. Будем считать, что это отображение задано на дискретном множестве точек:

$$\eta(\mathbf{H}_{i-1}) = \mathbf{H}_i, \quad i = 1, \dots, k.$$

По множеству найденных отражателей R_ε и набору матриц $\{\Phi_i\}_{i=1}^k$ требуется сделать оценку отображения $\hat{\eta}$ в точках, соответствующих устойчивым отражателям, оценив таким образом относительный сдвиг земной поверхности.

Базовый алгоритм обнаружения устойчивых отражателей

Алгоритм обнаружения устойчивых отражателей на основе оценок когерентности между парами точек на двух и более изображениях был предложен в [3, 5]. Отметим, что алгоритм использует матрицы амплитуд $\{\mathbf{Z}_i\}_{i=1}^k$ только для начального приближения, оперируя, в основном, только матрицами фаз $\{\Phi_i\}_{i=1}^k$.

Рассматривается k SAR-изображений одного и того же участка земной поверхности. Среди этих изображений выбирается мастер-изображение. Эффективные методы выбора мастер-изображения описаны в [16, 17]. Для каждого i -го изображения и мастер-изображения рассматриваются все пары точек-«кандидатов» в устойчивые отражатели. Для i -го изображения рассчитываются величины разности фаз $\delta\varphi_{a,i}$ для всех пар точек между мастером и i -м изображением, где a обозначает дугу, связывающую соответствующие пары точек (таким образом, всего дуг — $N(N-1)$ для $N = m \times n$ точек на изображении).

Величина разности фаз $\delta\varphi_{a,i}$, зависящая от пары точек a , моделируется следующим образом:

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

В этой формуле известными параметрами являются длина волны λ , B_i и T_i — пространственная и временная база интерферометрической пары радиолокационных снимков

[1, 8, 7], которые соответствуют расстоянию и времени между двумя положениями радара в разные моменты съемки; $\varepsilon_{a,i}$ — шумовая составляющая. Неизвестные параметры δh_a и $\delta \nu_a$ отвечают за относительную высоту и скорость движения двух отражателей, связанных дугой a .

Вводится понятие когерентности γ_a , ассоциированной с дугой a :

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

где j — комплексная единица. Чем больше значение параметра γ_a , тем выше значение когерентности между двумя точками на изображении, и для больших значений γ_a пара точек, связанных дугой a , объявляется парой устойчивых отражателей. При этом максимизация величины γ_a производится по параметрам δh_a и $\delta \nu_a$, таким образом, при решении задачи оптимизации сразу вычисляется оценка всех относительных высот и скоростей движения отражателей.

Предлагается итеративный алгоритм поиска множества P_L устойчивых отражателей. На первом шаге формируется множество P_0 — начальное множество отражателей, являющихся точками с максимальной амплитудой.

За P_l обозначается множество, состоящее из точек и соединяющих их дуг, выбранных на итерации l . На следующей итерации $l + 1$ строится множество P_{l+1} , являющееся объединением множества P_l с множеством дуг

$$\gamma_a > \gamma_T,$$

где γ_T — пороговое значение, а оценка когерентности γ_a

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

Итеративный процесс останавливается, когда на шаге L не может быть выбрано новых дуг со значениями оценки когерентности больше порогового значения. При этом множество P_L представляет собой множество точек устойчивых отражателей и соединяющих их дуг, причем для каждой дуги вычислены оценки относительной высоты δh_a и относительной скорости движения $\delta \nu_a$ отражателей, используемые для определения величины сдвига земной поверхности. По найденным величинам δh_a и $\delta \nu_a$ производится оценка отображения $\hat{\eta}$.

Утверждается [8], что предложенный метод устойчив к атмосферным и другим шумам измерения фазовой составляющей, а также устойчив к неоднородной структуре расположения устойчивых отражателей.

Алгоритм обнаружения устойчивых отражателей в качестве высокоамплитудных пятен и сопоставления систем отражателей на основе анализа метрических конфигураций

Предлагаемый алгоритм состоит из трех последовательных этапов. На первом этапе каждому SAR-изображению последовательности ставится в соответствие система отражателей, найденных в качестве однородных светлых пятен (в дальнейшем — блобов [18]). На втором этапе найденные системы отражателей сопоставляются, и для последовательности снимков строится единая система устойчивых отражателей. Таким образом, на первых

двух этапах решается задача поиска устойчивых отражателей и оценки матрицы Σ . На третьем этапе производится вычисление относительных высот и скоростей движения отражателей с использованием идей из [8], и решается задача восстановления отображения $\hat{\eta}$ сдвига земной поверхности.

