

АЛГОРИТМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И СОВМЕЩЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

А.А. Адуенко^{1,2}, А.С. Василейский³, А.И. Карелов³, И.А. Рейер¹, К.В. Рудаков^{1,2,3,4}, В.В. Стрижов^{1,2},

¹ Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт, Москва, Россия,

³ ОАО «НИИАС» (Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте), Москва, Россия,

⁴ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Аннотация

Для решения задачи выделения малых (со скоростями до единиц сантиметров в год и менее) движений земной поверхности с помощью методов SAR-интерферометрии необходимо выделить некоторое множество участков земной поверхности, которые остаются когерентными на радиолокационных снимках в течение длительного времени. Такие участки и соответствующие им точки на снимках называются устойчивыми отражателями. В данной работе рассмотрены два метода выделения устойчивых отражателей. Рассматриваемые методы сравниваются по количеству выделяемых точек и по их средней временной когерентности. Рассматриваемые алгоритмы проиллюстрированы на примере обработки набора из 35 радиолокационных снимков.

Ключевые слова: SAR-интерферометрия, устойчивые отражатели, совмещение SAR-снимков, детектор Харриса, карта когерентности.

Цитирование: Адуенко, А.А. Алгоритмы выделения и совмещения устойчивых отражателей на спутниковых снимках / А.А. Адуенко, А.С. Василейский, А.И. Карелов, И.А. Рейер, К.В. Рудаков, В.В. Стрижов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 622-630. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-622-630.

Введение

Задача обнаружения малых движений земной поверхности вследствие воздействия естественных и техногенных факторов является достаточно актуальной [1,2]. Своевременное обнаружение геодинамических воздействий, вызываемых оползневыми, карстово-суффозионными, криогенными или неотектоническими процессами на объекты транспортной инфраструктуры, топливно-энергетического комплекса, жилой и промышленной застройки зачастую позволяет избежать серьезных последствий. Для обнаружения малых движений земной поверхности (со скоростями до единиц сантиметров в год и менее), наряду с традиционными методами геодинамического мониторинга, могут эффективно применяться методы SAR-интерферометрии (англ. *Synthetic Aperture Radar*) [12]. Основным принципом спутниковой SAR-интерферометрии является совместная обработка амплитудной и фазовой составляющей отражённого от поверхности сигнала, зарегистрированного бортовой аппаратурой спутника в разное время. Для достижения требуемой точности определения движения земной поверхности производится множественная съёмка поверхности в разные моменты времени из немного отличающихся положений спутника на орбите (расстояние между соответствующими положениями обычно 10–1000 м) [10] или съёмка с различающейся длиной волны [13].

В силу того, что сигнал может подвергаться, например, поглощению и множественному отражению, только небольшая доля точек на SAR-снимках сохраняет временную когерентность от снимка к снимку. Такие точки называют устойчивыми отражателями радиолокационного сигнала. К таковым часто относятся крыши и стены зданий, промышленные по-

стройки, сооружения и объекты транспортной инфраструктуры, а также участки, лишённые растительности. При этом участки зелёных насаждений, леса, водной поверхности являются слабо когерентными. Это затрудняет выделение устойчивых отражателей на снимках естественных ландшафтов. Для применения же многих методов SAR-интерферометрии выделение набора устойчивых отражателей является одной из важнейших задач.

Фазовая составляющая отражённого сигнала может подвергаться существенным искажениям, вызываемым влиянием атмосферы, в частности, различием концентрации водяного пара. В большинстве случаев для надёжного выделения устойчивых отражателей требуется большой набор (обычно не менее 30) SAR-снимков, полученных в разное время и образующих так называемую интерферометрическую цепочку. Одним из традиционно используемых методов выделения устойчивых отражателей по набору нескольких SAR-снимков является метод, предложенный в работе [7], где, наряду с физической моделью отражённого сигнала с шумом, строится вероятностная модель отражённого сигнала для устойчивых отражателей. Утверждается, что истинная дисперсия фазы в каждой точке SAR-снимка может быть оценена через дисперсию и среднее значение амплитуды в той же точке. Дисперсия фазы [8] является мерой стабильности отражателя, а потому может быть использована для выделения устойчивых отражателей. В этой работе временная когерентность используется для сравнения качества выделенных устойчивых отражателей разными методами. Заметим, что прямой расчёт дисперсии фазы невозможен, так как для расчёта дисперсии фазы или временной когерентности [8] требуется определить скорость

движения точки вдоль направления наблюдения и относительную ошибку в определении высоты по имеющимся данным. Нахождение этих величин, однако, и является целью SAR-интерферометрии. После определения параметров модели из шума в фазе можно выделить атмосферную составляющую [11], с помощью которой определить особенности погоды на территории в момент съёмки.

Метод выделения устойчивых отражателей, изложенный в [7], сравнивается с базовым алгоритмом, основанным на выделении ярких точек амплитудной составляющей SAR-снимков. Для сравнения используется набор из 35 SAR-снимков, сделанных с помощью системы COSMO-SkyMed в режиме STRIPMAP [11]. Из имеющихся снимков были вырезаны фрагменты, охватывающие территорию размером 5×5 км. Для привязки разновременных радиолокационных снимков друг к другу использовались детектор Харриса [4], дескриптор SIFT [5] и алгоритм сопоставления точек изображений FLANN [6]. Рассматривавшиеся два метода выделения устойчивых отражателей сравнивались по средней временной когерентности [10] выделенных отражателей и их количеству. Для определения смещений отражателей вдоль направления наблюдения использовалась стандартная PS (англ. *persistent scatterers* – устойчивые отражатели) методика [12], но без развёртки фазы [10]. При этом в качестве опорного использовался снимок, минимизирующий среднюю величину временной и пространственной базы [9].

1. Совмещение снимков

Заданы $K+1$ изображений - матриц размера $M \times N$ яркостей \mathbf{Z} , высот \mathbf{H} и фаз $\mathbf{\Phi}$ с элементами $z_{ij} \in \mathbf{R}_+$, $h_{ij} \in \mathbf{R}$, $\phi_{ij} \in [-\pi, \pi]$.

