

Определение типа отражающей поверхности по данным системы глобального мониторинга GNSS-R: доплеровский спектр

Д.А. Ковалдов, Ю.А. Титченко, В.Ю. Караев, М.А. Панфилова

*Институт прикладной физики РАН
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: d.kovaldov@ipfran.ru*

В работе представлены возможности системы GNSS-R для исследования поверхности Земли, в частности в работе проводится сравнение ледяной поверхности в Антарктической зоне и водной поверхности в зоне Атлантического океана. Для получения информации о характере поверхности спутники системы GNSS-R используются в качестве излучателей. В качестве приёмника в работе рассматривается TechDemoSat-1 (TDS-1). Получившаяся бистатическая система в качестве первичного продукта обработки L1b позволяет рассмотреть delay-Doppler map (DDM) для сигнала, отражённого поверхностью. При дальнейшем анализе интегрируя DDM по дальности получали доплеровский спектр сигнала, отражённого поверхностью. Полученные зависимости сравнивались с зависимостью сечения обратного рассеяния от угла падения по данным двухчастотного радиолокатора (DPR), установленного на спутнике GPM и теоретическими расчётами доплеровского спектра. Полученные результаты показывают кардинальное отличие в формируемых DDM отражённого сигнала. Ключевые слова: Глобальная навигационная спутниковая система-рефлектометрия, дистанционное зондирование ледяной поверхности, TechDemoSat-1 (TDS-1).

Determination of the type of reflective surface according to the GNSS-R global monitoring system: Doppler spectrum

D.A. Kovaldov, Yu.A. Titchenko, V.Yu. Karaev, M.A. Panfilova

Institute of Applied Physics RAS

The paper presents the capabilities of the GNSS-R system for studying the Earth's surface, in particular, the work compares the ice surface in the Antarctic zone and the water surface in the Atlantic Ocean. To obtain information about the nature of the surface, GNSS-R satellites are used as emitters. TechDemoSat-1 (TDS-1) is considered as a receiver in this work. The resulting bistatic system as the primary product of L1b processing allows us to consider a delay-Doppler map (DDM) for the signal reflected by the surface. During further analysis, integrating the DDM over the range, we obtained the Doppler spectrum of the signal reflected by the surface. The obtained dependences were compared with the dependence of the backscattering cross section on the angle of incidence according to data from the dual-frequency radar (DPR) installed on the GPM satellite and theoretical calculations of the Doppler spectrum. The results obtained show a fundamental difference in the generated DDM of the reflected signal.

Keywords: Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R); sea ice remote sensing; TechDemoSat-1 (TDS-1).

Введение

Происходящий процесс уменьшения площади ледяного покрова в арктической и антарктической зонах увеличивает значение мониторинга динамики площади морского льда. Изменения ледяного покрова играют важную роль в глобальном тепловом балансе, циркуляции атмосферы, температуре, а также в выборе безопасных маршрутов для судов в полярных регионах [1]. В настоящее время основными источниками

информации о типе (лед/вода) подстилающей поверхности (лед/вода) выступают средства дистанционного зондирования: 1) в оптическом и ИКА диапазонах и 2) в СВЧ диапазоне. Измерения в видимом и ИКА диапазоне ограничены погодными условиями и освещенностью. Облака и туман закрывают поверхность, а полярная ночь делает измерения невозможными в оптическом диапазоне.

В свою очередь методы дистанционного зондирования с использованием спутниковых миссий являются дорогостоящими и поэтому их количество ограничено. Это приводит к уменьшению частоты наблюдения. Использование системы глобального мониторинга GNSS-R [2] позволяет увеличить количество доступных для анализа данных.

В настоящее время система GNSS-R активно используется для мониторинга полей приводного ветра и оценке параметров морского волнения [3-5]. Активно развивается применение GNSS-R для мониторинга ледяного покрова и суши. Показаны возможности использования GNSS-R для оценки толщины снежного покрова [6,7], влажности почвы и анализа растительности [8,9].

