

## К вопросу об определении диаграммы рассеяния ледяного покрова по данным бистатистического дистанционного зондирования в L-диапазоне

Д. А. Ковалдов<sup>1</sup>, Ю. А. Титченко<sup>1</sup>, В. Ю. Караев<sup>1</sup>,  
М. А. Панфилова<sup>1</sup>, В. П. Лопатин<sup>2</sup>, В. Ф. Фатеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*  
*E-mail: d.kovaldov@ipfran.ru*

<sup>2</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Солнечногорск, Московская обл., 141570, Россия*  
*E-mail: lopatin@vniiftri.ru*

Рассмотрены возможности бистатистической схемы зондирования, реализуемой с помощью спутника TDS-1 (*англ.* TechDemoSat-1) и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), для обнаружения морского льда и построения его диаграммы рассеяния в L-диапазоне. Предлагаемый подход основан на определении диаграмм рассеяния морского волнения и морского льда по частотно-временному спектру отражённого сигнала ГНСС (DDM, *англ.* Delay-Doppler Map). В процессе обработки анализируется доплеровский спектр (ДС) отражённого сигнала, регистрируемого приёмником в бистатистической схеме зондирования ГНСС-Рефлектометрии (ГНСС-Р). В такой схеме измерение ширины ДС зависит от проекции скорости приёмника на отражённые лучи, соединяющие отражающие точки на поверхности с приёмником. В этом случае можно считать, что падающее излучение ГНСС в области отражения имеет плоский фронт, поэтому от проекции скорости излучателя зависит только центральная частота смещения ДС. Таким образом, зная геометрию задачи «излучатель – точка зеркального отражения – приёмник», можно для каждой частоты измеренного ДС определить соответствующий угол скольжения отражённого луча. Предлагаемый алгоритм применялся для данных спутника TDS-1, которые были получены при измерениях над Антарктикой в районе моря Уэдделла и в Атлантическом океане, а также в Охотском море. Для верификации типа отражающей поверхности (лёд/вода) использовались данные о сплочённости ледяного покрова радиометра AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer-2). Подтверждено предположение, что ширина ДС от морского льда существенно меньше, чем от морского волнения. Были восстановлены диаграммы рассеяния для морского волнения и морского льда, затем полученные зависимости сравнивались с соотношениями, установленными по данным радиолокатора миссии GPM (*англ.* Global Precipitation Measurement) в Ku-диапазоне.

**Ключевые слова:** ГНСС, квазизеркальное отражение, L-диапазон, диаграмма рассеяния, дистанционное зондирование ледяного покрова, TDS-1

Одобрена к печати: 07.11.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308

### Введение

Ледяной покров в арктической и антарктической зоне играет важную роль в глобальном тепловом балансе, влияет на циркуляцию атмосферы и температурные условия на поверхности Земли. Развитие дистанционного зондирования важно для мониторинга площади, занимаемой льдом, а также для выбора безопасных маршрутов судов. В настоящее время основную часть информации о состоянии ледяного покрова получают с помощью сенсоров дистанционного зондирования, выполняющих измерения: 1) в оптическом и инфракрасном (ИК) диапазонах и 2) в области сверхвысоких частот (СВЧ). Возможности первой группы приборов ограничены погодными условиями и освещённостью наблюдаемого региона: облака, туман и полярная ночь делают измерения невозможными в оптическом диапазоне. В свою очередь, СВЧ-методы дистанционного зондирования являются дорогостоящими, что приводит к сильным ограничениям в повторяемости наблюдения за отдельными регионами, а также существуют пределы для пространственного разрешения.

Проведённые ранее исследования показали, что при малых углах падения, когда доминирующим механизмом обратного рассеяния выступает квазизеркальное рассеяние, наблюдается существенное отличие зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для морского волнения и ледяного покрова (Panfilova, Karaev, 2023, 2024). Такая разница в зависимостях сечения обратного рассеяния от угла падения для льда и воды может приводить к различию в доплеровских спектрах (ДС), если измерения выполняются с движущегося радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны (Karaev et al., 2022a, b).

Более пяти десятилетий назад было предложено использовать отражённые сигналы спутниковых систем для решения задач дистанционного зондирования бистатистическими методами (Sutton et al., 1973). При приёме отражённых сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) геометрия задачи является бистатистической, однако механизм рассеяния остаётся квазизеркальным. В связи с этим возникло предположение, что доплеровские спектры могут стать надёжным критерием для разделения ледяного покрова и морского волнения в бистатистической постановке задачи. В настоящее время в состав ГНСС входят ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) (Россия), BeiDou (Китай), GPS (*англ.* Global Positioning System) (США), Galileo (Европа). Существуют также региональные системы навигации, таковыми являются QZSS (*англ.* Quasi-Zenith Satellite System) (Япония) и IRNSS (*англ.* Indian Regional Navigation Satellite System) (Индия) ([https://gssc.esa.int/navipedia//index.php/GNSS\\_signal](https://gssc.esa.int/navipedia//index.php/GNSS_signal)). В предложенной концепции передатчик ГНСС вместе с приёмником, способным обрабатывать отражённые сигналы ГНСС, становятся бистатистическим радиолокатором (Hall, Cordey, 1988).

Идея анализировать сигналы спутниковых навигационных систем, отражённые водной поверхностью, для измерения высоты приливов была предложена в 1993 г. (Martín-Neira, 1993). Рекомендация использовать отражённое излучение спутниковых навигационных систем для решения широкого круга задач показалась перспективной, и теоретические аспекты такого подхода к дистанционному зондированию стали быстро развиваться (Черноухов, Добыкин, 1995; Cardellach et al., 2011; Zavorotny et al., 2014).

Первые эксперименты по приёму отражённого GPS-сигнала на самолётах были проведены в середине 2000-х гг. (Nogués-Correig et al., 2007). Затем основные исследования отражения сигнала L-диапазона морской поверхностью были выполнены с помощью космических радиометров SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) и Aquarius (Lagerloef et al., 2008; McMullan et al., 2008). Малые спутники английской миссии мониторинга катастроф UK-DMC (*англ.* United Kingdom – Disaster Monitoring Constellation) (Gleason et al., 2005) начиная с 2004 по 2011 г. успешно провели ряд экспериментов для демонстрации возможностей анализа отражённых GPS-сигналов от воды, суши и ледяного покрова (Clarizia et al., 2009; Gleason, 2006, 2010; Gleason et al., 2009). Уникальные эксперименты по приёму отражённых от водной поверхности сигналов ГЛОНАСС были выполнены на морском полигоне в Швеции (Hobiger et al., 2014).

Методы ГНСС-Р (ГНСС-Рефлектометрия) позволяют оценить геофизические параметры, такие как высоту геоида и уклонение отвесной линии (Лопатин и др., 2024; Lopatin, Fateev, 2022), скорость приводного ветра (Clarizia et al., 2014; Li, Huang, 2014), влажность почвы (Alonso Arroyo et al., 2014; Chew et al., 2016), характеристики растительного (Camps et al., 2016; Yang et al., 2020), снежного (Larson et al., 2009; Najibi et al., 2013) и ледяного покрова (Cartwright et al., 2019; Yan, Huang, 2019). В зависимости от платформы приёмника ГНСС (стационарной, самолётной или космической) спектр применения этой техники и конкретные методы обработки отражённых сигналов могут различаться.

В настоящее время системы ГНСС-Р с приёмниками, имеющими спутниковое базирование, активно развиваются. На базе исследований, проведённых в рамках UK-DMC, был разработан спутник TDS-1 (*англ.* TechDemoSat-1), который работал в период 2014–2018 гг. (Unwin et al., 2016). Этот аппарат космического агентства Великобритании (*англ.* UK Space Agency – UKSA) лёг в основу при разработке миссии NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) по исследованию экстремальных атмосферных явлений CYGNSS (*англ.* Cyclone Global Navigation Satellite System) (2016 – наст. вр.) в широтах от  $-40$  до  $40^\circ$  (Ruf et al.,

2016), состоящей из группировки из восьми спутников-приёмников на одной орбите. Также работают миссии PRETTY (*англ.* Passive REflecTomeTry and dosimetrY) (Dielacher et al., 2019), Fengyun-3 (Huang et al., 2024; Sun et al., 2023) и готовится к запуску миссия Triton (Juang et al., 2016).

