

Д.Б. Никольский (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил факультет прикладной космонавтики МИИГАиК по специальности «исследование природных ресурсов авиакосмическими средствами». С 2007 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время – специалист по обработке радиолокационных данных.

Уровни обработки радиолокационных данных

Для радиолокационных данных можно выделить пять основных уровней обработки. Названия этих уровней немного изменяются в зависимости от типа радиолокационной системы, но суть остается.

«Сырые», не фокусированные данные. Переход от сырых данных к следующему уровню обработки называется фокусировкой (так как используется принцип синтеза апертуры, то каждый «элемент» поверхности дает многократные отклики, при данной обработке эти отклики фокусируются в одно значение, таким образом осуществляется переход к следующему уровню обработки данных (SLC). Работа с «сырыми» данными может осуществляться только в специализированном программном обеспечении. Основным преимуществом, которое дает использование данных этого уровня является то, что весь цикл обработки может быть выполнен в одном программном обеспечении.

SLC (Single Look Complex). Это следующий уровень обработки, работа с которым также возможна только в специализированном программном обеспечении. Данные этого уровня обработки представляют собой радиолокационный снимок в комплексном виде, т. е. изображение имеет два слоя: первый – амплитудная информация сигнала (по сути, изображение поверхности), второй – фазовая информация (по фазе определяется удаленность от радиолокатора до конкретной точки поверхности). Изображение с SLC уровнем обработки

представляется в системе координат снимка, оно довольно сильно деформировано ввиду специфической геометрии съемки (рис. 1а). Для работы с данными такого уровня обработки также необходимо специализированное программное обеспечение. Изображения этого уровня подходят для выполнения любого вида обработки данных.

Амплитудное изображение. Для данного уровня обработки не поставляется фазовый слой, то есть имеется только изображение поверхности в радиодиапазоне. Изображение также представлено в системе координат снимка. Переход от уровня обработки SLC к данному типу осуществляется с помощью усреднения значений по азимуту и дальности для того, чтобы приблизительно привести размер пикселя к квадратному. Размер пикселя устанавливается в зависимости от типа данных (рис. 1б). Этот тип данных является переходным от специализированных к стандартным уровням обработки данных ДЗЗ.

Геокодированное изображение. Это снимок земной поверхности, имеющий пространственную привязку в заданной системе координат (рис. 1в). Для данного уровня обработки, особенно для горных районов, характерно наличие больших геометрических искажений, вызванных тем, что съемка проводится со значительным отклонением от надира. Для равнинных (плоских) территорий, где перепад высот небольшой, такой уровень обработки подходит для решения задач, не требующих высокой точности.

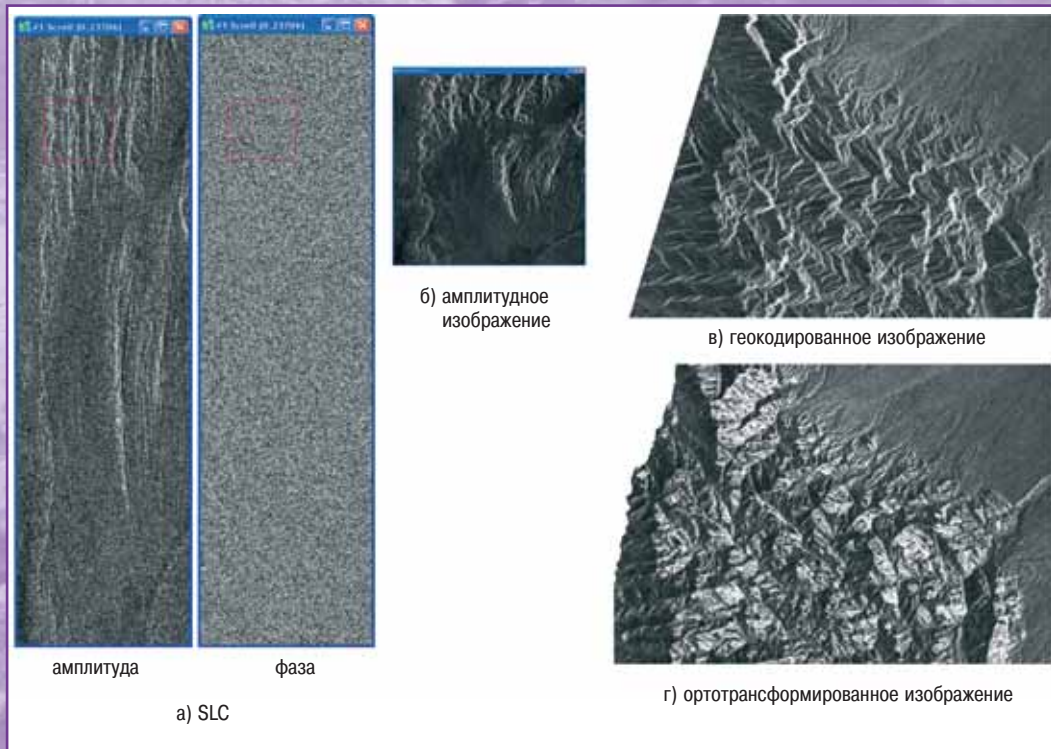


Рис. 1.
Уровни обработки радиолокационных данных

Ортотрансформированное изображение. Это снимок земной поверхности, имеющий пространственную привязку в заданной системе координат, на котором устранены геометрические искажения (рис. 1г). Для выполнения ортотрансформирования необходима ЦМР.

