

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

И. Г. Триушенко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220303, г. Минск, Беларусь, geo.schur@bsu.by*

В данной работе исследованы принципы и характеристики систем радиолокационного зондирования. Рассмотрен опыт применения радиолокационных данных в географических исследованиях и картографировании. Осуществлены процессы получения и обработки радиолокационных снимков с их трансформированием в производные радиолокационные изображения.

Ключевые слова: радиолокационная съёмка; применение радиолокационных данных в географических исследованиях и картографировании; методы обработки и создания радиолокационных изображений.

Радиолокационные исследования Земли – давно и успешно развивающаяся область дистанционного зондирования. В настоящее время происходит активное развитие технических средств радиолокации земной поверхности, методов и программного обеспечения обработки радиолокационных изображений.

В последние годы отмечается значительное усиление внимания к дистанционному зондированию Земли в радиодиапазоне. Новые принципы построения сканирующих радиолокационных систем позволили резко повысить их разрешающую способность и приблизить информационные возможности радиолокационных средств наблюдения Земли к оптическим. Далее рассмотрим стандартные этапы обработки амплитудных и поляриметрических радиолокационных данных.

Продукт самого низкого (нулевого) уровня обработки – RAW (радиоголограмма) – «сырые» данные, требующие специальной обработки, называемой фокусировкой. Через архив предоставляются продукты этого уровня для режимов съёмки SM, IW и EW, однако эти данные невозможно использовать для дешифрирования.

К первому уровню обработки относятся продукты SLC (single look complex) и GRD (ground range detected). Продукт уровня SLC представляет собой комплексные радиолокационные данные (которые содержат и амплитуду, и фазу сигнала), представленные в проекции наклонной дальности. Отличительной особенностью данных этого уровня является то, что они могут быть использованы в интерферометрической обработке для получения информации о высотах и смещениях зондируемой поверхности.

Данные SLC могут предоставляться для режимов SM, IW и EW, но в архиве для некоторых регионов этот продукт может и отсутствовать. В силу геометрических особенностей изображений (различного размера пиксела по азимуту и дальности) дешифрирование снимков этого уровня обработки затруднено.

Продукт GRD – амплитудное (амплитуда на РЛ изображении – аналог яркости на снимках видимого диапазона) радиолокационное изображение, трансформированное в проекцию наземной дальности. Следует отметить, что после трансформирования на наземную дальность выходные изображения могут предоставляться с разной детальностью (разным размером пиксела): полной (full resolution), высокой (high resolution) или средней (medium resolution). Такая обработка выполняется для данных, полученных в режимах SM, IW и EW. Данные именно этого уровня – наиболее подходящие для визуального и автоматизированного дешифрирования [3].

Рассмотрим основные этапы, которые обычно применяются для предварительной обработки амплитудных и поляриметрических радиолокационных данных.

Автоматическая корегистрация разновременных снимков. При работе с разновременными снимками (в частности, при многовременной фильтрации, разновременном цветовом синтезе, формировании графиков временных образов объектов и т. д.) требуется их точное геометрическое согласование. Современные программы, предназначенные для обработки данных радиолокационного зондирования, предусматривают возможность проведения автоматического геометрического согласования радиолокационных снимков с точностью до долей пиксела, называемого корегистрацией. Она выполняется в несколько этапов: вначале на основе орбитальных данных выполняется приблизительная оценка сдвига одного изображения относительно другого с точностью до десятков пикселей, для более точного совмещения применяются методы кросс-корреляции в скользящих окнах. Результатом корегистрации является серия изображений, в которой все вспомогательные изображения трансформированы в геометрию опорного (рис. 1) [12].

В качестве необязательного этапа возможно выполнить **выделение фрагмента** для сокращения времени обработки снимка.

