

**ИЗМЕРЕНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО
СПЕКТРА РАДИОЛОКАЦИОННОГО
СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ
ПОВЕРХНОСТИ ПРЕСНОГО ЛЬДА И
ВЗВОЛНОВАННОЙ РЕЧНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ
ВБЛИЗИНАДИРНОМ
ЗОНДИРОВАНИИ: СРАВНЕНИЕ С
МОДЕЛИРОВАНИЕМ**

Рябкова М. С., Епанова К.С., Понур К.А., Караев В.Ю., Титченко Ю.А.,
Лебедев И. Ю., Мешков Е. М., Ошарин И.В.

m.rjabkova@gmail.com

Институт прикладной физики РАН

Тезисы

В радиолокационном дистанционном зондировании морского льда основным информативным параметром является сечение обратного рассеяния, которое не всегда позволяет однозначно определить тип рассеивающей поверхности (лед/волнение), что приводит к ошибкам при оценке площади ледяного покрова. Эта работа продолжает ряд публикаций, посвященных исследованию возможности использования доплеровского спектра (ДС) отраженного при малых углах падения сигнала для дистанционного зондирования океана. Сравниваются экспериментальные ДС микроволнового сигнала, отраженного от поверхности воды и ледяного покрова. Эксперимент проводился на Нижегородской канатной дороге. Импульсный радиолокатор X-диапазона был установлен на технологической тележке и выполнял измерения в двух работающих последовательно режимах. В доплеровском режиме измерялся ДС отраженного сигнала, содержащий информацию о статистических параметрах поверхности. Была проведена обработка данных, и первые результаты подтвердили предположение о том, что ДС может быть эффективным инструментом для классификации типа подстилающей поверхности согласно критерию "лед/вода". Сравнение с моделью ДС для морского льда и морского волнения показало, что общее поведение ДС для льда и волн в эксперименте соответствует теории. Планируется разработка теоретического описания ДС для пресноводного льда и сравнение с экспериментальными данными в будущих исследованиях.

Предыдущие результаты

В настоящий момент на орбите находится два радара, сканирующих поверхность под малыми углами падения: 1) SWIM на спутнике CFOSAT (< 11 градусов) [1, 2] и 2) DPR на спутнике GPM (< 19 градусов) [3]. Сечение рассеяния (УЭПР) считается эффективным параметром в алгоритмах классификации подстилающей поверхности по критерию «вода-лед» [4-6].

УЭПР зависит от многих параметров, таких как температура воздуха, соленость, возраст льда, что затрудняет его использование в алгоритмах. Более надежным способом определения типа подстилающей поверхности будет анализ характеристик, которые определяют оба типа подстилающей поверхности, но существенно отличаются, например, уклоны поверхности (mss).

В теоретической работе [7] была показана возможность использования ДС отраженного сигнала при малых углах падения для определения типа подстилающей поверхности (лед или вода). Согласно моделированию для этой задачи удобно использовать радиолокатор с ножевой антенной. Позже, в работе [8] были представлены первые результаты экспериментов по измерению ДС отраженного при малых углах падения сигнала от воды и пресного льда. В работе [8] описана схема измерения и способ обработки данных. В данной работе представлено сравнение экспериментов с моделированием.

