

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Докт. физ.-мат. наук *А.И. Захаров* (ФирЭ РАН),
канд. техн. наук *Н.П. Ковалевский* (ФГУП ЦНИИмаш),
канд. физ.-мат. наук *В.П. Синило* (ФирЭ РАН)

Анализируются особенности методов предварительной и тематической обработки радиолокационной (РЛ) космической информации для решения социально-экономических задач. Отмечается такое отличительное качество этих методов, как возможность организации автоматизированной обработки радиолокационных данных и доступность эффективных алгоритмов их обработки. Проводится систематизация задач, которые могут быть решены с помощью радиолокационных наблюдений. Даются рекомендации по комбинированию РЛ-наблюдений с целью повышения эффективности решения тематической задачи.

Ключевые слова: радиолокационная съёмка, предварительная и тематическая обработка, комплексирование информации.

Method Particularities of a Radar Space Information Processing. A.I. Zakharov, N.P. Kovalevsky, V.P. Sinilo. Methods particularities of a preliminary and thematic processing of a radar (RR) space information for solving socio-economic problems are analyzed. Such distinctive quality of these methods, as a possibility of organizing an automated radar data processing and an availability of efficient algorithms for its processing, is noted. A systematization of tasks, which can be solved with the help of radar observations, is carried out. Recommendations for combining RR observations in order to improve a thematic task solving efficiency are given.

Key words: radar survey, preliminary and thematic processing, information complexation.

В силу специфики формирования радиоволн и особенностей их взаимодействия с подстилающими покровами радиолокационные изображения отличаются от оптических, традиционно используемых в задачах наблюдения Земли из космоса. Видимые на них радиолокационные контрасты обусловлены наличием крупномасштабных уклонов рельефа, неровностей микрорельефа, диэлектрическими свойствами и характером структуры объектов поверхности, что определяет внешнее отличие радарных снимков от оптических. Удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) поверхности, измеряемая с помощью радара, является входным параметром радиофизических моделей различных типов отражающей поверхности, с помощью которых оценивают биомассу леса, влажность почв, скорость приводного ветра, а также проводят классификацию типов поверхности. Существенное преимущество радарных данных по сравнению с оптическими состоит в возможности использования наравне с амплитудными данными информации о фазе. Так, разность начальных фаз сигналов элементов синтезированных изображений согласно схеме интерферометрической съёмки с повторяющихся траекторий космического аппарата (КА) содержит информацию о рельефе поверхности и мелкомасштабных изменениях (перемещениях) подстилающих покровов за время между съёмками. Возможность измерения поляризационных характеристик сигнала обеспечивает получение информации об особенностях рассеяния радиоволн слоем подстилающей поверхности, что во многих случаях существенно облегчает интерпретацию данных [1].

Обработка радарных данных, в отличие от оптических, несравненно более сложная, многоэтапная. Упрощённо она может быть разделена на два этапа: предва-

рительной (первичной) и вторичной (тематической) обработки. К предварительной обработке могут быть отнесены все те преобразования данных, которые могут выполняться в результате формализованных процедур, не требующих вмешательства оператора. На этом этапе после приёма спутниковых данных и записи их на магнитный носитель выполняются необходимые декодирующие, а также корректирующие операции, происходит преобразование полученных с космического аппарата данных (с учётом калибровок) непосредственно в изображение или космический снимок (например синтез радиолокационных изображений исходя из радиоголограмм, переданных по радиолинии), в том числе такие преобразования, как радиометрические и геометрические (коррекция), для исправления радиометрических и геометрических искажений, вызванных нестабильностью работы космического аппарата и его целевой аппаратуры; географическая привязка изображения с наложением на него сетки координат; изменение масштаба изображения и представление изображения в необходимой географической проекции (геокодирование) [2].

Завершающий этап – тематическая обработка – включает в себя не только цифровой анализ с применением статистических методов обработки (кластерного анализа, методов выделения признаков и классификации для количественных оценок и т. п.), но и визуальное дешифрирование данных и их интерпретацию. Особенностью тематической обработки является, как правило, непосредственное участие оператора.

Основами существующих методов тематической обработки радиолокационной информации при решении различных социально-экономических и научных задач служат:

- инверсия измерений УЭПР и получение физических характеристик поверхности с использованием радиофизических моделей;
- классификация деталей на амплитудных изображениях с использованием библиотек образов различных объектов;
- комплексирование амплитудных разновременных/разночастотных/поляризационных/многопозиционных измерений;
- объединение комплексных разновременных/интерферометрических измерений;
- сочетание комплексных поляризационных измерений;
- комбинирование перечисленных процедур.