В настоящей работе предложен метод определения диаграммы рассеяния поверхности по ДС сигнала ГСС, отражённого морской поверхностью или морским льдом. Полученная информация позволит проверить теоретические модели рассеяния в квазизеркальной области отражения в L-диапазоне и продвинуться в разработке теоретической модели рассеяния для морского льда при углах отражения близких к зеркальным. Использовались данные спутника TDS-1, полученные над взволнованной водной поверхностью в Атлантическом океане (между Южной Америкой и Африкой) и морским льдом в Антарктическом регионе (море Уэдделла) в ноябре 2018 г. Также рассматривались данные, полученные над Охотским морем в феврале – марте 2017 г. Область выбрана таким образом, чтобы попадали участки, покрытые льдом.

### ГСС-Р и TDS-1

В качестве излучателя в бистатической схеме выступают спутники системы GPS и приёмником является TDS-1 с высотой орбит 20 180 км и 635 км соответственно. В данной работе мы ограничимся приёмом отражённого сигнала L1 (несущая частота 1575,42 МГц). На борту спутника TDS-1 установлен приёмник GPS-сигнала SGR-ReSI (*англ.* Space GPS Receiver Remote Sensing Instrument) с частотой дискретизации 16,367 МГц. Также приёмник способен записывать отражённый сигнал одновременно с четырёх различных спутников GPS. Упрощённая геометрия задачи (не в масштабе) показана на *рис. 1*.

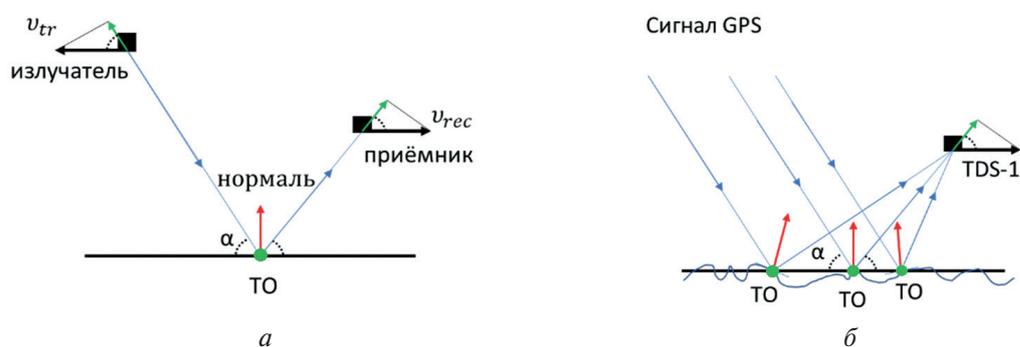


Рис. 1. Плоская геометрия ГСС-Р

На *рис. 1а* показан пример плоской отражающей поверхности, в котором скорости излучателя ( $v_{rec}$ ) и приёмника ( $v_{tr}$ ) направлены в противоположные стороны параллельно поверхности. Зелёными стрелками показаны проекции соответствующих скоростей на направление зондирования к точке отражения, которая отмечена зелёным цветом,  $\alpha$  — угол скольжения падающего и отражённого сигнала, красной стрелкой показана нормаль к отражающей поверхности в точке отражения.

В данной схеме измерения из-за большой разности высоты орбит передатчика и приёмника можно считать, что падающая волна на отражающей площадке имеет постоянный угол скольжения (плоский фронт). В этом случае схема хода лучей, попадающих в приёмник после отражения от шероховатой поверхности, показана на *рис. 1б*. Отражённый сигнал попадает в приёмник под разными углами. Каждому углу соответствует собственная проекция скорости, а следовательно, своя частота доплеровского смещения, что формирует ширину ДС. Если выполнить обратную процедуру и перейти от частот доплеровского смещения в углы падения, то можно получить диаграмму рассеяния поверхности. Для этого необходима

информация о скорости и положении излучателя и приёмника, положении точки отражения и измеренный ДС.

Данные со спутника TDS-1 сохраняются в файлы формата NetCDF (*англ.* Network Common Data Form). Основная информация находится в файлах метаданных (*англ.* metadata) и DDM (*англ.* Delay-Doppler Map). В метаданных сохраняются координаты положения и компоненты скорости излучателя и приёмника в геоцентрической системе координат и расчётная точка зеркального отражения на эллипсоиде WGS 84 (*англ.* World Geodetic System 1984). Сохраняются необходимые константы для пересчёта DDM из последовательных номеров в частоту доплеровского смещения (в Гц) и временную задержку (в с). Информация о спутнике, излучателе и канале приёма также записывается в этот файл. Последнее необходимо для сопоставления положения излучателя и приёмника в момент записи сигнала, так как данные о положении и характеристиках приёмника хранятся в переменных NetCDF файла метаданных, а частотно-временные спектры отражённого сигнала и параметры положения и скорости излучателя находятся по группам, соответствующим группам в файле DDM (<http://mer-bys.co.uk/resources/documentation>).

### Формирование и вид DDM

Как уже отмечалось, основной характеристикой принимаемого сигнала в ГНСС-Р является DDM, по которому определяются параметры отражающей поверхности. DDM — частотно-временной спектр сигнала, получаемый при применении фурье-преобразования к взаимной корреляционной функции отражённого поверхностью сигнала и сигнала, принятого напрямую от навигационного спутника. Для примера рассмотрим треки TDS-1 в ноябре 2018 г. при пролёте над южной частью Атлантического океана и над морем Уэдделла в Антарктическом регионе.

Трёхмерные координаты положения излучателя и приёмника пересчитываются в широту и долготу, а координаты точки отражения сохраняются в таком виде в метаданных.

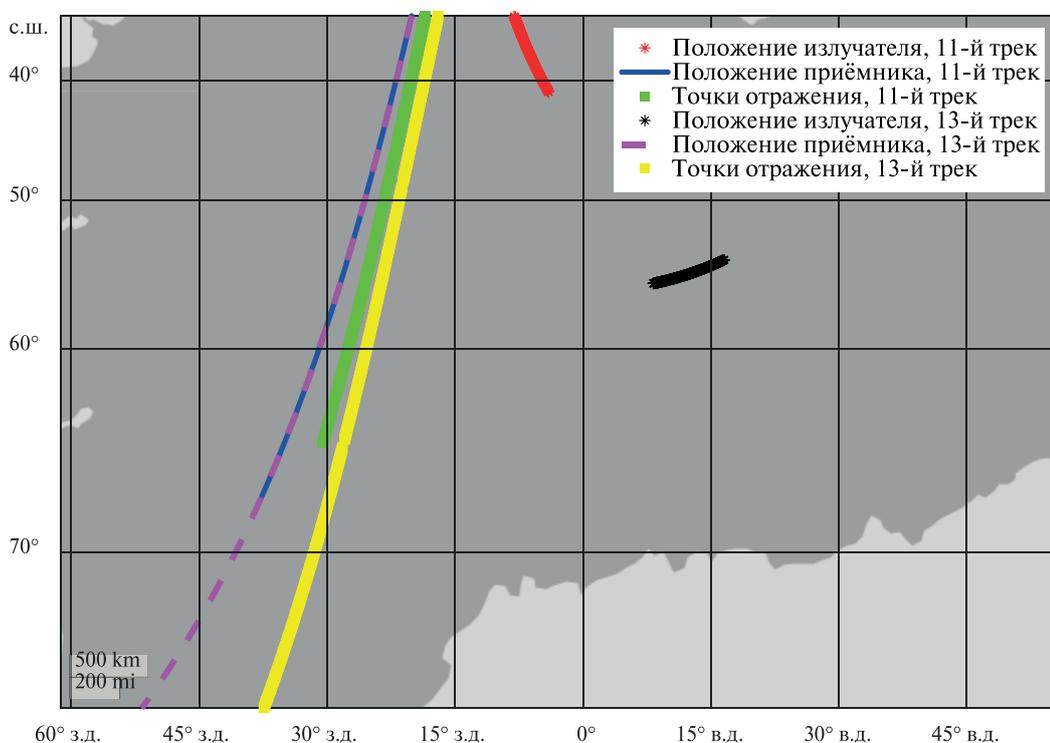
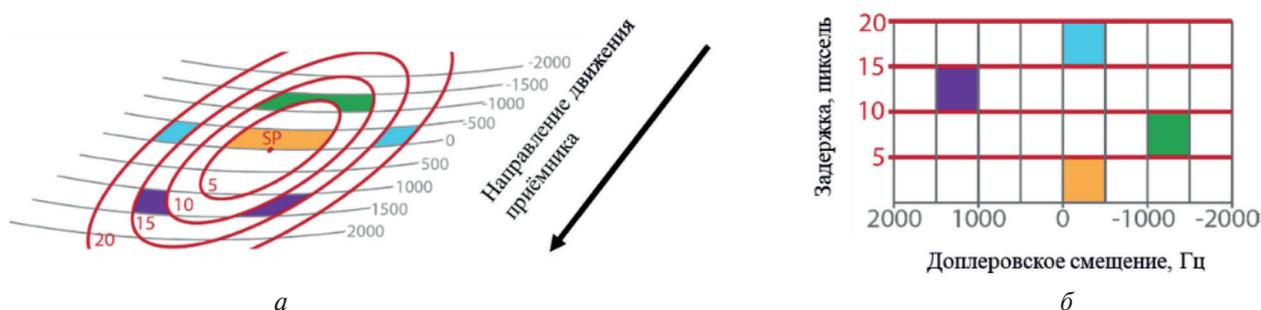