ДС для волн и льда: теория

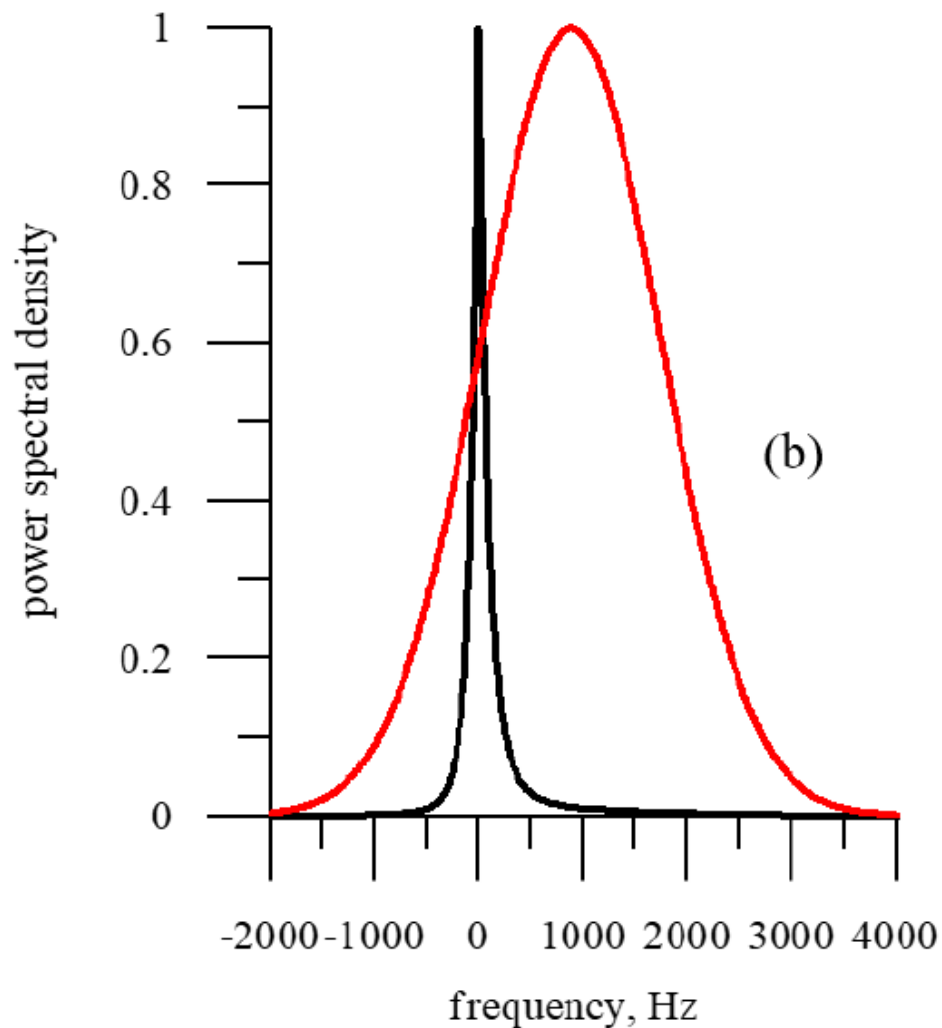
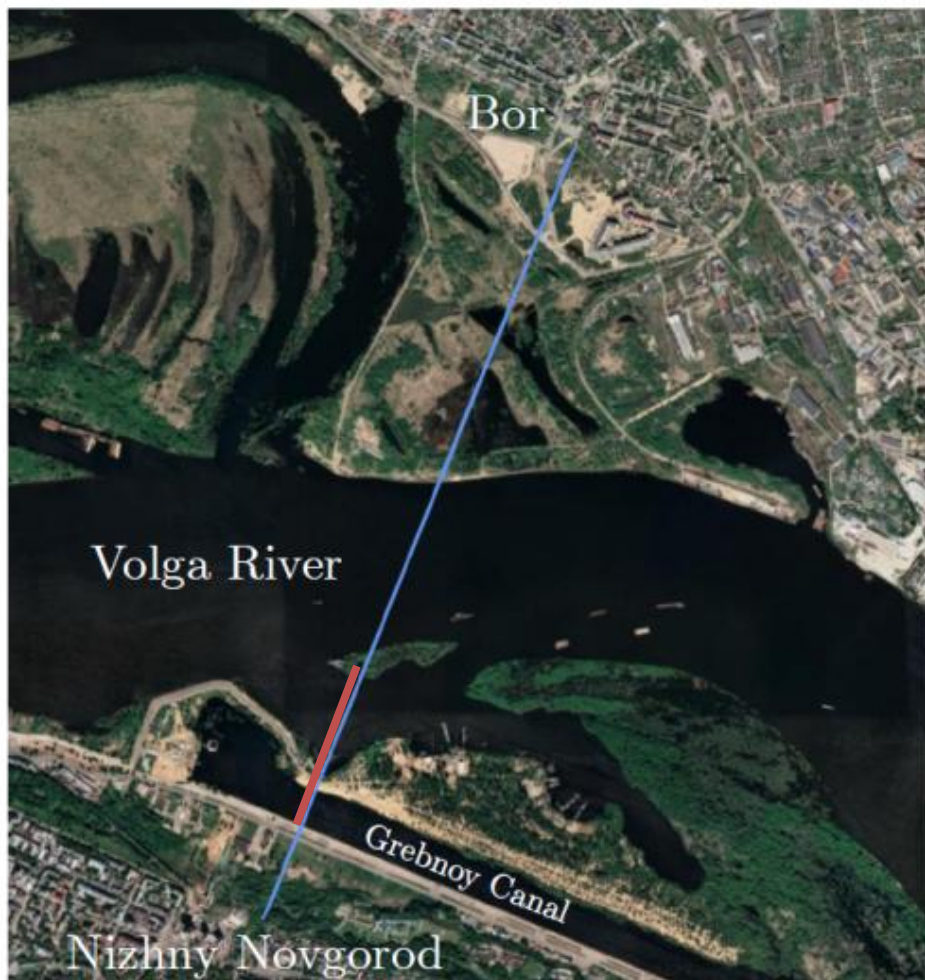