Радиолокационные данные могут использоваться при решении широкого круга социально-экономических задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а именно:

- гляциологии – определение типов ледовых покровов, границ и влагозапаса снежных покровов, а также изучение динамики ледовых покровов морей, ледников, айсбергов;
- геологии – морфология поверхности земной коры, исследование засушливых регионов, подповерхностное зондирование, изучение тектонических процессов;
- гидрологии – определение влажности почв, шероховатости поверхности, степени эрозии и засоления почв, установление границ водоёмов;
- экологии – изучение процессов эрозии почв, выветривания, опустынивания земель, контроль антропогенного воздействия на окружающую среду;
- при исследовании растительных покровов – классификация типов растительности, определение границ лесов и их состояния, а также объёма биомассы и влажности;
- океанографии – исследование течений, фронтов, внутренних и поверхностных волн, проведение батиметрии;
- в области мониторинга районов чрезвычайных ситуаций – выявление районов наводнений, других кризисных ситуаций, оценка последствий природных катастроф;
- хозяйственной деятельности – организация навигации во льдах, мониторинг шельфовых зон и зон разработки полезных ископаемых, контроль состояния нефтепроводов, контроль рыболовства в прибрежной зоне, определение степени загрязне-

ния морей, организация работ в сельском хозяйстве, мониторинг лесного хозяйства, контроль работы транспорта;

– картографии – создание и обновление карт различного масштаба, построение детальных цифровых карт рельефа;

– решение военно-прикладных задач – разведка и обнаружение различных объектов исходя из высоких требований к разрешению, полосе обзора, производительности и оперативности получения информации, а также слежение за ними.

Анализ степени проработки и эффективности решения перечисленных тематических задач показывает следующее.

Решение большинства подзадач в области гляциологии основано на использовании одиночных амплитудных снимков или их серии. Имеется многолетний опыт применения РЛ-данных X -диапазона, работающего при одной согласованной поляризации, для классификации типов ледовых покровов, их разделения на молодой лёд, однолетний и многолетний ледовые покровы, а также для картирования границ ледовых покровов – в соответствии с уровнем УЭПР отражающей поверхности на снимках.

В то же время достаточно информативными для решения этих задач оказываются данные поляриметрического радиолокатора L -диапазона. Динамика ледовых покровов надёжно выявляется по сериям амплитудных снимков в обоих указанных диапазонах. Наблюдаемые на радарных снимках границы снежного покрова, особенно при изменении его влажности, можно устанавливать и с помощью комплексирования серии разновременных амплитудных снимков. Оценка влагозапаса снежных покровов не столь несомненна из-за слабого уровня объёмного рассеяния снега, в связи с чем для решения этой задачи может быть полезным комплексирование результатов наблюдений с повторяющихся орбит при условии интерферометрической съёмки поверхности, сначала свободной от снега, а впоследствии – со снежным покровом. Различие диэлектрических свойств снега и свободного пространства обуславливает дополнительный фазовый набег на интерферограмме, по которому можно определить количество снега в слое.

Решение геологических задач базируется, главным образом, на использовании амплитудных снимков, при этом предполагается, в основном, привлечение экспертных оценок (например для решения подзадач исследования/картирования геоморфологии поверхности или подповерхностного зондирования). Задачи, связанные с тектоническими явлениями, могут решаться с помощью анализа амплитудных данных, путём выявления характерных геологических структур на изображениях, а также посредством измерения медленных мелкомасштабных подвижек поверхности при объединении наблюдений с повторяющихся орбит в схеме интерферометрической съёмки поверхности.

Задачи гидрологии решаются большей частью на основе амплитудных данных. Границы водоёмов определяются наиболее просто, особенно с использованием данных длинноволновых радиолокаторов или кроссполяризационных измерений, поскольку УЭПР поверхности водоёма заметно меньше УЭПР соседствующей суши. Эрозия и засоление почв проявляются в виде изменения УЭПР во времени вследствие изменения диэлектрических свойств или наличия мелкомасштабной шероховатости. Автоматическая классификация типов покровов возможна, в первую очередь, при условии привлечения экспертных оценок. Измерение влажности почв – не столь простая задача, поскольку одиночные амплитудные снимки, полученные при одной поляризации, не позволяют разделить влияние влажности почв и мелкомасштабной шероховатости. Комплексирование данных, полученных при разных поляризациях поляриметрическим радаром сравнительно длинноволнового диапазона, эффективно используется в современных методиках измерения влажности.

