ISSN 2079-3316 ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ т. 9, № 4(39), с. 461–475

ББК 28стд1-658.20 ГРНТИ 82.13.37 УДК 004.93:004.89

А. Н. Виноградов, И. В. Елизаветин, Е. П. Куршев, С. В. Парамонов, С. А. Белов

Анализ применимости методов дифференциальной интерферометрии для задач геотехнического мониторинга Арктической зоны

Аннотация. Рассмотрено применение методов космической радиолокационной дифференциальной интерферометрии (КРДИ) для решения актуальных прикладных задач геотехнического и геоэкологического мониторинга арктических районов. Исследованы различные направления и задачи использования интерферометрических данных.

Выработаны требования к формированию временной серии интерферометрических снимков и сформулированы критерии оценки их пригодности для задач геотехнического мониторинга Арктической зоны.

Kлючевые слова u фразы: радиолокационное изображение, космическая радиолокационная дифференциальная интерферометрия, геотехнический мониторинг, дистанционное зондирование земли.

Введение

Активное исследование и освоение арктического региона в последние годы осуществляется всеми промышленно развитыми державами, примыкающими к данному региону. Отмечено, в том числе на высшем государственном уровне в нашей стране, что арктический регион имеет

•

Работа выполнена в рамках проекта Президиума РАН «Система мониторинга состояния комплексных объектов и характеристик окружающей среды прибрежных арктических районов методами космического радиолокационного зондирования», номер гос. регистрации АААА-А18-118021490109-2.

 $[\]textcircled{O}$ А. Н. Виноградов⁽¹⁾ И. В. Елизаветин⁽²⁾ Е. П. Куршев⁽³⁾ С. В. Парамонов⁽⁴⁾ С. А. Белов⁽⁵⁾ 2018

[©] Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН^{(1, 2, 3, 4}) 2018

[©] Российский университет дружбы народов⁽¹⁾, 2018

[©] AO «СТТ ГРУП»⁽⁵⁾, 2018

[©] Программные системы: теория и приложения (дизайн), 2018

^{10.25209/2079-3316-2018-9-4-461-475}

462 А. Н. Виноградов, И. В. Елизаветин, Е. П. Куршев и др.

особое значение, в частности, для Российской Федерации. Российская Арктика, включающая континентальный шельф, побережье, исключительную морскую экономическую зону, занимает более 30% площади нашей страны. Освоение данной зоны производится, в частности, по следующим направлениям:

- развитие транзитных маршрутов, в первую очередь, Северного морского пути, а также сухопутных транспортных магистралей, включая создание и развитие элементов транспортной инфраструктуры;
- создание и развитие элементов оборонной инфраструктуры;
- добыча и транспортировка полезных ископаемых, в первую очередь, углеводородного сырья, а также редкоземельных металлов и драгоценных камней;
- добыча морских биопродуктов.

Указанные процессы сопровождаются также комплексным развитием сопроводительной инфраструктуры, включая жилую инфраструктуру, связь, энергетику и т.п., а также развитием систем метеорологического, гидрологического, геологического, океанографического наблюдения в целях фундаментальных исследований и для повседневного применения.

Проектирование, строительство и эксплуатация элементов инфраструктуры в рамках перечисленных выше задач обладают повышенной сложностью. Во-первых, известно, что строительство и эксплуатация объектов и сооружений в районах вечномерзлых грунтов связано с повышенным риском возникновения опасных геодинамических процессов, обладающих разрушительной силой. Во-вторых, непредвиденные геодинамические процессы могут привести к необратимой трансформации природных ландшафтов и, соответственно, к деградации экосистемы данного региона.

В связи с этим, в процессе освоения арктических территорий особую важность приобретает задача непрерывного геотехнического и геоэкологического мониторинга состояния и динамики геологических процессов, связанных с антропогенным воздействием.

