

Алгоритм выделения устойчивых отражателей на спутниковых радиолокационных снимках 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

Исследуется проблема выделения устойчивых отражателей радиолокационного сигнала, расположенных на поверхности земли. Устойчивые отражатели определяются по данным радиолокационных спутниковых снимков, содержащих амплитудную и фазовую составляющие. Определение координат отражателей происходит по амплитудной составляющей. Фазовая составляющая используется для определения движения отражателей с течением времени вследствие сдвига земной поверхности. Предложен алгоритм выделения отражателей как ярких пятен на амплитудной составляющей. Алгоритм проиллюстрирован синтетическими и реальными данными. В работе описан метод обработки спутниковых снимков, построения и проверки адекватности синтетических данных и процедура построения системы устойчивых отражателей.

Ключевые слова: радиолокация, синтезированная апертура, SAR-интерферометрия, устойчивые отражатели, LoG-детектор.

The algorithm of persistent scatterers 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

We consider a problem of the radar signal persistent scatterers detection on the earth surface. To detect the scatterers we use satellite SAR images consisting of the amplitude and phase components. To identify scatterers coordinates we use amplitude component. Phase component is used to determine scatterers movement due to the terrain shifts. We propose a blob detection algorithm to find the scatterers. To illustrate the algorithm we use synthetic and real data. We describe a method of the satellite images processing, a method of the synthetic data construction and verification and method of the persistent scatterers system detection.

Keywords: radiolocation, synthetic aperture radar, SAR interferometry, persistent scatterers, LoG-detector.

Введение

Мониторинг состояния объектов железнодорожной инфраструктуры включает контроль стабильности пути, зданий и сооружений с использованием различных методов из-

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

Машинное обучение и анализ данных, 2012. Т. 1, № 4.
Machine Learning and Data Analysis, 2012. Vol. 1 (4).

мерений. Раннее обнаружение отклонений геометрических параметров пути от заданных значений, деформаций и потери устойчивости искусственных сооружений, связанных как с эксплуатационными нагрузками, так и с воздействием экзогенных процессов, необходимо для поддержания исправного состояния железнодорожной инфраструктуры и обеспечения безопасности перевозок. Дистанционные методы аэрокосмического мониторинга эффективно дополняют традиционный контроль состояния пути вагонами-путеизмерителями и контроль стабильности сооружений геодезическими методами за счет обнаружения потенциально опасных воздействий на прилегающих к объектам инфраструктуры территориях на оползневых участках, в зонах воздействия эрозионных процессов, при прохождении пути по территориям, подверженным карстовым процессам, и в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Данная работа посвящена описанию и анализу методов, позволяющих осуществлять контроль стабильности устойчивых отражателей радиолокационного сигнала, представляющих собой элементы наземных сооружений и открытые участки местности, по данным спутниковой радиолокационной съемки.

Для обнаружения изменений ландшафта, просадок и смещений земной поверхности, вызванных оползнями, землетрясениями, извержением вулканов и другими экзогенными геологическими процессами, применяется метод радиолокационной дифференциальной интерферометрии [1]. В его основе лежит съемка территории радаром с синтезированной апертурой (*synthetic aperture radar - SAR*) на борту космических аппаратов. SAR системы позволяют получать детальные радиолокационные изображения земной поверхности путем искусственного увеличения апертуры бортовой антенны.

Радиолокатор с синтезированной апертурой фиксирует амплитуду и фазу отраженного сигнала. Принцип интерферометрии заключается в восстановлении цифровой модели рельефа путем анализа фазовых компонент двух (или более) SAR-снимков одного и того же участка земной поверхности, сделанных с отстоящих точек одной орбиты. Дифференциальная интерферометрия применяется для получения информации об изменениях ландшафта.

Ранее в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6] были исследованы методы обработки фазовых частей радиолокационных снимков для решения задачи интерферометрии. Сигнал, участвующий в формировании каждого пиксела, отражается от большого количества маленьких участков поверхности, которые могут обладать разными диэлектрическими свойствами. При этом фаза отраженного сигнала может быть абсолютно нескоррелирована для соседних пикселов, что затрудняет анализ фазовой картины и восстановление смещений поверхности [2].

