

УДК 621.396.96+910.3+551.5

Бойко Игорь Владимирович, студент, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.

Устинова

**ВСЕПОГОДНОСТЬ И ОГРАНИЧЕНИЯ: АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ
ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОСМИЧЕСКИХ
РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ В
ЗАДАЧАХ КАРТОГРАФИИ, МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ
СИТУАЦИЙ И АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА**

Аннотация

в статье рассматривается влияние погодно-климатических факторов на функционирование космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) применительно к гражданским задачам дистанционного зондирования Земли. Проанализированы физические механизмы взаимодействия радиоволн с гидрометеорами и атмосферными неоднородностями. Они приводят к ослаблению сигнала, фазовым искажениям и деградации пространственного разрешения. Особое внимание уделено специфике работы РСА в арктическом регионе: экстремально низкие температуры, ледовый покров и полярная ночь создают дополнительные сложности. Показано, что даже при известной концепции «всепогодности» сильные осадки, атмосферная турбулентность и ионосферные возмущения способны накладывать существенные ограничения на точность и достоверность информации. Предложены пути компенсации таких искажений на основе современных алгоритмов обработки сигналов.

Annotation

This article examines the impact of weather and climate factors on space-based synthetic aperture radars (SARs) for civilian Earth observation. The physical mechanisms of radio wave interaction with hydrometeors and atmospheric irregularities are analyzed; they cause signal attenuation, phase distortions, and

spatial resolution degradation. Special attention is paid to SAR operations in the Arctic under extremely low temperatures, ice cover, and polar night. It is shown that, despite the well-known «all-weather» capability, heavy precipitation, turbulence, and ionospheric disturbances can significantly limit the accuracy and reliability of the data. Compensation methods based on modern signal processing are proposed.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), погодные условия, атмосферные искажения, картографирование, мониторинг чрезвычайных ситуаций, Арктика, всепогодность.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), weather conditions, atmospheric distortions, mapping, emergency monitoring, Arctic, all-weather capability.

Введение

Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с синтезированной апертурой (РСА) занимают особое место среди инструментов космического мониторинга. Их ключевое преимущество — способность получать радиолокационные изображения (РЛИ) фотографического качества с разрешением до 10 см. Это работает вне зависимости от времени суток и, в значительной степени, от метеоусловий. Благодаря активному когерентному зондированию и процедуре синтеза апертуры (достигаемой в движении носителя) РСА применяют для детализированного картографирования, мониторинга чрезвычайных ситуаций и решения арктических задач.

Устойчивость к погодным факторам, однако, не абсолютна. Облака, дождь, снег, туман, неоднородности тропосферы и ионосферы вносят искажения в амплитуду и фазу сигналов. Это ухудшает качество изображений и снижает точность. Понимание природы искажений и разработка методов компенсации — задача актуальная. Особенно в Арктике, где сложные погодные-климатические условия создают дополнительные вызовы для всех систем наблюдения.

Физические основы всепогодности РСА и фундаментальные ограничения

Принцип работы РСА основан на излучении зондирующих радиоимпульсов в заданном диапазоне и приёме отражённых от поверхности сигналов. Разрешение по дальности обеспечивают широкополосные сигналы (например, линейно-частотно-модулированные импульсы). Разрешение по азимуту достигается когерентным накоплением сигналов на траектории носителя — это эквивалентно синтезу антенны с большой апертурой. Радиоволны сантиметрового диапазона (L, C, X) проникают сквозь облака и туман, чем и обусловлена «всепогодность». Однако даже их распространение в реальной атмосфере не идеально.

Анализ влияния погодных факторов на параметры РСА

Атмосферная рефракция и фазовые фронтальные искажения.

Скорость распространения радиоволн в атмосфере (тропосфере и ионосфере) меняется, что даёт дополнительный фазовый набег. Там, где влажность и температура неоднородны по вертикали и горизонтали (атмосферные фронты, термики), луч искривляется — возникает рефракция. Следствие: смещение точечных объектов на РЛИ и геометрические искажения. Это критично для высокоточного картографирования.

