ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Е.Н. Нафиева, А.В. Гречищев

Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии (МИИГАиК)

elena_nafieva@mail.ru, agre4@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается опыт применения методики построения цифровой модели рельефа (ЦМР) методом радиолокационной интерферометрии по данным Sentinel-1A/1B на территорию Амурской области близ города Свободный. Представленная методика, состоящая из 9 основных этапов, реализована в программном комплексе PHOTOMOD Radar. Этапы обработки включают: загрузку исходных данных и перевод их во внутренний формат программы; создание проекта обработки и совмещение изображений интерферометрической пары (пересчёт растра вспомогательного изображения в геометрию основного изображения); построение картин интерферограммы и когерентности; фильтрацию интерферограммы и развертку фазы; построение цифровой модели рельефа и ее геокодирование в географическую систему координат. После проведения оценки полученных результатов и сравнение их с цифровой моделью SRTM.

Ключевые слова: ДЗЗ, радиолокация, РСА, цифровая модель рельефа, интерферометрическая пара, PHOTOMOD Radar, Sentinel-1A/1B.

При изучении, картографировании земельных, водных, лесных ресурсов, наблюдении за антропогенными объектами и различных видах геопространственного моделирования территорий, выявлении изменений на местности основным элементом создаваемых и исследуемых комплексных моделей являются ЦМР – цифровые модели рельефа, для построения которых применяются данные дистанционного зондирования. В настоящее время в качестве источника информации, требуемой для оперативной разработки актуальных ЦМР, всё чаще используются данные радиолокационной съёмки, имеющие несомненные преимущества перед другими, в силу возможности выполнения съёмки в любое время суток, практически независимо от состояния облачности. Количество и разнообразие радиолокационных систем дистанционного зондирования, в том числе космических, с каждым годом становится больше [1]. В связи с этим есть необходимость разработки новых программ, методов и методик обработки радиолокационных данных, совершенствование и адаптация существующих специализированных программных продуктов.

Появление с 2014 года в открытом доступе радиолокационных снимков местности, получаемых Европейскими космическими аппаратами Sentinel, привело к повышенному вниманию широкого круга потребителей к такой информации, и, соответственно, к запросам на подготовку отраслевых специалистов в области обработки и использования материалов радиолокационных съёмок. Авторы [2, 3] рассматривают возможности применения

данных со спутника Sentinel-1A для географических исследований и использования их в образовательных проектах, а также приводят примеры успешного решения широкого спектра отраслевых задач наук о Земле. В наших исследованиях, выполненных в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК), изучалась возможность создания ЦМР на основе интерферометрических пар радиолокационных снимков с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar, поставляемого российской компанией РАКУРС.

Для исследований использована интерферометрическая пара Sentinel-1A/1B, полученная в режиме Stripmap на Амурскую область РФ 23.06.2019 г. и 29.06.2019 г. Уровень обработки: SLC; Поляризация: VV+VH. Дополнительная информация о снимках представлена на рис. 1.

Дополнительную информацию о съёмке с КА Sentinel-1 можно получить, обратившись к [4, 5].

Обработка снимков включала 9 основных этапов:

- 1 – Загрузка данных с портала;
- 2 – Импорт данных в программу;
- 3 – Создание проекта;
- 4 – Совмещение снимков;
- 5 – Построение интерферограммы;
- 6 – Фильтрация интерферограммы;
- 7 – Развертка фазы;
- 8 – Построение ЦМР;
- 9 – Геокодирование модели.

Кратко проиллюстрируем и поясним перечисленные этапы работ.