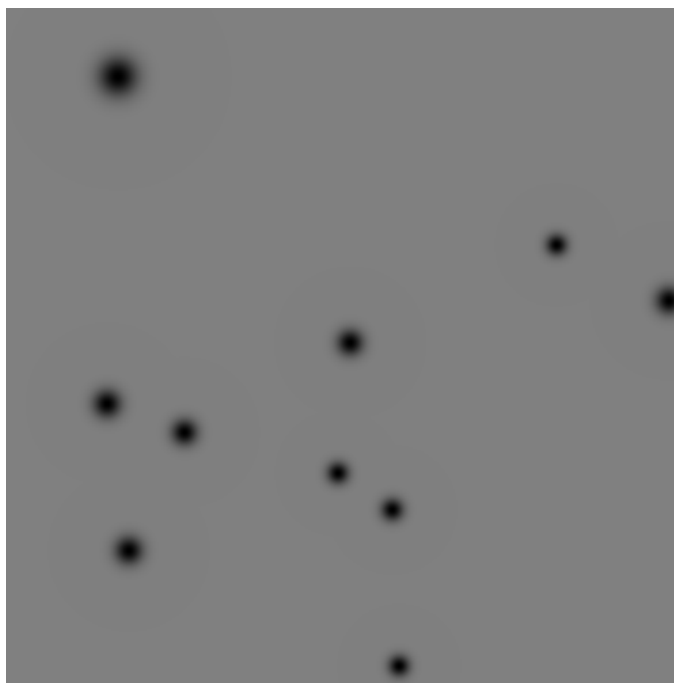
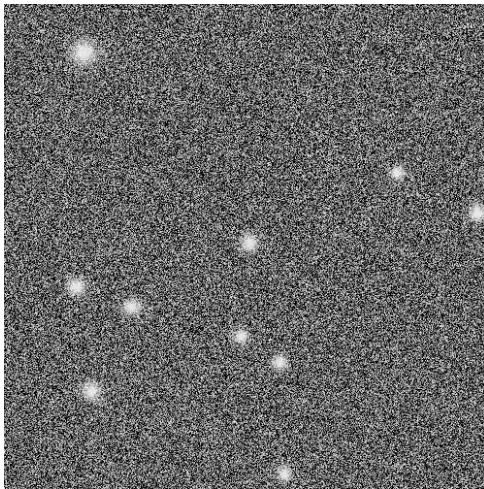


Рис. 1: Модельные данные: поверхность дисперсий

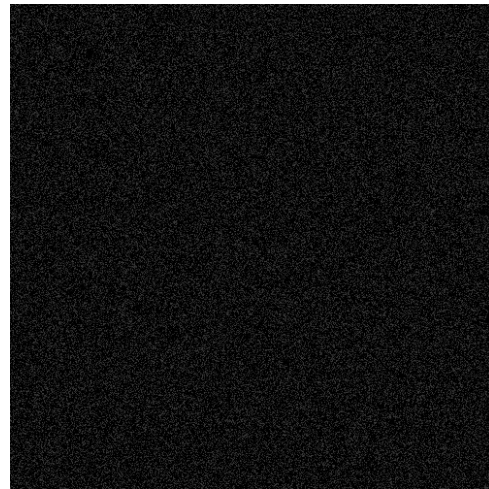
Алгоритм поиска блоков для одного изображения. На первом этапе для каждого изображения i найдем систему отражателей по амплитудной составляющей $\{Z_i\}$. Будем строить систему отражателей с помощью метода, описанного в [18]. Используется метод нахождения устойчивых отражателей, основанный на принципе LoG-детектора. Этот принцип представляет собой свертку изображения с лапласианом гауссиан разных масштабов и поиск максимумов в полученной серии сглаженных изображений. Производится также процедура уточнения эллипсоидальной формы блоков, основанная на сингулярном разложении матрицы, состоящей из взвешенных значений производной функции интенсивности.

В качестве результата, на этом этапе вычисляются множества $\{R_{\varepsilon,i}\}_{i=1}^k$ центров отражателей для каждого изображения i . В дальнейшем описании для сокращения обозначений опустим параметр ε множества отражателей, являющийся некоторой пороговой константой для алгоритма на данном этапе.

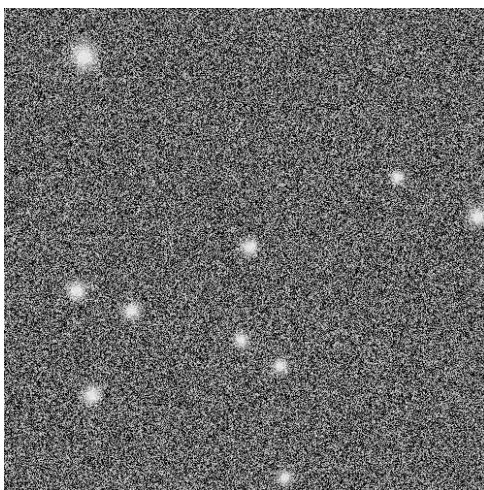
Алгоритм сопоставления систем отражателей. На втором этапе строится система отражателей R , единая для всех изображений последовательности. Идея метода заключается в попарном сравнении систем отражателей на последовательных снимках и сопоставлении найденных центров отражателей.