Хотя набор имеющихся снимков $\mathbf{Z}, \mathbf{\Phi}$ представляет собой набор снимков одного участка местности, существуют тем не менее малые отклонения снимков друг от друга. Для дальнейшей работы требуется определить это смещение [3]. Предлагается использовать следующий алгоритм определения смещения:

- используем детектор Харриса для выделения на изображениях ключевых точек;
- строим признаковое описание всех найденных ключевых точек с помощью дескриптора SIFT;
- используем алгоритм FLANN для поиска пар соответствующих точек на изображениях;
- отбираем пары точек, векторы описаний которых близки в терминах евклидова расстояния;
- по найденным соответствиям определяем смещение изображений друг относительно друга.

Детектор Харриса для выявления особых точек на изображении. Под особыми точками будем понимать точки, для которых велико значение меры Харриса [1]. К таковым будут относиться угловые точки. Путём сопоставления таких точек и будем определять смещение изображения. Для точки (x_0, y_0) рассматриваем следующую функцию

$$S(u, v) = \sum_{x, y \in S} w(x, y) (Z(x+u, y+v) - Z(x, y))^2,$$

где S - некоторая окрестность точки (x_0, y_0) , а $w(x, y)$ - весовая функция. В качестве весовой функции в работе используется гауссова функция

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}}.$$

Раскладывая $Z(x+u, y+v)$ в ряд Тейлора до членов первого порядка, получим

$$S(u, v) \approx \sum_{x, y \in S} w(x, y) (Z_x(x, y)u + Z_y(x, y)v)^2 = (u \ v) \times \left(\begin{array}{cc} \sum_{x, y \in S} w(x, y) Z_x(x, y)^2 & \sum_{x, y \in S} w(x, y) Z_x(x, y) Z_y(x, y) \\ \sum_{x, y \in S} w(x, y) Z_x(x, y) Z_y(x, y) & \sum_{x, y \in S} w(x, y) Z_y(x, y)^2 \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = (u \ v) \mathbf{A} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}.$$

Анализируя собственные значения матрицы \mathbf{A} , делаем вывод относительно того, является ли точка (x_0, y_0) особой точкой или нет. Если $\lambda_1 \approx 0, \lambda_2 \approx 0$, то точка не является точкой интереса. Если $\lambda_1 \approx 0, \lambda_2 \gg 0$, то рассматриваемая точка является точкой границы. Если же $\lambda_1 \gg 0, \lambda_2 \gg 0$, то рассматриваемая точка является угловой точкой. Так как вычислять собственные числа затратно [4], то мерой Харриса, показывающей, является ли точка особой, служит

$$\mu(x_0, y_0) = \det \mathbf{A} - k \text{trace}^2 \mathbf{A}. \tag{1}$$

Особыми будем считать точки, мера Харриса которых больше, чем мера Харриса всех точек некоторой окрестности S_1 , а значение меры Харриса превышает среднее значение по изображению.

Сопоставление точек разных изображений.

Опишем, как найти пары соответствующих точек на изображениях. Рассмотрим амплитудные составляющие \mathbf{Z}_{t_1} и \mathbf{Z}_{t_2} двух изображений с номерами t_1 и t_2 , $1 \leq t_1, t_2 \leq K+1$. Пользуясь детектором Харриса, найдём для каждого изображения набор особых точек $\{\mathbf{x}_i^{t_1}\}, i=1, \dots, n_{t_1}, n_{t_1} \leq MN$ и $\{\mathbf{x}_j^{t_2}\}, j=1, \dots, n_{t_2}, n_{t_2} \leq MN$.

Пользуясь дескриптором SIFT [5], построим числовое признаковое описание каждой особой точки. Это описание содержит информацию о направлениях градиента яркости в окрестности точки. Затем с помощью алгоритма FLANN [6] произведём сопоставление найденных точек. При сопоставлении используется евклидово расстояние между векторами, описывающими особые точки. Метод FLANN заметно быстрее, чем алгоритм, находящий каждой точке ближайшую в другом множестве, а потому он и используется в данной работе. Результатом его работы является набор $P = \{(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2}), (i, j) \in I\}$ пар соответствующих точек, где $I \subseteq 2^{\{1, \dots, n_{t_1}\} \times \{1, \dots, n_{t_2}\}}$ есть соответствующее множество пар индексов. Далее произведём отсев ложно найденных

соответствий. Для этого оставим только те пары точек в наборе, для которых выполнено

$$\rho(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2}) \leq \max(\alpha \rho_{\min}, \rho_{\max} / \beta),$$

где $\rho_{\min} = \min_{(i,j) \in I} \rho(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2}), \rho_{\max} = \max_{(i,j) \in I} \rho(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2}), \alpha, \beta > 1$.

После отбора соответствий имеем набор $\tilde{P} = \{(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2}), (i, j) \in \tilde{I}\}$ пар соответствующих точек, где $\tilde{I} \subseteq 2^{[1, \dots, n_1] \times [1, \dots, n_2]}$ есть соответствующее множество пар индексов.

Определение смещения изображений. Опишем, как использовать найденный набор $\tilde{P} = \{(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2}), (i, j) \in \tilde{I}\}$ пар соответствующих точек для определения смещения изображения. Каждой паре $(\mathbf{x}_i^{t_1}, \mathbf{x}_j^{t_2})$ соответствуют точки двух изображений $(x_i^{t_1}, y_i^{t_1})$ и $(x_j^{t_2}, y_j^{t_2})$. Тогда соответствующая пара смещений есть $(x_i^{t_1} - x_j^{t_2}, y_i^{t_1} - y_j^{t_2})$. Образуем два набора смещений $X_{t_1 t_2} = \{x_i^{t_1} - x_j^{t_2}\}$ и $Y_{t_1 t_2} = \{y_i^{t_1} - y_j^{t_2}\}, (i, j) \in \tilde{I}$. Искомым смещением изображения t_1 относительно изображения t_2 считаем

$$s_{t_1 t_2} = (\text{med} X_{t_1 t_2}, \text{med} Y_{t_1 t_2}). \tag{2}$$

Определение смещения для больших изображений. Заметим, что в рассматриваемой задаче изображения имеют большое разрешение (напомним, что размеры спутникового снимка составляют 40×40 км, пространственное разрешение – 3×3 м, откуда $M, N > 10000$), а потому прямое применение алгоритмов нахождения особых точек и затем их сопоставления вычислительно затратно. Потому для этой цели предлагается разбить амплитудную составляющую изображения на части

$$\mathbf{Z}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}'_{i1} & \dots & \mathbf{Z}'_{im} \\ & \ddots & \\ \mathbf{Z}'_{in} & \dots & \mathbf{Z}'_{nm} \end{pmatrix},$$