Для решения этой проблемы было разработано понятие устойчивых отражателей [3, 4, 5, 6] радиолокационного сигнала. Устойчивыми отражателями является такой (разреженный) набор участков на поверхности, для которых амплитудно-фазовые характеристики сигнала при отражении незначительно меняются со временем. Такими участками могут являться, например, крыши зданий, сооружения или открытые участки грунта с неразвитой растительностью. Для последовательности снимков одной и той же поверхности выделяется набор устойчивых отражателей, и для каждого отражателя вычисляется изменение фазы отраженного сигнала. По этому изменению фаз делаются выводы об относительном сдвиге участков земной поверхности за время между съемками.

Для поиска на снимке устойчивых отражателей были предложены методы [6], основанные на построении вероятностной модели отраженного сигнала. Сигнал, отражающийся от элемента поверхности, представляется случайной величиной, для которой дисперсия

обратно пропорциональна показателю «устойчивости» отражателя. Для введенной таким образом вероятностной модели были предложены методы поиска отражателей, основывающиеся, например, на методе максимального правдоподобия.

В последующих работах были предложены методы поиска устойчивых отражателей на основе анализа графов [3], основывающиеся на переборе ребер, соединяющих все пары пикселей для двух изображений. При этом, исходя из минимизации некоторого функционала, среди всех ребер выбираются те, которые с наибольшей вероятностью соединяют пары устойчивых отражателей.

В данной работе предлагаются алгоритмы получения синтетических радиолокационных снимков с использованием измерений высот земной поверхности и выделения устойчивых отражателей по амплитудным компонентам снимков. Для выделения отражателей применяется LoG-детектор [7, 8]. Идея этого детектора заключается в последовательной свертке изображения с лапласианом гауссиан разного масштаба. По полученному набору свертков вычисляются максимумы функции отклика, соответствующие отражателям, а их размер определяется масштабом найденной гауссианы.

Проанализирована адекватность соответствия синтетических и реальных данных - радиолокационных снимков земной поверхности, полученных системой из четырех спутников COSMO-SkyMed, оснащенных SAR-аппаратурой. Изображения, полученные этой системой, используются для составления карт земной поверхности, контроля за береговыми линиями и предупреждения природных чрезвычайных ситуаций. Некоторые изображения находятся в открытом доступе: <http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm>.

Принцип радиолокационного синтеза апертуры

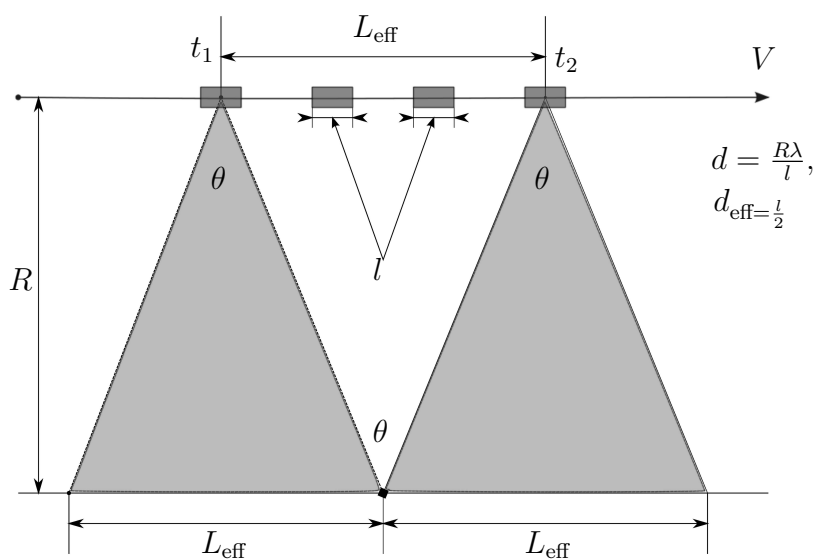


Рис. 1: Схема активной съемки земной поверхности с использованием космического радиолокатора с синтезированной апертурой

Основная идея принципа синтеза апертуры [1, 2] продемонстрирована на рис. 1. В общем случае, вследствие дифракции, разрешающая способность радиолокатора напрямую зависит от линейных размеров антенны:

$$\theta = \frac{\lambda}{l},$$

где l — размер антенны, λ — длина волны, θ — угол апертуры. Здесь и далее, величины λ, L, d, R измеряются в метрах, θ — в радианах. Детальность d радиолокационного изображения тем выше, чем больше размер антенны l и чем меньше расстояние до поверхности R :

$$d = \frac{R\lambda}{l}.$$

Таким образом, для получения высокой разрешающей способности (до нескольких сантиметров) необходимо располагать антеннами больших апертурных размеров, существенно превышающих реализуемые на реальных носителях. Для решения этой проблемы был разработан принцип искусственного синтеза апертуры при поступательном движении летательного аппарата [1, 2].