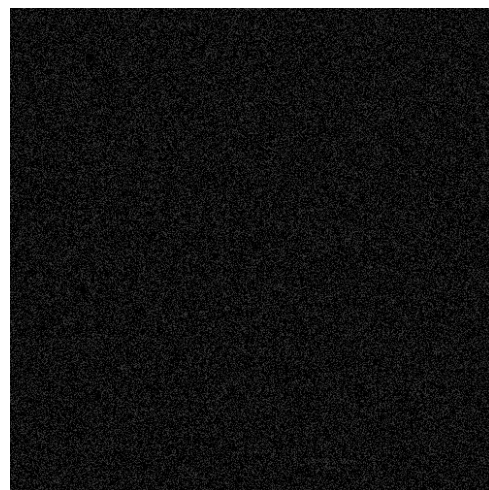
(а) Амплитудное изображение



(б) Фазовое изображение без учета высот



(в) Амплитудное изображение



(г) Фазовое изображение без учета высот

Рис. 2: Модельные данные.

Алгоритм заключается в следующем. Дан набор амплитудных изображений $\{\mathbf{Z}_i\}_{i=1}^k$ и соответствующие им системы отражателей $\{R_i\}_{i=1}^k$. На первом шаге для изображений $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2$ строится система отражателей $R_{\{1,2\}}$, состоящая из тех отражателей, которые прошли процедуру сопоставления систем R_1 и R_2 . На шаге i для изображений $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_{i+1}$ строится система отражателей $R_{\{1,\dots,i+1\}}$, состоящая из отражателей, которые прошли процедуру сопоставления систем $R_{\{1,\dots,i\}}$ и R_{i+1} . Таким образом, на шаге $k - 1$ мы построим систему отражателей $R_{\{1,\dots,k\}}$, единую для всех изображений $\mathbf{Z}_1, \dots, \mathbf{Z}_k$.

Для сопоставления двух систем отражателей R_1 и R_2 предлагается следующий двухшаговый метод. Первый шаг является распространенным в обработке изображений методом сопоставления SIFT дескрипторов [13]. Он состоит в том, что каждому найденному на первом шаге отражателю ставится в соответствие гистограмма градиентов яркости по разным

направлениям. Два отражателя на разных изображениях считаются одной точкой, если в многомерном пространстве гистограмм между этими отражателями мало евклидово расстояние. При выполнении этой процедуры рассчитываются две равномошные системы отражателей R_1^0, R_2^0 , где отражатели одного и другого изображения соответствуют друг другу в порядке индексации. При этом в системах R_1^0, R_2^0 может присутствовать большое количество ложных пар отражателей. Это связано с тем, что спутниковый снимок поверхности может содержать большое количество областей, являющихся похожими друг на друга по направлениям градиентов.

На втором шаге выполняется построение множества $R_{\{1,2\}}$ путем удаления лишних пар отражателей из множеств R_1^0, R_2^0 . Для этого строятся метрические конфигурации точек $\|r_{ij}^1\|, \|r_{ij}^2\|$ [14, 15] из множеств R_1^0, R_2^0 . Для количественной ошибки оценочного связывания [19] вводится переменная δ_{ij} ,

$$\delta_{ij} = |r_{ij}^1 - r_{ij}^2|.$$

Вектор расстояний, ассоциированный с парой номер i , есть

$$\delta_i = \{\delta_{1,i}, \dots, \delta_{i-1,i}, \delta_{i,i+1}, \dots, \delta_{i,N}\},$$

где N — мощность множества отражателей.

Пара сопряженных точек принимается, если $\|\delta_i\| < \Delta$ и отклоняется в противоположном случае. Здесь $\|\delta_i\|$ является усредненным значением всех компонент.

Приведенный метод позволяет оставить в множестве только те отражатели, которые являются стабильными в смысле метрической конфигурации, то есть реальные объекты на изображении, инвариантные к преобразованиям сдвига и поворота.

Восстановление сдвига земной поверхности. Располагая множеством отражателей R , рассчитаем относительные высоты и скорости движения отражателей, решив задачу оптимизации базового алгоритма для всех пар устойчивых отражателей:

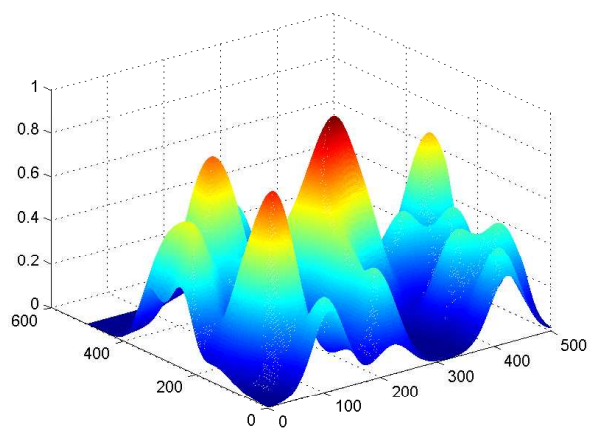
$$\gamma_a = \max_{\delta h_a, \delta \nu_a} \left| \sum_{i=1}^k w_{a,i} \exp \left(j \left[\delta \varphi_{a,i} - \frac{4\pi}{\lambda} (T_i \delta \nu_a + \alpha B_i \delta h_a) \right] \right) \right|.$$

Отметим, что главным отличием от базового алгоритма является то, что мы используем уже построенные системы устойчивых отражателей, то есть дуги a являются известными. Найденные δh_a и $\delta \nu_a$ относительных высот и скоростей движения отражателей однозначно характеризуют отображение $\hat{\eta}$.

