

УДК 528

А.С. ВАСИЛЕНКО, Ю.В. СЪЕДИНА, Ю.В. СЪЕДИН, Д.В. ШИШКИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МОНИТОРИНГ РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Приведены способы получения цифровых моделей рельефа земной поверхности и показаны преимущества методов радиолокационной интерферометрии для решения задачи мониторинга районов катастроф и чрезвычайных ситуаций. По результатам исследований сделано заключение о высоком качестве полученной модели рельефа, позволяющем получать картографическое изображение земной поверхности с достаточным разрешением на карте масштаба 1:25 000 при размере снимаемого участка 70×70 км. Представлено трехмерное изображение массива с увеличенным масштабом рельефа полученной модели, подтверждающее достоинства комплексного использования радиолокационных и оптических методов для мониторинга.

Ключевые слова: *линеаменты, космические снимки, радиолокационное изображение, интерферометрическая обработка, амплитудный и фазовый слой, критическая базовая линия.*

Введение

В настоящее время в практике геолого-поисковых работ все чаще используются материалы спутниковых съемок земной поверхности. Это связано с относительно низкой стоимостью космических снимков (КС), постоянным ростом их пространственного и спектрального разрешения, а также с развитием средств обработки и интерпретации. В литературе описано большое количество примеров успешного применения КС при решении разнообразных технологических задач [1 – 7]. Эффективность использования КС во многом определяется относительной простотой обнаружения и картирования приповерхностных объектов, в том числе тех, которые при большой протяженности, но малой мощности, могут быть пропущены при полевых исследованиях. Вместе с тем снимки Земной поверхности несут полезную информацию и о глубинном строении территории, однако для ее извлечения необходима разработка новых подходов, основанных на количественных методах пространственного анализа. Известна методика изучения закономерностей расположения линейных неоднородностей земной коры (линеаментов), основанная на выделении крупных линеаментов на космических снимках и определении периодичности их чередования [5]. Она позволяет увеличить объем извлекаемой из КС полезной информации.

Настоящая работа посвящена решению задачи получения цифровых моделей рельефа земной поверхности с помощью космических радиолокационных комплексов. Ее решение позволит, по нашему

мнению, проводить успешно мониторинг на территории Украины объектов добычи, транспорта и хранения нефти и газа, а также контроль регионов бедствий службами министерства по чрезвычайным ситуациям. Это широко может быть использовано также при проектировании новых объектов наземного устройства месторождений и нефтегазотранспортной инфраструктуры. Выполнение мониторинга земной поверхности, вызванных подработкой залежей углеводородов, с помощью интерферометрической обработки радиолокационных изображений позволяет определить смещение земной поверхности, предполагает использование высокоточного опорного рельефа. И, наконец, цифровые модели рельефа поверхности земли используются в научных исследованиях, для моделирования геодинамических напряжений, анализа линеаментов структурного дешифрирования.

Основная часть

Существуют следующие методы получения цифровых моделей рельефа земной поверхности:

- спутниковая и авиационная стереосъемка, как оптическая, так и радиолокационная;
- воздушное и лазерное сканирование с достаточно высокой точностью съемки (но дорогостоящее);
- по одиночным космическим изображениям или аэрофотосъемкам;
- оцифровка существующих топографических карт с последующим получением цифровой модели рельефа в соответствующем программном обеспечении.

Мы предлагаем в настоящей работе подробнее рассмотреть технологию мониторинга рельефа земной поверхности с помощью космических радиолокационных комплексов на основе метода радиолокационной интерферометрии.

Очевидными преимуществами получения модели современного рельефа при этом являются:

– всепогодность радиолокационной съемки (нет зависимости от облачности и времени суток в отличие от оптической стереосъемки);

– относительно низкая стоимость и широкая полоса захвата по сравнению с аэросъемкой и воздушным лазерным сканированием;

– минимальные трудозатраты при обработке данных космической съемки по сравнению со стереоскопической обработкой, так как процесс получения рельефа в программном модуле практически полностью автоматизирован;

– возможность построения модели рельефа без наземных контрольных точек либо с их минимальным количеством в случае использования данных радиолокатора PALSAR с космического аппарата ALOS с гарантированной субпиксельной точностью геопозиционирования;

– высокая точность и детальность получаемых результатов.

Космические аппараты, находящиеся в настоящее время на орбите, ведут радиолокационную съемку земной поверхности в различных диапазонах радиоволновой области электромагнитного спектра, приведенных в табл. 1.

Наиболее доступными являются архивные радиолокационные изображения с этих космических аппаратов.

На основе накопленного опыта интерферометрической обработки значительных объемов архивных радиолокационных космических снимков нами сделан вывод о наличии двух вариантов набора исходных данных при построении рельефа интерфе-

рометрическим методом для условий большей части территории Украины.