Геокодирование и ортотрансформирование данных может выполняться без использования наземных опорных точек, только по орбитальным данным, но, как и для снимков, получаемых в оптическом диапазоне, для достижения необходимой точности требуются опорные точки. Для того, чтобы опорные точки уверенно идентифицировались на радиолокационных изображениях, перед съемкой наземной поверхности необходимо установить специальные уголкового отражатели, которые дают яркий отклик на изображении.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ ДАННЫМИ

Данные космической радиолокационной съемки существенно отличаются от данных получаемых из космоса в оптическом диапазоне, в первую очередь, тем, что при съемке регистрируются амплитуда и фаза сигнала. Для работы с радиолокационными изображениями начальных уровней обработки требуется специализированное программное обеспечение.

Одним из наиболее современных программных средств позволяющим выполнять комплексную обработку радиолокационных данных является SARscape (среда ENVI). Это модульное программное обеспечение, в котором реализована поддержка современных

радиолокационных данных. Ниже приведено краткое описание модулей программного комплекса SARscape.

SARscape Basic. Модуль включает следующие возможности обработки данных: фокусировку, корегистрацию, удаление спекл-шумов, извлечение характеристик (включая когерентность), геокодирование, радиометрическую калибровку и нормализацию, составление мозаики и классификации. Этот набор функций дополнен набором средств, обладающих широким диапазоном возможностей: от визуализации изображения до импорта, интерполяции ЦМР и картографических и геодезических преобразований, а также возможностями для обработки оптических мультиспектральных данных (ортотрансформирование, радиометрическая калибровка, искусственное увеличение пространственного разрешения и классификация).

SARscape Focusing. Модуль расширяет возможности фокусировки модуля SARscape для режимов (Fine Beam и Standard Beam) RADARSAT-1 и данных ENVISAT ASAR для переменной поляризации, а также данных ALOS PALSAR.

SARscape Gamma-Gaussian Filter. Модуль включает специализированные алгоритмы фильтрации радиолокационных данных, основанные на Гамма/Гауссовом распределении.

SARscape Interferometry. Модуль предназначен для обработки интерферометрических серий радиолокационных изображений для создания ЦМР (двухпроходная интерферометрия, InSAR) и построения картограмм смещения земной поверхности (n-проходная интерферометрия, DInSAR).

SARscape ScanSAR Interferometry. Расширяет функции модуля SARscape Interferometry с использованием режима ScanSAR, обеспечивая возможность получения интерферограмм на большие территории (500x500 км).

Polarimetry/Polarimetric Interferometry. Предназначен для обработки поляриметрических SAR-данных (ALOS PALSAR): калибровки данных, возможности синтезирования изображений, расчета различных параметров радиолокационных данных (энтропия, анизотропия, альфа), расчета поляриметрических интерферограмм (PolInSAR).

Persistent Scatterers (PS). Обеспечивает определение относительных вертикальных смещений объектов на земной поверхности на миллиметровом уровне.

Распространение и техническая поддержка программного комплекса SARscape на территории России и стран СНГ осуществляется компанией «Совзонд».

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Радиолокационные изображения используются для решения широкого круга задач. Они, во-первых, могут дать дополнительную информацию о состоянии поверхности и объектов, наряду с данными в оптическом диапазоне. Во-вторых, радиолокационные данные могут служить источником уникальной информации, которую можно получить либо только по радиолокационным данным, либо по наземным измерениям. Ниже приводятся основные направления использования радиолокационных данных.

Одиночные снимки используются либо дополнительно к оптическим, либо как альтернатива оптическим данным. При качественно выполненном ортотрансформировании изображения могут применяться как пространственная основа для решения задач по топографическому и тематическому картографированию местности. Для радиолокационных данных возможность получения изображения конкретного района в сжатые сроки достаточно высока (до нескольких дней), в отличие от оптических, где срок напрямую зависит от метеоусловий. Таким образом, в экстренных, срочных ситуациях радиолокационные данные незаменимы как единственный источник информации.

Работа с поляриметрическими изображениями – это отдельное направление, существенно улучшающее возможности по классификации объектов на радиолокационных изображениях. Поляриметрические данные дополнительно позволяют улучшить качество интерферометрической обработки, так как возможно использовать четыре изображения, полученные при различных поляризациях вместо одного при параллельной поляризации данных.

При использовании серий снимков, полученных при одной и той же геометрии, во-первых, появляется возможность рассматривать изменения, происходящие на местности, а, во-вторых, наличие серии снимков обеспечивает их совместную фильтрацию, при которой устраняется спекл-шум, а разрешающая способность, в отличие от стандартных алгоритмов фильтрации, не ухудшается.

Совместная обработка данных в оптическом диапазоне и радиолокационных данных применяется для получения композитных изображений, которые содержат в себе информацию о подстилающей поверхности, полученную в разных методах космической съемки.

Работа со стереоснимками, полученными в радиодиапазоне (радарграмметрия) применяется не очень широко, так как точность ЦММ, получаемых при такой обработке невысокая, в отличие от интерферометрии.