Работа с использованием GNSS-R осуществляется в бистатической конфигурации, то есть спутники, входящие в группировку GNSS-R, являются излучателями, которые находятся на большом удалении от Земли, приёмником выступает спутник, находящийся на околоземной орбите.

В данной работе будут использованы данные спутника TechDemoSat-1, который выступал в качестве приёмника в бистатической схеме. Основным продуктом для пользователей по итогам обработки является delay-Doppler map (DDM). DDM – двумерная корреляционная функция сигнала отраженного поверхностью и излученного сигнала зависящая от времени и частоты. Таким образом по DDM возможно рассчитать доплеровский спектр сигнала, отраженного поверхностью.

Доплеровский спектр.

Проведенные ранее исследования показали, что при малых углах падения, когда доминирующим механизмом обратного рассеяния является квазизеркальное рассеяния, наблюдается существенное отличие зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для морского волнения и ледяного покрова. На рисунке приведены угловые зависимости, построенные по данным двухчастотного радиолокатора DPR установленного на спутник GPM [11,12].

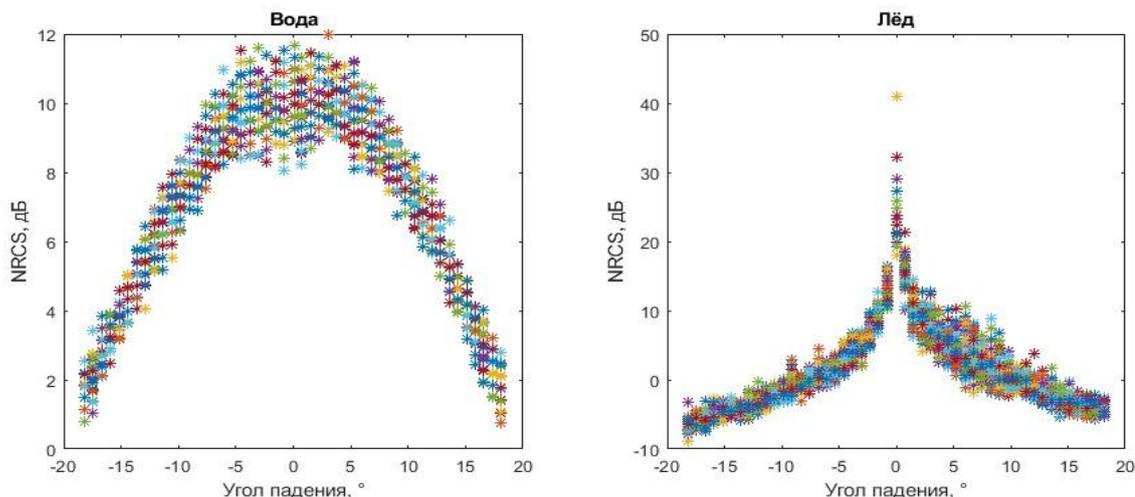


Рис. 1. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения по данным DPR для воды (слева) и льда (справа). Разные цвета соответствуют разным сканам.

Такое различие в зависимостях сечения обратного рассеяния от угла падения для льда и воды, приводит к различию в доплеровских спектрах, если измерения выполняются с движущегося радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны [13, 14].

На рис.2 приведены примеры доплеровских спектров, которые были смоделированы для движения радиолокатора со скоростью 200 м/с над ледяным покровом (слева) и морской поверхностью (справа).