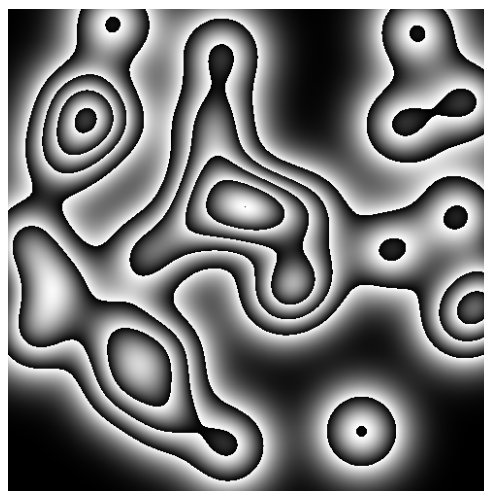
Моделирование данных для SAR-интерферометрии

Для иллюстрации свойств предлагаемого алгоритма выполнена процедура построения набора синтетических данных для SAR-интерферометрии. Нашей задачей является определить функции амплитуды $z(x, y)$, фазы $\varphi(x, y)$ и высоты $h(x, y)$ на конечном наборе точек, задаваемых матрицами $\mathbf{Z}$, $\mathbf{\Phi}$ и $\mathbf{H}$. Важным допущением при генерации данных является то, что функция амплитуды $z(x, y)$ не зависит от высоты $h(x, y)$ соответствующего участка местности. Другими словами, яркость изображения не зависит от высоты съемки. Заметим, что в реальности эти две функции могут быть зависимыми. Мы будем предполагать лишь зависимость фазы $\varphi(x, y)$ от высоты $h(x, y)$; именно эта зависимость и интересует нас при решении задачи интерферометрии.

Разделим алгоритм построения модельных данных на два этапа. На первом этапе будем моделировать набор матриц $\{\mathbf{Z}_i\}$ и $\{\mathbf{\Phi}_i\}$ независимо от высоты, причем каждая матрица

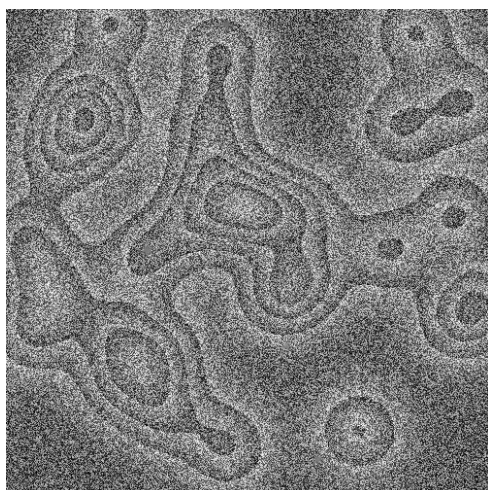


(а) Высота

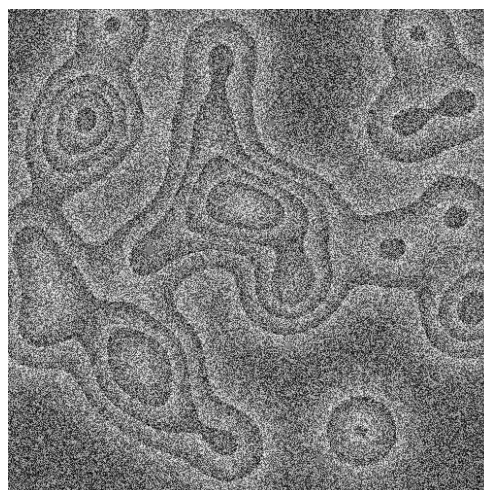


(б) Фазовая составляющая без учета шума

Рис. 3: Модельные данные



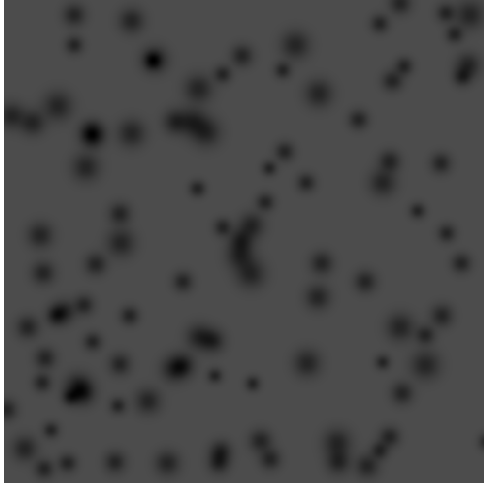
(а) Фазовая составляющая



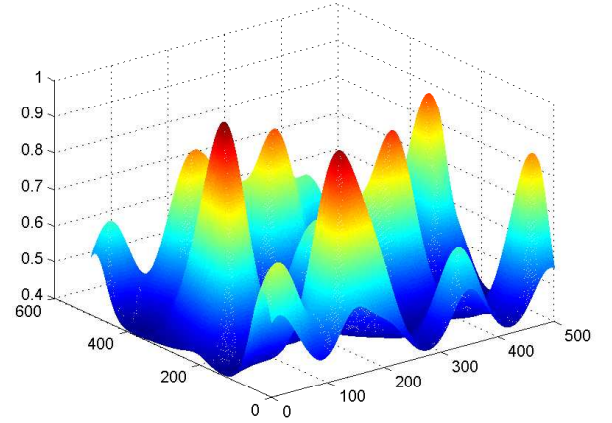
(б) Фазовая составляющая при сдвинутых высотах