Рис. 2. Положение излучателя (красные точки — 11-й трек, чёрные — 13-й трек), траектория движения приёмника (синяя линия — 11-й трек, фиолетовая штриховая — 13-й трек) и точки зеркального отражения (зелёные — 11-й трек, жёлтые — 13-й трек)

На *рис. 2* (см. с. 297) приведено положение излучателя и траектория движения приёмника 20 ноября 2018 г. Положения приёмника и излучателя записываются по-разному в силу того, что одновременно может приниматься сигнал с четырёх спутников GPS. На *рис. 2* видно, что положения приёмника, соответствующие 13-му треку и 11-му треку, совпадают на некотором участке движения приёмника, что говорит о том, что в эти моменты регистрировалось два сигнала от двух разных спутников GPS, положения которых указаны на рисунке чёрными и красными точками. Треки соотносятся с группами в метаданных и в файле с DDM, где каждой точке зеркального отражения соответствует свой DDM.

На *рис. 3* показана схема формирования DDM относительно зеркальной точки с отражающей областью. Линии постоянного доплеровского смещения и постоянной задержки показаны серым и красным цветом соответственно (см. *рис. 3а*). Примеры областей имеют цветовую кодировку, чтобы соответствовать области на поверхности (см. *рис. 3а*) и тому, как они отображаются на DDM (см. *рис. 3б*). Далее выберем несколько точек в 11-м треке, относящихся к взволнованной водной поверхности, и в 13-м треке, соответствующих ледяному покрову, и построим для них DDM.

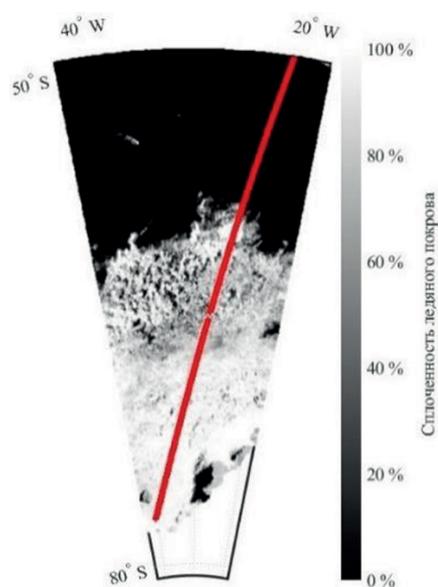


*Рис. 3.* Схема формирования DDM (Cartwright, 2021)

Для подтверждения того, что на поверхности в 13-м треке был лёд, использовались данные радиометра AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) о сплочённости ледяного покрова в антарктической области, предоставляемые Бременским университетом (*нем.* Universität Bremen) (Melsheimer, Spreen, 2019). Сплочённость льда представлена в процентах: 0 — чистая вода, 100 — сплошной лёд. Часть точек зеркального отражения 13-го трека нанесены на карту сплочённости ледяного покрова в море Уэдделла на *рис. 4*.

На *рис. 5* (см. с. 299) приведены DDM, формируемые при отражении от водной поверхности и ледяного покрова. Отличия между ними очевидны, и в современных исследованиях нередко используются исходные DDM для определения типа отражающей поверхности (лёд/вода). Для этого применяют нейронные сети (Yan et al., 2017; Yan, Huang, 2018) или сам DDM в качестве переменной и смотрят на дифференциальную характеристику в одном треке (Zhu et al., 2017).

В настоящей работе предлагается использовать ДС отражённого сигнала, который можно рассчитать интегрированием по времени DDM с последующим вычитанием уровня шума, для получения среднего ДС по всей площадке. Уровень шума для каждого DDM рассчитывается как среднее значение первых пяти строк (область показана красным прямоугольником на *рис. 5*, первый слева DDM от воды).



*Рис. 4.* Карта сплочённости ледяного покрова с нанесёнными на неё зеркальными точками (красные)

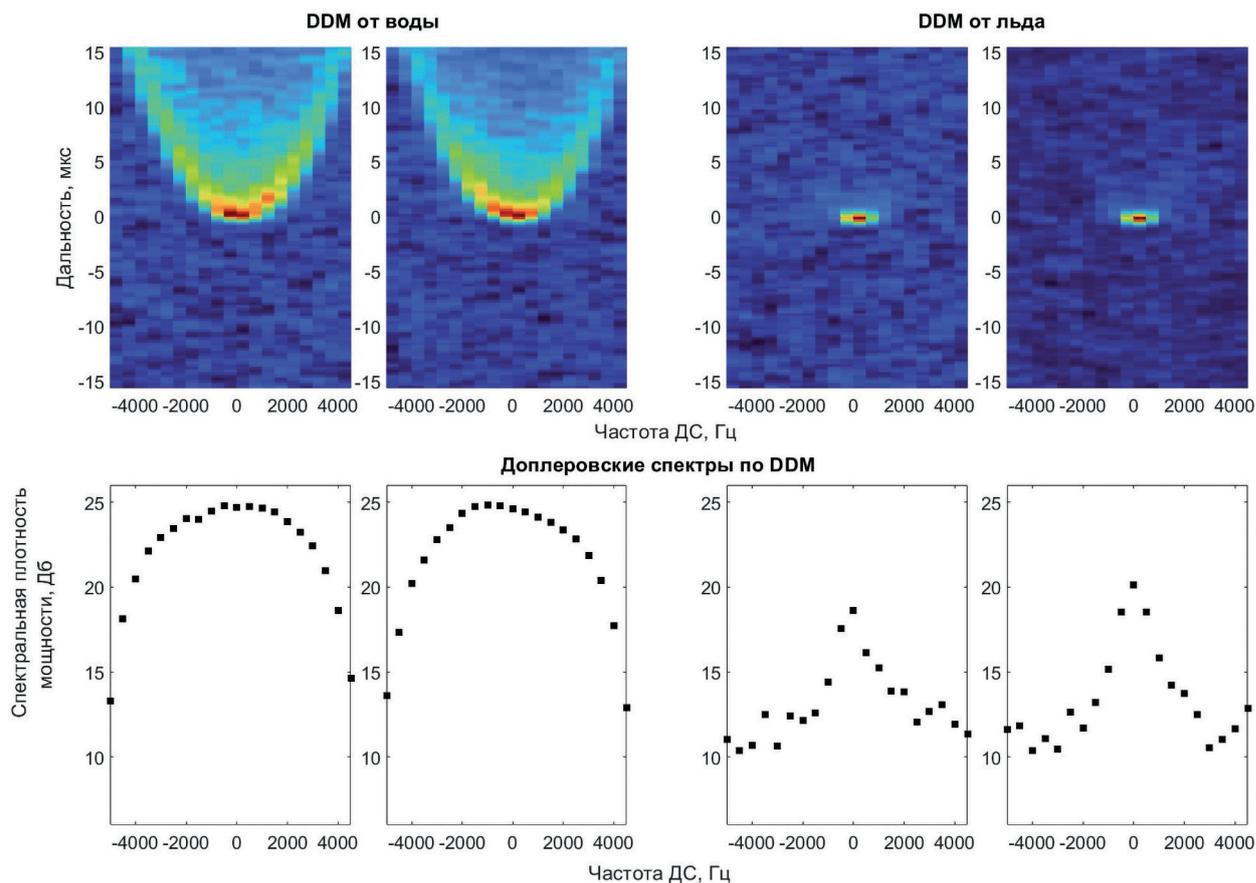


Рис. 5. DDM и доплеровские спектры для взволнованной водной поверхности (слева) и для ледяного покрова (справа)