Учитывая протяженность, разнообразие, малоосвоенность и климатические условия в арктической зоне России, общепризнанно, что опорным источником данных для геотехнического и геоэкологического мониторинга здесь будут являться средства дистанционного зондирования космического базирования.

Преимущество использования методов дифференциальной интерферометрии

Практика показывает, что в связи со спецификой метеорологических условий данного региона (преобладание длительных периодов сплошной облачности) в основном приходится рассчитывать на радиолокационные спутники дистанционного зондирования. Применительно к задачам геотехнического и геоэкологического мониторинга, в рамках проекта предлагается использовать перспективную технологию дифференциально-интерферометрической обработки радиолокационных данных.

В качестве инструмента, обеспечивающего получение радиолокационных данных для дифференциально-интерферометрической обработки, может быть использован радиолокатор с синтезированной апертурой антенны сантиметрового диапазона электромагнитных волн, размещенный на борту космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Сегодня на околоземных орбитах действует несколько коммерческих радиолокаторов, способных выполнить интерферометрическую съемку интересующего участка в течение заданного промежутка времени (Kompsat-5, Sentinel-1, TerraSAR-X/Tandem, Radarsat-2, COSMOSkyMed-1,2,3,4). В ближайшее время планируется выведение на орбиту отечественных радиолокаторов с синтезированием апертуры — Кондор-ФКА и Обзор-Р.

Радиолокатор является активным датчиком в том смысле, что подсвечивает подстилающую поверхность для получения ответного сигнала на входе приёмного устройства. Процесс зондирования начинается, когда радиолокатор посылает импульс в направлении земной поверхности. Импульс взаимодействует с земной поверхностью, частично поглощается, а частично отражается в сторону локатора. Отражённый сигнал с выхода антенны через антенный переключатель поступает на приемник и далее, в виде голограммы, на записывающее устройство. Голограмма должна пройти специальную обработку для получения радиолокационного изображения. Радиолокационное изображение является комплексным, то есть из него можно извлечь амплитуду, характеризующую яркость поверхности и фазу, обусловленную временной задержкой сигнала и длинной волны сигнала; фаза может быть в дальнейшем использована для измерения высоты рельефа поверхности.



Рисунок 1. Схема двухпозиционного интерферометра на основе РСА космического базирования

В общем случае, при измерении высот рельефа радиолокационная система представляет собой двухпозиционный интерферометр (рисунок 1).

При дифференциальной интерферометрии, использующей данные разновременной съемки, возможно решение задачи выявления смещений подстилающей поверхности сантиметрового и даже миллиметрового масштаба. Таким образом, мы получаем удобный инструмент для построения цифровых моделей рельефа и измерения сдвигов земной поверхности, используемых при проведении геотехнических и геоэкологических исследований. Кроме того, наличие фазовой информации в снимках PCA позволяет производить их взаимное пространственное совмещение с точностью до сотых долей элемента разрешения, что даёт возможность формировать временные наборы (стеки) снимков на интересующий участок поверхности.

Результатом обработки таких наборов могут быть карты временных изменений на поверхности и карты типов поверхности, как результат классификации по вектору параметров. Как показывают оценки специалистов, внедрение описанных технологий в хозяйственный оборот одновременно приведет и к уменьшению стоимости геотехнических работ, и к повышению качества получаемых данных.

На рисунке 2 показано диалоговое окно интерферометрического процессора.

🙋 Интерферометрический процессо	p		×
Совмещение	Фрагмент	Интерферограмма Фильтр	Развертка 🖌 🕨
Основное изображение F-tout_deberst\ T е вспоногательное изображение F-tout_deberst\ F-tout_deberst F-tout_deb	- -	Тип проекта С Интерферсинятрия Ф Дифф, интерферсинятрия (2 прохода) С Дифф, интерферсинятрия (3 прохода) С Дифф, интерферсинятрия (4 прохода)	Новый проект Открыть проект Сохранить Сохранить как
- 2-е вспоногательное изображение - F:load_debest\ - 3-е вспоногательное изображение - F:load_debest\ - ШМР - ШМР			3
		Harris	Выполнить С Помощь
J			Х Закрыть