Рис. 4: Модельные данные

i в наборе будет соответствовать i -му SAR-снимку последовательности. На втором этапе сгенерируем набор скрытых матриц высот $\{\mathbf{H}_i\}$, элементы в которых меняются медленно от матрицы к матрице, и подкорректируем соответствующие им матрицы фаз $\{\Phi_i\}$. Нашей задачей будет являться восстановление изменений матриц высот $\{\mathbf{H}_i\}$ при наблюдении матриц амплитуды $\{\mathbf{Z}_i\}$ и фазы $\{\Phi_i\}$.



(а) Поверхность дисперсий



(б) Поверхность высот

Рис. 5: Экспериментальные данные

Моделирование амплитудной и фазовой составляющей. Для того чтобы смоделировать отраженную волну, воспользуемся вероятностной моделью сигнала [10]. Будем исходить из следующих вероятностных предположений. Действительная $R(i, j)$ и мнимая $I(i, j)$ части функции отраженной волны являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону:

$$R(i, j) \sim \mathcal{N}(\mu_R(i, j), \sigma^2(i, j)), \quad I(i, j) \sim \mathcal{N}(\mu_I(i, j), \sigma^2(i, j)).$$

Отметим, что в данной вероятностной модели величина дисперсии $\sigma^2(i, j)$ одинакова для действительной и мнимой части.

Амплитуда отраженной волны описывается функцией от действительной и мнимой части:

$$z(i, j) = \sqrt{R^2(i, j) + I^2(i, j)}$$

и имеет распределение Райса

$$f(z(i, j)|\nu(i, j), \sigma(i, j)) = \frac{x}{\sigma^2(i, j)} \exp\left(-\frac{(x^2 + \nu^2(i, j))}{2\sigma^2}\right) J_0\left(\frac{x\nu(i, j)}{\sigma^2(i, j)}\right),$$

где

$$\nu(i, j) = \sqrt{\mu_R^2(i, j) + \mu_I^2(i, j)},$$

а J_0 — функция Бесселя. Распределение фазы $\varphi(i, j)$ может быть описано в терминах интеграла ошибок [10] и опущено из-за громоздкости.

Отметим, что величина $\sigma(i, j)$ отвечает за отражающее свойство земной поверхности в точке (i, j) : при маленьких значениях $\sigma(i, j)$ на последовательности SAR-снимков в точке (i, j) наблюдается постоянство фазы и амплитуды, и точка (i, j) считается устойчивым отражателем. Исходя из этого, на первом шаге необходимо смоделировать величину дисперсии $\sigma(i, j)$ во всех точках $m \times n$, то есть построить матрицу $\Sigma = \|\sigma(i, j)\|$. Будем делать это следующим образом: во всех точках (i, j) примем значение $\sigma(i, j) = \text{const}$ кроме разреженного множества точек, являющихся устойчивыми отражателями. В точках устойчивых отражателей примем $\sigma(i, j) = 0$ и сделаем эти точки центрами гауссианов, чтобы получить сглаженное изображение отражателей.

Пример такого построения показан на рис. 1. Черными пятнами обозначены устойчивые отражатели: значение $\sigma(i, j)$ в центрах этих пятен равно нулю и гладко размывается гауссианой до значения $\sigma(i, j) = 0.5$, что соответствует цвету фона рисунка моделируемого распределения дисперсий. Смоделируем матрицу высот $\mathbf{H}$ набором гауссиан. Пример такой поверхности показан на рис. 3а.

Исходя из имеющегося распределения дисперсий, сгенерируем действительную и мнимую части отраженной волны (в простейшем случае, сделаем их константными), зашумив их гауссианами с нулевым средним и соответствующей дисперсией $\sigma^2(i, j)$. Полученное модельное распределение дисперсий должно использоваться при генерации действительной и мнимой частей отраженной волны для всех SAR-снимков последовательности.

Пример двух таких реализаций приведен на рис. 2. Слева показаны сгенерированные амплитудные компоненты изображений, на которых светлые пятна являются устойчивыми отражателями; справа — фазовые компоненты. Отметим, что на этом шаге никак не учитываются высоты поверхности, существенно влияющие на фазовые компоненты изображений. Моделирование высот и корректировку фазы рассмотрим в следующем параграфе.