Интерферометрическая обработка пар снимков с целью построения ЦММ является одним из наиболее перспективных направлений в использовании радиолокационных снимков, так как иногда из-за метеословий и высокой стоимости получить достаточно современную и точную ЦМР практически невозможно.

Интерферометрическая обработка серий радиолокационных снимков с целью получения информации о смещениях/просадках, происходящих на местности, позволяет получить величины смещений на сантиметровом уровне. Основным результатом при дифференциальной интерферометрической обработке являются картограммы смещений.

Интерферометрическая обработка большой серий (15-20) радиолокационных изображений (Persistent Scatterers) позволяет получать точечные значения вертикальных смещений на миллиметровом уровне. Используется преимущественно для городских территорий и районов с развитой инфраструктурой.

Рассмотрим более подробно методики обработки радиолокационных данных применительно к перечисленным выше направлениям использования на осно-

вании технологических цепочек и алгоритмов, реализованных в специализированном программном комплексе SARscape 4.0, который предназначен для проведения комплексной обработки радиолокационных данных.

ОДИНОЧНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СЕРИИ СНИМКОВ

Одиночные снимки могут использоваться как основной, так и вспомогательный источник информации о поверхности. Для данной группы задач снимки выбираются в соответствии с необходимым рабочим масштабом (определяется разрешающей способностью, табл. 1), а также возможностью заказа новой съемки, либо наличием данных в архиве. Уровень обработки данных может быть различным, в зависимости от решаемых задач.

Таблица 1

Соответствие разрешающей способности и масштаба

Наименование SAR-систем	Максимальное пространственное разрешение, м	Масштаб
TerraSAR-X	1	1:10 000
Cosmo SkyMEd	1	1:10 000
Radarsat-2	3	1:25 000
ALOS / PALSAR	7	1:50 000
Radarsat-1	8	1:50 000
Envisat /ASAR	25	1:200 000
ERS-1 и ERS-2	30	1:200 000



Амплитудное изображение ENVISAT



Отфильтрованное (по 5 снимкам) амплитудное изображение ENVISAT

Рис. 2.
Результат мультитременной фильтрации радиолокационных изображений

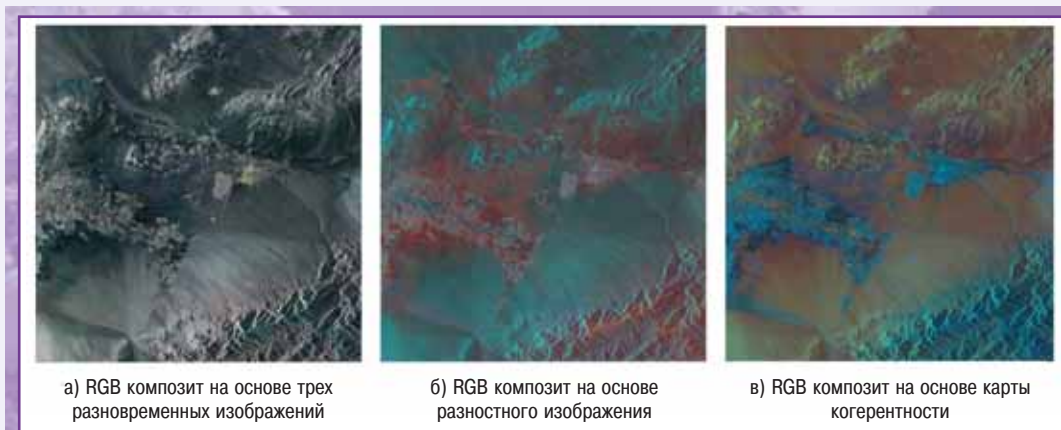


Рис. 3.

Различные виды композитных мультивременных изображений

Если радиолокационные данные используются в качестве геопространственной основы, и не будут обрабатываться по специализированным алгоритмам (например, совместная обработка снимков), необходимо выполнить их ортотрансформирование. Когда речь идет о совместной обработке разновременных радиолокационных снимков одной и той же территории, то первоначальной процедурой является корегистрация данных, т. е. трансформирование всех изображений к единой геометрии с субпиксельной точностью. В данном случае для выполнения обработки требуются, по крайней мере, амплитудные изображения. На рис. 2 приведен пример совместной фильтрации группы изображений, которая существенно улучшает изобразительные свойства радиолокационного изображения.

Еще одним приложением, при наличии мультивременных данных, является возможность создания на их основе мультивременных композитных изображений, которые могут быть рассчитаны по различным методикам.