Ещё более серьёзную проблему создают флуктуации показателя преломления во времени. Для РСА, который требует когерентной обработки, фазовые искажения траекторного сигнала напрямую снижают фокусировку (разрешение по азимуту). Контуры объектов размываются, что мешает, например, идентификации завалов или разливов нефти.

Влияние гидрометеоров (дождь, снег, облака).

Выпадающие осадки — это рассеивающие и поглощающие объёмы. Проходя сквозь слой дождя, РСА-сигнал ослабевает. Кроме того, фоновый шум от метеорных образований может маскировать сигнал подстилающей поверхности. В сантиметровом диапазоне при определённых условиях возможно парадоксальное улучшение разрешения по угловым координатам

(за счёт перераспределения интенсивности). А в миллиметровом диапазоне влияние осадок столь велико, что даже туман способен полностью блокировать дешифрирование подстилающей поверхности.

Снегопад действует сходно с дождём: крупные снежинки эффективно рассеивают сигнал, особенно в X-диапазоне. Тем не менее современные коммерческие спутники сохраняют работоспособность и при осадках. Правда, при сильных ливнях или густом снегопаде отношение сигнал/шум заметно падает, что ограничивает уверенное выделение полезных сигналов.

Атмосферная турбулентность.

Флуктуации фазы траекторного сигнала, вызванные турбулентностью, порождают случайные фазовые ошибки. Это эквивалентно введению дополнительного «фазового шума» в канал обработки.

Особенности работы в Арктическом регионе

Арктика предъявляет особые требования. Здесь действует совокупность экстремальных погодных и геофизических факторов. Полярная ночь полностью исключает оптические спутники. Поэтому РСА остаётся единственным инструментом круглосуточного наблюдения. Сильные ветры и метели искажают голографические траектории носителей и усиливают турбулентные эффекты. Ледяной покров — сложная среда: механизм рассеяния СВЧ-волн зависит от влажности снега, наличия корки, стадии таяния. Низкие температуры влияют на стабильность генераторов и приёмников, добавляя фазовые наводки. Частые ледовые явления (сжатия, торосы) требуют обработки с высоким разрешением доплеровских сдвигов. При этом фазовая когерентность должна сохраняться даже в условиях циклонов.

Методы компенсации погодных искажений и пути повышения достоверности данных

Влияние погодных условий не критично. Современные алгоритмы обработки позволяют заметно снизить деградацию.

Автофокусировка (алгоритмы минимальной энтропии). Они позволяют слепо восстанавливать РСА-изображения как при параметрической, так и при непараметрической неопределённости. Это даёт возможность скорректировать фазовые искажения до формирования итогового РЛИ.

Компенсация аппаратурных искажений. Выполняется с помощью эталонных измерений на безэховых стендах или с использованием обратных матриц 4×4 для поляриметрических каналов.

Коррекция по опорным данным GPS/ГЛОНАСС. Измеряется абсолютная фазовая задержка в атмосфере навигационными приёмниками, затем вводится поправка в РСА-тракт.

Постобработка с привлечением оптических данных. Для районов с малым облачным покровом сопоставление разнородных изображений устраняет ошибки геопривязки, вызванные тропосферными неоднородностями.

Выбор зондирующих диапазонов. Там, где высока вероятность осадков, рекомендуются С- и L-диапазоны — они наиболее сбалансированы по параметру «разрешение/погодоустойчивость».

Значение для целевых задач

Картографирование

В геодезии и картографии искажения из-за погоды (особенно влажностные эффекты рефракции) ограничивают точность дифференциальной РСА-интерферометрии. При наблюдениях за оседанием грунта или тектоникой сдвиг фазы от тропосферных неоднородностей сравним с полезным сигналом. Ошибка может составлять сантиметры. Вот почему в ответственных картографических проектах требуется либо отделять атмосферный вклад, либо использовать данные из безоблачных периодов. В целом же создание планов местности и карт землепользования остаётся возможным при самом широком спектре погод.