Первый вариант — использование результатов тандемной съемки с небольшой временной базой, например, архив снимков, сделанных спутниками ERS-1 и ERS-2. Наряду с положительными факторами (идеальная интерферограмма, высокая когерентность, пространственное разрешение около 25 м), минусами этого варианта являются: неполное покрытие территории Украины радиолокационными изображениями; отсутствие свежих архивных данных (в том случае, если необходима современная ЦМР); резкое падение когерентности в районе лесных массивов, характерное в целом для С-диапазона радиодиапазона в целом.

Второй вариант — использование результатов радиолокационной съемки со спутника ALOS бортовым радиолокатором с синтезированной апертурой PALSAR. Основным плюсом использования этих данных для получения информации о рельефе земной поверхности представляется длина зондирующей волны этого радиолокатора – 23 см, соответствующая L-диапазону. Соответственно, в большинстве случаев снимается проблема временной декорреляции интерферометрических пар радиолокационных снимков, вызванной влиянием растительности на местности. В связи с этим интерферометрические пары изображений ALOS PALSAR характеризуются высокой когерентностью, даже несмотря на то, что минимально возможный временной интервал между ними составляет 46 дней. При этом режим съемки PLR (полная поляризация излучения) позволяет дополнительно повысить когерентность и оптимизировать интерферограмму за счет съемки с полной поляризационной матрицей. В свою очередь, данные ALOS PALSAR FBS (однополяризационный режим съемки) характеризуются высоким пространственным разрешением – 7 м, что в 4 раза превышает разрешение данных тандемной съемки.

Таблица 1

Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра радиолокационных комплексов космических аппаратов

Диапазон	Частота, ГГц	Длина волны, см	Космические аппараты с радиолокационными комплексами
X	5,2...10,9	2,75...5,77 (2,4...3,8)	USGS SLAR, Terra-SAR-X, Cosmo-SkyMed
C	3,9...6,2	3,8...7,6	ERS-1,2, ENVISAT-ASAR, RADAR SAT-1
L	0,39...1,55	19...76,9 (15...30)	SIR-A, SIR-B, ALOS
P	0,225...0,391	40,0...76,9 (30...100)	AIRSAR

Современная модель рельефа не может быть получена с помощью первого рассмотренного варианта в связи с отсутствием в настоящее время на орбите тандемов космических аппаратов с радиолокационными комплексами. Поэтому нами выбран второй вариант, а именно получение рельефа для мониторинга с помощью интерферометрической обработки пары изображений ALOS PALSAR.

Каждое радиолокационное изображение интерферометрической пары или цепочки содержит амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой более пригоден для визуального анализа. Результирующую фазу Φ , полученную в ходе обработки фазовых слоев изображений интерферометрической пары, запишем в виде:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{n}}, \quad (1)$$

где Φ_{topo} – фазовый набег за счет смещения обзора топографии под двумя разными углами;

Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками;

Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в фазе распространения сигнала;

Φ_{n} – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Непосредственная интерферометрическая обработка в соответствии с выражением (1) представляет собой последовательность следующих базовых шагов.

1. Совмещение основного и вспомогательного радиолокационных изображений (с целью получения цифровой модели рельефа) интерферометрической пары в автоматическом или в ручном режиме.

2. Генерация интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлементного перемещения основного изображения и изображения, комплексно сопряженного к вспомогательному.

3. Разделение компонентов фазы Φ_{topo} и Φ_{def} за счет синтеза фазы рельефа.

4. Фильтрация интерферограммы, позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной цифровой модели рельефа.

5. Получение файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары, соответствующих друг другу пикселей.

6. Развертка фазы, представляющая собой процедуру перехода от относительных значений фазы к абсолютным.

7. Коррекция базовой линии.

8. Преобразование абсолютных значений фазы в относительные либо абсолютные высотные отметки в метрах, с получением на выходе цифровой мо-

дели рельефа поверхности земли.

Как показали исследования, восемь теоретических шагов, необходимых для получения модели рельефа интерферометрическим методом, возможно реализовать полностью практически шестью шагами, выполняемыми пользователем ПК SARscape, так как первый и второй, а также четвертый и пятый теоретические шаги выполняются в рамках первого и третьего практических шагов, соответственно.

Критическая перпендикулярная базовая линия, составляющая для радиолокаторов С – диапазона порядка 1 км, для радиолокаторов L – диапазона также увеличивается и составляет в данном случае 20 км [7, 8]. Представим эту зависимость следующей формулой:

$$B_{n, cr} = \lambda R_{\text{tan}}(\Theta) / 2R_r, \quad (2)$$

где $B_{n, cr}$ – критическая базовая линия;

λ – длина зондирующей волны радиолокатора;

R_{tan} – пространственное разрешение в направлении наклонной дальности;

R_r – дальность или путь зондирующей волны;

Θ – угол между дальностью и высотой.