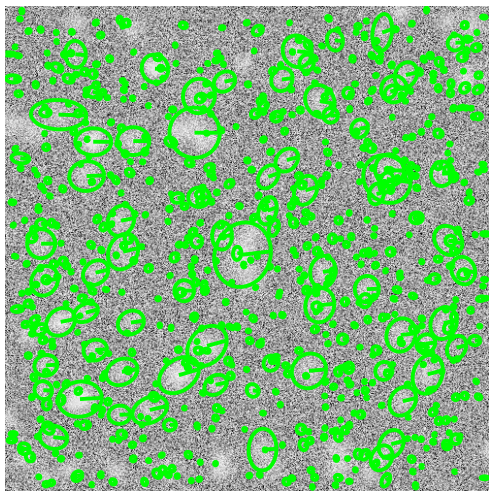
Моделирование высот. Дальнейшее моделирование данных будем проводить, учитывая следующие соображения. Функцию фазы $\varphi(x, y)$ будем считать суперпозицией

$$\varphi(x, y) = \varphi_0(x, y)\varphi_h(x, y),$$

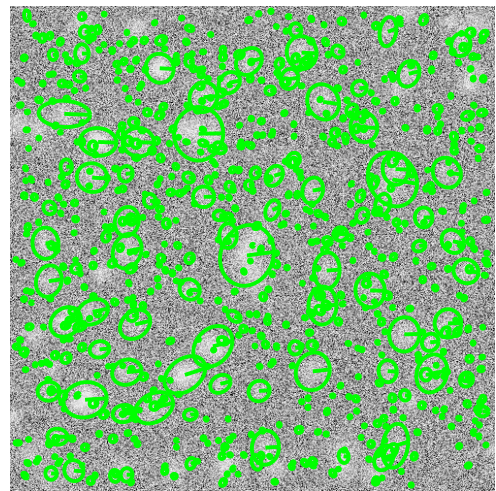
где $\varphi_0(x, y)$ — фаза отраженной волны, смоделированная нами на предыдущем шаге. Эта составляющая зависит только от случайного шума, накладывающегося на действительную и мнимую части волны, и не зависит от высоты. Составляющая $\varphi_h(x, y)$ зависит от высоты соответствующего участка поверхности с учетом его смещений во времени. Пример этой составляющей фазы $\varphi_h(x, y)$ для построенной матрицы высот $\mathbf{H}$ продемонстрирован на рис. 3б.

Для генерации фазовых компонент будем изменять матрицу высот $\mathbf{H}$ согласно выбранному закону. Например, в простейшем случае будем уменьшать каждый элемент $h(i, j)$ на постоянную величину смещения поверхности за время между получением снимков. Такой закон соответствует равномерному уменьшению высот земной поверхности. При этом будет меняться составляющая $\varphi_{hi}(x, y)$ фазовой компоненты изображений, а соответственно, и вся суперпозиция $\varphi_i(x, y)$.

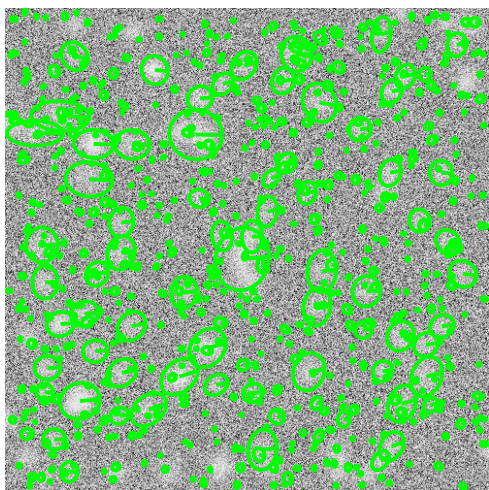
На рис. 4 показаны фазовые компоненты модельных изображений с учетом изменения высоты и наложения шума. На рис. 4а приведена фазовая компонента, соответствующая высотам на рис. 3а и амплитудной составляющей на рис. 2а. На рис. 4б приведена фазовая компонента, соответствующая изменившимся вследствие смещений поверхности высотам и амплитудной компоненте на рис. 2в. Отметим, что на реальных снимках фазовая состав-



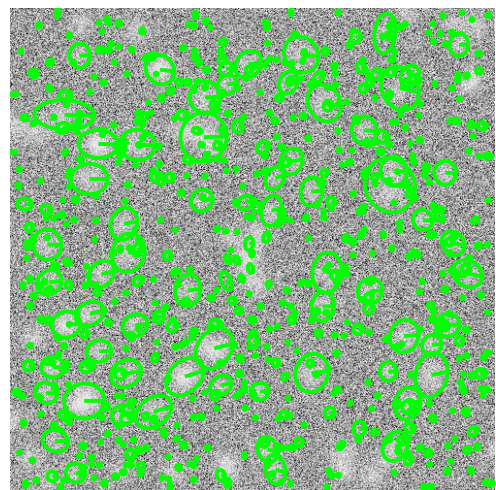
(a)



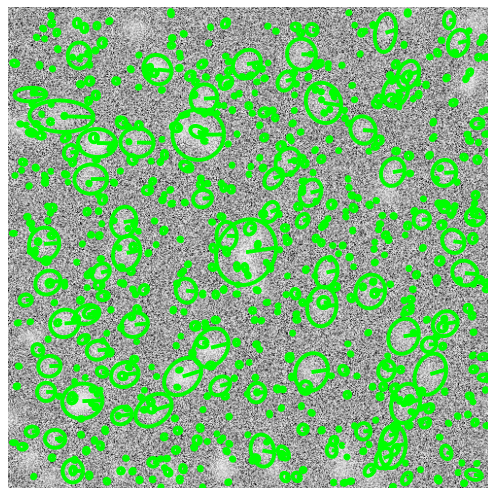
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис. 6: Последовательность амплитудных изображений с выделенными отражателями

ляющая зашумлена гораздо сильнее, и визуальное практически невозможно распознать изменение фазы, соответствующее рельефу поверхности.