Экологические задачи также решаются исходя из анализа амплитудных снимков или серий снимков при условии привлечения экспертных оценок. Решающим фактором в этом случае является локальное изменение отражательных свойств подстилающих покровов вследствие изменения микроструктуры рельефа или диэлек-

трических свойств почвы при эрозии (либо выветривании, либо опустынивании), а также неблагоприятного антропогенного воздействия на среду.

Различные подзадачи изучения растительности решаются в той или иной степени успешно с помощью разных подходов. Границы лесов на фоне открытых пространств эффективно выделяются с помощью поляризационных измерений, поскольку диффузная компонента рассеяния сигнала растительностью заметно больше сигнала гладкой поверхности, не покрытой густой растительностью. Классификация растительности, например определение типов лесов, может производиться с помощью поляриметрических данных, содержащих сведения об ориентации и доминирующих линейных отражателей, таких, как крупные ветки дерева. Биомасса лесных пород конкретного типа может быть определена по уровню УЭПР с привлечением аллометрических уравнений. Методы поляриметрической интерферометрии дают возможность измерения высоты леса и его биомассы.

Океанографические задачи из указанного списка решаются с привлечением амплитудных данных при условии комплексирования данных различных поляризационных каналов. Течения, фронты выявляются путём визуального дешифрирования на амплитудных изображениях. Скорость приводного ветра может быть определена по уровню УЭПР водной поверхности с использованием отработанных эмпирических моделей. Присутствие батиметрических особенностей на снимках водной поверхности выявляется по результатам модуляции мелкомасштабного её волнения. Обратная задача восстановления батиметрии – достаточно сложная, и решение её пока не найдено.

Задачи мониторинга районов чрезвычайных ситуаций весьма многообразны, поэтому для них характерно разнообразие подходов к решению и способов комбинирования радиолокационных данных. Мониторинг опасных оползневых и карстовых процессов может осуществляться на основе анализа временных рядов амплитудных данных в целях морфологического анализа снимков поверхности и выявления потенциально опасных зон, а также с применением методов дифференциальной интерферометрии для обнаружения предшественников опасных явлений типа подвижек подстилающей поверхности. Картирование затопленных участков выполняется при изучении как одиночных амплитудных снимков, так и серии временных рядов снимков. Последствия природных катастроф, обстановка в районах кризисных ситуаций изучаются на основе одиночных амплитудных снимков или их серий, результатов измерения подвижек рельефа методами дифференциальной интерферометрии с обязательным привлечением экспертных оценок.

Большинство задач, связанных с хозяйственной деятельностью, решаются на основе анализа амплитудных изображений или серий разновременных снимков с привлечением экспертных оценок. Применение автоматизированных методов анализа амплитудных изображений возможно при выявлении судов на водной поверхности, мониторинге транспортных потоков, выявлении загрязнений водной поверхности нефтью или нефтепродуктами. Задача контроля состояния растительности наиболее эффективно решается на основе анализа серии снимков, полученных в разные фазы вегетационного цикла. Поляриметрические съёмки позволяют расширить возможности классификации сельскохозяйственных культур.

Подзадачи картографии наиболее эффективно решаются с использованием амплитудных радарных снимков и комплексных разновременных/ интерферометрических измерений. Амплитудные изображения служат хорошей картографической основой, а наличие хорошо проработанных алгоритмов и методов построения цифровых моделей рельефа позволяет получать детальные высококачественные карты высот поверхности.

Решение военно-прикладных задач, как правило, базируется на использовании амплитудных изображений или серий снимков поверхности. В процессе обработки радарных снимков чаще всего предполагается участие эксперта при анализе содержания снимка и выявлении интересующего объекта.

В целях обеспечения оперативности обработки и получения информации применяются автоматизированные методы обработки, такие, как обнаружение, класси-

фикация и слежение за наблюдаемым объектом, для реализации которых следует использовать библиотеки образов искомым объектов.

Описанные этапы обработки осуществляются с помощью разных программно-аппаратных средств. В ходе предварительной обработки, как правило, применяется специализированный программно-аппаратный инструментарий, позволяющий учесть особенности построения и функционирования аппаратных средств радиолокатора, а также использовать результаты внешней и внутренней калибровки радиолокатора. Особенность программно-аппаратного комплекса предварительной обработки состоит в высокой пропускной способности, обуславливающей возможность выполнения большого объема вычислений, необходимых для реализации алгоритмов фокусированного синтеза высокдетального радиолокационного изображения. Выходным продуктом названного комплекса являются стандартизованные продукты – синтезированные изображения максимально высокого разрешения с комплексным представлением отсчетов снимка, а также яркостные изображения с различными вариантами геокодирования [3 – 5].