Бортовой радиолокатор L – диапазона на космическом аппарате ALOS характеризуется большей длиной волны зондирования, более высоким пространственным разрешением в направлении наклонной дальности, большим значением углов между дальностью и высотой и, наконец, большим значением пути зондирующей волны. Соответственно, для спутников ALOS каждый из аргументов в приведенной выше формуле влияет на величину критической перпендикулярной базовой линии в сторону ее увеличения. В связи с этим, диапазон приемлемых базовых линий в случае анализа данных ALOS PALSAR значительно расширяется.

В качестве примера получения цифровой модели по паре снимков приведен рельеф Заполярного месторождения золота, полученный аппаратурой ALOS PALSAR 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г. [7, 9].

Исходные данные – два космических снимка, после обработки которых, была получена карта когерентности этих радиолокационных снимков (рис. 1).

При обработке установлено, что результирующая модель рельефа соответствует картографической карте масштаба 1:25000. На рис. 2 приведено трехмерное изображение участка месторождения с крупным ледяным массивом с увеличенным вертикальным масштабом рельефа полученной модели совмещения с многозначительным оптическим снимком среднего пространственного разрешения.

По результатам проводимых исследований можно сделать вывод о высоком качестве цифровой модели рельефа, полученной интерферометрическим методом из пары радиолокационных снимков ALOS PALSAR FBS, так как она соответствует по

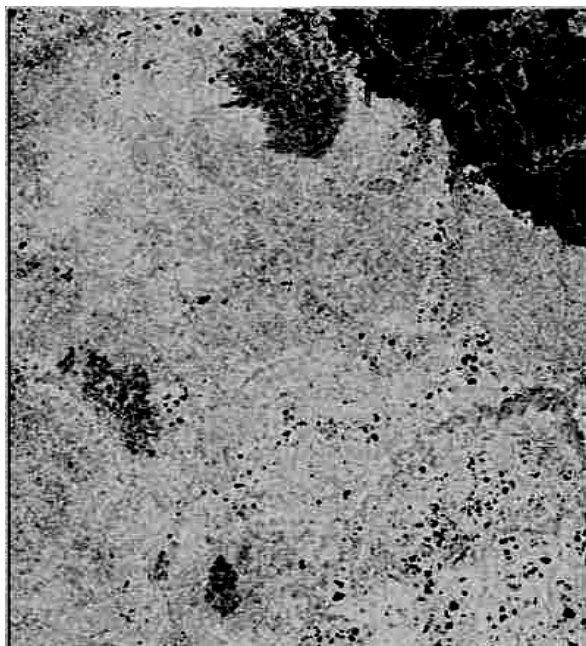


Рис. 1. Карта когерентности, рассчитанная по паре снимков ALOS PALSAR от 09.06.2006 г. и 25.07.2006 г.

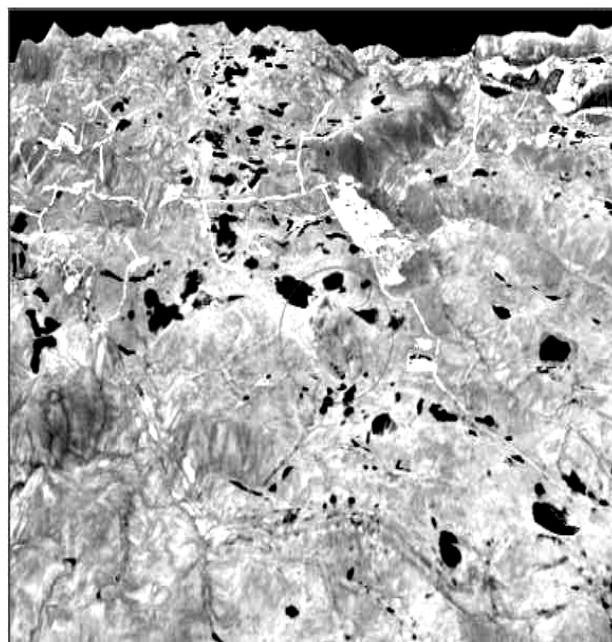


Рис. 2. Трехмерное изображение участка месторождения с крупным выпученным ледяным массивом

точности картографической карте масштаба 1:25000 при размере исследуемого участка 70×70 км. Это позволяет утверждать, что данный метод применим для мониторинга земной поверхности на больших площадях при небольших материальных затратах и крайне незначительных объемах уже имеющейся топографической информации. Полученный рельеф может применяться как для дальнейших научных исследований, так и в проектировании застройки территорий, при обновлении планово-высотной основы топографических карт масштаба до 1:25000 включительно. Необходимо лишь правильный выбор исходных радиолокационных снимков, специализированное программное обеспечение, опытные квалифицированные операторы и незначительное количество геодезической информации в виде пространственных координат хорошо дешифрируемых точек местности.