где m, n - число частей по каждой из осей. Затем производим определение смещений для некоторого множества пар F амплитудных составляющих поды изображений $(\mathbf{Z}_{kl}^{t_1}, \mathbf{Z}_{kl}^{t_2}), (k, l) \in F$. Получаем набор смещений, определённых по формуле (2)

$$S_{t_1 t_2} = \{s_{kl}^{t_1 t_2}\}, (k, l) \in F.$$

В качестве итогового смещения используем

$$s_{t_1 t_2} = \text{med} S_{t_1 t_2}. \tag{3}$$

Постановка задачи выделения устойчивых отражателей. Заданы $K + 1$ изображений - матриц размера $M \times N$ яркостей \mathbf{Z} , высот \mathbf{H} и фаз Φ . Требуется построить отображение $g: (i, j) \in [1, \dots, M] \times [1, \dots, N] \mapsto \{0, 1\}$, где 1 соответствует устойчивому отражателю радиолокационного сигнала, а 0 - остальным точкам.

Влияние параметров орбиты спутника. Основным принципом SAR-интерферометрии является совместная обработка нескольких радиолокационных снимков исследуемого участка местности в разные моменты времени из немного отличающихся положений на орбитах спутника (расстояние между соответствующими положениями обычно $10 - 1000$ м [10]). Пусть среди $K + 1$ снимков снимок с номером M выбран опорным. В качестве такого снимка обычно выбирают снимок, имеющий минимальную среднюю абсолютную пространственную или временную базу [12]. Для дальнейшего анализа необходимо задать следующие параметры, соответствующие каждому из оставшихся снимков: временная база T_i по отношению ко времени регистрации опорного снимка с номером M и пространственная база B_i , перпендикулярная направлению наблюдения. Данные параметры оказывают существенное влияние на возможность интерферометрической обработки снимков, определяя в конечном счёте чувствительность метода. Под временной базой понимается время, прошедшее между регистрацией двух радиолокационных снимков территории, а потому $T_i = t_i - t_M$, где t_i - время, когда был сделан i -й снимок. Пространственную же базу будем рассчитывать как среднее расстояние между плоскостями орбит спутников или фрагментов орбиты одного спутника при пролёте над территорией во время съёмки. Среднее расстояние необходимо ввести из-за отсутствия строгой параллельности орбитальных плоскостей в силу вариации орбитальных параметров. При этом знак B_i определяется следующим образом: величину B_i считаем положительной, если i -е положение спутника дальше от регистрируемой сцены, чем M -е.

Модель фазовой составляющей сигнала. Фаза отражённого сигнала определяется расстоянием от точки местности, сигнал от которой регистрируется, до спутника [15]. Разность же фаз сигналов, зарегистрированных от одной точки в разные моменты времени из несколько отличающихся положений на орбите, зависит от высоты h точки над уровнем моря, относительного смещения d вдоль направления наблюдения и от положения точки на регистрируемой сцене, определяющего расстояние s от неё до спутника в момент съёмки.

С учётом введённого определения временной и пространственной базы, перпендикулярной направлению наблюдения, имеем следующую модель для разности фазовых компонент радиолокационного сигнала [9]:

$$\Phi_i - \Phi_M = \frac{4\pi B_i}{\lambda R \sin \theta} \mathbf{H} + \frac{4\pi B_i}{\lambda R \tan \theta} \mathbf{S} + \frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{V} T_i + \Delta \Phi_i^{\text{atm}} + \Delta \Phi_i^{\text{noi}}, \tag{4}$$

где Φ_i^{atm} - отклонения фазы, связанные с атмосферными явлениями, а $\Delta \Phi_i^{\text{noi}}$ - шумовая составляющая, \mathbf{S} -

матрица расстояний от точек местности до спутника, \mathbf{V} - матрица скоростей смещения объектов на местности вдоль направления наблюдения, \mathbf{H} - матрица высот для снимаемой местности, R - расстояние от спутника до сцены, $R = H / \cos \theta$. Здесь θ есть угол между вертикалью и направлением наблюдения [12]. Угол θ при регистрации сцены считается постоянным. Равенство (4) справедливо для полной фазы. Так как матрицы Φ_i содержат значения фазы по модулю 2π , равенство (4) нужно понимать по модулю 2π , как и все последующие. Для удобства записи указание на это здесь и далее опущено.

Временная когерентность точек снимков. В соответствии с (4) произведём вычитание из фазы каждого снимка составляющей, связанной с рельефом местности \mathbf{H} и положением спутника, определяющим \mathbf{S} . Сохраним для получившихся матриц обозначение Φ_i . Получим следующую модель для разности фазовых компонент сигнала [9].

$$\begin{aligned} \Phi_i^{\text{rel}} &= \Phi_i - \Phi_M = \\ &= \frac{4\pi B_i}{\lambda R \sin \theta} \Delta \mathbf{H} + \frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{V} T_i + \\ &+ \Delta \Phi_i^{\text{atm}} + \Delta \Phi_i^{\text{noi}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В (5) присутствует матрица $\Delta \mathbf{H}$, характеризующая ошибки используемой цифровой модели рельефа, связанные с тем, что шаг дискретизации модели зачастую существенно превышает пространственное разрешение радиолокационных снимков.