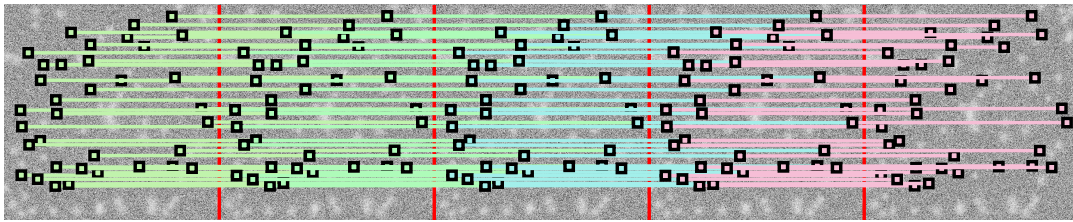


Рис. 7: Поиск системы отражателей

Итак, при моделировании данных мы получаем последовательность матриц высот $\mathbf{H}_i$, плавно изменяющихся во времени в соответствии с заданным законом, соответствующим сдвигу земной поверхности. Для каждой матрицы $\mathbf{H}_i$ мы строим матрицы $\mathbf{Z}_i$ амплитуды и Φ_i фазы. Причем матрицы яркости зависят только от заранее выбранной системы устойчивых отражателей, положение которых описывается матрицей Σ , а матрицы фазы зависят и от положения устойчивых отражателей, и от соответствующих значений высоты.

Вычислительный эксперимент

Для демонстрации работоспособности разработанного алгоритма проведен вычислительный эксперимент по обработке смоделированной последовательности радиолокационных снимков. В качестве исходных данных, была сгенерирована поверхность дисперсий, показанная на рис. 5а, характеризующая расположение устойчивых отражателей, а также поверхность высот, показанная на рис. 5б. Помимо этого, был сгенерирован набор из пяти SAR-изображений, состоящих из зашумленных амплитудных и фазовых компонент. При генерации фазовых компонент использовалась последовательность высотных изображений, причем каждое следующее высотное изображение формировалось из предыдущего путем преобразования линейного сдвига высот:

$$H_{k+1} = \eta(H_k) = \|h_{ij} + (\lfloor \frac{m}{2} \rfloor - i)\mu\|,$$

где μ — параметр, определяющий величину сдвига.

Для каждого из изображений алгоритм выделил свою систему устойчивых отражателей на рис. 6. На рис. 7 проиллюстрирована работа алгоритма поиска единой системы отражателей. Красные вертикальные линии показывают границы изображений. Горизонтальные разноцветные линии демонстрируют связи между соответствующими устойчивыми отражателями. Поскольку смещения отражателей в плоскости изображения от снимка к снимку не происходило, горизонтальность соединяющих линий на рисунке свидетельствует о правильности обнаружения пар соответствующих отражателей.

На рис. 8 показано обнаруженное алгоритмом движение отражателей. Отражатели, для которых зафиксировано положительное смещение относительно всей сцены, соответствующее увеличению высоты, выделены красным цветом. Устойчивые отражатели, для которых зафиксировано отрицательное относительное движение, выделены синим цветом. Черным цветом выделены устойчивые отражатели, оставшиеся неподвижными относительно всей сцены. Полученный результат свидетельствует о работоспособности алгоритма