Одна из них – совмещение изображений за три различные даты, каждая из которых соответствует одному из каналов RGB. В данном случае, преобладающем цветом, соответствующим дате, будет показано какое-либо изменение состояния объектов, либо земной поверхности (рис. 3а). Важно объединять соответствующие комплекты данных в нужных целях. Например, для определения состояния посевов: несколько сеансов получения данных в период роста и созревания; для

картографирования наводнений: получение данных до, в течение, и (если возможно) сразу после пика наводнения; для обнаружения более долгосрочных изменений: комбинированные сеансы получения данных за один и тот же сезон, но в разные годы. Относительно интерпретации изображений можно сказать следующее: объекты без изменений будут отображаться в черно-белом цвете; любое изменение в сцене, (выраженное в изменении обратного рассеяния), между двумя сеансами измерений отображается в цвете;

Вторая основана на выявление изменений по двум изображениям (change detection). Может быть несколько вариантов реализации: расчет композитного изображения, основанного на разностном изображении (рис. 3б, оттенки красного соответствуют максимальным изменениям), расчет композитного изображения на основе карты когерентности, создаваемой по двум изображениям (значения когерентности от 0 до 1) и характеризующей согласованность этих снимков между собой, а также наличие изменений, при использовании карты когерентности выполняется очень четкая локализация временных изменений (рис. 3в, оттенки синего соответствуют максимальным изменениям), и расчета карты изменений в виде классифицированного изображения.

Как было сказано выше, работа с поляриметрическими данными – это несколько обособленное направление, хотя в настоящее время большинство новых космических радиолокационных систем предусматривают проведение многополяризационной съемки. Ос-

новными «рабочими» поляризациями остаются HH (горизонтальная) и VV (вертикальная). Они используются при проведении интерферометрической обработки, да и в целом съемка проводится преимущественно с этими видами поляризации излучения (в зависимости от типа радиолокационной системы), так как изображение поверхности получается более информативным. Кросполяризации HV и VH дают дополнительную информацию о поверхности и для некоторых задач являются важным дополняющим фактором. Например, для лесного и сельского хозяйства наличие изображений HV или VH позволяет более достоверно выполнить классификацию различных типов объектов. На основе многополяризационных данных создаются ложноцветовые композитные изображения. В качестве примера на рис. 4 приведено сравнение радиолокационных данных поляризации: HH, HV, а также композитное изображение, полученное на основе этих данных. Как видно, поляризация HV дает более четкую дифференциацию между участками леса и вырубками, хотя структурность изображения лучше на изображении HH.

СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ДАННЫХ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Совместная обработка радиолокационных и данных в оптической зоне спектра выделена как отдельное направление, так как во многих случаях именно их совместное использование дает более полные результаты. Изображения в оптическом диапазоне содержат ин-

формацию об отраженной или переотраженной энергии света и информацию о «химических» свойствах поверхностного слоя, в то время как изображения, полученные в микроволновом диапазоне, предоставляют данные о геометрических параметрах (шероховатость, физическая структура и диэлектрические свойства) поверхности. Способ слияния данных заключается в геометрическом слиянии данных от различных источников и при необходимости их дальнейшей обработке, например, какое-либо совместное преобразование. В качестве примера приведем два различных направления комбинирования оптических и радиолокационных данных.

1. Геометрическое совмещение данных на примере выявления новых площадей вырубок в лесном массиве. Задача решается по стандартному алгоритму, при наличии двух изображений в оптическом диапазоне (желательно наличие красного или ближнего ИК каналов). В рассматриваемом случае, современного снимка в оптическом диапазоне необходимого разрешения не было, в то время как радиолокационная съемка, с нужными параметрами была в архиве. В данном случае можно выделить ряд особенностей, возникающих при совместной обработке. Геометрия радиолокационных изображений существенно отличается от геометрии оптических, поэтому от качества выполнения ортотрансформирования данных существенно зависит результат работ. Разрешение используемых изображений должно быть сходным, либо оптический снимок может иметь более низкое разрешение, так как изоб-

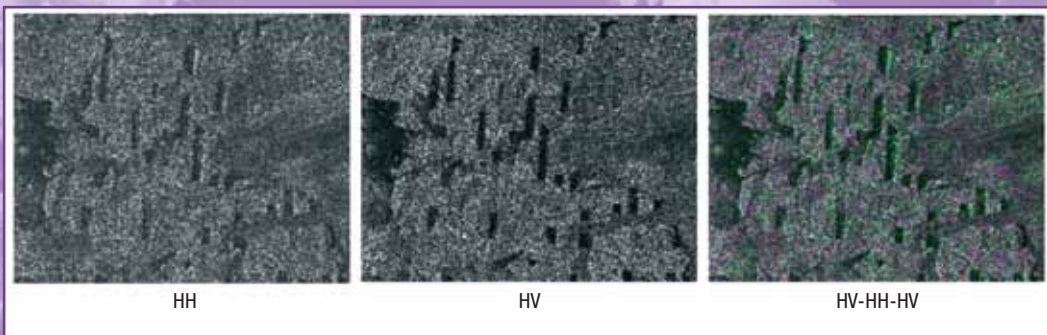


Рис. 4. Сравнение информативности данных, полученных при различных поляризациях излучения, при локализации вырубок