Для удобства сравнения на рис. 5 представлены DDM, нормированные на свои максимумы, используемая при построении рисунков шкала дана внизу. Для каждого рассматриваемого DDM на рис. 5 снизу приведены соответствующие доплеровские спектры, рассчитанные по ненормированным DDM после вычитания уровня шума (в дБ). В результате ДС получаются с разрешением 500 Гц в интервале  $(-5; 4,5)$  кГц.

Тем не менее получаемые при интегрировании абсолютные значения спектральной плотности мощности сложно интерпретировать и сравнивать друг с другом в силу того, что они зависят от большого количества параметров, а не только от характеристик отражающей поверхности. Таким образом, сложность задачи по калибровке прибора, постоянно меняющаяся геометрия и погодные условия затрудняют анализ абсолютных значений мощностных характеристик. В данной работе основное внимание уделяется исследованию формы спектральных характеристик отражённого сигнала, которая зависит от параметров отражающей поверхности.

### Алгоритм перехода от доплеровского спектра к диаграмме рассеяния поверхности

Для пересчёта полученных доплеровских спектров в зависимость от угла падения воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Перейдём из трёхмерной задачи в двумерную. Для этого воспользуемся информацией о положении излучателя и точки зеркального отражения и сопоставим с положением приёмника.
2. Для первичного моделирования геометрии рассмотрим сферу с радиусом Земли. Через точку зеркального отражения, нанесённую на сферу, проведём касательную плоскость. Это задаст отражающую плоскость в нашей системе.

3. На основе трёх точек: положения излучателя, приёмника и точки зеркального отражения строим плоскость зондирования (рис. 6). В плоскости зондирования лежат направления зондирования (прямые проходящие через положения излучателя/приёмника и точку отражения на плоскости) излучателя и приёмника. Угол между направлением зондирования приёмника и излучателя принимается за центральный угол. На рис. 6 обозначен как  $\theta_{\text{ц}}$ . Для центрального угла в случае движения параллельно отражающей плоскости доплеровское смещение  $f_{\text{ц}}$  запишется следующим образом:

$$f_{\text{ц}} = \frac{v_{\text{tr}} \cos(\alpha) + v_{\text{rec}} \cos(\alpha)}{\lambda},$$

где  $\alpha$  — угол скольжения падающего и отражённого сигнала;  $\lambda$  — длина волны излучения. В общем случае для определения проекции вектора скорости излучателя и приёмника на соответствующее направление зондирования используется скалярное произведение между векторами скорости и направляющими векторами зондирования, начало которых всегда откладывается от точки отражения, а конец — положение соответствующего спутника. Таким образом,  $\cos(\alpha)$  может принимать отрицательные значения, что позволяет учесть разные знаки направления векторов скорости.

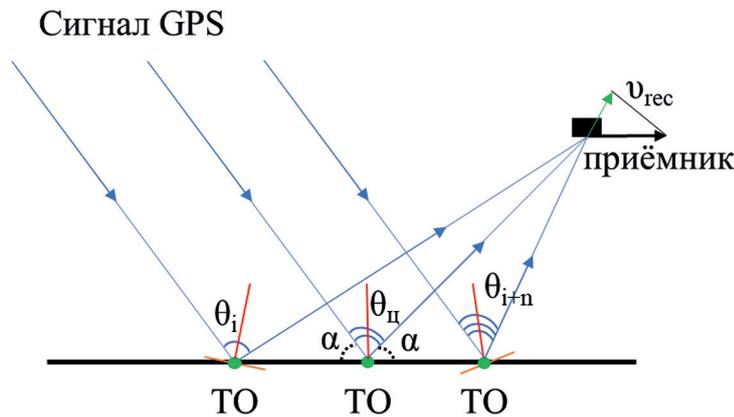


Рис. 6. Схема распространения сигнала в плоскости зондирования

4. Строим прямую, образованную пересечением двух плоскостей (отражающей плоскости и плоскости зондирования, на рис. 6 чёрная прямая), назовём её линией отражения. Она будет использоваться для расчёта зависимости доплеровского смещения от угла падения.
5. Выберем несколько точек на линии отражения. Так как сигнал излучателя приходит к поверхности с постоянным углом скольжения  $\alpha$ , на формирование доплеровского спектра влияет только изменение направления приёма.
6. Для каждой выбранной точки на линии зондирования вычислим проекцию скорости приёмника на направление приёма и угол между направлением падающего и отражённого излучения. Для примера на рис. 6 выбраны две точки, для которых такие углы соответственно  $\theta_i$  и  $\theta_{i+n}$ .
7. Каждая точка характеризуется своим углом  $\theta_i$  между направлением от точки отражения к приёмнику и от точки отражения к излучателю. Рассчитаем разницу между этим углом  $\theta_i$  и центральным углом  $\theta_{\text{ц}}$  и разделим на два, чтобы получить угол между биссектрисами соответствующих углов:

$$\varphi_i = (\theta_i - \theta_{\text{ц}})/2,$$

где  $\varphi_i$  — угол между биссектрисой центрального угла и биссектрисой в точке  $i$  на линии зондирования. Для каждого такого угла  $\varphi_i$  устанавливается в соответствие разность

между доплеровским смещением от  $i$ -й точки отражения с углом  $\theta_i$  и от точки отражения с углом  $\theta_{\text{ц}}$ :

$$\Delta f_i = f_i - f_{\text{ц}} = \frac{v_i - v_{\text{rec}_i}}{\lambda},$$

в которой  $f_i$  — доплеровское смещение при отражении сигнала от  $i$ -й точки отражения;  $v_{\text{rec}_i}$  — проекция скорости приёмника на направление приёма для центрального угла;  $v_i$  — проекция скорости приёмника на направление приёма для  $i$ -й точки отражения.

Таким образом получается установить соответствие между углами падения и частотами доплеровского спектра отражённого поверхностью сигнала. Недостаток такого подхода связан с тем, что точки на линии отражения выбираются последовательно с постоянным шагом. Это приводит к неравномерному шагу по доплеровскому спектру. Для устранения неравномерности шага используется аппроксимация полученной зависимости смещения частоты от угла падения полиномом 5-й степени. Следует отметить, что точки выбираются таким образом, чтобы получаемые пределы по частотам всегда были больше, чем реальные спектры ( $>4500$  и  $<-5000$  Гц), чтобы избежать некорректной аппроксимации на концах зависимости.

### Диаграмма рассеяния поверхности

Воспользуемся предложенным алгоритмом для определения диаграммы рассеяния поверхности и применим его к ДС, полученным при отражении от взволнованной водной поверхности в Атлантическом океане (оранжевый и красный круги, фиолетовый ромб и синий квадрат на *рис. 7в*, см. с. 302), ледяного покрова в море Уэдделла (красный круг, синий ромб и зелёный квадрат, см. *рис. 7б*) и участков, покрытых льдом в Охотском море (оранжевый и синий круги, см. *рис. 7а*).