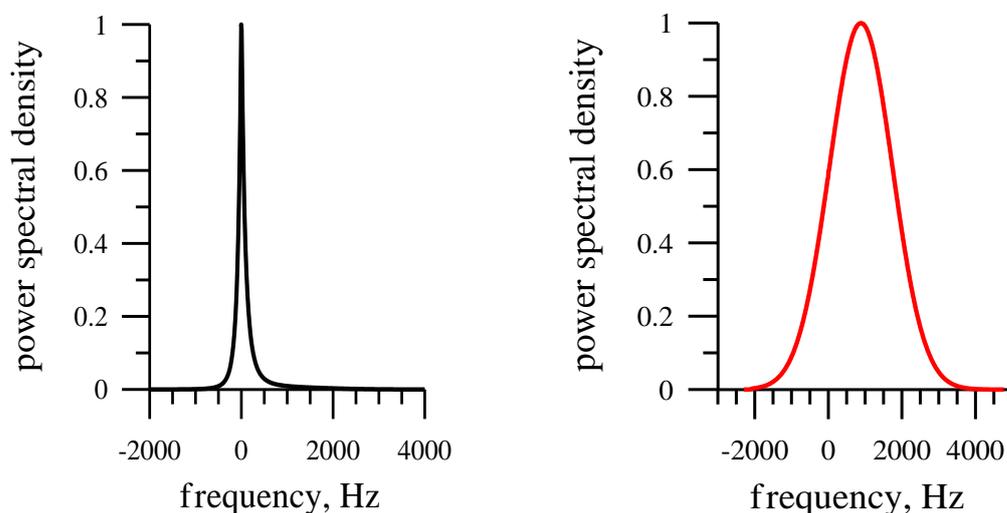


Рис. 2. Доплеровские спектры для ледяного покрова (слева) и морской поверхности (справа)

При использовании данных GNSS-R измерения выполняются в бистатической схеме измерения, однако механизм обратного рассеяния остается квазизеркальным. В связи с этим возникло предположение, что доплеровские спектры могут стать надежным критерием для разделения ледяного покрова и морского волнения.

Данное исследование посвящено проверке этого предположения.

Конфигурация спутников.

В качестве излучателя выступают спутники системы GPS работающие на частоте 1575.42 МГц и находящиеся на средневысокой орбите 20180 км. Приёмником выступал запущенный в 2014 году спутник TechDemoSat-1 с установленным на борту приёмником GNSS сигнала (SGR-ReSI) с частотой семплирования 16.367 МГц. Высота орбиты 635 км. Спутник выполнял измерения с 2014 по 2019 годы.

Данные TechDemoSat-1 в формате L1b находятся в NetCDF файлах и содержат информацию о DDM, местоположении спутников, точке зеркального отражения на поверхности и зеркальном угле падения (α). Схема приведена на рис. 3.

Начиная с 2014 года проведено около 1500 измерений в каждом из которых несколько десятков тысяч DDM. В данной работе используются данные за 22 ноября 2018 года (рисунок 4). Это соответствует весне в Южном полушарии и площадь ледяного покрова максимальна.

Спутник GNSS движется по высокой орбите, поэтому скорость движения относительно поверхности Земли небольшая и за время оборота спутника TechDemoSat-1 (синие кривые) происходит незначительное изменение его положения (красные участки на карте). Положение зеркальной точки определяется в основном движением спутника TechDemoSat-1 и на рисунке они показаны фиолетовым цветом.

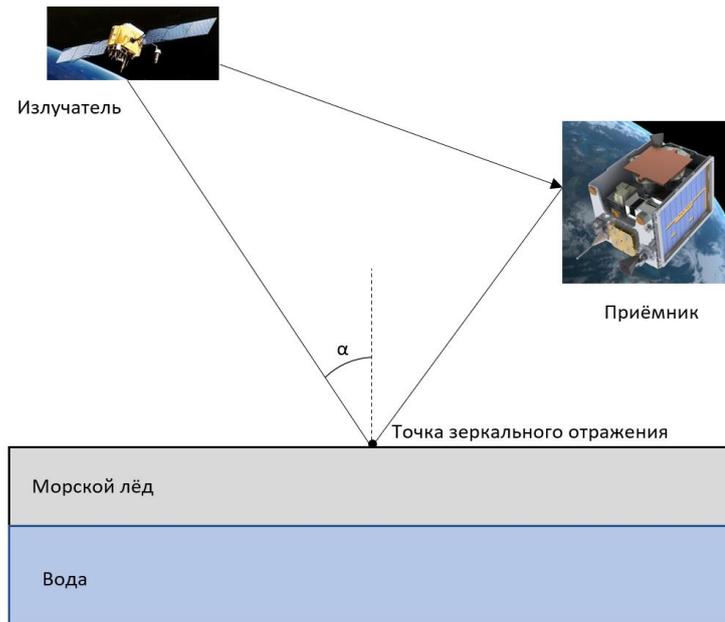


Рис. 3. Конфигурация системы спутников.