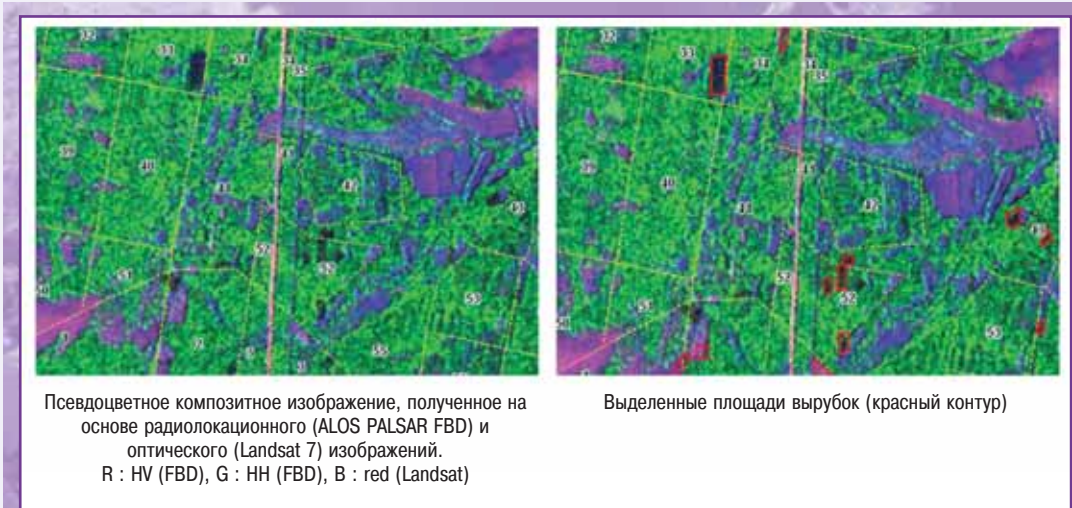


Рис. 5.

Выявление новых вырубок в лесных массивах (на изображения нанесены номера и границы кварталов)

разительные способности таких изображений выше. Желательно использование радиолокационных данных, полученных при нескольких поляризациях излучения (HH и HV), а оптических – в красной либо ближней ИК зонах спектра. На рис. 5 показана реализация описанной выше задачи.

Аналогично определению вырубок в лесных массивах могут выявляться другие различные природные и антропогенные явления. Возникает много ситуаций, когда современных данных в оптическом диапазоне в наличии нет, а чтобы выполнить новую съемку требуется значительное время. В этих случаях радиолокационные данные могут служить хорошей альтернативой, так как их получение не зависит от метеоусловий.

2. Комбинирование данных, основанное на преобразовании RGB↔HIS (Hue Intensity Saturation). Такое действие позволяет совместить на одном выходном изображении информацию о местности, полученную в двух разных диапазонах. Сначала выполняется преобразование трех наиболее информативных спектральных каналов RGB→HIS (оттенок цвета – яркость – насыщенность), затем в полученном изображении яркость заменяется на радиолокационный снимок и осуществляется обратное преобразование, при проведении которого необходимо сбалансированное растяжение каналов для повы-

шения качества конечного представления в RGB. Конечные цвета не имеют физического значения, но их можно объяснить, поскольку цвет и насыщенность сохранены из оптического диапазона. По таким изображениям можно определить шероховатость (низкая/высокая растительность, затопленный/незатопленный район), также при выполнении данного преобразования за счет радиолокационного изображения четко отображается структурность территории, что необходимо при решении геологических задач.

Комплексный анализ оптических и радиолокационных данных позволяет в особых условиях исследовать объекты различного геологического строения. Некоторые из них слабо видимы на обоих типах изображений и поэтому могут быть выделены в объединенном комплекте данных, иногда они могут быть полностью невидимы на оптических изображениях (экранированы), но четко отображены на радиолокационных снимках, или наоборот. На рис. 6 приведены примеры совмещения оптических и радиолокационных данных на основе преобразования RGB↔HIS.

Рассмотренные варианты комбинирования данных иллюстрируют два основных направления, в каждом из которых существует множество различных вариантов комбинирования и дальнейшего использования данных.



Снимок Landsat-5 (каналы 7-5-2)



Снимок ERS-1



Синтез данных (ERS-1 и Landsat-5). Отражены литологические различия (цвет с Landsat), а также подробная карта структурных линейментов



Снимок Landsat-7 (каналы 3-2-1)



Снимок Envisat



Синтез данных

Рис. 6.

Пример совмещения оптических и радиолокационных данных на основе преобразования $RGB \leftrightarrow HIS$

РАДАРГРАММЕТРИЯ

Под радарграмметрией понимается обработка стереопары радиолокационных изображений. Она не нашла широкого практического применения, так как конечная точность данных довольно невысокая по сравнению с точностью данных, получаемых при обработке стереопар оптических изображений и интерферометрической обработке радиолокационных данных. Это вызвано тем, что при радарграмметрической обработке исходной является амплитудная информация, т. е. используются только значения интенсивности радиолокационных изображений, полученных под двумя различными углами, а вследствие того, что снимки имеют невысокие изобразительные свойства и зашумлены, точность ЦММ, получаемых по радиолокационным стереоснимкам, по сравнению с оптическими не высока. В случае же с интерферометрическим подходом, ключевой информацией является не амплитудная информация, а фазовая, по которой и проводится восстановление высот местности.

Из современных радиолокационных систем, данные с которых используются для радарграмметрии, можно

выделить RADARSAT-1 и RADARSAT-2, обладающие высокими возможностями по проведению съемки в различных режимах и под различными углами. Условием получения радиолокационных снимков, пригодных для стереообработки, является съемка с одноименных витков (восходящих или нисходящих) с разностью углов визирования примерно от 5 до 30 градусов. При подборе стереопар желательно выбирать снимки, сделанные с меньшим временным интервалом, чтобы избежать взаимной декорреляции изображений из-за различных изменений на земной поверхности, произошедших за время между съемками.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРЫ И СЕРИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Интерферометрическая обработка пар и серий снимков с целью построения ЦММ либо определения просядок земной поверхности является одним из уникальных и перспективных направлений в использовании радиолокационных изображений.