Этот принцип основан на перемещении излучателя вдоль требуемого апертурного размера L_{eff} со скоростью V при движении летательного аппарата, последовательно испускающего и принимающего отраженные от цели сигналы, а затем совместно обрабатывающего их. При этом появляются затраты времени на синтезирование, связанные с тем, что спутнику, летящему со скоростью V , необходимо пролететь расстояние L_{eff} , чтобы получить серию снимков, участвующих в формировании изображения, а также появляются вычислительные затраты на синтезирование снимков. Однако при этом достигается необходимый размер апертурного угла

$$\theta_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{L_{\text{eff}}},$$

что позволяет добиться высокой разрешающей способности:

$$d_{\text{eff}} = \frac{l}{2},$$

где l — реальный апертурный размер антенны. На рис. 2 схематически изображен принцип эквивалентности реальной апертуры большого размера и синтезированной апертуры движущегося летательного аппарата. На рис. 2(а) показан радар с реальным размером апертуры L . На рис. 2(б) показан радар, искусственно синтезирующий апертуру размера L_{eff} в течение своего полета путем последовательного наложения снимков. Благодаря этому принципу в радаре на рис. 2(б) для получения разрешающей способности радара на рис. 2(в) требуется антенна гораздо меньшего размера.

Формат используемых данных.

Для иллюстрации работы предлагаемого алгоритма использованы SAR-снимки, полученные системой COSMO-SkyMed.

Данная система предусматривает SAR-съемку в трех различных режимах [9]:

Spotlight — режим съемки небольшого участка местности с высоким разрешением (антенна направлена на снимаемый участок в течение продолжительного времени);

Stripmap — режим съемки полосы местности со средним разрешением (фиксированное направление антенны);

ScanSAR — режим съемки большой территории (сканирование нескольких полос со сменой направления антенны) с низким разрешением.

Используемые изображения получены системой COSMO-SkyMed в подрежиме HIMAGE режима съемки Stripmap (съемка полосы с фиксированной конфигурацией радара, второй подрежим, PINGPONG, подразумевает съемку полосами с переключением поляризации). Ширина полосы съемки в подрежиме HIMAGE — приблизительно 40 км,