Рис. 12(b) из [7].
Нормализованный доплеровский спектр для движущегося локатора ($V_{\text{rad}} = 200$ м/с) с ножевой антенной (14 x 2):
Красная кривая – морские волны,
Черная кривая – ледяной покров

Эксперимент: канатная дорога



На нижегородской канатной дороге была проведена серия экспериментов. Канатная дорога проходит над рекой Волга и соединяет Нижний Новгород с городом Бор. Измерения были произведены 28.09.2021 (вода), 2.12.2021 (лед и вода) и 17.02.2022 (лед), что позволило сравнить измерения для ледяного покрова и водной поверхности. В ходе экспериментов в месте наблюдений не было осадков. На рисунке представлена схема района экспериментов. Кабинка канатной дороги проходит от одной станции до другой за 15 минут.

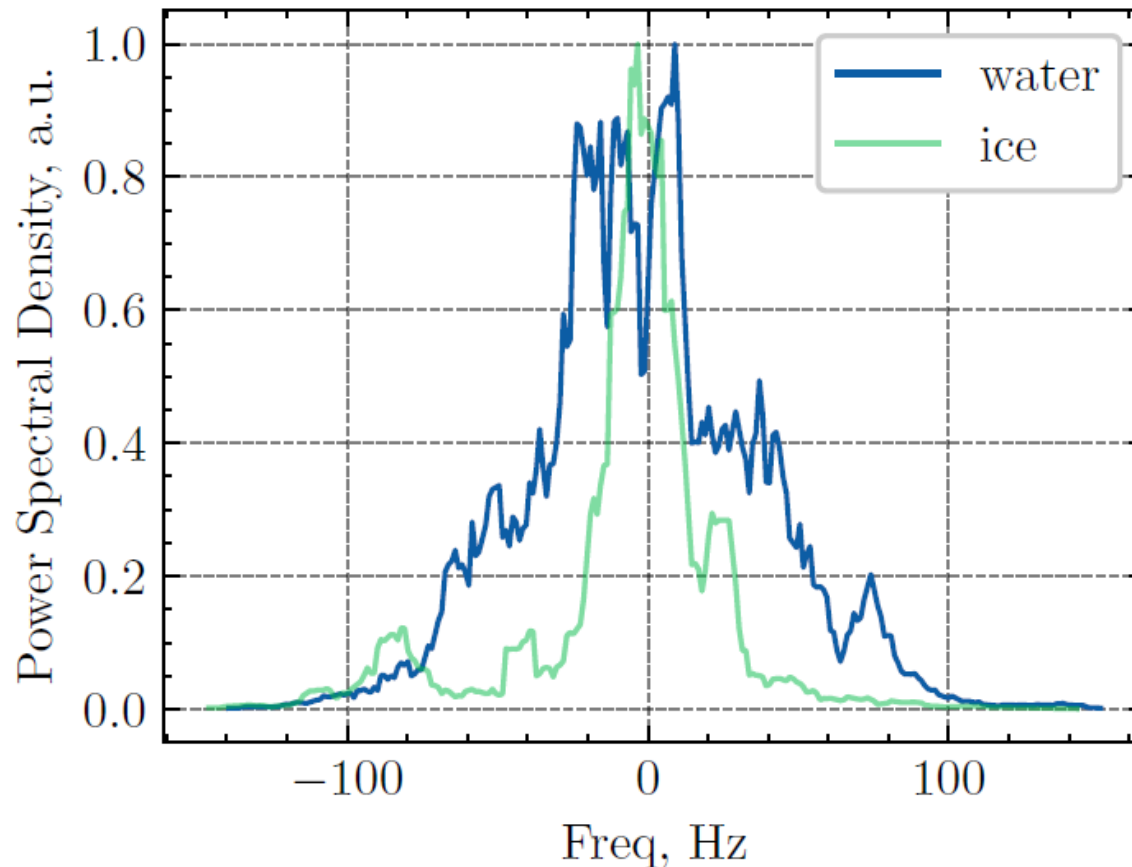
Эксперимент: условия

В экспериментах использовался радиолокатор X-диапазона, который может работать в двух режимах: непрерывный (доплеровский) и импульсный (альтиметрический). Полоса пропускания прибора 300 МГц, что позволяет получить