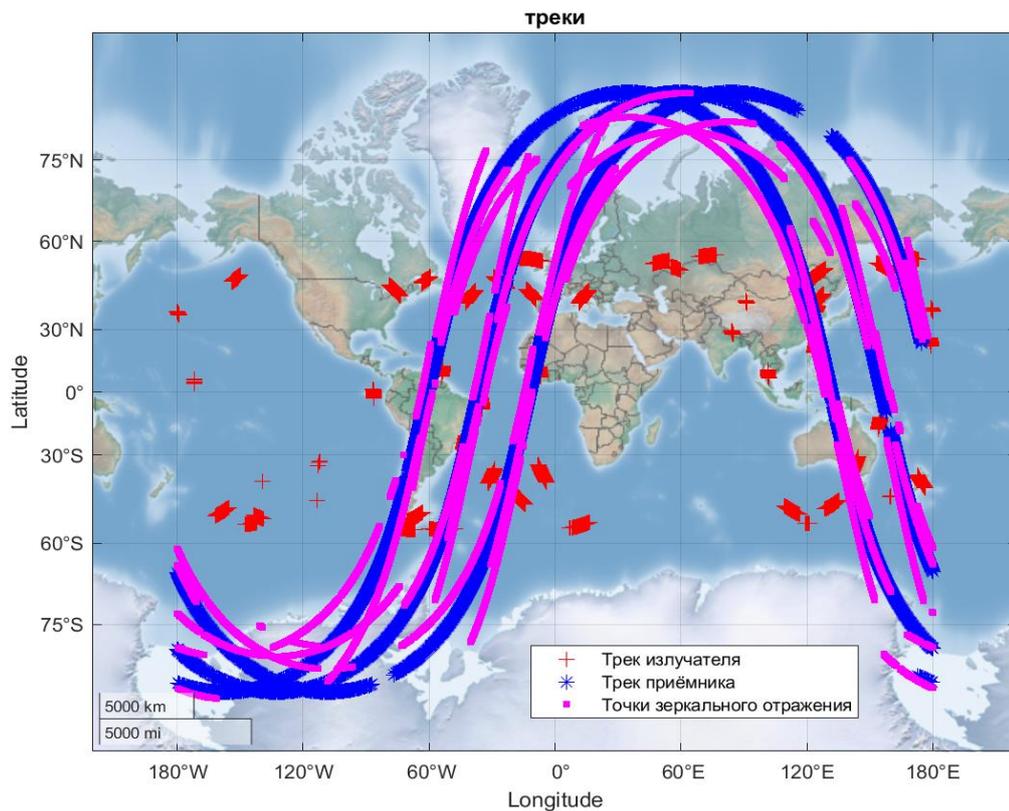


Рис. 4. Треки излучателя, приёмника и положение точки зеркального отражения 22.11.2018.

Данная запись содержит 33000 DDM. Благодаря тому, что приемник SGR-ReSI может принимать сразу 4 канала, увеличиваются возможные схемы измерения для одного положения приёмника, что позволяет дополнительно увеличить объём собираемых данных. Так же записываются данные не только о положении излучателя и

приёмника, но и данные о скорости. Информация о движении спутников необходима для анализа доплеровского спектра отражённого сигнала.

Для сравнения возьмем треки 11 и 13, которые показаны на рис. 5 зеленым и фиолетовым цветом соответственно. Синие линии – трек спутника TechDemoSat-1 и красные области – трек спутника GNSS.