Параметры	Значения	Параметры	Значения
Идентификатор КА	S1B	Идентификатор КА	S1A
Тип продукта	SLC	Тип продукта	SLC
Режим съёмки	S1	Режим съёмки	S1
Начало съёмки	2019-06-23T21:52:19.919873	Начало съёмки	2019-06-29T21:53:01.948768
Конец съёмки	2019-06-23T21:52:38.852798	Конец съёмки	2019-06-29T21:53:20.879021
Номер витка съёмки	16829	Номер витка съёмки	27900
Номер кадра	129715	Номер кадра	206429
Ветвь орбиты	Descending	Ветвь орбиты	Descending
Проекция снимка	Slant Range	Проекция снимка	Slant Range
Ширина снимка, пикс.	21274	Ширина снимка, пикс.	21274
Высота снимка, пикс.	35418	Высота снимка, пикс.	35413
Формат данных	Complex	Формат данных	Complex
Тип данных	16 bit Signed Integer	Тип данных	16 bit Signed Integer
Размер пиксела по дальности...	1.49758	Размер пиксела по дальности...	1.49758
Размер пиксела по азимуту, м.	3.63426	Размер пиксела по азимуту, м.	3.63424

Рис. 1. Характеристики интерферометрической пары снимков на Амурскую область

Этап 1. Загрузка данных с портала

Продукты разных уровней начальной обработки, формируемые на основе данных Sentinel-1A/1B, распространяются через веб-портал Copernicus Open Access Hub [4]. В окне поиска выбирается миссия, тип продукта, режим съёмки, выделяется интересующая область. Кроме того, на портале есть возможность выбора спутника, поляризации, номера орбиты.

По завершению поиска, выпадает список снимков на данную территорию. Важным критерием подбора снимков для получения интерферометрической пары является минимальный временной диапазон съёмки в 6 дней, для возвращения в ту же или близкую к изначальной точке двумя спутниками (1A и 1B) и 12 дней для съёмки одним спутником (1A или 1B). После выбора снимков, отмечаем их и скачиваем.

Этап 2. Импорт данных в программу

После загрузки снимки импортируются в программу PHOTOMOD Radar, при помощи модуля «Операции с файлами» и «Импорт/Экспорт». Поскольку программа работает только с внутренним форматом *.rpd. Для этого нужно выполнить конвертацию из формата *.safe (в котором загружается исходный файл данных Sentinel). После этого в окне «Импорт Sentinel-1» надо выбрать фрагмент для обработки, так как изначальный размер сцены очень большой (около 10 280 км²) и его обработка займет много времени, поэтому был выбран меньший участок.

То же самое нужно выполнить для второго снимка интерферометрической пары. После импорта двух снимков во внутренний формат программы, можно приступить к построению цифровой модели рельефа в модуле «Интерферометрия» программного пакета PHOTOMOD Radar («InSAR/DInSAR»).

Этап 3. Создание проекта.

Выбор основного и дополнительного изображений, установка типа проекта, в нашем случае – интерферометрия, также возможны варианты выбора 2–3-4 проходной интерферометрии, для выявления подвижек и вертикальных смещений (при условии наличия данных). Сохраняем проект.

Этап 4. Совмещение снимков.

Основным принципом является пересчёт растра вспомогательного изображения в геометрию основного изображения. При необходимости можно выполнить коррекцию базовой линии. Имеется выбор режима совмещения изображений: автоматический (программа сама ищет общие точки) или полуавтоматический (оператор ищет характерные точки на основном и вспомогательном изображениях, по ним выполняется совмещение) [6]. При обработке интерферометрической пары на Амурскую область выбиралось совмещение в автоматическом режиме. Результаты показаны на рис. 2. Для каждой точки можно рассчитать также интерферометрическую картину и коэффициент когерентности.

Этап 5. Построение интерферограммы

Когда два изображения совмещены, можно переходить к построению интерферограммы, вкладку фрагмент пропускаем, т.к. он был выбран на начальном этапе импорта изображений. На данном этапе подсчитываются файлы комплексной интерферограммы и когерентности. При необходимости можно создать файлы амплитуды и фазы изображений. Компенсация может выполняться в 4х режимах: точная, быстрая, грубая и ручная. Была выбрана точная компенсация, т.к. коэффициенты компенсации набега фазы рассчитываются для каждого пикселя интерферограммы, такое построение является более качественным в рамках нашей задачи. При выборе быстрой компенсации коэффициенты рассчитыва-

ются по центральной строке и центральному столбцу, при грубой компенсации расчёт проводится по средним значениям набега фазы, при выборе ручной компенсации – коэффициенты задаются оператором.

По завершению процесса, программа рассчитывает 4 файла комплексной интерферограммы, когерентности, амплитуды и фазы.