разрешение 0,5 м. Используется ножевая антенна $3.6^\circ \times 30^\circ$, в ходе эксперимента использовались два положения антенны относительно направления движения (вдоль или поперек), что влияло на параметры доплеровского спектра. Радар переключался между двумя режимами работы: в режиме радиовысотомера работал 0,285 с в сентябре и декабре, а в режиме измерения доплеровского спектра – 10 с, также в сентябре и декабре, и 1 с в феврале. В ходе экспериментов скорость движения измерялась с помощью GNSS приемника. Средняя скорость кабины составляла 5 м/с. Для обработки выбирались только измерения из области, обозначенной красным на предыдущем рисунке. Это участок дороги, где расстояние между канатной дорогой и подстилающей поверхностью не изменяется существенно, а модуль вертикальной компоненты скорости не превышает 0,25 м/с.

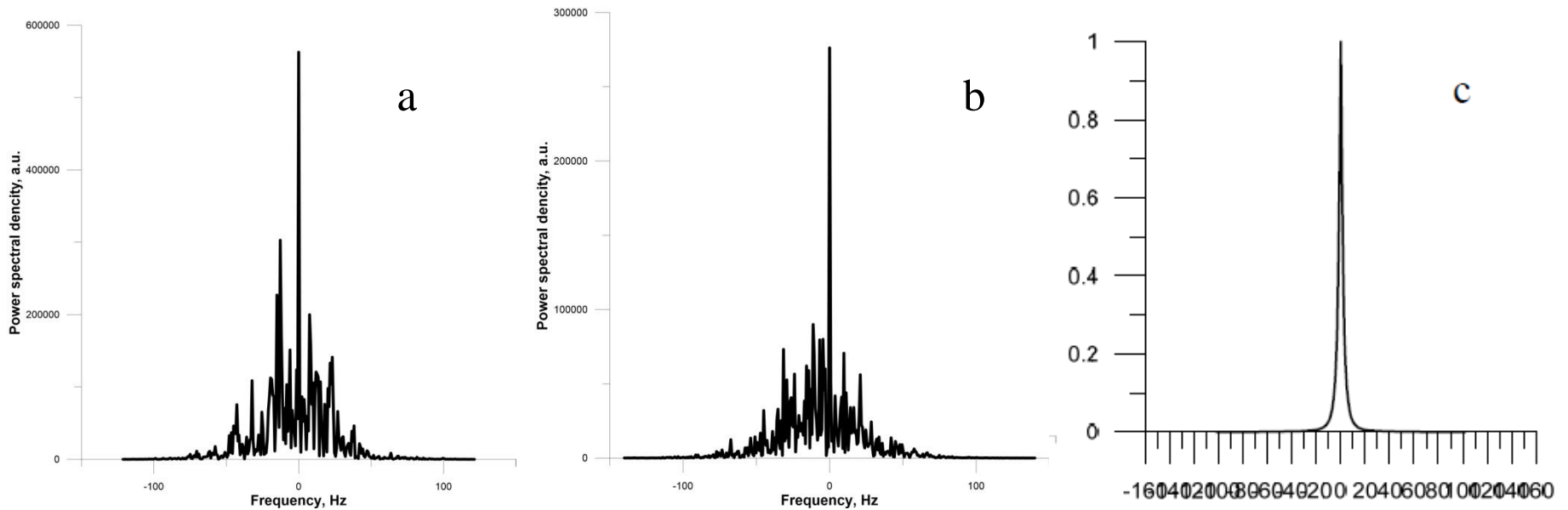
ДС для волн и воды: эксперимент

Пример ДС отраженного сигнала для воды (голубая кривая) и ледяного покрова (красная кривая).