Радиолокационная интерферометрия – метод измерений, использующий эффект интерференции элект-

ромагнитных волн. Технология интерферометрической обработки радиолокационных данных предполагает получение нескольких когерентных измерений одного и того же района земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны радиолокатора.

Основная идея метода заключается в формировании интерферограммы, которая представляет собой результат перемножения двух комплексных радиолокационных изображений местности, полученных идентичными съемочными SAR-системами из близко расположенных точек орбиты одной и той же территории.

Радиолокационное изображение содержит информацию об амплитуде, характеризующей отражательные свойства объекта, и о фазе сигнала, которая определяется удаленностью до объекта. Для определения геометрических характеристик объекта необходимо знать разность фаз между двумя радиолокационными изображениями интерферометрической пары, полученными из близко расположенных точек в пространстве, а также разницу наклонных дальностей и геометрические параметры съемки.

Для построения качественной интерферограммы и, соответственно, определения высот или смещений, необходимо, чтобы два изображения обладали высокой когерентностью (условие интерференции), а также были совмещены геометрически с высокой точностью. Т. е. вспомогательное изображение предварительно должно быть трансформировано в геометрию основного снимка с субпиксельной точностью, после чего вы-

полняется перемножение этих двух изображений, в результате которого получается интерферограмма, характеризующая рельеф территории, а также содержащая информацию о смещениях, произошедших на поверхности. На рис. 7 приведена цепочка изображений, демонстрирующая основные шаги интерферометрической обработки пары радиолокационных снимков с целью получения ЦММ.

Для выполнения интерферометрической обработки необходимо соблюдение целого ряда условий.

1. Съемка должна выполняться идентичными радиолокационными системами (тандемная съемка ERS-1 и ERS-2, будущая TanDEM-X) либо одним и тем же радиолокатором через определенное время.

2. При съемке идентичными радиолокационными системами также необходима одинаковая геометрия съемки, т. е. съемка должна быть проведена с одинаковых орбит КА и с одинаковыми углами наклона. Таким образом, съемка проводится из близких точек пространства. Расстояние между точками съемки называется пространственной базовой линией (для интерферометрии определяющей является ее перпендикулярная составляющая), его величина существенно влияет на результаты обработки, его величина существенно влияет на результаты обработки. Теоретически для построения ЦММ, чем больше величина базовой линии, тем выше точность результирующей модели местности. Однако на практике большие базовые линии приводят к тому, что когерентность такой пары изображений получается до-

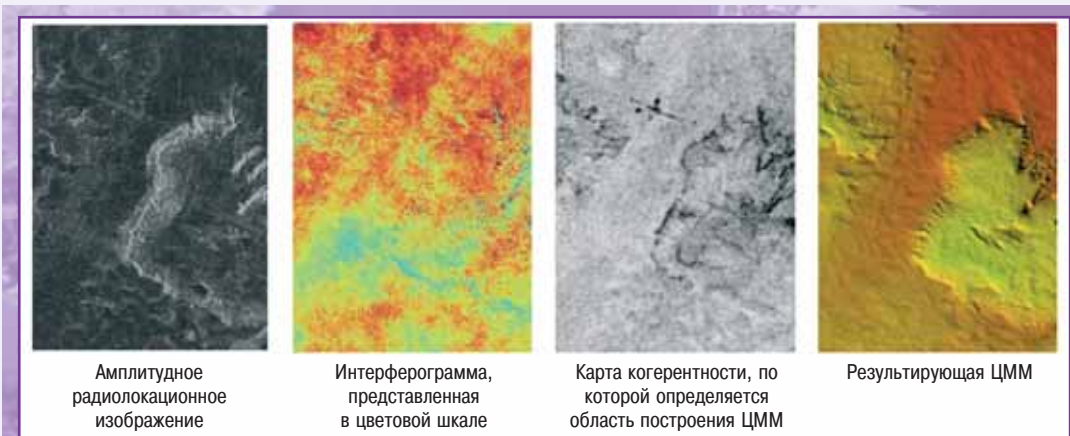


Рис. 7. Изображения, демонстрирующие основные шаги интерферометрической обработки (использованы данные ENVISAT)

вольно низкая, и в итоге – неудовлетворительный результат. Для выявления смещений желательнее использовать пары изображений с минимальной базовой линией, так как теоретически на интерферограмме с нулевой базовой линией отображаются только смещения. Для различных диапазонов можно рассчитать предельную величину базовой линии, при которой еще возможно построение интерферограммы. Но использование пар с такими базовыми линиями не целесообразно, так как вероятность получения результата очень низкая. При обработке данных С диапазона (ERS, Envisat, Radarsat) наилучшими являются значения базовой линии 100-300 м (при построении ЦММ). Для L диапазона (PALSAR) значения базовых линий могут быть на порядок больше, также как и для данных TerraSAR-X.