Рисунок 2. Диалоговое окно интерферометрического процессора для восстановления высот рельефа и сдвигов поверхности по интерферометрическим съёмкам PCA

В работах [1,2] рассматриваются подходы к обработке серий снимков, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой космического базирования (PCA). Главным требованием к снимкам является их соответствие условиям интерферометрической съёмки. Основными направлениями использования интерферометрических серий снимков является получение информации о высотах рельефа и смещений поверхности сантиметрового масштаба за интервал времени между съёмками.

Для наглядного понимания, на рисунке 3 показан пример восстановления рельефа местности с использованием интерферометрических серий снимков.

Метод дифференциальной PCA-интерферометрии (DInSAR) [3] предполагает совместную обработку двух или более разновременных снимков участка земной поверхности, сделанных PCA с одной приёмопередающей антенной. При обработке PCA изображения совмещаются таким образом, чтобы идентифицировать точки, соответствующие одной области поверхности Земли (корегистрация) и далее вычисляется комплексная интерферограмма, каждый элемент которой равен произведению обратно рассеянного сигнала первого снимка и комплексно сопряженного сигнала второго снимка.



Рисунок 3. Архипелаг Северная Земля, остров Революции. Интерферограмма и восстановленный рельеф по снимкам PCA ERS-1/ERS-2

Однако, существуют и другие применения интерферометрических серий. При помощи разновременных интерферометрических снимков можно регистрировать изменения объектового состава и характеристик подстилающей поверхности с высокой точностью, сопоставимой с разрешающей способностью РСА. Получение интерферометрических данных с различными поляризациями обеспечивает дополнительные возможности по различению объектов и выявления динамики их поведения во времени.

Метод выявления изменений когерентности позволяет получать данные об изменениях свойств земной поверхности на интервале времени между двумя интерферометрическими съёмками [4]. Данный подход основан на анализе разностно-фазовой информации, получаемой обработкой интерферометрических пар снимков. Поскольку фазовые характеристики обратного рассеяния радиолокационного сигнала зависят от геометрии подстилающей поверхности в масштабе рабочей длины волны (от 3 до 20 сантиметров), потенциально существует возможность выявления изменений вплоть до миллиметрового масштаба. С помощью данного метода можно осуществлять мониторинг таких процессов как изменение растительного покрова, изменение береговой линии, а при определенных условиях — следы движения транспортных средств. В качестве входных данных используются пары комплексных изображений, полученных в режиме интерферометрической съёмки, а на выходе получаются растровые и векторные карты в географической проекции, характеризующие наличие изменений.



Рисунок 4. Карта когерентности поверхности

На рисунке 4 показана карта когерентности (фазовой корреляции за период между двумя съёмками) поверхности. Тёмный цвет обозначает участки с низкой (нарушенной) корреляцией, что свидетельствует об изменениях на поверхности, например, движении транспортных средств.

Изменение когерентности за интервал времени между радиолокационными съёмками может быть использовано для выявления объектовых изменений на земной поверхности или изменений в состоянии различных типов поверхности, которые, в общем случае, показывают разные яркостные профили на интервале в несколько недель или месяцев. Совместная обработка длительных серий интерферометрических снимков (рисунок 5) помогает выявить изменения классов (типов поверхности) поверхности путём сравнения их яркостных профилей, как функции времени. Важным моментом здесь является высокая точность совмещения разновременных снимков, что позволяет исключить опибки в идентификации изменений или опибки появления ложных изменений из-за неточности взаимной привязки снимков.

Перспективным направлением использования интерферометрических серий является совместное амплитудное детектирование набора предварительно корегистрированных (совмещённых с использованием фазовой информации) снимков для подавления спекл-шума и повышения изобразительных свойств радиолокационных данных [5]. Такая технология позволяет добиться улучшения визуального восприятия снимков без ухудшения разрешающей способности.