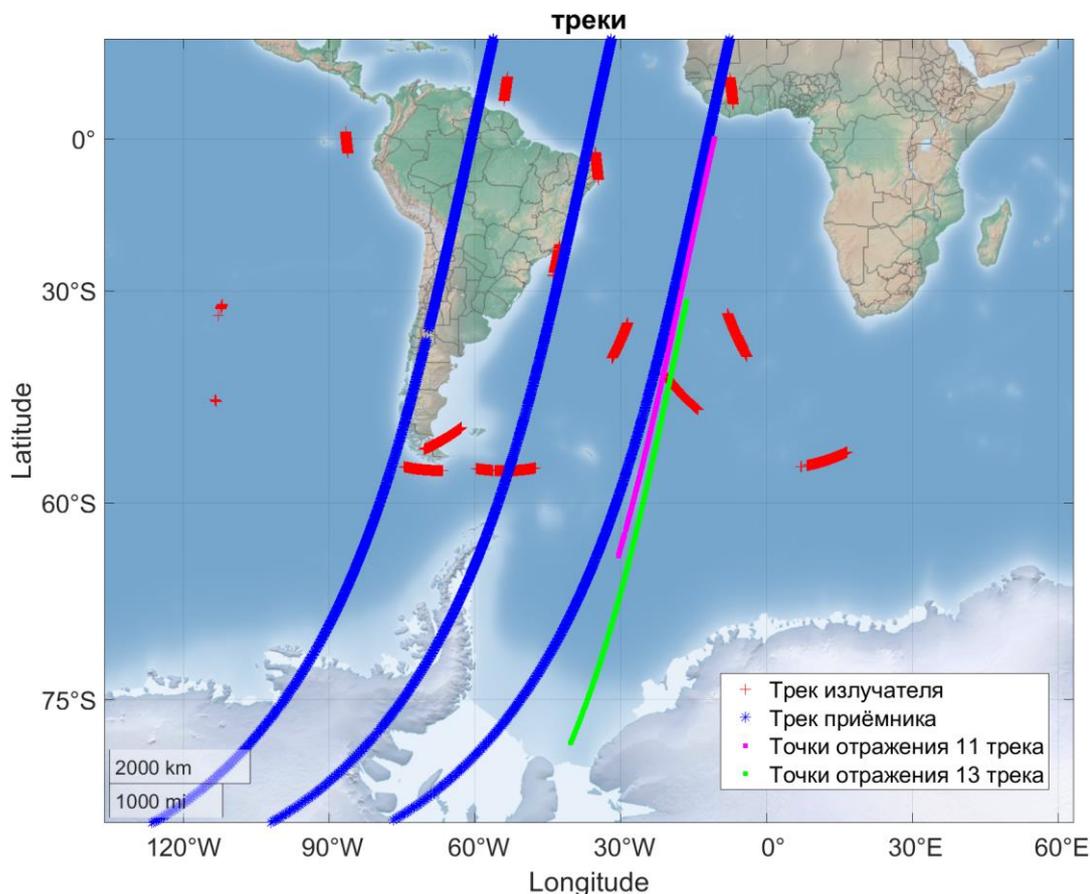


Рис. 5. Треки излучателя (красный цвет) и приёмника (синий) и выделенные зеркальные точки для 11 (зеленый) и 13 (фиолетовый) треков.

ДС сигнала, отраженного водой/льдом

Из рис. 5 видно, что 11 трек практически полностью находится в зоне Атлантического океана и не заходит на ледяной покров, 13 трек пересекает ледяной покров, сформировавшийся около Антарктиды. Для подтверждения этого нанесём на карту ледяного покрова, построенную по данным радиометра AMSR-E [10], положение зеркальных точек, показанных на рис. 5.

Для дальнейшего анализа были выбраны участки со сплоченностью более 95%. Сравним DDM ледяного покрова и морской поверхности.

Для удобства передачи данных информация о значении пикселя DDM сохраняется в виде uint16 и отдельно сохраняется максимальное значение. На рис. 7 приведены DDM, в данном случае зависимость от дальности оставили в пикселях, так как это не влияет на дальнейшие расчеты доплеровского спектра и не является предметом обсуждения данной работы. Видно, что DDM для морской поверхности существенно шире, чем для ледяного покрова.