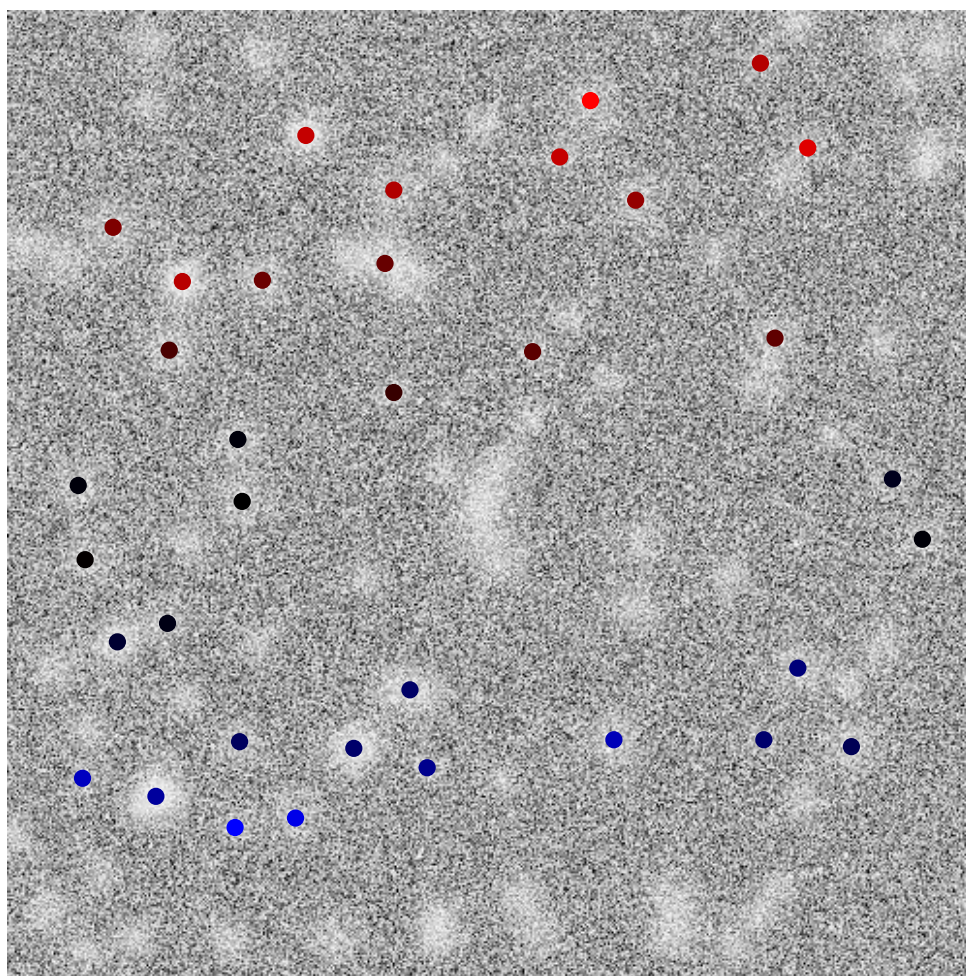


Рис. 8: Движение отражателей

и возможности с некоторой точностью восстановить первоначально заданные относительные линейные сдвиги высот.

Заключение

Исследована задача обнаружения движения системы устойчивых отражателей на последовательности SAR-изображений земной поверхности. Предложен алгоритм описания системы отражателей, основанный на построении метрической конфигурации отражателей. Исследуется изменение метрической конфигурации с течением времени. Предложен способ измерения относительного движения отражателей, основанный на изменении метрической конфигурации. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована на примере обработки синтетического набора данных, метод генерации которых основывается на вероятностной модели отраженной волны.

Литература

- [1] Harger R. O. Synthetic aperture radar fundamental and image processing // *EARSeL Advances in Remote Sensing*. 1993. Vol. 2. Pp. 268–286.

- [2] *Hartl P., Bamler R.* Synthetic aperture radar interferometry // *Inverse Problems*. 1998. Vol. 14. Pp. R1–R54.
- [3] *Quagliarini A., Schiavon G., Costantini M., Minati F.* A new method for baseline calibration in SAR interferometry // *Proceedings of the FRINGE 2003 Workshop (ESA SP-550)*. 2003.
- [4] *Mallorqui J. J., Berardion P., Sansosti E., Lanari R., Mora O.* A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 2004. Vol. 42. Pp. 1377–1386.
- [5] *Costantini M.* A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (International) (IGARSS 2008)*. 2008.
- [6] Italian Space Agency. *COSMO-SkyMed SAR Products Handbook* // <http://www.e-geos.it/products/pdf/csk-product>
- [7] *Rocca F., Ferretti A., Prati C.* Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2000. Vol. 38. Pp. 2202–2212.
- [8] *Rocca F., Ferretti A., Prati C.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001. Vol. 39. Pp. 8–20.
- [9] *Segall P., Kampes B., Hooper A., Zebker H.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31.
- [10] *Agram P. S.* *Persistent Scatterer Interferometry In Natural Terrain* // PhD Thesis. Stanford University, 2012.
- [11] *Lindeberg T.* Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales // *Journal of Applied Statistics*. 1994. Vol. 21, no. 2. Pp. 224–270.
- [12] *Schmid C., Mikolajczyk K.* Scale & affine invariant interest point detectors // *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. Pp. 63–86.
- [13] *Lowe D. G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004.
- [14] *Майсурадзе А. В.* О специальных представлениях метрических конфигураций // Диссертация. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН. 2005.
- [15] *Леонтьев В. К.* О мерах сходства и расстояниях между объектами // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2009. Т. 49. С. 2041–2058.
- [16] *Yihua Liu, Xiaofan Li, Liang Gao, Hua Zhang, Qiming Zeng.* The optimum selection of common master image for series of differential SAR processing to estimate long and slow ground deformation // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (International) (IGARSS'05) Proceedings*. 2005. Vol. 7. Pp. 4586–4589.
- [17] *Bethel J., Li Zh.* Image coregistration in SAR interferometry // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. XXXVII. Pp. 433–438.
- [18] *Василейский А. С., Карацуба Е. А., Карелов А. И., Кузнецов М. П., Рейер И. А.* Алгоритм выделения устойчивых отражателей на спутниковых снимках земной поверхности // *Машинное обучение и анализ данных*. 2012. Т. 1. С. 452–463.
- [19] *Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржун А. В., Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.* // *Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения*. М.: Физматкнига, 2010.