Заключение

Таким образом, проведенные в работе исследования радиолокационных методов получения цифровой модели рельефа земной поверхности подтверждают целесообразность использования их для мониторинга участков земли, в частности, для служб министерства по чрезвычайным ситуациям (определение районов бедствий, катастроф, разлива нефтяных пятен в акватории морей и рек). Особое значение при этом приобретает комплексное использование радиолокационных и оптических методов для дешифрирования и немедленного принятия решения.

Литература

1. Андросова Н.К. Оценка достоверности прогнозирования эндогенного оруденения на основе космогеологической информации (на примере п-ва Камчатка) / Н.К. Андросова, В.М. Моралев, О.Г. Шеремет // Исследования Земли из космоса. – 1992. – № 4. – С. 82-91.
2. Прогнозирование оруденения на Собь – Харбейской площади (Полярный Урал) по космогеологическим данным / Г.А. Миловский, Е.А. Денисова, Л.Л. Ежов, Н.С. Каленкович // Исследования Земли из космоса. – 2007. – № 6. – С. 29-36.
3. Бондур В.Г. Механизмы формирования линейных элементов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий / В.Г. Бондур // Исследования Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47-56.
4. Бусыгин В.С. ГИС – технология поисков золота в Западном Узбекистане. Ч. 1 / В.С. Бусыгин, С.М. Никулин, В.А. Бойко // Геоинформатика. – 2006. – № 1. – С. 44-49.
5. Бусыгин В.С. ГИС – технология поисков золота в Западном Узбекистане. Ч. 2 / В.С. Бусыгин, С.М. Никулин, В.А. Бойко // Геоинформатика. – 2008. – № 3. – С. 35-43.
6. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR. Ч. 1 / Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.В. Киселевский, М.А. Болсуновский // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 31-34.
7. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR. Ч. 2 / Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.В. Киселевский, М.А. Болсуновский

ский // *Геопрофи.* – 2008. – № 2. – С. 19-23.

8. Немтинов В.А. *Технология создания пространственных моделей территориально распределенных объектов с использованием геоинформационных систем* / В.А. Немтинов, В.В. Морозов // *Ин-*

формационные технологии. – 2008. – № 8. – С. 23-25.

9. Соловьев Ю.А. *Спутниковая навигация и ее применение* / Ю.А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 326 с. ил.

Поступила в редакцию 14.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, директор НПО «Природа», Харьков.

МОНІТОРІНГ РЕЛЬЄФУ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ КОСМІЧНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ

А.С. Василенко, Ю.В. С'єдина, Ю.В. С'єдін, Д.В. Шишкін

Наведені способи отримання цифрових моделей рельєфу земної поверхні і показані переваги методів радіолокаційної інтерферометрії для розв'язання задачі моніторингу районів катастроф та надзвичайних ситуацій. За результатами досліджень зроблено висновок про високу якість моделі рельєфу, дозволяючому отримувати картографічне зображення земної поверхні з достатньою роздільною здатністю на карті масштабу 1:25 000 при розмірах знімаємої ділянки 70×70 км. Подано трьохмірне зображення масиву зі збільшеним масштабом рельєфу отриманої моделі, яке підтверджує переваги комплексного використання радіолокаційного і оптичного методів для моніторингу.

Ключові слова: лінеamenti, космічні знімки, радіолокаційне зображення, інтерферометрична обробка, амплітудний та фазовий шар, критична базова лінія.

RELIEF MONITORING OF EARTH SURFACE USING SPACE RADIO-LOCATION COMPLEXES

A.V. Vasylenko, J.V. Syedina, Y.V. Syedin, D.V. Shishkin

The methods of getting digital models of relief of earth surface and advantages of methods of radio-location research for the decision the task of districts monitoring of catastrophes and extraordinary situations are shown. As a results of researches we can say, that the model of relief is in high quality, it allows get the cartographic image of earth surface with sufficient permission on the map of scale 1:25 000 with the size of area 70x70 km. The 3d image of array with the megascopic scale of relief is presented, it is confirm advantages of the complex using radio-location and optical methods of monitoring.

Key words: lineaments, space pictures, radio-location image, interferometric treatment, amplitude and phase layer, critical datum line.

Василенко Анатолій Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

С'єдина Юлія Владимировна – студент кафедри производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

С'єдін Юрій Владимирович – студент кафедри производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Шишкін Дмитрій Викторович – студент кафедри производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.