На рисунке 6 представлено сравнение снимка с одиночным накоплением и накоплением 30-ти интерферометрических снимков.

Ещё одним направлением использования интерферометрических данных может стать классификация типов поверхности на основе



Рисунок 5. Пример яркостных профилей участка поверхности в районе г. Новый Уренгой, полученных обработкой серии интерферометрических снимков



(а) общий вид



(б) железнодорожные пути

Рисунок 6. Новый Уренгой



Рисунок 7. Результат классификации типов поверхности на основе анализа вектора параметров: стабильность амплитуды, средняя амплитуда, средняя когерентность

изменения амплитудных и фазовых характеристик радиолокационных снимков, образующих стек взаимно совмещённых комплексных матриц изображений. Процедуры классификации типов без обучения на основе алгоритмов анализа вектора параметров, образуемого амплитудными и фазовыми характеристиками РЛИ, позволяют с высокой точностью разделять классы поверхности (рисунок 7).

Возможности практического применения технологии

Как показывают оценки специалистов, внедрение описанных технологий в хозяйственный оборот одновременно приведет и к уменьшению стоимости геотехнических работ, и к повышению качества получаемых данных. Проведение наземных геодезических работ требует наземных геодезических измерений; нивелирование 2 класса, необходимое для проведения таких работ, потребует закладки большого количества грунтовых реперов на глубину 15 м. При площади обследования порядка 100 кв. км требуется не менее 100 реперов стоимостью не менее 100 тыс. руб. каждый. Таким образом, только закладка реперов будет стоить не менее $100 \times 100000 = 10$ млн. руб. Стоимость работ по нивелированию многократно возрастает за счет прочих работ, транспортных и управленческих расходов и будет составлять 50 млн. руб. и выше. Стоимость работ по интерферометрическому определению поля смещений поверхности в основном стоимостью радиолокационных снимков. Стоимость интерферометрической цепочки из 100 снимков (это максимальное количество снимков, которое может потребоваться) не превысит 8-10 млн.руб. с НДС. Стоимость камеральной обработки снимков не превысит 50,00 руб. за снимок или 5 млн. руб. с учетом всех накладных расходов.

Таким образом, стоимость определения поля смещений интерферометрическими методами не превысит 15 млн. руб. Одновременно с этим, поле смещений поверхности может быть получено с шагом, равным разрешению снимка, т.е. 3 м, что практически недостижимо при наземном геодезическом обследовании, при котором обычно шаг измерений составляет десятки и сотни метров.

Заключение

Таким образом, можно рассматривать несколько технологий совместного использования методов интерферометрической обработки и классификации типов поверхности для повышения достоверности машинного и визуального дешифрирования радиолокационных данных дистанционного зондирования: выявление изменений поверхности по фазовым свойствам отражённого сигнала, подавление шума без ухудшения разрешающей способности на основе высокоточного совмещения интерферометрических снимков, классификация типов поверхности на основе совместного использования амплитудных и фазовых характеристик набора разнесённых по времени комплексных РЛИ.

При практической реализации указанных выше технологий, одним из ключевых моментов становится задача формирования набора или серии интерферометрических снимков на интересующий район. Это особенно актуально при применении интерферометрических технологий в Арктической зоне, поскольку там присутствуют такие специфические особенности поверхности, как вечная мерзлота и длительное время наличия снежного покрова.

Как амплитудные, так и фазовые характеристики отражённого сигнала (и как его производной — интерферограммы) зависят, главным образом, от двух составляющих:

радиометрических свойств, определяемых рассеянием ЭМВ поверхностью;

• геометрических и радиометрических свойств РЛИ, непосредственно определяемых характеристиками аппаратуры.