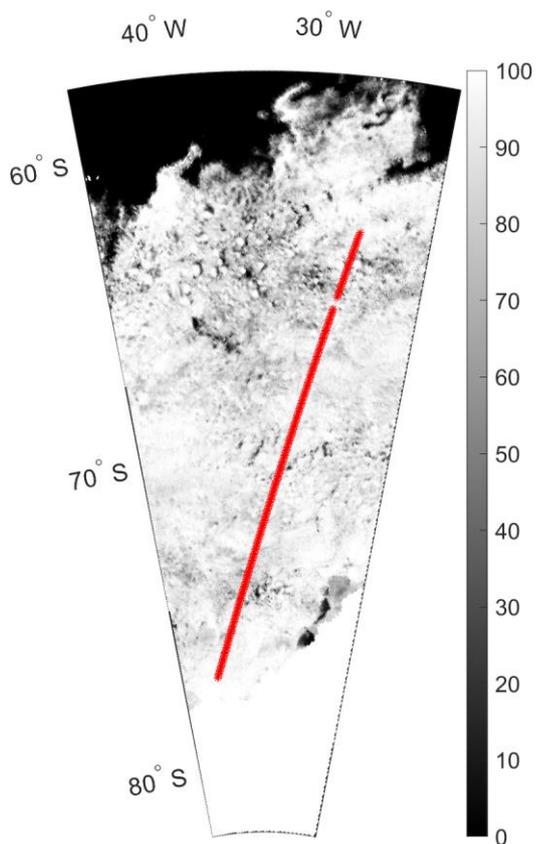


Рис.6. Карта сплоченности ледяного покрова с нанесёнными на неё зеркальными точками (красные).

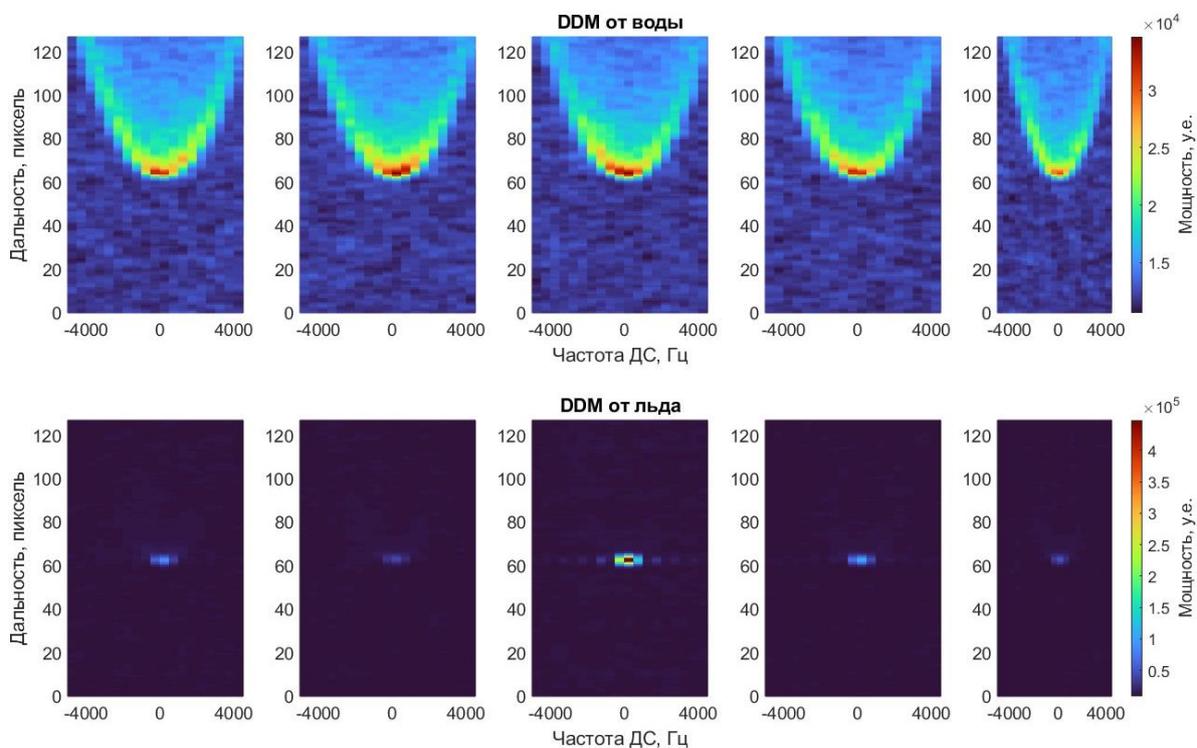


Рис. 7. DDM для воды (вверху), для льда (внизу).