Шумовая составляющая $\Delta \Phi_i^{\text{noi}}$ и атмосферная составляющая $\Delta \Phi_i^{\text{atm}}$ в фазе могут значительно изменять (5) в случае, если во время наблюдения на территории наблюдаются облачность, а поверхность земли покрыта лесом. Однако в силу отсутствия значимой временной корреляции погоды на территории на интервале измерения [9], а также некоррелированности шумовых компонент рассмотрение большого числа снимков позволяет исключить эти компоненты из рассмотрения [9].

Рассмотрим произвольную точку снимка с координатами (i, k) . Предположим, что скорость смещения соответствующего участка вдоль направления наблюдения v_{ik} и ошибка по высоте Δh_{ik} определены. Тогда в качестве временной когерентности для этой точки примем [9]

$$c_{ik} = \left| \sum_{q \neq M} \exp \left[j \left(\phi_q^{ik} - \frac{4\pi v_{ik} T_q}{\lambda} - \frac{4\pi B_q \Delta h_{ik}}{\lambda R \sin \theta} \right) \right] \right| / K. \quad (6)$$

Отметим, что $0 \leq c_{ij} \leq 1$, причём $c_{ij} = 1$ тогда и только тогда, когда фаза сигнала полностью объясняется линейным движением соответствующего участка вдоль направления наблюдения и существованием ошибки в используемой цифровой модели рельефа. Перейдём к описанию сравниваемых методов выделения устойчивых отражателей.

2. Выделение и сопоставление наборов устойчивых отражателей

Базовый алгоритм выделения устойчивых отражателей. Считаем, что точки изображения, соответствующие устойчивым отражателям, имеют большую интенсивность. Считаем, что за время наблюдения устойчивый отражатель не мог переместиться в соседнюю точку снимка [9]. Выделим на первом снимке набор точек-кандидатов в устойчивые отражатели по следующему правилу. Установим границу $\gamma \geq 1$. Считаем точку (i, k) изображением с номером q кандидатом в устойчивые отражатели, если $z_{ik} \geq \gamma z_q$, где z_q - среднее значение яркости на q -м изображении. После выделения кандидатов в устойчивые отражатели на первом снимке проверяем, какие из них являются кандидатами в устойчивые отражатели для второго снимка и т.д. В конце получим пересечение наборов кандидатов в устойчивые отражатели для всех $K+1$ снимков. Их и объявим устойчивыми отражателями. Количество выделенных устойчивых отражателей снижается с увеличением γ .

Алгоритм выделения устойчивых отражателей, основанный на дисперсии амплитуды сигнала.

Пусть $\bar{\mathbf{Z}}$ есть осреднённое изображение, то есть

$$\bar{\mathbf{Z}} = \frac{1}{K+1} \sum_{q=1}^{K+1} \mathbf{Z}_q / z_q.$$

Для каждой точки снимков вычислим оценку дисперсии амплитуды

$$\mathbf{D} = \frac{1}{K} \sum_{q=1}^{K+1} \left[(\mathbf{Z}_q / z_q - \bar{\mathbf{Z}}) \times (\mathbf{Z}_q / z_q - \bar{\mathbf{Z}}) \right],$$

где \times означает поэлементное умножение. Установим два граничных значения $\gamma_1 \geq 1$ и $\gamma_2 > 0$. Точку (i, k) будем считать устойчивым отражателем, если

$$\bar{z}_{ik} \geq \gamma_1, \frac{\sqrt{d_{ik}}}{\bar{z}_{ik}} \leq \gamma_2.$$

Количество выделяемых таким образом устойчивых отражателей снижается при увеличении γ_1 и уменьшении γ_2 . При известных матрицах \mathbf{V} и $\Delta \mathbf{H}$ при одинаковом количестве выделенных устойчивых отражателей описанные методы будем сравнивать по средней когерентности (6) этих отражателей. Опишем далее метод оценки матриц \mathbf{V} и $\Delta \mathbf{H}$.

Метод оценки скоростей движения точек и ошибок по высоте без развёртки фазы. Будем оценивать матрицы \mathbf{V} и $\Delta \mathbf{H}$ поэлементно, без учёта зависимостей между точками снимков. Такой подход соответствует стандартному методу устойчивых отражателей. Для точки (i, k) снимков величины v_{ik} и Δh_{ik} найдём из задачи максимизации временной когерентности (6) для этой точки

$$[v_{ik}, \Delta h_{ik}] = \operatorname{argmax} c_{ik}(v_{ik}, \Delta h_{ik}).$$

3. Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте описанные методы сравнивались на примере обработки набора из 35 SAR-снимков территории в Хостинском районе г. Сочи размером 5×5 км в режиме STRIPMAP. Исходная интерферометрическая цепочка снимков с 22.08.2010 по 3.04.2011 получена спутниковой радиолокационной системой COSMO-SkyMed (© ASI, 2010-2011. All rights reserved. Distributed by e-GEOS) в ходе работ по мониторингу потенциально опасных воздействий на объекты железнодорожной

инфраструктуры. Данный проект выполняется на участке Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги компанией e-GEOS и ОАО «НИИАС» в рамках программы международного научно-технического сотрудничества ОАО «РЖД» и корпорации «Финмекканика». На рис. 1 приведён пример сопоставления точек амплитудных компонент двух снимков исходного набора для их совмещения. На фоне амплитудных компонент радиолокационных снимков показаны выделенные соответствующие точки (соединены линиями).