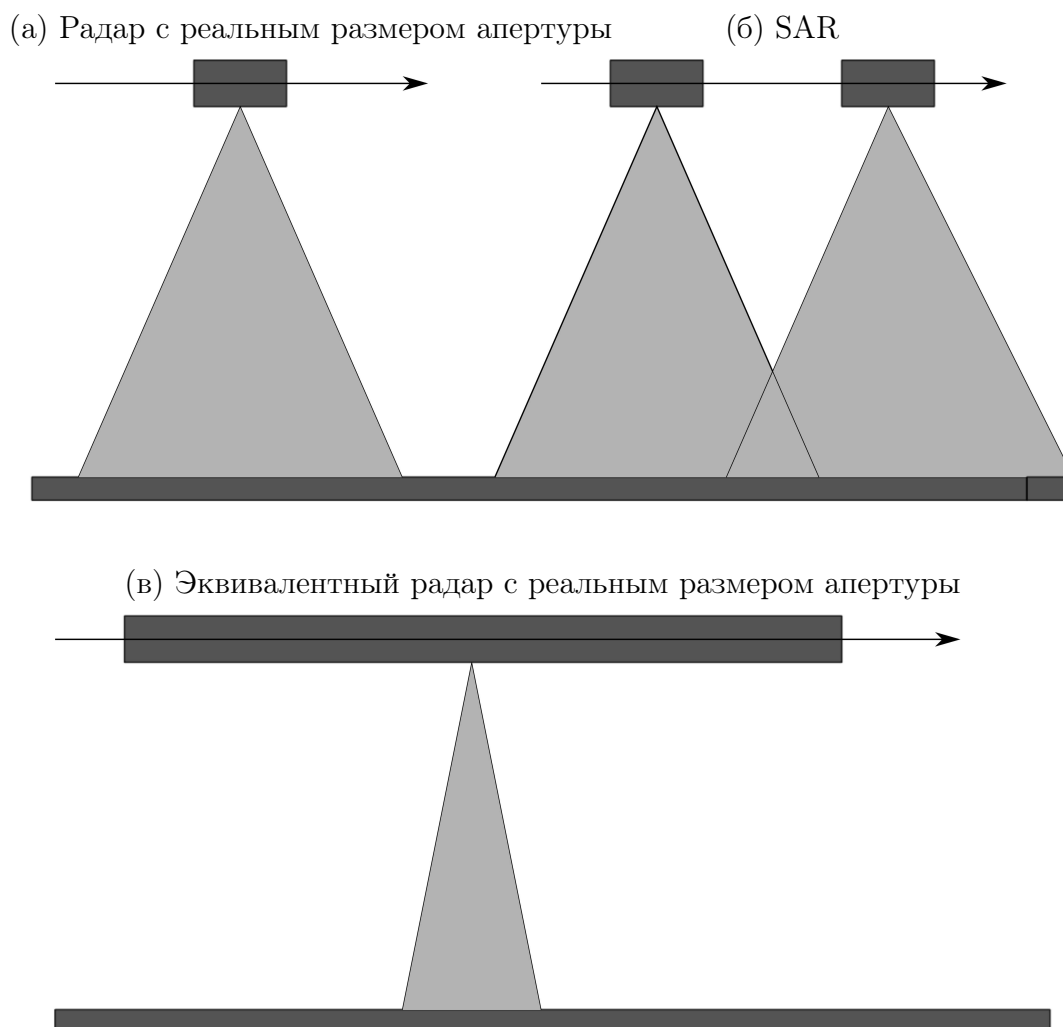


Рис. 2: Эквивалентность реальной и синтезированной апертуры

пространственное разрешение - 3×3 м. Получаемое изображение представляет квадратную сцену с длиной равной ширине полосы съемки. Уровень обработки данных в используемых изображениях - SCS (Single Look Complex Slant - одиночная наклонная съемка). Такие изображения формируются на основе одиночного сигнала, шаг пикселя равно стоит по азимуту и углу падения, сохраняется информация о фазе, данные представлены в формате комплексных чисел, отсутствует геопривязка, изображение ориентировано перпендикулярно направлению движения радиолокационного аппарата.

SAR-интерферометрия

Для SAR-интерферометрии используется два (или более) SAR-снимков одного и того же участка земной поверхности. В результате комплексного поэлементного перемножения снимков формируется интерферограмма. Разность интерферограмм, полученных из различных пар SAR-снимков, позволяет определять малые смещения земной поверхности.

Принцип дифференциальной интерферометрии проиллюстрирован на рис. 3. Для реализации этого принципа необходимо иметь как минимум два SAR-снимка, полученных в разные моменты времени. Минимальный интервал между съемками определяется периодом повторения орбиты при движении спутников вокруг Земли и составляет несколько

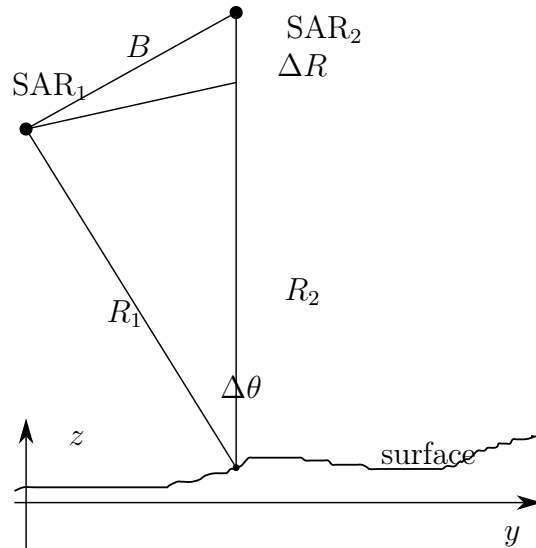


Рис. 3: Принцип SAR-интерферометрии

суток для многоспутниковой системы COSMO-SkyMed. При этом, не смотря на относительную стабильность орбиты, съемка одного и того же участка земной поверхности неизбежно осуществляется из разных положений, характеризующихся расстояниями R_1 и R_2 . Важно, чтобы расстояние между двумя положениями спутника B , называемое *базовой линией* [1], не превышало нескольких сот метров. При большем значении базовой линии полностью пропадает корреляция между совмещаемыми фазовыми изображениями.