Как уже обсуждалось, в данной работе анализируется диаграмма рассеяния — зависимость спектральной плотности мощности от угла падения, которая связана с удельной эффективной площадью рассеяния (УЭПР) или нормированным сечением обратного рассеяния. Для удобства сравнения данных, полученных в разных точках (условиях), нормируем зависимости на максимумы.

Видно, что диаграмма рассеяния для ледяного покрова обычно значительно уже, чем для морского волнения (см. *рис. 7г* и *д*). А самое главное, вид диаграммы для морского льда существенно отличается от зависимости для морского волнения.

Для сравнения полученных диаграмм рассеяния взволнованной водной поверхности и ледяного покрова воспользуемся зависимостями нормированного сечения обратного рассеяния сигнала Ku-диапазона от угла падения, полученного по данным двухчастотного радиолокатора DPR (*англ.* Dual-frequency Precipitation Radar), установленного на спутнике миссии GPM (*англ.* Global Precipitation Measurement) (GPM..., 2014). Особенностью данного прибора является узкая диаграмма направленности антенны:  $0,7 \times 0,7^\circ$ . Угловая зависимость измеряется с помощью сканирования диаграммой направленности антенны в направлении, перпендикулярном направлению движения. Пример угловой зависимости приведён на *рис. 8* (см. с. 302) (Panfilova, Karaev, 2024).

При надирном зондировании в случае DPR (обратное рассеяние, узкая диаграмма направленности антенны) отражение происходит от участков, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Лёд можно считать плоским и обратное отражение имеет ярко выраженный пик и быстро спадает с увеличением угла падения. Морское волнение обладает уклонами, и при нулевом угле падения количество горизонтальных участков волнового профиля меньше, чем у льда, и уменьшается с возрастанием интенсивности волнения. В результате сечение обратного рассеяния для ледяного покрова при нулевом угле падения намного больше, чем для морского волнения в области малых углов падения (см. *рис. 8а* и *б*), но быстро становится меньше при увеличении угла падения.

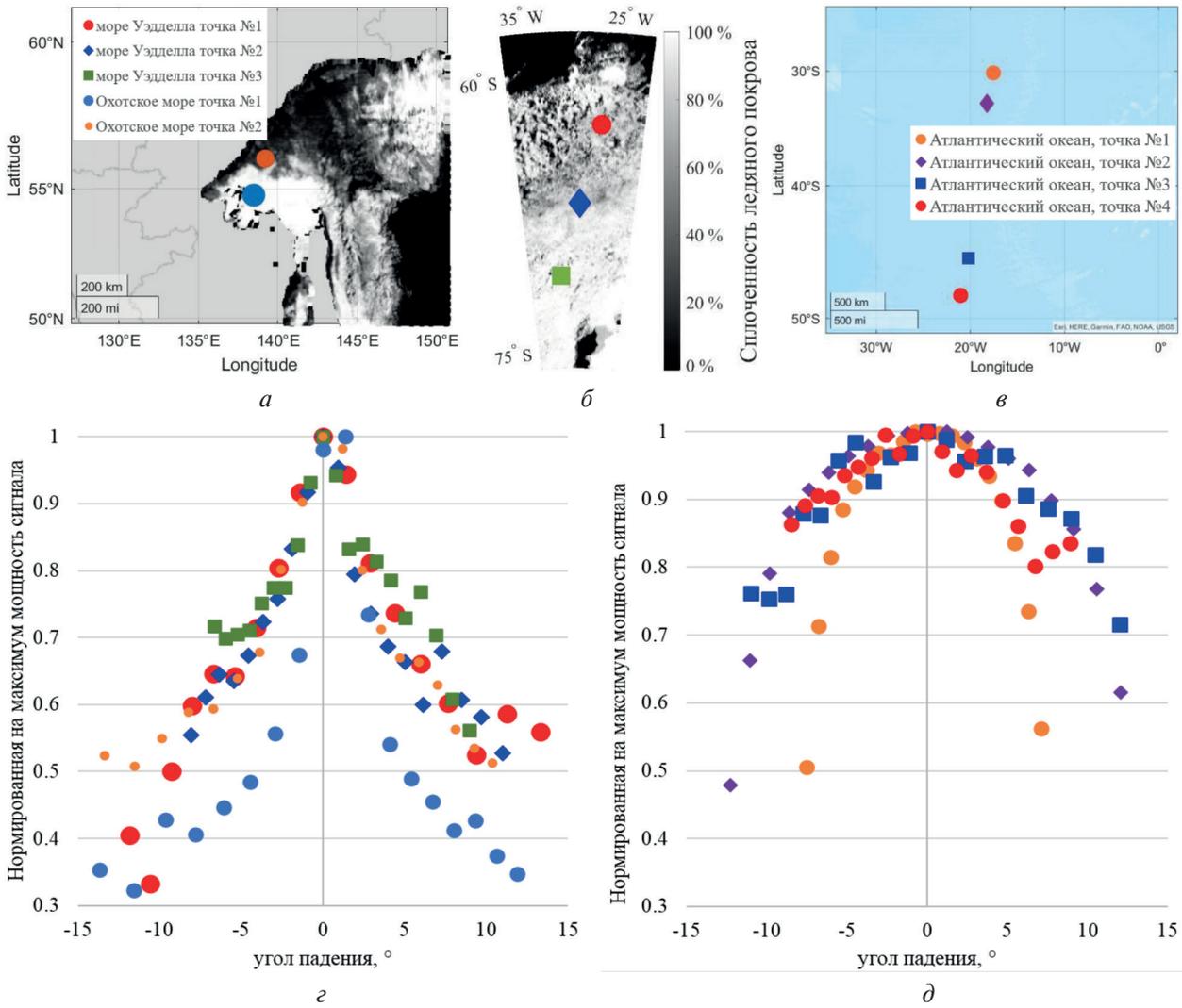


Рис. 7. Карта с нанесёнными рассматриваемыми точками сплошности ледяного покрова моря Уэдделла в Антарктике (б), Охотского моря (а), области Атлантического океана (в) с нанесёнными рассматриваемыми точками. Диаграммы рассеяния покрытой льдом (z) и взволнованной водной поверхности, нормированные на максимум; цвета зависимостей соответствуют точкам на картах (а), (б) и (в)

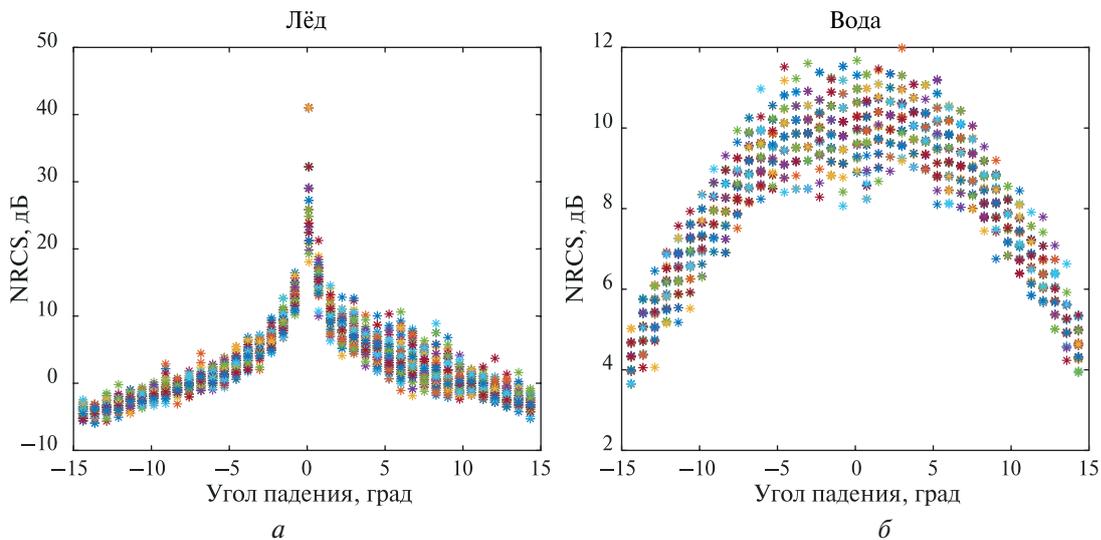


Рис. 8. Зависимость сечения обратного рассеяния ледяного покрова (а) и взволнованной водной поверхности (б) от угла падения в Ку-диапазоне по данным DPR

Отметим, что в случае с TDS-1 наблюдается уменьшение разницы в мощности отражённого сигнала между льдом и волнением (ДС на *рис. 5* и NRCS (*англ.* Normalized Radar Cross-Section) на *рис. 8*). При бистатистическом зондировании в случае TDS-1 (прямое рассеяние, широкая диаграмма направленности) отражение для ледяного покрова происходит только от «настоящей» зеркальной точки (угол падения равен углу отражения). Приёмная антенна является широкой, поэтому для морского волнения в формировании отражённого сигнала принимают участие не только горизонтальные участки, но и участки волнового профиля, имеющие наклон. В результате отражённый сигнал для морского волнения собирается со значительно более широкого пятна и принимаемая мощность значительно увеличивается. Общая площадь отражателей зависит от статистического распределения дисперсии уклонов крупномасштабного волнения. В результате разница между льдом и волнением уменьшается, что и видно на *рис. 5*.