На характер рассеяния ЭМВ поверхностью непосредственно влияют следующие набора параметров:

- параметры датчика (радиолокатора): частота (рабочая длина волны), поляризация, угол наклона;
- параметры поверхности: шероховатость, характеристики почвы, характеристики растительности;
- другие факторы: эффекты ориентации объектов, рельеф местности, эффекты окружающей среды (атмосферы, ионосферы).

Таким образом, при выработке требований к данным дистанционного зондирования, в том числе, к интерферометрическим сериям снимков применительно к конкретному региону, например, Арктическому, необходимо учитывать всю совокупность условий съёмки: характеристики датчика, характер поверхности, тип и свойства растительности, сезон и атмосферные условия съёмки.

Применительно к задаче исследования Арктического региона с использованием интерферометрических технологий дистанционного зондирования можно сформулировать эти требования (или, более мягко, предпочтения) следующим образом:

- рабочая длина волны датчика L или S диапазон;
- поляризация Н и полная матрица Стокса;
- диапазон углов съёмки с учётом невыраженного рельефа от 30 до 60 градусов;
- время съёмки сезон, когда поверхность свободна от снежного покрова;
- погодные условия съёмки желательно отсутствие в атмосфере грозовых туч и облачности с большим содержанием влаги;
- периодичность съёмки как можно чаще в бесснежный период с учётом таяния верхнего слоя вечной мерзлоты и быстрого изменения состояния растительного покрова.

Список литературы

 И. В. Елизаветин. «Возможности, обеспечиваемые обработкой разновременных и многополяризационных интерферометрических снимков», 14-я Международная научно-техническая конференция «От снимка к карте:

А. Н. Виноградов, И. В. Елизаветин, Е. П. Куршев и др.

цифровые фотограмметрические технологии» (18–24 октября, 2014 г., Хайнань, Китай), с. 7.
 \mathbb{Q}_{465}

- [2] В. Г. Коберниченко, А. В. Сосновский. «Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съёмки», Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 13:3 (2010), с. 98–106. №↑₄₆₅
- [3] R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta, A. Pepe. "An overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis", *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*, Pageoph Topical Volumes, eds. D. Wolf, J. Fernández, Birkhäuser, Basel, 2007, pp. 637–661. € ↑465
- [5] T. Wang, S. Jónsson, R. F. Hanssen. "Improved SAR image coregistration using pixel-offset series", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11:9 (2014), pp. 1465–1469. cc ↑₄₆₇

Поступила в редакцию	15.11.2018
Переработана	07.12.2018
Опубликована	30.12.2018

472

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. И.В. Расина

Пример ссылки на эту публикацию:

А. Н. Виноградов, И. В. Елизаветин, Е. П. Куршев, С. В. Парамонов, С. А. Белов. «Анализ применимости методов дифференциальной интерферометрии для задач геотехнического мониторинга Арктической зоны». *Программные системы: теория и приложения*, 2018, **9**:4(39), с. 461–475.

^{10.25209/2079-3316-2018-9-4-461-475}

http://psta.psiras.ru/read/psta2018_4_461-475.pdf

Дифференциальная интерферометрия для мониторинга Арктики 473

Об авторах:



Андрей Николаевич Виноградов

к.ф.-м.н., Заместитель руководителя Исследовательского центра искусственного интеллекта ИПС им. А. К. Айламазяна РАН. Доцент кафедры информационных технологий Российского университета дружбы народов Область научных интересов: искусственный интеллект и принятие решений, интеллектуальный анализ данных и распознавание образов



0000-0002-3349-8859 andrew@andrew.botik.ru e-mail:

Игорь Васильевич Елизаветин

к.т.н., инженер Исследовательского центра искусственного интеллекта ИПС им. А. К. Айламазяна РАН



0000-0002-6742-0320 igorve@mail

Евгений Петрович Куршев



к.т.н., ведущий научный сотрудник Исследовательского центра искусственного интеллекта ИПС им. А. К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: искусственный интеллект и принятие решений, интеллектуальный анализ данных и распознавание образов