Мониторинг чрезвычайных ситуаций

Главное условие оперативность: при кризисном реагировании данные нужны в течение часа. Погодные ограничения наиболее критичны при мониторинге наводнений. Интенсивный дождь создаёт наложенную помеху на РЛИ, маскирующую границу вода/суша. Однако современные системы классификации земных покровов умеют фильтровать обратное рассеяние от капель дождя. Поэтому задержки с информацией редко превышают 3–6 часов.

Арктический мониторинг

Глобальное потепление и рост судоходства по Северному морскому пути делают первоочередной задачей спутниковый ледовый мониторинг. Здесь РСА незаменимы. Всепогодность и независимость от времени суток позволяют непрерывно наблюдать дрейф льдов, формирование заторов, состояние ледовых полей. Росгидромет и другие арктические службы в своих регламентах используют радиолокационную съёмку с разрешением не хуже 250 м/пиксель для оперативных ледовых карт. Явных отказов из-за осадков практически не фиксируется. Единственное ограничение — сильный снегопад, который снижает контраст между чистой водой и молодым льдом.

Заключение

Проведённый анализ позволяет заключить: концепция «абсолютной всепогодности» РСА, доминирующая в научно-популярной литературе, нуждается в уточнении. Несомненно, радиолокаторы с синтезированной апертурой — самый устойчивый к погоде инструмент космического мониторинга по сравнению с оптическими и ИК-сенсорами. Но интенсивные осадки, атмосферная турбулентность, вариации влажности в тропосфере, ионосферные возмущения способны существенно деградировать качество РЛИ. А именно: снижать разрешение по азимуту, вносить геометрические искажения, приводить к потере когерентности при интерферометрической обработке.

При планировании съёмок в регионах с высокой вероятностью сильных дождей целесообразно ориентироваться на С-диапазон и применять

поляриметрические режимы (VV+VH или HH+HV). Это помогает лучше разделить вклад осадков и подстилающей поверхности. В Арктике «золотым стандартом» оперативного ледового мониторинга остаётся комбинация РСА-данных с низкочастотными пассивными микроволновыми радиометрами. Она гарантирует надёжность даже во время полярной ночи и при низкой облачности.

Таким образом, РСА занимает лидирующее положение как инструмент, обеспечивающий компромисс между погодной независимостью, пространственно-временным разрешением и достоверностью дешифрирования. Всепогодность же следует понимать не как панацею, а как свойство, требующее грамотного учёта ограничений и адаптивного выбора алгоритмов обработки.

Литература

1. Татаренков К.В. Особенности применения радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны для всепогодного обнаружения объектов // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 5. – С. 16–20. – DOI: 10.18127/j00338486-202205-02.
2. Горячкин О.В. Влияние случайных фазовых ошибок на разрешающую способность радиолокатора с синтезированной апертурой // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 10.
3. Захаров А.И. Отделение влияния атмосферных помех от динамики земной поверхности на дифференциальных РСА интерферограммах // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2014.
4. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Сезонные вариации отражательных свойств растительных покровов. РЭНСИТ, 2019, 11(1):49-56.
5. Мелентьев В.В., Смирнова А.С., Милова В.М. и др. Атлас РСА сигнатур ледяного покрова арктических морей: особенности подготовки и использования // Девятнадцатая международная конференция

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2021.

6. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Радиотехника и электроника. – 1992. – № 1. – С. 90–95.
7. ГОСТ Р 58113-2018. Нефтяная и газовая промышленность. Арктические операции. Управление ледовой обстановкой. Обеспечение метеорологической и гидрологической информацией. – М.: Стандартинформ, 2018.
8. Рекомендация МСЭ-R P.676-13. Затухание в атмосферных газах и связанные эффекты = Attenuation by atmospheric gases and related effects. – Женева: Международный союз электросвязи, 2022. – 32 с. – (Серия Р: Распространение радиоволн). Женева: Международный союз электросвязи, 2022. – 32 с.