На файле комплексной интерферограммы, отчетливо виден рельеф, полученный из разности фаз пары снимков, а на файле комплексной когерентности, видна зависимость двух снимков друг от друга. Чем темнее пиксель, тем зависимость меньше, чем светлее – тем больше (рис. 3).

За дополнительной информацией о построении интерферограмм можно обратиться, например, к [7].

Рис. 2. Связующие точки, созданные в автоматическом режиме

Рис. 3. Файлы комплексной интерферограммы (слева) и когерентности (справа)

Этап 6. Фильтрация интерферограммы

На данном этапе рассчитывается файл отфильтрованной от шумовых значений интерферограммы. Фильтрация импульсного шума проводится с использованием восьми соседних пикселей. Результат процесса фильтрации интерферограммы показан на рис. 4.

Рис. 4. Фильтрации интерферограммы

Этап 7. Развертка фазы

После получения отфильтрованной интерферограммы, можно переходить к выполнению развертки фазы, чтобы извлечь из интерферограммы информацию о рельефе, преобразовав ее в матрицу абсолютных значений фазовых разностей. Задача восстановления массива абсолютных фазовых значений по массиву главных значений фазы называется задачей развертки фазы. Развертка фазы является наиболее сложным этапом интерферометрической технологии, поскольку на получаемых интерферограммах практически всегда присутствуют разрывы, положение которых неизвестно. Для установления положения разрывов фазы на интерферограмме необходима дополнительная информация. В космической радиолокационной топографической интерферометрии дополнительная информация включает интенсивность принятого сигнала на двух снимках, когерентность между дву-

мя снимками, и априорную информацию о рельефе. После включения в постановку задачи развертки фазы дополнительной информации и выбора критерия оптимальности решения задача развертки фазы становится задачей оптимизации [8].

На этапе развертки фазы вычисляется файл абсолютной фазы. В качестве алгоритма развертки фазы выбран метод статистических сетей, рекомендованный при решении аналогичных задач. Суть алгоритма заключается в том, что развертка фазы производится при помощи метода поиска сетевого потока минимальной стоимости.

Этап 8. Построение ЦМР

Далее необходимо выполнить пересчет абсолютной фазы в относительные значения высоты. Для этого указывается точка, относительно которой производится пересчет. Точка должна находиться в наиболее низком месте матрицы, которая нами выбрана у реки, сверяясь с высотами, представленными в GoogleEarth. Результатом пересчета является матрица высот, представленная на рис. 5.

Рис. 5. Развернутая фаза

Этап 9. Геокодирование модели

Для получения окончательного результата остается только перевести матрицу абсолютных высот

рельефа в географическую проекцию, процессом, называемым геокодированием. При этом матрица трансформируется в географическую систему координат: широта-долгота-высота над опорным эллипсоидом (WGS 84). Полученная модель изображена на рис. 6.

Рис. 6. Геокодированная ЦМР

Сравнение построенной матрицы с SRTM

В результате обработки интерферометрической пары радиолокационных снимков получена

цифровая модель рельефа с разрешением 6,6 м. Перепад высот от 0 до 310 метров. Для того чтобы определить правильность методики геопространственного моделирования, необходимо сравнить полученную модель с другими данными, например, матрицей рельефа SRTM, которая является общедоступной и на нашу территорию имеет разрешение 39,1 м и перепад высот от 136 до 282 м.

На рис. 7 представлены две модели рельефа с одинаковым ранжированием цветов, для их визуальной оценки. Поскольку ЦМР, построенная по радиолокационным данным Sentinel-1, имеет более высокое пространственное разрешение, видно, что рельеф прорисован гораздо чётче, чем у SRTM. Для получения детального сравнения мы воспользовались возможностями специального модуля «Special Analyst» в программном обеспечении ArcGIS [9], где имеется функция «Алгебра карт – калькулятор растра», благодаря которой можно выполнять различные действия с растровыми файлами. Одно из таких действий – вычитание одного растра из другого, в результате чего на выходе получается карта различий.