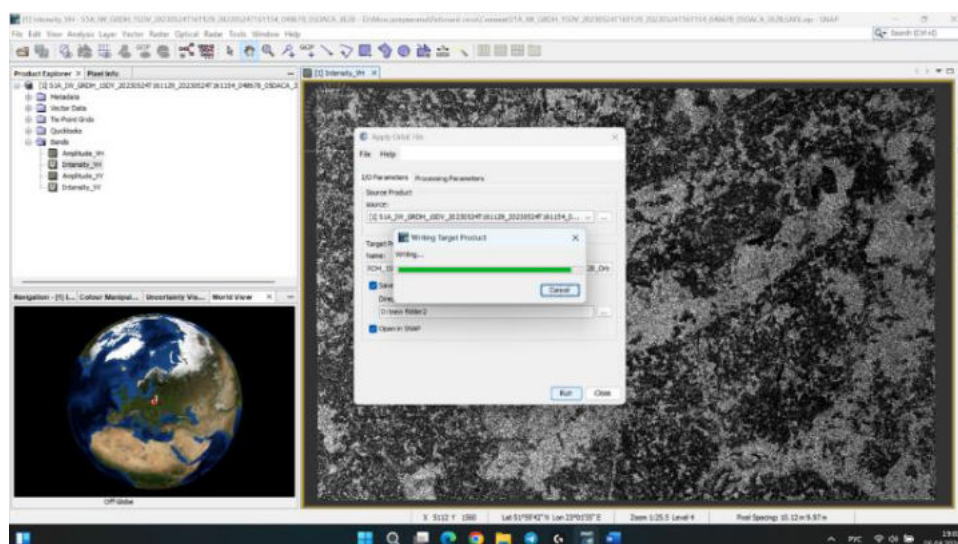


Рис. 1. Процесс применения автоматической корегистрации
разновременных снимков

Удаление тепловых шумов. Тепловые шумы возникают вследствие теплового излучения объектов, окружающих приемную антенну радиолокатора. Спектр этих шумов, являясь практически равномерным вплоть до частот порядка 1013 Гц, далеко выходит за пределы того диапазона частот, который используется в радиолокации. Поэтому такой шум называется «белым шумом» – по аналогии со световыми колебаниями, имеющими широкий спектр. Удаление тепловых шумов обычно выполняется для проведения очень точных расчётов (рис. 2) [4].

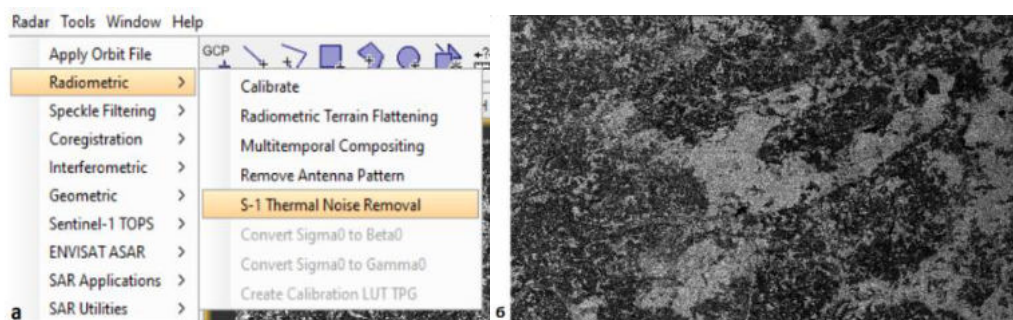


Рис. 2. Процесс удаления тепловых шумов: а – контекстное меню;
б – результат применения фильтра

Радиометрическая калибровка. Для правильной работы с данными РСА сначала они должны быть откалиброваны. Это особенно необходимо при подготовке данных для мозаик, где у вас могут быть несколько продуктов данных на различных углах съемки и относительных уровнях яркости. Калибровка радиометрически исправляет РСА-изображение таким

образом, чтобы значения пикселей действительно представляли значение обратного рассеяния луча радара от отражающей поверхности.