Опишем вкратце принцип интерферометрии. Отраженные волны u_1 и u_2 от точки поверхности x , принятые спутником в положениях R_1 и R_2 , записываются в виде

$$u_1(R_1, x) = |u_1(R_1, x)| \exp(i\varphi_1(R_1, x)), \quad u_2(R_2, x) = |u_2(R_2, x)| \exp(i\varphi_2(R_2, x)).$$

Результат интерференции записывается в виде произведения:

$$v(\cdot) = u_1(\cdot)u_2^*(\cdot) = |u_1(\cdot)||u_2^*(\cdot)| \exp(i\Delta\varphi(\cdot)),$$

где

$$\Delta\varphi(\cdot) = \varphi_1(\cdot) - \varphi_2(\cdot)$$

— разность фаз.

Не принимая во внимание шумовые эффекты, запишем разность фаз $\Delta\varphi$ как функцию от разности хода ΔR :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R.$$

Таким образом, интерферограмма состоит из пикселей, каждому из которых соответствует разность фаз, зарегистрированных спутником, находящемся в различных положениях (на разных расстояниях от поверхности). Если эта разность фаз кратна 2π , то на интерферограмме наблюдается чередование темных и светлых полос. Каждая полоса характеризуется определенным значением разности фаз зарегистрированного сигнала при съемке с разных расстояний. В силу того, что съемка осуществляется из разных положений, существенный вклад в эту картину вносит рельеф территории (топографическая компонента). Скомпенсировав топографическую компоненту фазы можно получить интерферограмму, характеризующую смещения поверхности относительно первоначального

положения за время между съемками. Участки, не являющиеся устойчивыми отражателями радиолокационного сигнала, отображаются на интерферограмме в виде областей пикселей со случайными значениями разности фаз. Устойчивые отражатели радиолокационного сигнала демонстрируют относительно плавные изменения фазы на интерферограмме, а также зачастую характеризуются высокими значениями амплитудной компоненты. Изучив структуру полос на интерферограмме, можно выделить участки, на которых земная поверхность сдвинулась за время между съемками и оценить величину смещения.

Постановка задачи выделения устойчивых отражателей

Заданы изображения — матрицы размера $m \times n$ яркостей \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 $Z, H, \Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^1$.

Предполагается, что изображение \mathbf{Z} содержит, в том числе, пятна (односвязные области, в которые можно вписать круг радиусом ξ), ассоциируемые с устойчивыми отражателями.

Требуется выделить на изображении множество отражателей, заданных координатами $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, соответствующих однородным пятнам на изображении с резким изменением градиента яркости на границе. Требуется поставить в соответствие каждому отражателю (x, y) значение на фазовой составляющей $\varphi(x, y)$.

Алгоритм выделения устойчивых отражателей

Решается задача поиска устойчивых отражателей на амплитудной составляющей изображения \mathbf{Z} . На изображении отражатели представляются в виде однородных светлых пятен (в дальнейшем — блобов), обладающих свойством резкого изменения градиента на границе. Для решения задачи применяется LoG-детектор. Принцип, по которому строится LoG-детектор, состоит из двух последовательных этапов.

Свертка изображения с лапласианом гауссианы. Первый этап состоит в свертке яркостной составляющей изображения $Z(x, y)$ с лапласианом Δ гауссианы $G(x, y, \sigma)$, где

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$\Delta G(x, y, \sigma) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)G(x, y, \sigma).$$

Введем также обозначение для нормированного на σ^2 лапласиана:

$$\hat{\Delta}G(x, y, \sigma) = \sigma^2 \Delta G(x, y, \sigma).$$

Свертка изображения записывается в виде

$$\hat{\Delta}Z(x, y, \sigma) = \iint \hat{\Delta}G(x - x', y - y', \sigma)Z(x, y)dx'dy'.$$

$\hat{\Delta}Z(x, y, \sigma)$ — результат свертки изображения $Z(x, y)$ с лапласианом гауссиана $\hat{\Delta}G(x, y, \sigma)$. Свертка выполняется для k различных значений параметра $\sigma_t, t \in \{1, \dots, k\}$, и в результате образуется k отфильтрованных изображений $\hat{\Delta}Z(x, y, \sigma_t), t \in \{1, \dots, k\}$.