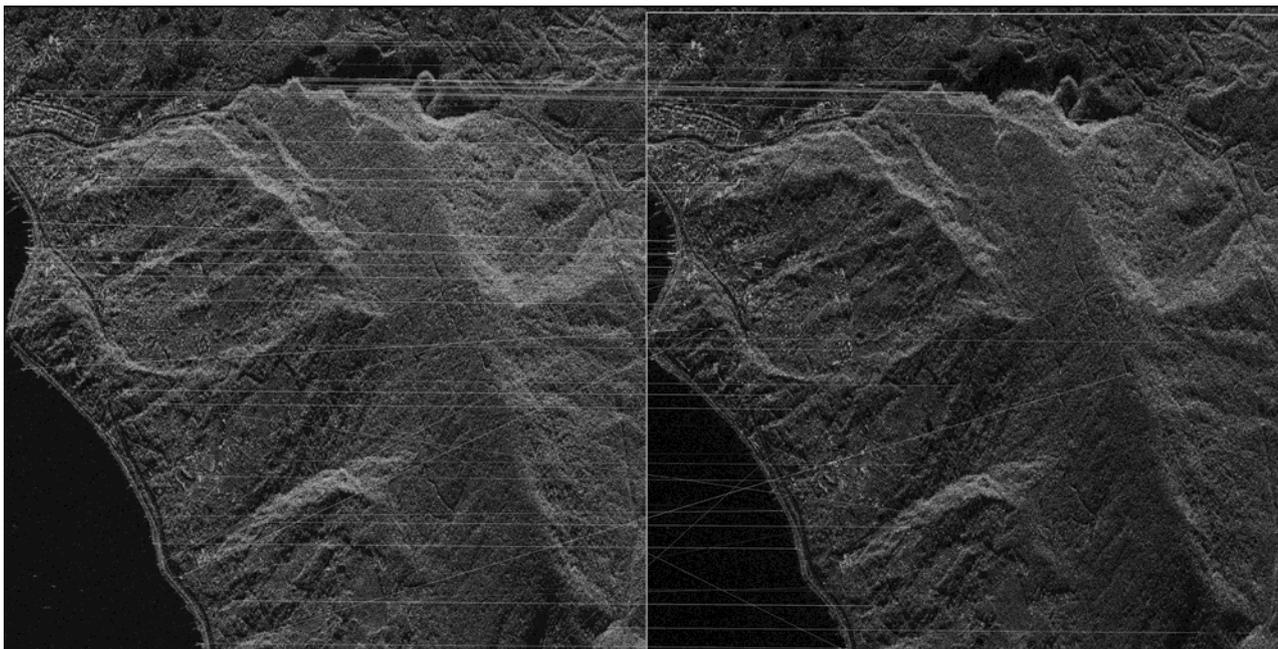


Рис. 1. Пример выделения соответствующих точек при совмещении изображений

На рис. 2 приведены примеры амплитудной и фазовой компонент радиолокационного снимка (*a* и *b*, соответственно), приведена использовавшаяся цифровая модель рельефа соответствующего участка местности (*в*) и пример разности фаз одного из снимков и опорного снимка после учёта рельефа и положения спутников в момент съёмки (*г*). Отметим, что используемая модель рельефа SRTM [16] имеет разрешение 3"×3" по широте и долготе, что соответствует для рассматриваемого участка местности 67,60 м по широте и 92,43 м по долготе. При этом геометрическое разрешение снимков в наборе составляет 3 м. Так как разрешение модели рельефа на порядок ниже, чем пространственное разрешение радиолокационных снимков, привязка модели рельефа к снимкам осуществлялась по орбитальным данным. Точность привязки в таком случае составляет 2–3 элемента разрешения радиолокационных снимков, что гораздо меньше разрешения цифровой модели рельефа.

Произведём теперь сравнение систем устойчивых отражателей, построенных с помощью двух рассматриваемых методов. Считаем, что устойчивый отражатель задаётся своими координатами на снимке. Пусть *A* и *B* – две системы устойчивых отражателей, где система *A* построена базовым методом, а система *B*

построена с учётом дисперсии амплитуды. Назовём мерой их схожести величину

$$S(A,B) = 1 - \frac{|(A \setminus B) \cup (B \setminus A)|}{|A| + |B|} \tag{7}$$

Ясно, что $0 \leq S(A,B) \leq 1$, $S(A,B) = 1$ тогда и только тогда, когда $A = B$, и $S(A,B) = 0$ тогда и только тогда, когда *A* и *B* не пересекаются. Из табл. 1 можно заключить, что два рассматриваемых метода дают близкие наборы устойчивых отражателей, одинаковые в терминах средней временной когерентности (6). На рис. 3 для первой и третьей строки табл. 1 приведены наборы найденных устойчивых отражателей. Серым цветом выделены совпавшие отражатели, чёрным отмечены точки, выделенные как устойчивые отражатели дисперсным методом и не выделенные базовым, а белым – точки, выделенные базовым методом, но не дисперсным.

Табл. 1. Сравнение двух методов выделения устойчивых отражателей

$ A $	$ B $	$S(A,B)$	γ	γ_1	γ_2	$\bar{c}(A)$	$\bar{c}(B)$
5283	5302	0,903	2,45	2,75	0,15	0,557	0,557
7557	7595	0,895	2,125	2,65	0,175	0,556	0,556
10578	10585	0,876	1,9	2,55	0,2	0,555	0,555