## Заключение

Бистатистическая схема зондирования, реализуемая с помощью спутника TDS-1 и глобальной системы ГНСС-Р, позволяет проводить мониторинг поверхности Земли. В данной работе сравнивались характеристики сигнала, отражённого морской поверхностью и морским ледяным покровом. Данные для сравнения получены при измерениях над Антарктикой в районе моря Уэдделла и в Атлантическом океане в зимний период времени в южном полушарии (20 ноября 2018 г.), а также в областях Охотского моря, покрытых ледяным покровом (2 февраля 2017 г.). Тип отражающей поверхности верифицировался по измерениям радиометра AMSR-2.

Разработан алгоритм, позволяющий по геометрии системы «излучатель – точка зеркального отражения – приёмник» пересчитать частоту доплеровского спектра в углы диаграммы рассеяния поверхности, чтобы сравнивать с зависимостями, полученными по данным моностатистического зондирования. Алгоритм основан на предположении о падении на отражающую поверхность плоской волны (один угол падения на отражающей площадке) и высокой скорости движения приёмника, что позволяет не учитывать орбитальные скорости волнения. Новый алгоритм был применён к данным ГНСС-Р.

Характер восстановленных диаграмм рассеяния сравнивался с зависимостями сечения обратного рассеяния от угла падения в Ku-диапазоне, полученным по данным DPR. Было показано (см. *рис. 7г* и *д* и *8*), что ширина диаграммы рассеяния зависит от типа подстилающей поверхности (лёд/вода) и является надёжным критерием перехода от одного типа поверхности к другому. Найденные угловые зависимости спектральной плотности мощности TDS-1 и известные зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для морского волнения и ледяного покрова похожи.

Мощность отражённого сигнала не является надёжным критерием для классификации типа подстилающей поверхности, так как зависит от нескольких параметров. Отметим, что если сравнить данные DPR с TDS-1, то увидим, что для обратного рассеяния при зеркальном отражении (угол падения 0) с узкой диаграммой антенны разность сечений обратного рассеяния (мощности отражённого сигнала) ледяного покрова и морского волнения на *рис. 8а* и *б* превышает 20 дБ. В случае бистатистического зондирования с широкой диаграммой антенны приёмника разность будет значительно меньше (см. *рис. 5* — доплеровские спектры).

В алгоритмах классификации отражающей поверхности можно использовать несколько критериев, например: 1) ширину доплеровского спектра; 2) знак второй производной от угловой зависимости и 3) коэффициент эксцесса. Применение нескольких критериев позволит повысить точность классификации.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение предлагаемого алгоритма определения типа подстилающей поверхности и сравнение точности трёх подходов к разработке алгоритма (по ширине доплеровского спектра, знаку второй производной угловой зависимости и коэффициенту эксцесса угловой зависимости спектральной плотности мощности). Будет построена полуэмпирическая модель рассеяния ледяного покрова для случая бистатистического зондирования в L-диапазоне.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

## Литература

1. Лопатин В. П., Мурзабеков М. М., Бобров Д. С. Результаты определения профиля высот геоида и уклонения отвесной линии по сигналам ГНСС, отраженным от водной поверхности // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 21–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-21-30.
2. Черноухов В. В., Добыкин В. Д. Рассеяние электромагнитных волн морской поверхностью при двухпозиционной локализации // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 3. С. 464–471.
3. Alonso Arroyo A., Camps A., Aguasca A. et al. Dual-polarization GNSS-R interference pattern technique for soil moisture mapping // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. V. 7. No. 5. P. 1533–1544. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2320792.
4. Camps A., Park H., Pablos M. et al. Sensitivity of GNSS-R spaceborne observations to soil moisture and vegetation // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 10. P. 4730–4742. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2588467.
5. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O. et al. GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets // Radio Science. 2011. V. 46. No. 6. Article RS0C04. 16 p. DOI: 10.1029/2011RS004683.
6. Cartwright J. Novel applications of GNSS-R data from TechDemoSat-1 to monitoring the cryosphere: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. University of Southampton, United Kingdom, 2021. 151 p.
7. Cartwright J., Banks C. J., Srokosz M. Sea ice detection using GNSS-R data from TechDemoSat-1 // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. Iss. 8. P. 5801–5810. DOI: 10.1029/2019JC015327.
8. Chew C., Shah R., Zuffada C. et al. Demonstrating soil moisture remote sensing with observations from the UK TechDemoSat-1 satellite mission // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. Iss. 7. P. 3317–3324. DOI: 10.1002/2016GL068189.
9. Clarizia M. P., Gommenginger C. P., Gleason S. T. et al. Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. Iss. 2. Article L02608. 5 p. DOI: 10.1029/2008GL036292.
10. Clarizia M. P., Ruf C. S., Jales P., Gommenginger C. Spaceborne GNSS-R minimum variance wind speed estimator // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. No. 11. P. 6829–6843. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2303831.
11. Dielacher A., Fagner H., Moritsch M., Høeg P., Wickert J., Cardellach E., Koudelka O., Beck P., Walker R., Martin-Neira M., Lissi F. P. The passive reflectometer on board of PRETTY // Proc. ESA ARSI+KEO Conf. 2019.
12. Gleason S. Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low Earth orbit: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. University of Surrey, UK, 2006. 223 p.
13. Gleason S. Towards sea ice remote sensing with space detected GPS signals: Demonstration of technical feasibility and initial consistency check using low resolution sea ice information // Remote Sensing. 2010. V. 2. Iss. 8. P. 2017–2039. DOI: 10.3390/rs2082017.
14. Gleason S., Hodgart S., Sun Y. et al. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 6. P. 1229–1241. DOI: 10.1109/TGRS.2005.845643.
15. Gleason S., Lowe S., Zavorotny V. Remote sensing using bistatic GNSS reflections // GNSS Applications and Methods. Norwood, MA: Artech House, 2009. P. 399–436.
16. GPM Data Utilization Handbook. 1<sup>st</sup> ed. JAXA, Japan, 2014. 92 p.
17. Hall C. D., Cordey R. A. Multistatic Scatterometry // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. “Remote Sensing: Moving Toward the 21<sup>st</sup> Century”. 1988. V. 1. P. 561–562. DOI: 10.1109/IGARSS.1988.570200.
18. Hobiger T., Haas R., Löfgren J. S. GLONASS-R: GNSS reflectometry with a frequency division multiple access-based satellite navigation system // Radio Science. 2014. V. 49. Iss. 4. P. 271–282. DOI: 10.1002/2013RS005359.
19. Huang F., Sun Y., Xia J. et al. Progress on the GNSS-R product from Fengyun-3 missions // IGARSS 2024 — 2024 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2024. P. 6717–6720. DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10640688.
20. Juang J.-C., Ma S.-H., Lin C.-T. Study of GNSS-R techniques for FORMOSAT mission // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 10. P. 4582–4592. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2575069.