Поправки, применяемые в процессе калибровки, являются специфичными для конкретной миссии, поэтому программное обеспечение автоматически определяет на основе метаданных продукта, какой входной продукт у вас есть и то, какие поправки должны быть применены. Калибровка необходима для последующего использования данных РСА [5].

Подавление спекл-шума. Спекл-шум является неотъемлемым свойством снимков, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой, и образуется из-за когерентного наложения откликов от нескольких объектов в элементе разрешения изображения. Его присутствие затрудняет визуальное восприятие изображений и их автоматизированную обработку. Для снижения уровня спекл-шума на амплитудных изображениях в программных комплексах предусмотрено несколько способов: межэлементное некогерентное накопление и различные виды фильтрации.

Под некогерентным накоплением (англ. multilooking) подразумевается усреднение изображения в окне размером $N \times M$ пикселей с последующим укрупнением элементов изображения. При этом уровень спекл-шума уменьшается, но уменьшается и размер изображения в пикселах, падает детальность изображения в целом. При использовании для картографирования радиолокационного изображения, прошедшего процедуру некогерентного накопления, важно иметь в виду то, что уменьшается возможный масштаб картографирования и увеличивается размер минимального картографируемого объекта [13].

Различные фильтры работают преимущественно в пределах скользящего окна, последовательно перемещающегося на один пиксел по всему снимку. При использовании фильтрации количество пикселей в результирующем изображении остается таким же, как и в исходном. Однако существенное влияние на детальность снимка после фильтрации оказывает размер скользящего окна: окно большого размера хоть и способствует подавлению зернистости, но при этом приводит к сильному размытию границ между объектами, а некоторые объекты и вовсе перестают быть различимыми [6].

В целом, все фильтры амплитудных радиолокационных снимков можно поделить на несколько групп: неадаптивные (Mean, Median и др.), адаптивные (Lee, Frost, Gamma MAP и др.) фильтры одиночных изображений и фильтры многовременных изображений. Фильтр Mean, например, вычисляет среднее арифметическое в скользящем окне и присваивает это значение центральному пикселу окна. Адаптивные фильтры более сложны, подавление шума в них опирается на характер распределения значений пикселей в пределах скользящего окна. Так, фильтр Lee на основе коэффициента вариации значений пикселей в рамках скользящего

окна осуществляет баланс между усреднением и пропуском значения без изменений (рис. 3) [9].

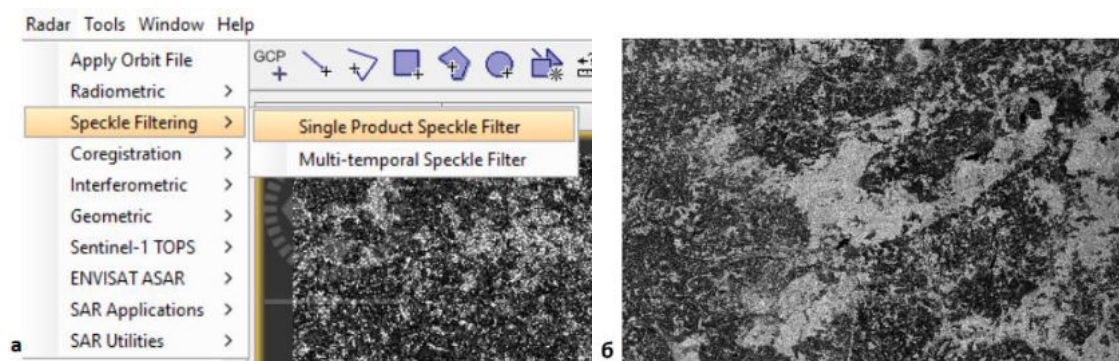


Рис. 3. Пример применения фильтра Lee для подавления спекл-шума:
а – контекстное меню; б – результат применения фильтра

Многовременные фильтры используют серию геометрически согласованных радиолокационных снимков одной и той же территории. При этом проводится не просто усреднение изображений, а на основе всех снимков вычисляется оптимальное весовое выражение для каждого в отдельности. В результате многовременной фильтрации количество выходных изображений совпадает с количеством исходных. В зависимости от объекта и масштаба картографирования необходимо находить компромисс между сглаживанием спекл-шума и сохранением деталей изображения, границ между объектами.