На рис. 8 представлен результат вычитания растров (SRTM – ЦМР по Sentinel-1), из чего можем сделать вывод, что сформированная модель рельефа, получилась глубже и более детализированной, особенно в области русла реки. Дополнительно выполнено контрольное сравнение по 10 точкам, размещаемым на характерных участках рельефа. Для каждой из точек определены высотные значения; результаты представлены в Таблице.

Рис. 7. Сравнение ЦМР по радарным данным Sentinel-1 и SRTM

Таблица – Анализ высот характерных точек местности

Номер точки	Тип местности	Высота по данным Sentinel-1, м	Высота по SRTM, м	SRTM – ЦМР по радарным данным Sentinel-1 Δ , м
1	Русло реки	159	140	19
2	Пойма	119	164	– 45
3	Возвышенность	219	244	– 25
4	Русло реки	71	143	– 72
5	Низина	95	154	– 59
6	Русло реки	82	146	– 64
7	Возвышенность	270	216	54
8	Пойма	119	149	– 30
9	Равнина	158	148	10
10	Русло реки	251	248	3

Рис.9 –Сравнение высот моделей в характерных точках рельефа

Из данных таблицы следует, что характерная разница между двумя моделями имеется в области русла реки и пойменной части, в этих местах ЦМР построенная по радарным снимкам Sentinel-1 гораздо «ниже», максимальная разница составляет 72 метра, минимальная – 3 метра, но динамика распространения рельефа совпадает, что также подтверждается графиком, построенным по точкам рельефа (рис. 9).

Заключение

Для геопространственного моделирования территорий можно успешно применять цифровые модели рельефа, создаваемые по данным интерферометрии КА Sentinel-1. При сравнении с имеющимися моделями, в нашем случае – SRTM, получено хорошее их соответствие. Основное количество различий приходится на исследованной территории на русло

реки и её пойму. Это можно увидеть по карте вычитания растров, и на данных сравнительной таблицы, где основная разница определяется в точках, расположенных в понижениях местности. Но следует заметить, что модель SRTM имеет довольно грубое разрешение и вполне вероятно, что при интерполяции в процессе её вычисления уничтожилась информация о локальных понижениях и превышениях.

Можно также сделать вывод о необходимости проведения дополнительных сравнительных оценок по другим, более детальным данным, по мере их получения. Полагаем, что данная разработка является началом будущих исследовательских проектов по сравнению результатов радиолокационных съёмок различными космическими аппаратами, в различных режимах съёмки, с применением различных специализированных программных комплексов.

Список литературы

1. *Нафиева Е.Н., Гречищев А.В.* Космические радиолокационные системы мониторинга Земли. В этом же сборнике.
2. *Балдина Е.А., Трошко К.А., Николаев Н.Р.* Радиолокационные данные Sentinel-1 и возможности их обработки для дешифрирования форм рельефа острова Котельный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофото-съемка, издательство Моск. ун-та геодезии и картографии (М.). 2016. Том 60, № 3, с.78–85.
3. *Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., Трошко К.А.* Опыт использования данных радиолокационной космической съемки для создания тематических карт // Вестник Московского университета. Серия 5: География, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.). 2019. № 4, с. 110–118.
4. Портал Европейского космического агентства Copernicus. URL: <https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения 25.05.2020).
5. *Сосновский А.В., Коберниченко В.Г., Хамидуллина С.Р.* Особенности интерферометрической обработки радиолокационных данных космических аппаратов Sentinel-1. В сборнике: 27-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2017). Материалы конференции: В 9 томах. 2017. С. 1718–1722.
6. Описание Интерферометрического процессора. Часть1 // Описание модулей PHOTOMOD Radar. Программные средства для обработки данных РСА.
7. *Коберниченко В.Г., Сосновский А.В.* Интерферометрическая обработка данных космической радиолокационной съёмки высокого разрешения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 3. С. 75–83
8. *Шувалов Р.И.* Развертка фазы радиолокационных топографических интерферограмм / Наука и образование, Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 7, с. 107–144. (<http://technomag.edu.ru/doc/423364.html>)
9. Справочная библиотека ArcGIS. URL: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html> (дата обращения 25.05.2020).