Избавимся от зависимости по дальности путём интегрирования и перейдём к рассмотрению доплеровского спектра принятого сигнала. Результат показан на рис. 8. Слева нарисованы 5 последовательных DDM для ледяного покрова (синие точки) и морской поверхности (красные точки).

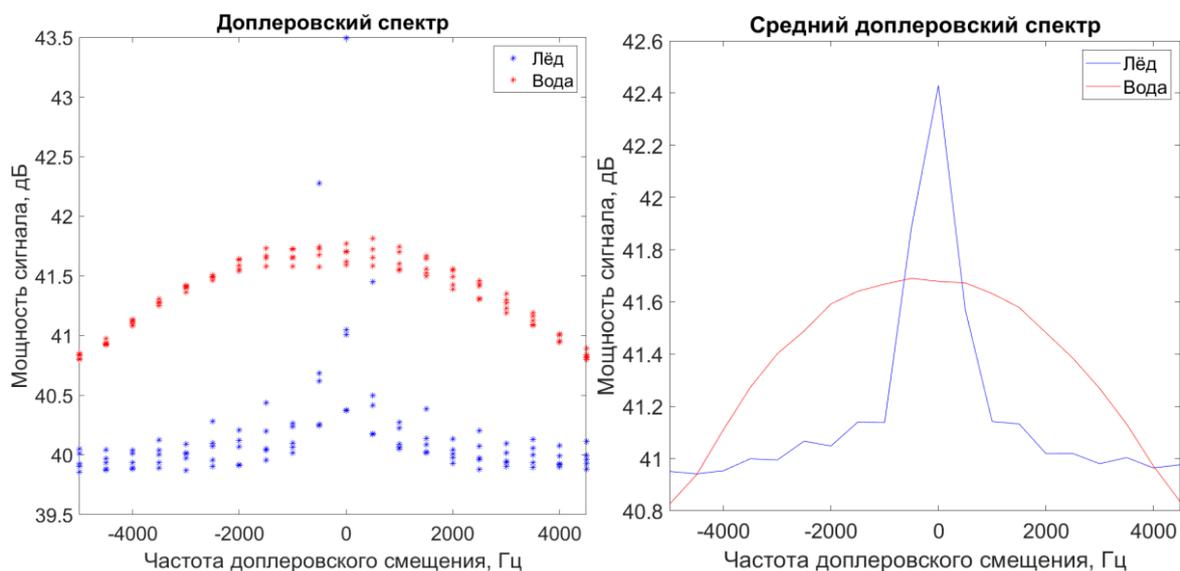


Рис. 8. Доплеровский спектр сигнала (дБ), отражённого водной (красный) и ледяной поверхностью (синий). Для каждого DDM спектры приведены слева, справа средний доплеровский спектр.

На рис. 8 справа приведены доплеровские спектры, усредненные по пяти DDM.

Видно, что, как и предполагалось, доплеровский спектр для ледяного покрова значительно уже, чем доплеровский спектр для морского волнения. Следовательно, ширина доплеровского спектра является надежным индикатором перехода от одного типа поверхности к другому.

Мощность отраженного сигнала не является надежным критерием. Если сравнить с рис. 1, то увидим, что для обратного рассеяния при зеркальном отражении (угол падения 0), разность сечений обратного рассеяния (мощности отраженного сигнала) превышает 20 дБ.

В данном случае разность намного меньше и результат будет сильно зависеть от скорости приводного ветра, который влияет на мощность отраженного сигнала для морской поверхности.

Отметим, что уменьшение разницы между льдом и волнением обусловлено схемой измерений. При вертикальном зондировании (обратное рассеяние), отражение происходит от участков волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Лед можно считать плоским, и он весь является отражателем. Морская поверхность обладает уклонами и отражение будет происходить только от горизонтальных участков волнового профиля.