0000-0003-4005-097X e-mail: epk@epk.botik



Семен Владимирович Парамонов

Научные интересы: алгоритмы и методы обработки изображений и сигналов со сложной природой происхождения



0000-0001-8219-9401 e-mail: psvpox@gmail.com



Сергей Александрович Белов Технический директор АО «СТТ груп»

> 0000-0001-5422-936X s.belov@cttgroup.ru e-mail:



474A.N. VINOGRADOV, I.V. ELIZAVETIN, E.P. KURSHEV, S.V. PARAMONOV, S.A. BELOV

CSCSTI 82.13.37 UDC 004.93:004.89

Andrey Vinogradov, Igor Elizavetin, Eugeniy Kurshev, Semen Paramonov, Sergey Belov. Analysis of the differential interferometry methods applicability for geotechnical monitoring of the Arctic zone.

ABSTRACT. We consider the application of space radar differential interferometry methods for solving actual applied problems of geotechnical and geoecological monitoring of Arctic regions. Various directions and problems of using interferometric data are investigated.

The requirements for the formation of a time series of interferometric images were developed and criteria for assessing their suitability for geotechnical monitoring of the Arctic zone were formulated. (*In Russian*).

 $Key\ words\ and\ phrases:$ radar image, satellite differential radar interferometry, geotechnical monitoring, earth remote sensing.

2010 Mathematics Subject Classification: 68U10; 68T45, 68-04

References

- [1] I. V. Yelizavetin. "Opportunities provided by the processing of multi-time and multipolarization interferometric images", 14-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Ot snimka k karte: tsifrovyye fotogrammetricheskiye tekhnologii" (18–24 oktyabrya, 2014 g., Khaynan', Kitay), pp. 7 (in Russian). \uparrow_{465}
- [2] V. G. Kobernichenko, A. V. Sosnovskiy. "An analysis of space-based SAR data processing", *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy*, **13**:3 (2010), pp. 98–106 (in Russian).↑₄₆₅
- [3] R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta, A. Pepe. "An overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis", *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*, Pageoph Topical Volumes, eds. D. Wolf, J. Fernández, Birkhäuser, Basel, 2007, pp. 637–661. Change 1465
- [4] B. Osmanoglu, F. Sunar, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano. "Time series analysis of InSAR data: Methods and trends", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote* Sensing, **115** (2016), pp. 90–102. [€]O↑₄₆₆
- T. Wang, S. Jónsson, R. F. Hanssen. "Improved SAR image coregistration using pixel-offset series", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**:9 (2014), pp. 1465–1469. ⁶↑₄₆₇

(1)

[©] A. N. VINOGRADOV⁽¹⁾, I. V. ELIZAVETIN⁽²⁾, E. P. KURSHEV⁽³⁾, S. V. PARAMONOV⁽⁴⁾, S. A. BELOV⁽⁵⁾, 2018

 $[\]odot$ Ailamazyan Program Systems Institute of $RAS^{(1, 2, 3, 4)}$ 2018

[©] RUDN UNIVERSITY⁽¹⁾, 2018

[©] Creation and Transfer of Technologies JSC⁽⁵⁾, 2018

 $[\]textcircled{C}$ $\$ Program Systems: Theory and Applications (design), $\ 2018$

^{10.25209/2079-3316-2018-9-4-461-475}

Differential interferometry for geotechnical monitoring of the $\rm Arctic -475$

Sample citation of this publication:

Andrey Vinogradov, Igor Elizavetin, Eugeniy Kurshev, Semen Paramonov, Sergey Belov. "Analysis of the differential interferometry methods applicability for geotechnical monitoring of the Arctic zone". *Program Systems: Theory and Applications*, 2018, **9**:4(39), pp. 461–475. (*In Russian*).

10.25209/2079-3316-2018-9-4-461-475

(R) http://psta.psiras.ru/read/psta2018_4_461-475.pdf