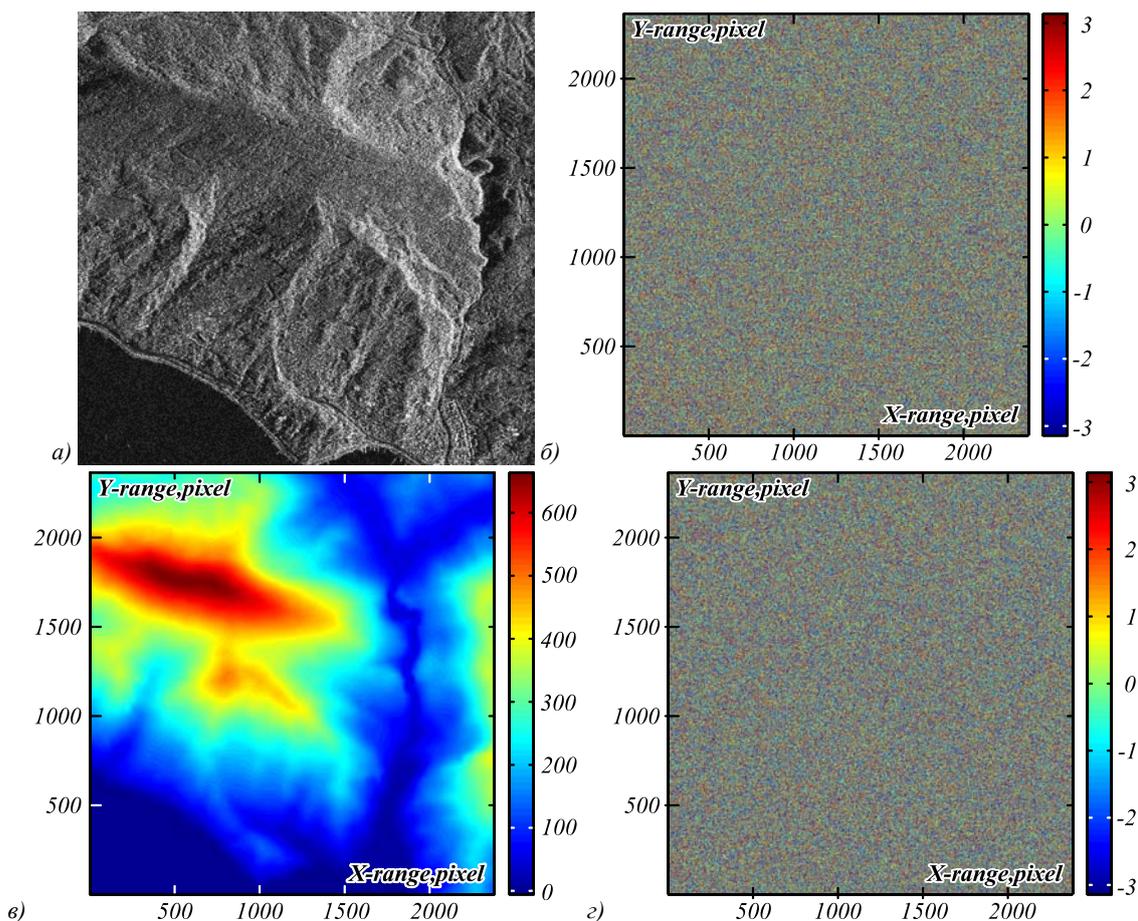


Рис. 2. Пример снимка, модель рельефа и пример разности фаз после учёта модели рельефа и положения спутника

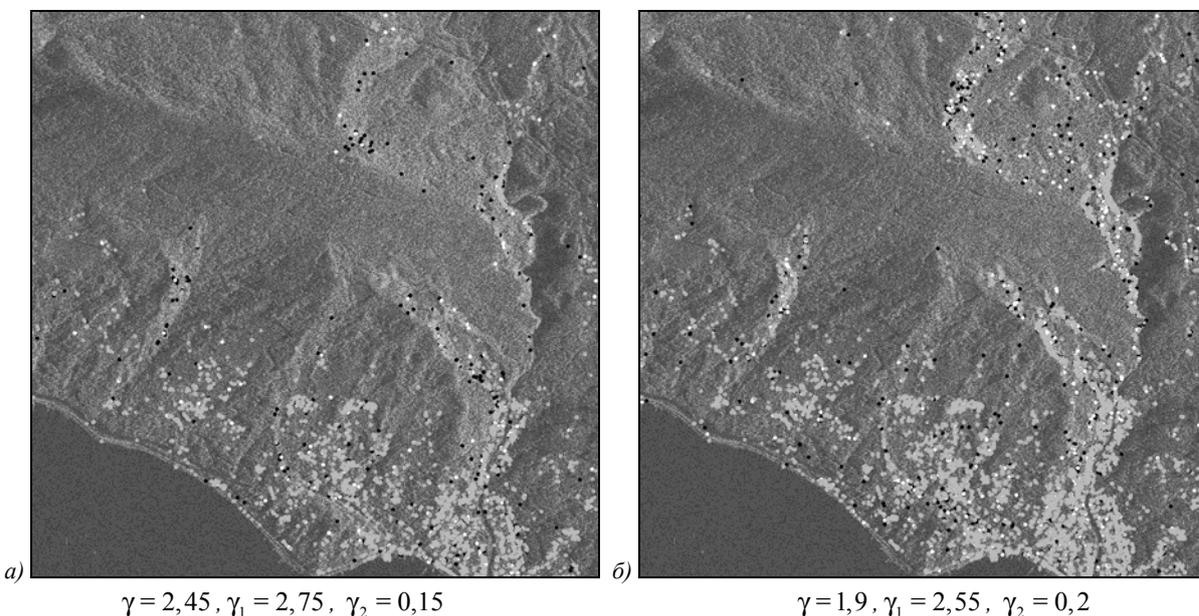


Рис. 3. Сравнение наборов отражателей, выделенных разными методами

Приведём далее оценки скоростей смещения отражателей вдоль направления наблюдения (рис. 4а) и оценки погрешностей в цифровой модели рельефа для точек, соответствующих устойчивым отражателям (рис. 4б) для системы отражателей, полученной дисперсным методом при $\gamma_1 = 2,5, \gamma_2 = 0,2$. Результаты

показывают, что ошибка по высоте имеет порядок 10 м, а большая часть устойчивых отражателей имеет небольшую скорость смещения. Среднее значение скорости смещения, равное 0,3 мм/год, показывает, что рассматриваемая территория испытывает медленный подъём.