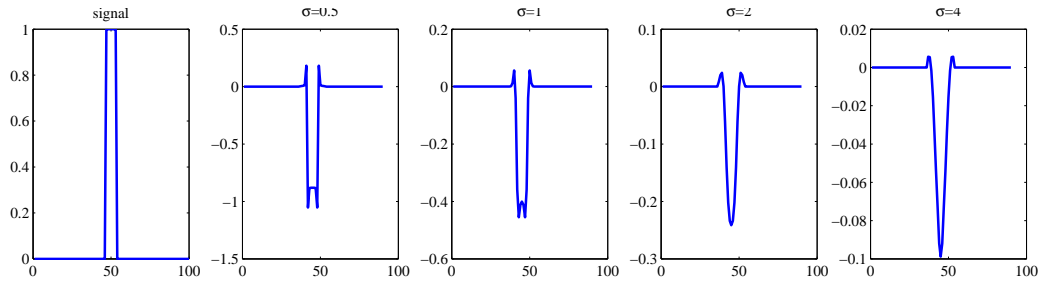


Рис. 4: Принцип LoG-детектора

Иллюстрация LoG-детектора показана на рис. 4 (рассматривается случай одномерного сигнала $Z(x)$). На крайнем левом графике показан входной сигнал $Z(x)$, который в наших терминах является блобом фиксированного размера. На последующих четырех графиках показана свертка $\hat{\Delta}Z(x, \sigma)$ исходного сигнала $Z(x)$ с лапласианом гауссиана $\hat{\Delta}G(x, \sigma)$ для различных значений σ . При малых значениях σ свертка $\hat{\Delta}Z(x, \sigma)$ имеет два локальных минимума и детектирует отдельно границы блоба. При увеличении σ происходит сглаживание сигнала и соединение двух локальных минимумов в один. При $\sigma = 2$ функция свертки имеет один ярко выраженный минимум, таким образом, значение параметра $\sigma = 2$ отвечает за характерный размер блоба.

Поиск характерного размера блоба. Для того, чтобы определить характерный размер блоба σ_i в точке (x, y) , необходимо вычислить минимум функции

$$\hat{t} = \arg \min_t \hat{\Delta}Z(x, y, \sigma_t), \quad t \in \{1, \dots, k\}.$$

Отметим, что если эта функция не имеет ярко выраженного минимума, или имеет несколько минимумов, то точка с координатами (x, y) не является центром блоба. Таким образом, на изображении Z метод находит некоторое разреженное множество координат центров блобов $\{A_i\}_{i=1}^N$ и их соответствующих размеров $\{\sigma_i\}_{i=1}^N$.

Аффинная адаптация размеров блоба. В этом параграфе под координатами (x, y) будем понимать координаты центров найденных блобов $\{A_i\}_{i=1}^N$.

Отметим, что найденными нами блобы характеризуются двумя параметрами: расположением (x, y) и радиусом σ . Пятна на изображении при этом могут быть произвольной формы, и для уточнения формы блоба предлагается произвести корректировку, или аффинную адаптацию, размеров блоба. Метод аффинной адаптации основывается на анализе вариации яркости изображения в зависимости от сдвига пиксела $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ в направлении вектора $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ (см. [10]):

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

где $w(x, y)$ — функция окна (прямоугольного или гауссова). Для небольших сдвигов справедливо приближение:

$$E(u, v) \approx [u \ v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

где \mathbf{M} — матрица, состоящая из взвешенных значений функции интенсивности:

$$\mathbf{M} = \sum_{x,y} w(x, y) \begin{bmatrix} Z_x^2 & Z_x Z_y \\ Z_y Z_x & Z_y^2 \end{bmatrix}.$$

Матрица \mathbf{M} является диагональной и допускает разложение

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \mathbf{R}.$$

Матрица \mathbf{M} определяет уравнение эллипса, показанного на рис. 5, с направлением, задаваемым поворотом \mathbf{R} , и главными осями $\lambda_1^{-\frac{1}{2}}$, $\lambda_2^{-\frac{1}{2}}$. Форма этого эллипса описывает форму соответствующего блока.