При бистатическом зондировании, отражение для ледяного покрова происходит только от «настоящей» зеркальной точки (угол падения равен углу отражения).

Приемная антенна является широкой, поэтому для морской поверхности в формировании отраженного сигнала принимают участие не только горизонтальные другие участки волнового профиля, но и имеющие наклон. В результате, отраженный 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. 8.

Выводы

Бистатистическая схема зондирования, реализуемая с помощью спутника TechDemoSat-1 и системы глобального мониторинга GNSS-R, позволяет проводить мониторинг поверхности земли. В данной работе сравнивалось отражение от морского волнения и от поверхности льда на примерах DDM, полученных при измерении вблизи Антарктики и в Атлантическом океане.

Было показано, что ширина доплеровского спектра зависит от типа подстилающей поверхности (лед/вода) и является надежным критерием перехода от одного типа поверхности к другому.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение зависимости мощности отраженного сигнала от угла падения (приема) на основе данных о скоростях спутников, углах зондирования (приема) и построение полуэмпирической модели рассеяния ледяного покрова для случая бистатистического зондирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-77-10064).

Литература

1. Kuznetsova, A.M., Poplavsky, E.I., Rusakov, N.S., Troitskaya, Y.I. (2022). Wind Waves Modeling in Polar Low Conditions Within the WAVEWATCH III Model. In: Chaplina, T. (eds) Processes in GeoMedia—Volume IV. Springer Geology. Springer, Cham.
2. Hall, C.D.; Cordey, R.A. Multistatic Scatterometry. In Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, "Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century", Edinburgh, UK, 12–16 September 1988; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 1988; Volume 1, pp. 561–562.
3. M. P. Clarizia, C. S. Ruf, P. Jales and C. Gommenginger, "Spaceborne GNSS-R Minimum Variance Wind Speed Estimator," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 11, pp. 6829-6843, Nov. 2014.
4. Yan, Q.; Huang, W. Sea Ice Remote Sensing Using GNSS-R: A Review. Remote Sens. 2019, 11, 2565. <https://doi.org/10.3390/rs11212565>
5. C. Li and W. Huang, "An Algorithm for Sea-Surface Wind Field Retrieval From GNSS-R Delay-Doppler Map," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 11, no. 12, pp. 2110-2114, Dec. 2014.
6. Najibi, N.; Jin, S. Physical Reflectivity and Polarization Characteristics for Snow and Ice-Covered Surfaces Interacting with GPS Signals. Remote Sens. 2013, 5, 4006-4030.
7. Larson, K. M., E. D. Gutmann, V. U. Zavorotny, J. J. Braun, M. W. Williams, and F. G. Nievinski (2009), Can we measure snow depth with GPS receivers? Geophys. Res. Lett., 36, L17502.
8. A. Alonso Arroyo et al., "Dual-Polarization GNSS-R Interference Pattern Technique for Soil Moisture Mapping," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, no. 5, pp. 1533-1544, May 2014.
9. A. Camps et al., "Sensitivity of GNSS-R Spaceborne Observations to Soil Moisture and Vegetation," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 9, no. 10, pp. 4730-4742, Oct. 2016.
10. <https://seaice.uni-bremen.de/sea-ice-concentration/amsre-amsr2/information/>
11. Panfilova, M.; Karaev, V. Sea Ice Detection Method Using the Dependence of the Radar Cross-Section on the Incidence Angle. Remote Sens. 2024, 16, 859.

12. 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 Sens.* 2023, 15, 3530.
13. Karaev, V.; Titchenko, Y.; Panfilova, M.; Ponur, K.; Ryabkova, M.; Meshkov, E.; Kovaldov, D. On the Problem of the Sea Ice Detection by Orbital Microwave Doppler Radar at the Nadir Sounding. *Remote Sens.* 2022, 14, 4937.
14. Karaev, V.; Titchenko, Y.; Panfilova, M.; Ryabkova, M.; Meshkov, E.; Ponur, K. Application of the Doppler Spectrum of the Backscattering Microwave Signal for Monitoring of Ice Cover: A Theoretical View. *Remote Sens.* 2022, 14, 2331.