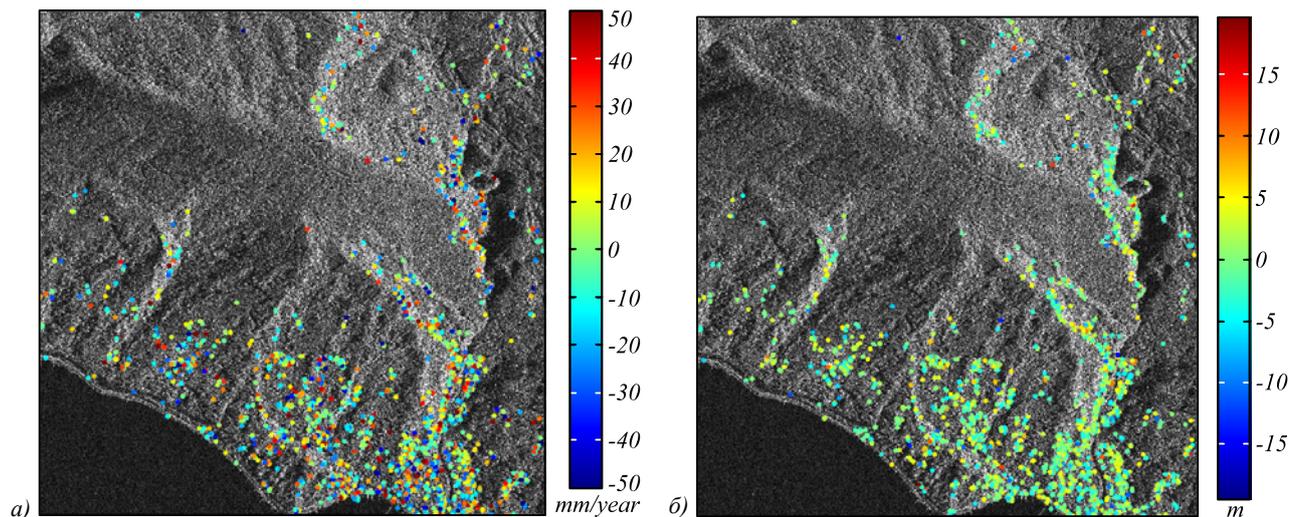


Рис. 4. Результаты, полученные методом устойчивых отражателей без развёртки фазы: скорость движения вдоль направления наблюдения (а), погрешность в высоте (б)

Заключение

В данной работе приведено сравнение двух методов выбора устойчивых отражателей по амплитудной части сигнала. Результаты сравнения показывают, что метод, использующий оценку дисперсии амплитуды сигнала по совокупности снимков, и метод, использующий лишь амплитуду каждого из снимков в отдельности, выделяют схожие наборы устойчивых отражателей. Поэтому возможно применять любой из них. Полученный набор устойчивых отражателей использован для определения скоростей смещения устойчивых отражателей и ошибок в цифровой модели рельефа с помощью стандартного метода устойчивых отражателей [8], но без развёртки фазы. Для рассматривавшейся территории ошибка по высоте в цифровой модели рельефа имеет порядок 10 м, а средняя скорость смещения – 0,3 мм/год, что представляется разумным.

Благодарности

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 №№ 13-07-00709 и 14-07-31205).

Литература

1. **Василейский, А.С.** Алгоритм выделения устойчивых отражателей на спутниковых радиолокационных снимках земной поверхности / А.С. Василейский, Е.А. Карацуба, А.И. Карелов, М.П. Кузнецов, И.А. Рейер // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – Т. 1, № 4. – С. 473-484.
2. **Василейский, А.С.** Обнаружение движения устойчивых отражателей по серии спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности / А.С. Василейский, Е.А. Карацуба, А.И. Карелов, М.П. Кузнецов, И.А. Рейер // Машинное обучение и анализ данных. – 2013. – Т. 1, № 5. – С. 489-504.
3. **Хашин, С.И.** Динамическая сегментация последовательности кадров / С.И. Хашин // Машинное обучение и анализ данных. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 787-795.
4. **Harris, C.** A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens // Alvey Vision Conference. – 1988. – Vol. 15. – P. 147-151.
5. **Lowe, D.** Distinctive image features from scale invariant keypoints / D. Lowe // IJCV. – 2004. – Vol. 60(2). – P. 91-110.
6. **Muja, M.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration / M. Muja, D.G. Lowe // International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09). – 2009. – P. 331-340.
7. **Ferretti, A.** Permanent scatterers in SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39(1). – P. 8-20.
8. **Ferretti, A.** Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2000. – Vol. 38(5). – P. 2202-2212.
9. **Prati, C.** Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations / C. Prati, A. Ferretti, D. Perissin // Journal of Geodynamics. – 2010. – Vol. 49(3). – P. 161-170.
10. **Hetland, E.A.** Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation / E.A. Hetland, P. Musé, M. Simons, Y.N. Lin, P.S. Agram, C.J. DiCaprio // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). – 2012. – Vol. 117(B2).
11. **Nitti, D.O.** On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation / D.O. Nitti, F. Bovenga, R. Nutricato, F. Intini, M.T. Chiaradia // European Journal of Remote Sensing. – 2013. – Vol. 46. – P. 250-271.
12. **Bamler, R.** Synthetic aperture radar interferometry / R. Bamler, P. Hartl // Inverse problems. – 1998. – Vol. 14(4). – P. 1-54.
13. **Balzer, H.** Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry / H. Balzer, C.S. Rowland, P. Saich // Remote Sensing of Environment. – 2007. – Vol. 108(3). – P. 224-239.
14. Digital elevation data [Электронный ресурс] - URL: <http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html#3dem> (дата обращения: 23.01.2014).

15. Vorontsov, K.V. Computable Combinatorial Overfitting Bounds / K.V. Vorontsov, A.I. Frey, E.A. Sokolov // Machine Learning and Data Analysis. – 2013. – Vol. 1(6). – P. 734-743. – ISSN 2223-3792.
16. Farr, T.G. The Shuttle Radar Topography Mission / T.G. Farr, P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Butbank, D. Alsdorf // Reviews of Geophysics. – 2007. – Vol. 45.
- [8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2000; 38(5): 2202-12.
- [9] Prati C, Ferretti A, Perissin D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. Journal of Geodynamics 2010; 49(3): 161-70.
- [10] Hetland EA, Musé P, Simons M, Lin YN, Agram PS, DiCaprio CJ. Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 2012; 117(B2).
- [11] Nitti DO, Bovenga F, Nutricato R, Intini F, Chiaradia MT. On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation. European Journal of Remote Sensing 2013; 46: 250-71.
- [12] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse problems 1998; 14(4): 1-54.
- [13] Balzter H, Rowland CS, Saich P. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. Remote Sensing of Environment 2007; 108(3): 224-39.
- [14] Digital elevation data. Source: <<http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html#3dem>>. Access date: 23.01.2014.
- [15] Vorontsov KV, Frey AI, Sokolov EA. Computable Combinatorial Overfitting Bounds. Machine Learning and Data Analysis 2013; 1(6): 734-43.
- [16] Farr TG, Rosen PA, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Butbank D, Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics 2007; 45.