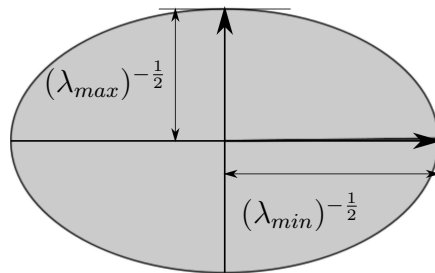


Рис. 5: Эллипс, соответствующий блобу.

Вычислительный эксперимент

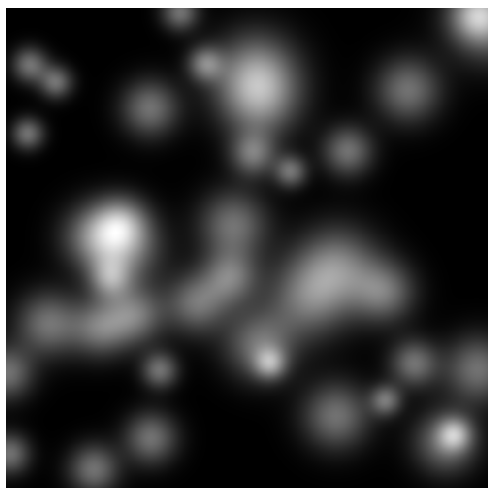
Эксперимент проводился на реальных и модельных данных.

В качестве модельных данных сгенерирована амплитудная составляющая изображения, состоящая из набора гауссиан разного масштаба, показанная на рис. 6 (а), и фазовая составляющая на рис. 6 (б). Предложенный выше алгоритм выделил на этой составляющей 24 блока, что показано на рис. 6 (с).

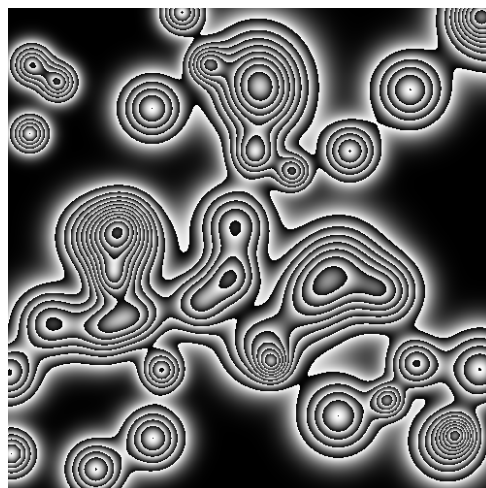
В качестве реальных данных использованы фрагменты снимков, полученных системой COSMO-SkyMed, размером 2000×2000 . На рис. 7 (а) показана амплитудная составляющая снимка, на рис. 7 (б) — фазовая составляющая. На амплитудной составляющей алгоритм выделил 1970 блоков, соответствующих устойчивым отражателям, что показано на рис. 7 (с).

Заключение

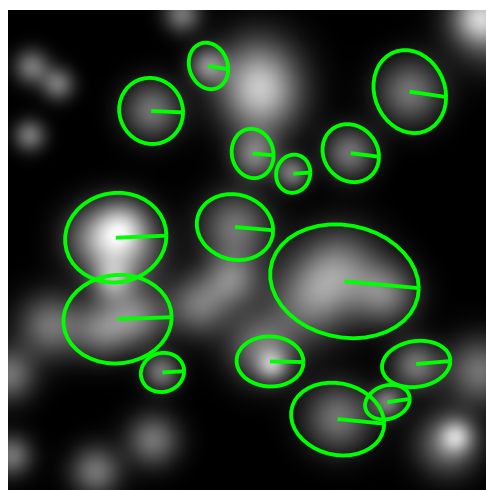
Исследована задача выделения системы устойчивых отражателей на SAR-снимках земной поверхности. Предложен метод нахождения устойчивых отражателей, основанный на широко распространенном в обработке изображений способе поиска блоков. Этот способ представляет собой свертку изображения с лапласианом гауссиан разных масштабов и поиск максимумов в полученной серии сглаженных изображений. Предложен алгоритм