21. *Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M. et al.* (2022a) Application of the Doppler spectrum of the backscattering microwave signal for monitoring of ice cover: A theoretical view // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Iss. 10. Article 2331. 23 p. DOI: 10.3390/rs14102331.
22. *Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M. et al.* (2022b) On the problem of the sea ice detection by orbital microwave Doppler radar at the nadir sounding // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Iss. 19. Article 4937. 18 p. DOI: 10.3390/rs14194937.
23. *Lagerloef G., Colomb F.C., Le Vine D. et al.* The Aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge // *Oceanography*. 2008. V. 21. No. 1. P. 68–81. DOI: 10.5670/oceanog.2008.68.
24. *Larson K.M., Gutmann E.D., Zavorotny V.U. et al.* Can we measure snow depth with GPS receivers? // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. Iss. 17. Article L17502. 5 p. DOI: 10.1029/2009GL039430.
25. *Li C., Huang W.* An algorithm for sea-surface wind field retrieval from GNSS-R delay-Doppler map // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. V. 11. No. 12. P. 2110–2114. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2320852.
26. *Lopatin V., Fateev V.* Methods of bistatic GNSS-radio altimetry for determining height profile of the ocean and their experimental verification // *Symp. Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019)*. 2022. V. 153. P. 127–132. DOI: 10.1007/1345\_2022\_139.
27. *Martín-Neira M.* A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry // *ESA J.* 1993. V. 17. P. 331–355.
28. *McMullan K.D., Brown M.A., Martín-Neira M. et al.* SMOS: The payload // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 3. P. 594–605. DOI: 10.1109/TGRS.2007.914809.
29. *Melsheimer C., Spreen G.* AMSR-2 ASI sea ice concentration data, Antarctic, version 5.4 (NetCDF) (July 2012 – December 2018) // *PANGAEA*. 2019. DOI: 10.1594/PANGAEA.898400.
30. *Najibi N., Jin S.* Physical reflectivity and polarization characteristics for snow and ice-covered surfaces interacting with GPS signals // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. Iss. 8. P. 4006–4030. DOI: 10.3390/rs5084006.
31. *Nogués-Correig O., Galí E.C., Campderrós J.S., Rius A.* A GPS-reflections receiver that computes Doppler/delay maps in real time // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2007. V. 45. No. 1. P. 156–174. DOI: 10.1109/TGRS.2006.882257.
32. *Panfilova M., Karaev V.* Sea ice detection by an unsupervised method using Ku- and Ka-band radar data at low incidence angles: First results // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Iss. 14. Article 3530. 12 p. DOI: 10.3390/rs15143530.
33. *Panfilova M., Karaev V.* Sea ice detection method using the dependence of the radar cross-section on the incidence angle // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Iss. 5. Article 859. 10 p. DOI: 10.3390/rs16050859.
34. *Ruf C.S., Atlas R., Chang P.S. et al.* New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical convection // *Bull. American Meteorological Soc.* 2016. V. 97. Iss. 3. P. 385–395. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00218.1.
35. *Sun Y., Huang F., Xia J. et al.* GNOS-II on Fengyun-3 satellite series: Exploration of multi-GNSS reflection signals for operational applications // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Iss. 24. Article 5756. 26 p. DOI: 10.3390/rs15245756.
36. *Sutton R., Schroeder E., Thompson A. et al.* Satellite-aircraft multipath and ranging experiment results at L-band // *IEEE Trans. Communications*. 1973. V. 21. No. 5. P. 639–647. DOI: 10.1109/TCOM.1973.1091693.
37. *Unwin M., Jales P., Tye J. et al.* Spaceborne GNSS-reflectometry on TechDemoSat-1: Early mission operations and exploitation // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. No. 10. P. 4525–4539. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2603846.
38. *Yan Q., Huang W.* Sea ice sensing from GNSS-R data using convolutional neural networks // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018. V. 15. No. 10. P. 1510–1514. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2852143.
39. *Yan Q., Huang W.* Sea ice remote sensing using GNSS-R: A review // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Iss. 21. Article 2565. 26 p. DOI: 10.3390/rs11212565.
40. *Yan Q., Huang W., Moloney C.* Neural networks based sea ice detection and concentration retrieval from GNSS-R delay-Doppler maps // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10. No. 8. P. 3789–3798. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2689009.
41. *Yang T., Wan W., Sun Z. et al.* Comprehensive evaluation of using TechDemoSat-1 and CYGNSS data to estimate soil moisture over Mainland China // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Iss. 11. Article 1699. 19 p. DOI: 10.3390/rs12111699.
42. *Zavorotny V.U., Gleason S., Cardellach E., Camps A.* Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2014. V. 2. No. 4. P. 8–45. DOI: 10.1109/MGRS.2014.2374220.
43. *Zhu Y., Yu K., Zou J., Wickert J.* Sea ice detection based on differential delay-Doppler maps from UK TechDemoSat-1 // *Sensors*. 2017. V. 17. Iss. 7. Article 1614. 18 p. DOI: 10.3390/s17071614.

## On the issue of determining the scattering diagram of ice cover using bistatic remote sensing data in the L-band

D. A. Kovaldov<sup>1</sup>, Yu. A. Titchenko<sup>1</sup>, V. Yu. Karaev<sup>1</sup>,  
M. A. Panfilova<sup>1</sup>, V. P. Lopatin<sup>2</sup>, V. F. Fateev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*  
*E-mail: d.kovaldov@ipfran.ru*

<sup>2</sup> *Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering*  
*Solnechnogorsk, Moscow Region 141570, Russia*  
*E-mail: lopatin@vniiftri.ru*

The possibilities of the bistatic sensing scheme implemented using the TDS-1 satellite (TechDemoSat-1) and global navigation satellite systems (GNSS) for detecting sea ice and determining the sea ice scattering diagram in the L-band are considered. The proposed approach is based on determining the scattering diagrams of sea waves and sea ice using the delay-Doppler map (DDM) of the reflected GNSS signal. During processing, the Doppler spectrum (DS) of the reflected signal recorded by the receiver in the bistatic GNSS-Reflectometry (GNSS-R) sensing scheme is analyzed. In such a measurement scheme, the DS width depends on the projection of the receiver velocity on the reflected rays connecting the reflecting points on the surface with the receiver. In this case, it can be assumed that the incident GNSS radiation in the reflection region has a flat front, therefore only the central frequency of the DS shift depends on the projection of the emitter velocity. Thus, knowing the geometry of the problem: emitter – mirror reflection point – receiver, it is possible to determine the corresponding grazing angle of the reflected beam for each frequency of the measured DS. The proposed algorithm was applied to the TDS-1 satellite data, which were obtained during measurements over Antarctica in the Weddell Sea region and in the Atlantic Ocean, as well as in the Sea of Okhotsk. To verify the type of reflecting surface (ice/water), the data on the ice cover concentration of the AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) radiometer were used. The assumption that the width of the Doppler spectrum from sea ice is significantly smaller than from sea waves was confirmed. Scattering patterns for sea waves and sea ice were reconstructed and the obtained dependencies were compared with the dependencies of the GPM (Global Precipitation Measurement) mission based on radar data in the Ku range.

**Keywords:** GNSS, quasi-specular reflection, L-band, scatter pattern, sea ice remote sensing, TDS-1

Accepted: 07.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308

### References

1. Lopatin V. P., Murzabekov M. M., Bobrov D. S., Results of determining the geoid height profile and vertical line deviation using GNSS signals reflected from water surface, *Geodeziya i kartografiya*, 2024, No. 2, pp. 21–30 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-21-30.
2. Chernoukhov V. V., Dobykin V. D., Scattering of electromagnetic waves by the sea surface at two-position location, *Radiotekhnika i elektronika*, 1995, Vol. 40, No. 3, pp. 464–471 (in Russian).
3. Alonso Arroyo A., Camps A., Aguasca A. et al., Dual-polarization GNSS-R interference pattern technique for soil moisture mapping, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, Vol. 7, No. 5, pp. 1533–1544, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2320792.
4. Camps A., Park H., Pablos M. et al., Sensitivity of GNSS-R spaceborne observations to soil moisture and vegetation, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 10, pp. 4730–4742, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2588467.
5. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O. et al., GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets, *Radio Science*, 2011, Vol. 46, No. 6, Article RS0C04, 16 p., DOI: 10.1029/2011RS004683.
6. Cartwright J., *Novel applications of GNSS-R data from TechDemoSat-1 to monitoring the cryosphere: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy*, University of Southampton, United Kingdom, 2021, 151 p.
7. Cartwright J., Banks C. J., Srokosz M., Sea ice detection using GNSS-R data from TechDemoSat-1, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124, Iss. 8, pp. 5801–5810, DOI: 10.1029/2019JC015327.