References

- [1] Vasileisky AS, Karatsuba EA, Karelov AI, Kuznetsov MP, Reyer IA. The algorithm of persistent scatterers detection on the satellite radar images of the earth surface [In Russian]. Machine Learning and Data Analysis 2012; 1(4): 473-84.
- [2] Vasileisky AS, Karatsuba EA, Karelov AI, Kuznetsov MP, Reyer IA. The algorithm of persistent scatterers movement detection on the satellite radar images of the Earth surface [In Russian]. Machine Learning and Data Analysis 2013; 1(5): 489-504.
- [3] Khashin SI. Dynamic segmentation of frames sequences [In Russian]. Machine Learning and Data Analysis 2013; 1(6): 787-95.
- [4] Harris C. A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens. Alvey Vision Conference 1988; 15: 147-51.
- [5] Lowe D. Distinctive image features from scale invariant keypoints. IJCV 2004; 60(2): 91-110.
- [6] Muja M, Lowe DG. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09) 2009; 331-40.
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2001; 39(1): 8-20.

ALGORITHMS OF DETECTION AND REGISTRATION OF PERSISTENT SCATTERERS IN SATELLITE RADAR IMAGES

A.A. Aduenko^{1,2}, A.S. Vasileisky³, A.I. Karelov³, I.A. Reyer¹, K.V. Rudakov^{1,2,3,4}, V.V. Strijov^{1,2}

¹ *Dorodnicyn Computing Center, Russian Academy of Sciences,*

² *Moscow Institute of Physics and Technology,*

³ *JSC «NIAS» (Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport),*

⁴ *Samara State Aerospace University*

Abstract

To detect small movements of the Earth surface (with a velocity of less than several centimeters per year) with use of SAR-interferometry methods it is necessary to find a number of surface areas remaining coherent in radar images over a long period. These areas and corresponding image points are called persistent scatterers. Two methods of persistent scatterers detection are considered in the paper. The methods are compared by the number of detected points and their average time coherence. The algorithms considered are illustrated with an example of processing of a set containing 35 radar images.

Keywords: SAR interferometry, persistent scatterers, SAR image registration, Harris detector, coherence map.

Citation: Aduenko AA, Vasileisky AS, Karelov AI, Reyer IA, Rudakov KV, Strijov VV. Algorithms of detection and registration of persistent scatterers in satellite radar images. Computer Optics 2015; 39(4): 622-30. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-622-630.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science and Russian Foundation of Basic Research Grants No. 13-07-00709 and 14-07-31205.

Сведения об авторах

Адуенко Александр Александрович, 1992 года рождения, студент Московского физико-технического института. Область научных интересов: анализ данных, вычислительная химия.

E-mail: aduenko@phystech.edu.

Alexander Alexandrovich Aduenko (b. 1992) is a student at Moscow Institute of Physics and Technology. Research interests are data analysis and computational chemistry.

Василейский Александр Сергеевич, 1970 года рождения, кандидат физико-математических наук, руководитель Центра внедрения космических технологий ОАО «НИИАС» (Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте). Область научных интересов: спутниковое дистанционное зондирование Земли, мониторинг опасных экзогенных процессов, методы обработки изображений, радиолокационная интерферометрия.

E-mail: A.Vasileisky@vniias.ru.

Alexander Sergeevich Vasileisky (b. 1970), candidate of physical and mathematical sciences, head of Space Technology Application Center JSC «NIAS» (Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport). Research interests are Earth remote sensing from space, dangerous exogenous processes' monitoring, image processing techniques, SAR interferometry.

Карелов Алексей Игоревич, 1984 года рождения, начальник отдела спутникового мониторинга ОАО «НИИАС» (Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте). Область научных интересов: спутниковое дистанционное зондирование Земли, применение методов радиолокационной интерферометрии для мониторинга геодинамических процессов.

E-mail: a.karelov@vniias.ru.

Alexey Igorevich Karelov (b. 1984), head of Satellite Monitoring Division JSC «NIAS» (Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport). His research interests are currently focused on Earth remote sensing from space, SAR interferometry application on monitoring of geodynamic processes.

Рейер Иван Александрович, 1976 года рождения, кандидат технических наук, научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук. Область научных интересов: обработка и распознавание изображений, морфологический анализ изображений, языки описания данных.

E-mail: rever@forecsys.ru.

Ivan Aleksandrovich Reyer (b. 1976), candidate of technical sciences, investigator of the Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests are image processing and recognition, morphological image analysis, data description languages.

Рудаков Константин Владимирович, 1954 года рождения, член-корреспондент РАН, заведующий отделом Интеллектуальных систем Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук. Область научных интересов: распознавание образов, математические методы прогнозирования, алгебраические системы, прикладная алгебра.

E-mail: rudakov@ccas.ru.

Konstantin Vladimirovich Rudakov (b. 1954), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of Intelligent Systems department at the Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests include pattern recognition, mathematical methods of forecasting, algebraic systems, applied algebra.

Стрижов Вадим Викторович, 1967 года рождения, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук. Область научных интересов: машинное обучение, анализ данных, прогнозирование, классификация, выбор моделей.

E-mail: strijov@ccas.ru.

Vadim Viktorovich Strijov (b. 1967), doctor of sciences in physics and mathematics, principal investigator of the Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests are machine learning, data analysis, forecasting, classification, model selection.

*Поступила в редакцию 24 апреля 2015 г.
Окончательный вариант – 8 августа 2015 г.*