Средства тематической обработки, как правило, практически не связаны с особенностями организации и функционирования радиолокационного датчика, и для неё возможно использовать сторонние коммерческие и некоммерческие программные пакеты [6]. Коммерческие программные пакеты представляют широкий набор инструментов для обработки данных военных, гражданских и коммерческих радиолокаторов с синтезированной апертурой. Среди предлагаемых пользователю функций – выявление изменений состояния поверхности в области съёмки; генерация цифровых моделей рельефа; фильтрация, классификация и сегментация снимков; поляриметрическая декомпозиция и классификация; орторектификация, автоматическое совмещение снимков различных сенсоров; автоматическое выявление и мониторинг нефтяных загрязнений водной поверхности; обнаружение судов и др. Возможна совместная обработка данных радиолокационных и получаемых с помощью оптических сенсоров.

Некоммерческие программные пакеты, как правило, содержащие меньше инструментов для обработки радарных данных, предоставляют меньше возможностей тонкой настройки инструментов, не гарантируют точности выполнения поставленной задачи и не принимаются разработчиком.

Методы и алгоритмы обработки данных с использованием сторонних коммерческих и некоммерческих программных пакетов, как правило, наиболее формализованы и для их реализации не требуется привлечение сложных моделей изучаемого объекта. Необходимо отметить, что в единичных случаях создаются инструменты для решения сложных тематических задач, предполагающие моделирование физических процессов, например геофизическое моделирование процессов проседания земной поверхности и уточнение параметров геофизических процессов при использовании пакета *SARSCAPE*.

Можно отметить как тенденцию разработку и создание для решения тематических задач инструментов, которые не входят в состав современных коммерческих и некоммерческих программных пакетов, являются ноу-хау разработчика и используются частной фирмой-разработчиком в дополнение к этим пакетам при решении задач заказчика. Причиной создания условий для предоставления услуг в таких фирмах и существования подобных сервисов часто является сложность обработки радиолокационной информации, усугубляющаяся тем, что для получения конечного результата необходимы не только углубленные знания в области изучаемого явления, но и привлечение ноу-хау специалиста в конкретной области исследования земной поверхности с помощью радиолокационных данных.

Представляется разумным выделить два направления (тенденции) совершенствования методов тематической обработки радиолокационной информации: подготовка информационных (базовых) продуктов в результате сложной отработанной к настоящему времени формальной предварительной обработки в обеспечение потребителя и развитие новых методов тематической обработки при условии дове-

дения их до автоматизма и расширения списка базовых продуктов новыми видами обработанной информации.

К базовым продуктам можно отнести радиолокационные данные, полученные в результате предварительной обработки стандартных видов, некоторых видов специфической, сложной для конечного потребителя предварительной и тематической обработки (фильтрации, сегментации, кластерного анализа, интерферометрических и поляриметрических преобразований и т. д.), а также путём комбинирования (комплексирования) различных информационных каналов. Базовые продукты могут быть полноценным информационным материалом, позволяющим потребителю решать свои тематические задачи без привлечения существенного дополнительного измерительного материала.

Таким образом, анализ особенностей этапов предварительной и тематической обработки РЛ-данных ДЗЗ показывает, что они существенно различаются по содержанию, вычислительной сложности, видам формируемых на выходе этапа обработки информационных продуктов и степени автоматизированности. Если на этапе предварительной обработки возможна практически полная автоматизация с использованием освоенных алгоритмов фокусированного синтеза, то для тематической обработки радиолокационной информации с целью решения широкого круга научных и социально-экономических задач чаще всего требуется участие квалифицированного оператора, наличие базы данных радиолокационных признаков и обучающих выборок, совершенствование имеющихся и создание новых алгоритмов обработки в дополнение к предлагаемому инструментарию в рамках существующих коммерческих и некоммерческих программных пакетов обработки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арманд Н. А., Захаров А. И., Захарова Л. Н. Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли – современные системы и перспективные проекты. – Исследование Земли из космоса, 2010, № 2, с. 3 – 13.
2. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010, 655 с.
3. Полетаев А. М. и др. Особенности сбора, формирования и описания радиолокационных данных и направления их стандартизации. – Информация и космос, 2006, № 3, с. 37 – 46.
4. Полетаев А. М. и др. Тенденции в дистанционном зондировании Земли и проблемы стандартизации данных. – Информация и космос, 2005, № 1, с. 9 – 23.
5. Полетаев А. М. и др. Тенденции в дистанционном зондировании Земли и проблемы стандартизации данных. – Информация и космос, 2005, № 2, с. 66 – 75.
6. Проектно-поисковые исследования и разработка ключевых положений методов обработки радиолокационной информации по результатам мониторинга земной поверхности и атмосферы. НТО. ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 2013, 358 с.