8. Chew C., Shah R., Zuffada C. et al., Demonstrating soil moisture remote sensing with observations from the UK TechDemoSat-1 satellite mission, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, Iss. 7, pp. 3317–3324, DOI: 10.1002/2016GL068189.
9. Clarizia M. P., Gommenginger C. P., Gleason S. T. et al., Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, Iss. 2, Article L02608, 5 p., DOI: 10.1029/2008GL036292.
10. Clarizia M. P., Ruf C. S., Jales P., Gommenginger C., Spaceborne GNSS-R minimum variance wind speed estimator, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 11, pp. 6829–6843, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2303831.
11. Dielacher A., Fragner H., Moritsch M., Høeg P., Wickert J., Cardellach E., Koudelka O., Beck P., Walker R., Martin-Neira M., Lissi F. P., The passive reflectometer on board of PRETTY, *Proc. ESA ARSI+KEO Conf.*, 2019.
12. Gleason S., *Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low Earth orbit: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy*, University of Surrey, UK, 2006, 223 p.
13. Gleason S., Towards sea ice remote sensing with space detected GPS signals: Demonstration of technical feasibility and initial consistency check using low resolution sea ice information, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2, Iss. 8, pp. 2017–2039, DOI: 10.3390/rs2082017.
14. Gleason S., Hodgart S., Sun Y. et al., Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 6, pp. 1229–1241, DOI: 10.1109/TGRS.2005.845643.
15. Gleason S., Lowe S., Zavorotny V., Remote sensing using bistatic GNSS reflections, In: *GNSS Applications and Methods*, Norwood, MA: Artech House, 2009, pp. 399–436.
16. *GPM Data Utilization Handbook*, 1<sup>st</sup> ed., JAXA, Japan, 2014, 92 p.
17. Hall C. D., Cordey R. A., Multistatic Scatterometry, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. "Remote Sensing: Moving Toward the 21<sup>st</sup> Century"*, 1988, Vol. 1, pp. 561–562, DOI: 10.1109/IGARSS.1988.570200.
18. Hobiger T., Haas R., Löfgren J. S., GLONASS-R: GNSS reflectometry with a frequency division multiple access-based satellite navigation system, *Radio Science*, 2014, Vol. 49, Iss. 4, pp. 271–282, DOI: 10.1002/2013RS005359.
19. Huang F., Sun Y., Xia J. et al., Progress on the GNSS-R product from Fengyun-3 missions, *IGARSS 2024 – 2024 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2024, pp. 6717–6720, DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10640688.
20. Juang J.-C., Ma S.-H., Lin C.-T., Study of GNSS-R techniques for FORMOSAT mission, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 10, pp. 4582–4592, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2575069.
21. Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M. et al. (2022a), Application of the Doppler spectrum of the back-scattering microwave signal for monitoring of ice cover: A theoretical view, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Iss. 10, Article 2331, 23 p., DOI: 10.3390/rs14102331.
22. Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M. et al. (2022b), On the problem of the sea ice detection by orbital microwave Doppler radar at the nadir sounding, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Iss. 19, Article 4937, 18 p., DOI: 10.3390/rs14194937.
23. Lagerloef G., Colomb F. C., Le Vine D. et al., The Aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge, *Oceanography*, 2008, Vol. 21, No. 1, pp. 68–81, DOI: 10.5670/oceanog.2008.68.
24. Larson K. M., Gutmann E. D., Zavorotny V. U. et al., Can we measure snow depth with GPS receivers? *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, Iss. 17, Article L17502, 5 p., DOI: 10.1029/2009GL039430.
25. Li C., Huang W., An algorithm for sea-surface wind field retrieval from GNSS-R delay-Doppler map, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 11, No. 12, pp. 2110–2114, DOI: 10.1109/LGRS.2014.2320852.
26. Lopatin V., Fateev V., Methods of bistatic GNSS-radio altimetry for determining height profile of the ocean and their experimental verification, *Symp. Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019)*, 2022, Vol. 153, pp. 127–132, DOI: 10.1007/1345\_2022\_139.
27. Martín-Neira M., A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry, *ESA J.*, 1993, Vol. 17, pp. 331–355.
28. McMullan K. D., Brown M. A., Martín-Neira M. et al., SMOS: The payload, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 3, pp. 594–605, DOI: 10.1109/TGRS.2007.914809.
29. Melsheimer C., Spreen G., AMSR-2 ASI sea ice concentration data, Antarctic, version 5.4 (NetCDF) (July 2012 – December 2018), *PANGAEA*, 2019, DOI: 10.1594/PANGAEA.898400.
30. Najibi N., Jin S., Physical reflectivity and polarization characteristics for snow and ice-covered surfaces interacting with GPS signals, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, Iss. 8, pp. 4006–4030, DOI: 10.3390/rs5084006.

31. Nogués-Correig O., Galí E. C., Campderrós J. S., Rius A., A GPS-reflections receiver that computes Doppler/delay maps in real time, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 1, pp. 156–174, DOI: 10.1109/TGRS.2006.882257.
32. Panfilova M., Karaev V., Sea ice detection by an unsupervised method using Ku- and Ka-band radar data at low incidence angles: First results, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Iss. 14, Article 3530, 12 p., DOI: 10.3390/rs15143530.
33. Panfilova M., Karaev V., Sea ice detection method using the dependence of the radar cross-section on the incidence angle, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, Iss. 5, Article 859, 10 p., DOI: 10.3390/rs16050859.
34. Ruf C. S., Atlas R., Chang P. S. et al., New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical convection, *Bull. American Meteorological Soc.*, 2016, Vol. 97, Iss. 3, pp. 385–395, DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00218.1.
35. Sun Y., Huang F., Xia J. et al., GNOS-II on Fengyun-3 satellite series: Exploration of multi-GNSS reflection signals for operational applications, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Iss. 24, Article 5756, 26 p., DOI: 10.3390/rs15245756.
36. Sutton R., Schroeder E., Thompson A. et al., Satellite-aircraft multipath and ranging experiment results at L-band, *IEEE Trans. Communications*, 1973, Vol. 21, No. 5, pp. 639–647, DOI: 10.1109/TCOM.1973.1091693.
37. Unwin M., Jales P., Tye J. et al., Spaceborne GNSS-reflectometry on TechDemoSat-1: Early mission operations and exploitation, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 10, pp. 4525–4539, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2603846.
38. Yan Q., Huang W., Sea ice sensing from GNSS-R data using convolutional neural networks, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, Vol. 15, No. 10, pp. 1510–1514, DOI: 10.1109/LGRS.2018.2852143.
39. Yan Q., Huang W., Sea ice remote sensing using GNSS-R: A review, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Iss. 21, Article 2565, 26 p., DOI: 10.3390/rs11212565.
40. Yan Q., Huang W., Moloney C., Neural networks based sea ice detection and concentration retrieval from GNSS-R delay-Doppler maps, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 8, pp. 3789–3798, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2689009.
41. Yang T., Wan W., Sun Z. et al., Comprehensive evaluation of using TechDemoSat-1 and CYGNSS data to estimate soil moisture over Mainland China, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Iss. 11, Article 1699, 19 p., DOI: 10.3390/rs12111699.
42. Zavorotny V. U., Gleason S., Cardellach E. et al., Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, Vol. 2, No. 4, pp. 8–45, DOI: 10.1109/MGRS.2014.2374220.
43. Zhu Y., Yu K., Zou J., Wickert J., Sea ice detection based on differential delay-Doppler maps from UK TechDemoSat-1, *Sensors*, 2017, Vol. 17, Iss. 7, Article 1614, 18 p., DOI: 10.3390/s17071614.