(a) Амплитудное изображение

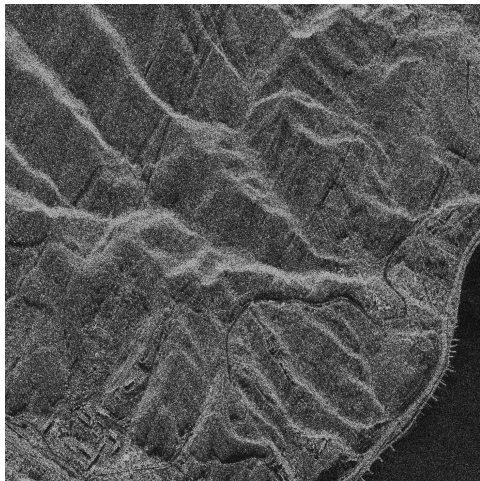


(b) Фазовое изображение

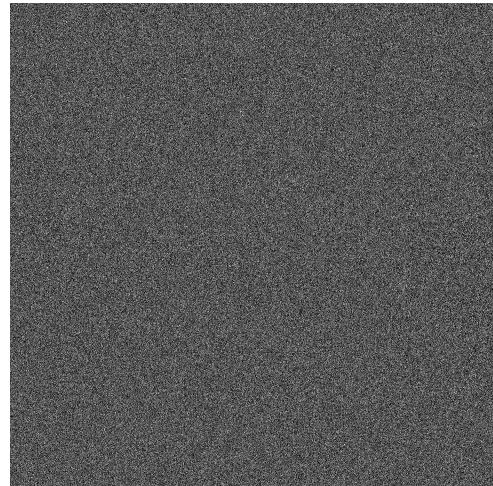


(c) Выделенные отражатели

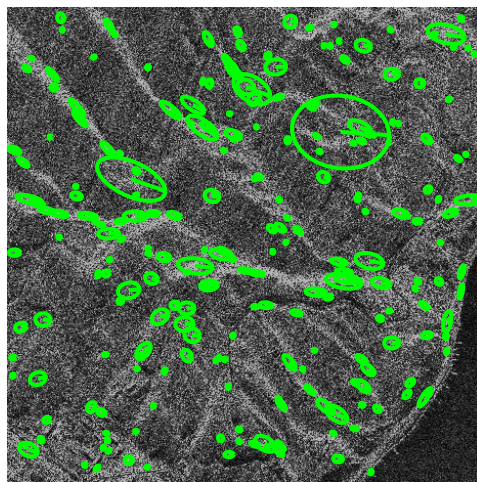
Рис. 6: Модельные данные



(a) Амплитудное изображение



(b) Фазовое изображение



(c) Выделенные отражатели

Рис. 7: Реальные данные.

COSMO-SkyMed Product - © ASI 2011 processed under license from ASI - Agenzia Spaziale Italiana. All rights reserved. Distributed by e-GEOS

уточнения эллипсоидальной формы блобов, основанный на сингулярном разложении матрицы, состоящей из взвешенных значений производной функции интенсивности. Адекватность работы алгоритма проиллюстрирована на синтетических и реальных данных.

Литература

- [1] Hartl P., Bamler R. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14:R1–R54, 1998.
- [2] Harger R.O. Synthetic aperture radar fundamental and image processing. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 2:268–286, 1993.
- [3] Costantini M. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, 2008.
- [4] Rocca F., Ferretti A., Prati C. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 39:8–20, 2001.
- [5] Rocca F., Ferretti A., Prati C. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential sar interferometry. *Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 38:2202–2212, 2000.
- [6] Agram P.S. *Persistent Scatterer Interferometry In Natural Terrain*. PhD thesis, Stanford University, 2012.
- [7] Schmid C., Mikolajczyk K. Scale & affine invariant interest point detectors. *International Journal of Computer Vision*, 60:63–86, 2004.
- [8] Lindeberg T. Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales. *Journal of Applied Statistics*, 21(2):224–270, 1994.
- [9] Italian Space Agency. *COSMO-SkyMed SAR Products Handbook*. <http://www.e-geos.it/products/pdf/csk-product>
- [10] Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В., Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. *Обработка и Анализ Изображений в Задачах Машинного Зрения*. М.: Физматкнига, 2010.