ДС, отраженный от волн шире, чем ДС, отраженный от ледяного покрова.



ДС: эксперимент vs теория



Экспериментальные ДС, 17.02.2022:

a: $v_z = -0.22$ м/с, смещение -3 Гц, ширина = 54 Гц, эксцесс 0.9, асимметрия 0.1;

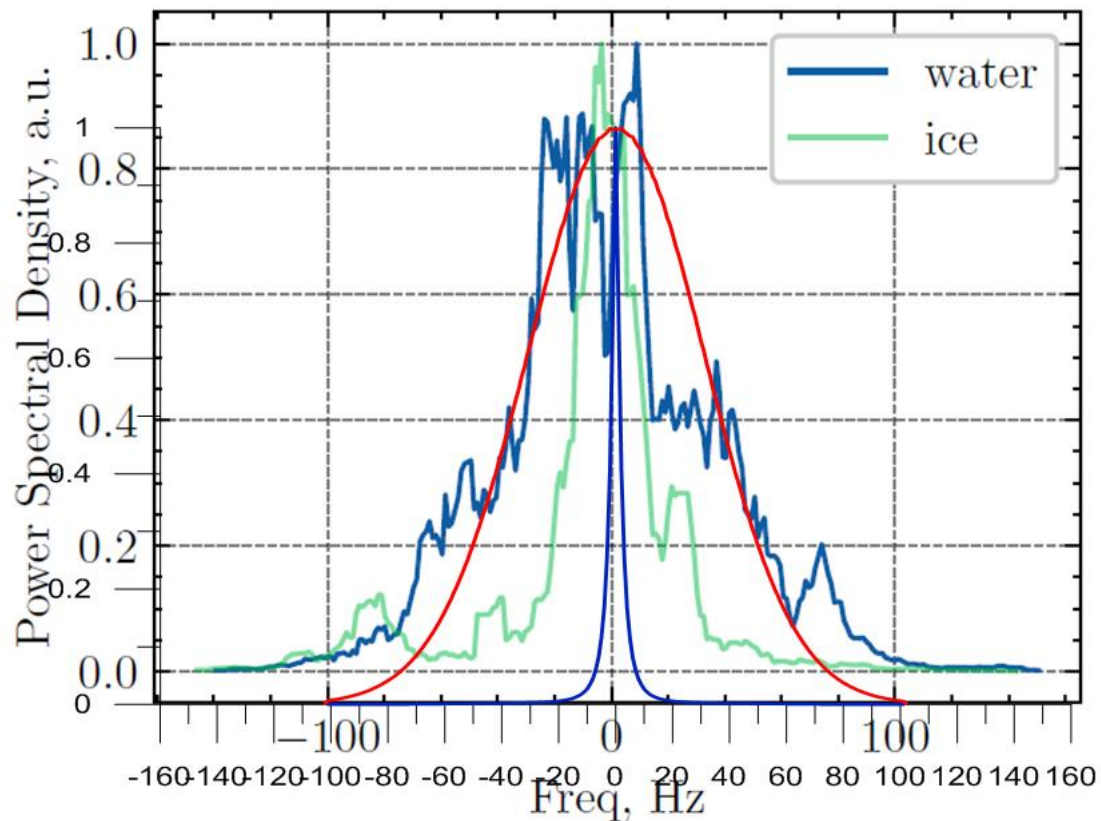
b: $v_z = -0.01$ м/с, смещение -9 Гц, ширина = 54 Гц, эксцесс 0.8, асимметрия -0.3;

Разница во времени между измерениями 14 с, за это время кабинка сместилась на 64 м. Как можно заметить, разница между измерениями незначительна.

c: модель ДС для морского льда (скорость движения радиолокатора 5 м/с), ДС смещение = -0.03 Гц, ширина ДС = 19.7 Гц.