Геокодирование и ортотрансформирование. Под геокодированием и ортотрансформированием подразумевается выполнение координатной привязки изображений. Последняя требует наличия цифровой модели рельефа и особенно востребована для участков с расчленённым рельефом. Как правило, современные программы осуществляют привязку автоматически, используя при этом множество параметров (положение космического аппарата в момент съёмки, параметры его движения, движения зондируемого участка, обусловленные вращением Земли и др.), записанных в сопроводительных файлах. В случаях существенных ошибок в геометрическом положении элементов изображения может потребоваться дополнительная привязка вручную путём набора опорных точек относительно некоторой основы, имеющей высокую точность привязки. Также для радиолокационных данных с ряда спутников спустя некоторое время после съёмки поставляются файлы, содержащие уточнённую информацию о движении космического аппарата, использование которых может привести к достижению более высокой точности привязки снимка (рис. 4) [6].

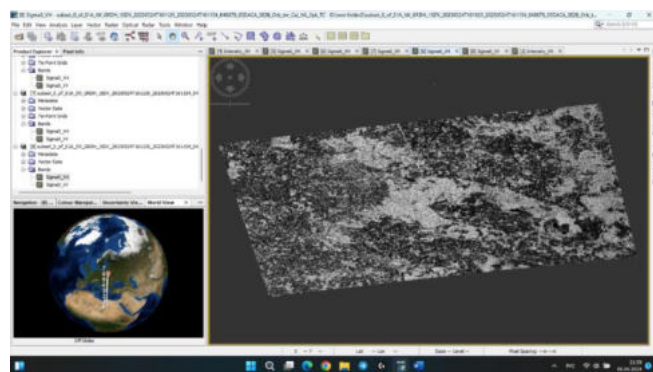


Рис. 4. Результат геокодирования и ортотрансформирования

Корректировка по местности геокодирует изображение, исправляя геометрические искажения РСА с использованием цифровой модели высот (DEM) и производит продукт в картографической проекции [6].

Все описанные выше процедуры (калибровка, фильтрация спекл-шума и др.) являются стандартными для обработки исходных данных радиолокационного зондирования. Однако в зависимости от вида исходных данных, особенностей исследуемой территории и решаемой задачи, предполагаемого метода анализа снимков (визуального или автоматизированного) требуются различные подходы к комбинированию этих этапов. Результаты обработки исходных радиолокационных данных в соответствии с определённой последовательностью называют производными радиолокационными изображениями (рис. 5) [11].