CREATION OF A DIGITAL ELEVATION MODEL BY THE METHOD OF RADAR INTERFEROMETRY

E.N. Nafieva, A.V. Grechishchev

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAik)
elena_nafieva@mail.ru, agre4@yandex.ru

Abstract. The article discusses the experience of applying the technique of constructing a digital elevation model (DEM) by the method of radar interferometry using Sentinel-1A / 1B data on the territory of the Amur region near the city of Svobodny in June 2019. The presented method, which consists of 9 main stages, is implemented in the PHOTOMOD Radar software package. The stages of processing include: loading the initial data and converting them into the internal format of the program; creating a project for processing and combining images of an interferometric pair (recalculating the raster of the auxiliary image into the geometry of the main image); construction pictures of interferogram and coherence and it is also possible to calculate pictures of phase and amplitude; filtering the interferogram and phase transformation (recalculation of the obtained values in meters); construction of a digital elevation model and its geocoding into a geographic coordinate system (WGS 84). After that, the results obtained are assessed and compared with the SRTM digital elevation model, namely, a visual comparison of two digital elevation models, their subtraction (SRTM – model obtained from Sentinel-1A / 1B data) and a comparison heights characteristic relief points. Also made conclusions and considered the possibilities of further projects.

Keywords: Remote sensing, radar, SAR, digital elevation model, interferometric pair, PHOTOMOD Radar, Sentinel-1A / 1B..

References

1. Nafieva E.N., Grechishchev A.V. Kosmicheskie radiolokatsionnye sistemy monitoringa Zemli [Space radar systems for monitoring the Earth]. In the same collection of articles. (In Russian)
2. Baldina E.A., Troshko K.A., Nikolaev N.R. Radiolokatsionnye dannye Sentinel-1 i vozmozhnosti ikh obrabotki dlya deshifirovaniya form rel'efa ostrova Kotel'nyy [Radar data of Sentinel-1 and the possibility of their processing for deciphering the relief forms of Kotelny Island] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofoto"emka, publisher is the Moscow University of Geodesy and Cartography (M.). 2016. Tome 60, No. 3, p.78–85. (In Russian)
3. Baldina E.A., Mikhaylyukova P.G., Troshko K.A. Opyt ispol'zovaniya dannykh radiolokatsionnoy kosmicheskoy s'emki dlya sozdaniya tematicheskikh kart [Experience of using radar space survey data to create thematic maps]// Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya, publisher is the Moscow University (M.). 2019. No. 4, p. 110–118. (In Russian)
4. Portal of the European Space Agency Copernicus. URL: <https://scihub.copernicus.eu> (date of access 05/25/2020).
5. Sosnovskiy A.V., Kobernichenko V.G., Khamidullina S.R. Osobennosti interferometricheskoy obrabotki radiolokatsionnykh dannykh kosmicheskikh apparatov Sentinel-1. [Features of interferometric processing of radar data from the Sentinel-1 spacecraft] V sbornike: 27-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo'2017) [27th International Crimean Conference "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies" (KryMiKo'2017). Conference materials: In 9 tomes. 2017. p. 1718–1722.].
6. Opisanie Interferometricheskogo protsessora. Chast'1 [Description of the Interferometric Processor. Part1]// Opisanie moduley PHOTOMOD Radar. Programmnye sredstva dlya obrabotki dannykh RSA [Description of PHOTOMOD Radar modules. Software tools for processing RSA data].
7. Kobernichenko V.G., Sosnovskiy A.V. Interferometricheskaya obrabotka dannykh kosmicheskoy radiolokatsionnoy s'emki vysokogo razresheniya [Interferometric processing of high-resolution space radar data]// Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy [Physics of wave processes and radio engineering systems]. 2012. Tome. 15.No. 3.P. 75–83/
8. Shuvalov R.I. Razvertka fazy radiolokatsionnykh topograficheskikh interferogramm [Phase transformation of radar topographic interferograms] / Nauka i obrazovanie, Rossiya, MGTU im. N.E. Bauman. 2012. № 7, p. 107–144. (<http://technomag.edu.ru/doc/423364.html>) (In Russian)
9. ArcGIS reference library. URL: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html> (date of treatment 05/25/2020).