3. Необходима небольшая временная базовая линия между двумя съемками (для построения ЦММ), так как при большом промежутке времени между съемками происходит больше изменений, и степень корреляции снижается. При выявлении смещений, наоборот, часто необходимо использовать данные с большой временной базой. В этом случае подбираются снимки за схожие даты, сезоны. При этом важна стабильность подстилающей поверхности.

4. Также немаловажным фактором являются погодные условия, хотя радиоизлучение и проникает через облачность, но влияние облачности все равно присутствует и, соответственно, вносятся изменения в распространение посланного и отраженного сигналов, особенно, если облака насыщены влагой. Наряду с наличием облачности важным является состояние подстилающей поверхности. Например, если первый снимок из интерферометрической пары получен при малооблачной сухой погоде, а второй – при влажной погоде, то корреляция этих снимков будет довольно низкой. То же самое относится к наличию и состоянию снежного покрова, растительности и т. п.

Чтобы повысить вероятность получения хорошего результата, нужно тщательно выбирать данные. В первую очередь, необходима оценка пространственной и временной базовых линий, а затем – метеоусловий в регионе на момент съемок.

Для интерферометрической обработки можно использовать данные, получаемые при соблюдении вышеописанных условий всеми SAR-системами, но, для того, чтобы получить удовлетворительные результаты, необходимо использовать не пары, а серии (цепочки)

изображений. При использовании интерферометрических цепочек (от 4-х изображений) существенно повышается вероятность получения полного и качественного результата. Дело в том, что даже при тщательном выборе данных нельзя гарантировать их высокую когерентность по всему полю изображения из-за различных факторов, а при использовании цепочек данных эта проблема частично решается.

Следует также отметить, что уровень когерентности данных существенно зависит от типа подстилающей поверхности. Например, для полупустынной территории, почти лишенной растительности, значения когерентности будут в целом выше и однороднее, чем для зеленых территорий. Так как значительная часть территории России покрыта лесами, рекомендуется использовать:

- цепочки данных, в том числе и разносезонные;
- данные, получаемые в L диапазоне, так как большая длина волны обладает большей проникающей способностью, а, следовательно, состояние растительного покрова оказывает меньшее влияние на уровень когерентности;
- поляриметрические наборы данных.

В целом для интерферометрии наиболее подходят данные с параллельной поляризацией, максимальный уровень когерентности имеют данные V V-поляризации, HH – чуть ниже. При выполнении специальной обработки поляриметрических пар данных (HH, V V, HV, VH) удастся повысить суммарный уровень когерентности за счет расчета когерентности по четырем поляризациям.

Для горных территорий со сложным рельефом при проведении радиолокационной съемки практически всегда присутствуют тени, а также другие эффекты, что сильно снижает качество выходной продукции. Устранить влияние этих эффектов можно за счет использования интерферометрических цепочек данных получаемых с разных орбит – восходящей и нисходящей, таким образом, при комбинировании итоговых цифровых моделей информация обо всех склонах будет полной.

Построение цифровой модели местности. Для получения корректного результата при построении ЦММ необходимо наличие, во-первых, опорной цифровой модели рельефа (могут быть использованы GTOPO-30, SRTM, чем точнее, тем лучше), во-вторых, наличие опорных точек с известными координатами и высотами, которые уверенно опознаются на радиолокационном снимке. Для уверенного распознавания опорных точек на радиолокационных изображениях

Таблица 2

**Оценка точности определения
высот ЦММ, получаемых в результате
интерферометрической обработки**

Наименование SAR-систем	Пространственное разрешение, м	Средняя погрешность определения высоты, м
TerraSAR-X	3	2-4 *
Radarsat-2	3	3-6
ALOS / PALSAR	7-14	5-10
Radarsat-1	8-25	
Envisat /ASAR	25	
ERS-1, 2	30	

Примечание.

* Точность определения высоты в таблице указана достаточно в широких пределах, так как зависит от большого числа факторов, перечисленных выше и определяющих качество интерферограммы.

среднего разрешения на земной поверхности в районе съемки устанавливают специальные металлические уголковые отражатели (рис. 8) с размером грани около 1 м (размер зависит от съемочной системы), точно сориентированные на радиолокатор, которые дают яркий отклик на изображении (эффект многократного отражения сигнала).

Вместо уголковых отражателей могут быть использованы специальные устройства – транспондеры, дающие сильный отклик на радиолокационных изображениях, которые не требуют ориентации на радиолокатор, и будут давать отклик при съемке любой SAR-системой. Их применение пока развито не очень широко. На одно изображение необходимо 5-8 отражателей, равномерно распределенных по территории съемки. Опорные точки используются для уточнения параметров интерферометрической модели и восстановления высот. Точности создаваемых ЦММ достаточно сильно варьируются в зависимости от множества факторов и могут быть оценены только приблизительно.

В табл. 2 приведена оценка точности высот цифровых моделей местности, создаваемых в результате интерферометрической обработки радиолокационных изображений с использованием опорных точек.