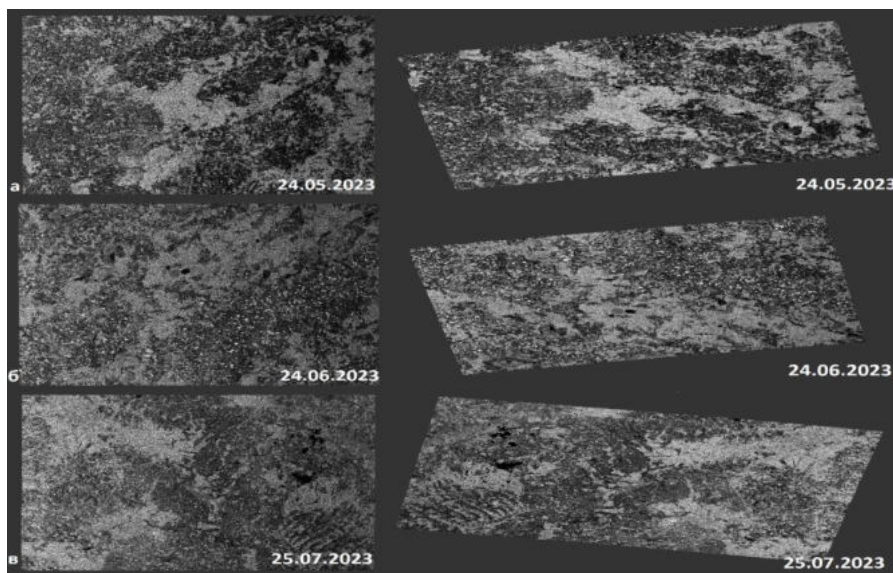


Рис. 5. Результаты обработки исходных радиолокационных данных в программном обеспечении SNAP на территории Беловежской пуши, полученных за периоды:
а – 24.05.2023 г.; б – 24.06.2023 г.; в – 25.07.2023 г.

Особое внимание уделено формированию наглядных производных изображений на основе амплитудных радиолокационных снимков, поляриметрических и интерферометрических данных. На наиболее типичных примерах проиллюстрированы возможности применения материалов радиолокационных съёмок в географических исследованиях и при создании карт.

Важным этапом, отличающим разработанную методику от других по космическим снимкам, является формирование производных изображений со сниженным уровнем спекл-шума, предназначенных для автоматизированного (одноканальные, многоканальные многополяризационные или многовременные изображения после радиометрической калибровки) и визуального дешифрирования (цветные синтезированные многополяризационные и многовременные изображения). Методика включает такие основные этапы, как выбор радиолокационных данных и дополнительных источников; предварительную обработку радиолокационных данных; классификацию производных изображений при разных параметрах с последующим выбором оптимального варианта;

Географические исследования на основе производных радиолокационных изображений наиболее эффективны при их использовании совместно с дополнительными источниками. Роль радиолокационных данных в исследованиях может быть различной в зависимости от исследуемой территории и изучаемой тематики.

Активное развитие радиолокационных космических съемочных систем и появление общедоступных изображений Земли в радиоволновом диапазоне обуславливают актуальность более широкого знакомства с ними географов.

Библиографические ссылки

1. Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF. ESA, 2015 [Electronic resource]. URL: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/S1-Radiometric-Calibration-V1.0> (date of access: 12.10.2024).
2. Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities/ ESA. [Electronic resource]. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (date of access: 13.10.2024).
3. Базовые продукты дистанционного зондирования Земли на основе радиолокационных данных / М. А. Гусев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. №5 (51). С. 82–85.
4. Базовые продукты зондирования Земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой / А. В. Дмитриев [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2014. №5. С. 83–91.
5. Балдина Е. А., Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков : учебник. 2-е изд., переработанное и дополненное. М. : КДУ, Добросвет, 2021. 269 с.

6. 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 аэрофотосъемка. 2016. № 3. С. 78–85.
7. Дистанционное зондирование Земли : учебное пособие / В. М. Владимиров [и др.] ; под общ. ред. В. М. Владимирова. Москва : ИНФА-М; Красноярск : Сиб. фед. ун-т, 2021. 196 с.
8. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли : радиолокационное зондирование поверхности. М. : КРАСАНД, 2012. 248 с.
9. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли : основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М. : Мир, 1988. 343 с.
10. Лимонов А. Н., Гаврилова Л. А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование : учебник для вузов. М. : Академический проект, 2018. 296 с.
11. Маркин С. Н. Методы подавления спекл-шума в РСА-изображениях // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2008. Вып. 10. С. 220–222.
12. Трошко К. А. Разработка методики использования радиолокационных данных для тематического картографирования : дис. канд. геогр. наук: 25.00.33 / К. А. Трошко ; МГУ им. М. В. Ломоносова. Москва, 2018. 158 с.
13. Шалькевич Ф. Е., Курьянович М. Ф. Тематическое дешифрирование : пособие. Минск : БГУ, 2022. 131 с.