Построение карт (картограмм) вертикальных смещений. В данном случае, необходима актуальная опорная цифровая модель рельефа максимальной точности, так как по ней устраняется влияние рельефа

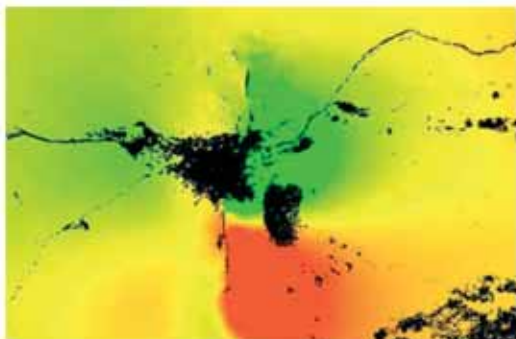


Рис. 8.
Уголковый отражатель

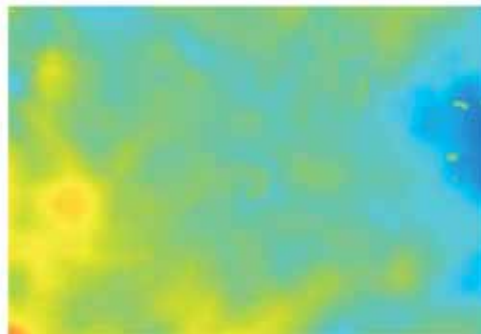
местности на интерферограмме. Если точность используемой ЦММ будет невысокой, то на карте смещений будут присутствовать значительные ошибки. Такой метод обработки данных называется дифференциальной интерферометрией (рис. 9), и часто для определения смещений используется несколько разновременных интерферограмм. Тем самым можно избежать использования внешней точной ЦММ напрямую, так как рельеф фиксируется на обеих интерферограммах, и его влияние может быть устранено при построении дифференциальной интерферограммы.

Для расчета величин вертикальных смещений также необходима опорная информация, т. е. точки с известными величинами смещений. Так как получить такую информацию существенно сложнее, нежели координаты точек, то идут от обратного. В качестве опорных точек берут те точки, где смещения теоретически должны быть нулевые, либо минимальные. На рис. 10 показано наглядное трехмерное представление вертикальных смещений земной поверхности, произошедших в результате землетрясения.

Наряду с приведенной выше методикой, существует другой подход к определению вертикальных смещений земной поверхности, который эффективно применяется для городских территорий и позволяет фиксировать просадки на миллиметровом уровне на основе большой серии изображений (15-20 снимков). В основе метода (Persistent Scatterers) лежит совместная обработка большого массива снимков территории, полученных в течение нескольких лет. Все имеющиеся снимки обрабатываются совместно, с целью локализации излучателей, таких как разнообразные металлические и бе-

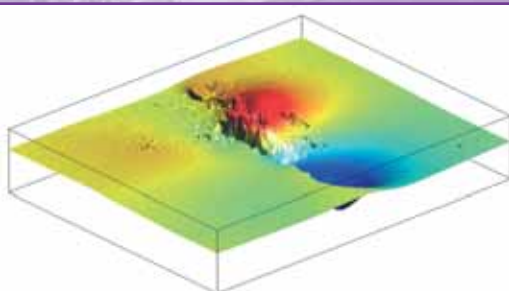


Карта вертикальных смещений территории землетрясения, смещения ± 25 см (период между съемками 35 дней)

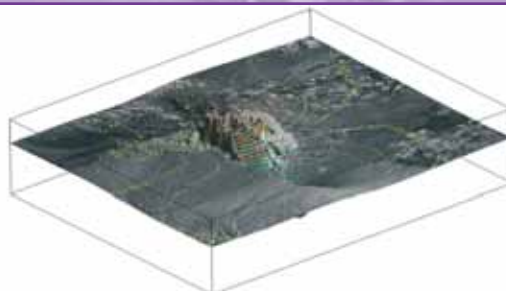


Карта вертикальных смещений, территории нефтегазового месторождения. Максимальные величины смещений порядка $-0,5 - -1$ см/год

Рис. 9.
Карты смещений, полученные методом дифференциальной интерферометрии



Трехмерное представление карты вертикальных смещений в цветовой шкале



Трехмерное представление карты смещений на базе радиолокационного амплитудного снимка, с нанесенными изолиниями вертикальных смещений

Рис. 10.
Трехмерное представление вертикальных смещений земной поверхности

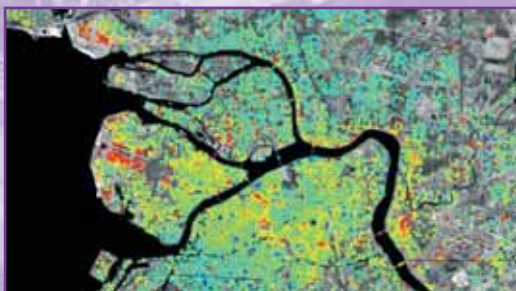


Рис. 11.
Графическое представление метода Persistent Scatterers. Цвет точек соответствует значениям от -5 (красный) до 5 (синий) мм/год

тонные сооружения: здания, мосты, скальные породы, специально установленные угольковые отражатели, которые отображаются на радиолокационных изображениях в виде интенсивных вспышек либо точек. Точное измерение подвижек определяется на фоне этих объектов. Результат таких измерений представляет собой таблицу, в которой сравниваются измерения среднегодовых подвижек и временные серии подвижек для каждой точки измерений (графическое представление показано на рис. 11). Эти данные могут использоваться при мониторинге зданий и сооружений, так как позволяют определять направление и величину деформаций (смещение и просадка) с миллиметровой точностью.