Видно, что модельный ДС уже, чем измеренный

ДС: эксперимент vs теория



Эксперимент:

Синяя кривая – вода

Зеленая кривая – лед

Моделирование:

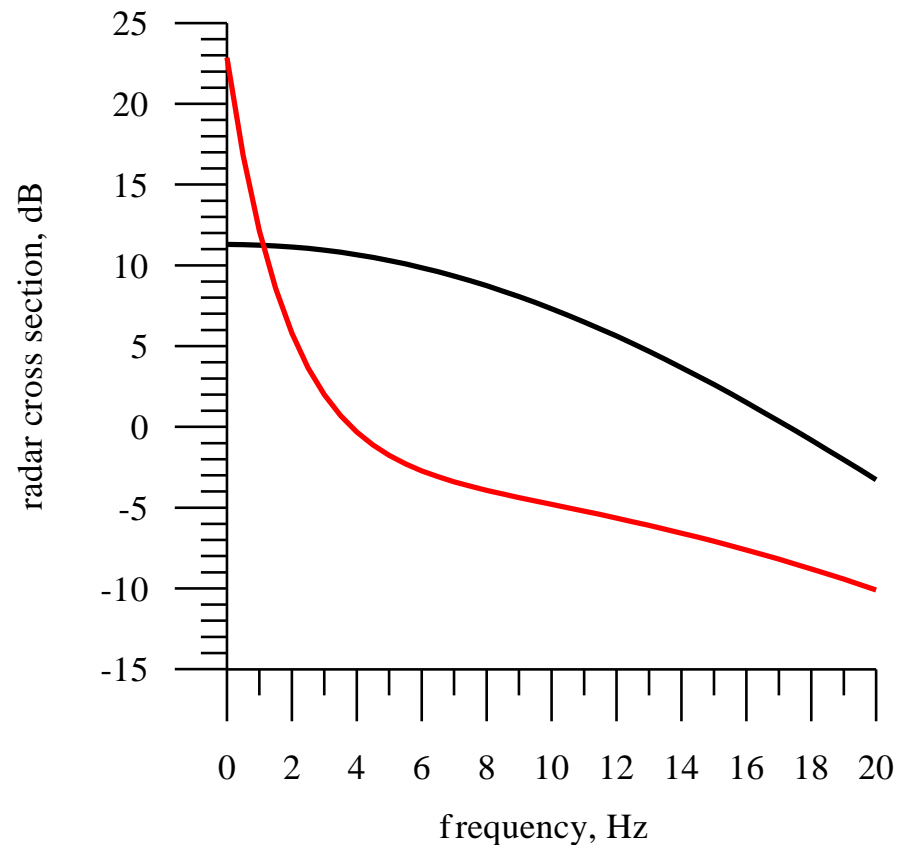
Красная кривая – вода

Синяя кривая - лед

Сравнение экспериментального ДС и модельного ДС (по модели из [7]) для льда и воды.

ДС: эксперимент vs теория

В ходе эксперимента основные теоретические результаты из [7] были подтверждены: ширина ДС может быть использована для определения типа подстилающей поверхности в случае использования радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны (если широкая часть диаграммы ориентирована вдоль направления движения радиолокатора).



Зависимость УЭПР в случае отражения от ледяного покрова (красная кривая) и волн (черная кривая) для морского льда

Результаты и дальнейшие исследования

ДС сигнала, отраженного от воды, шире, чем ДС сигнала, отраженного от льда. Это объясняется тем, что шероховатость (и уклоны) льда существенно меньше, чем волн.

Смещение ДС напрямую связано с вертикальной составляющей скорости движения радиолокатора, для льда смещение определяется в основном скоростью, в случае волнения параметры волн также влияют на смещение ДС. Ширина ДС зависит не только от скорости движения радиолокатора, но и от дисперсии уклонов поверхности. В дальнейшем будет разработано теоретическое описание ДС для сигнала, отраженного от пресного льда [9] и будет проведено сравнение с этой моделью. Также интересным вопросом дальнейшего исследования видится использование коэффициентов эксцесса и асимметрии для определения типа подстилающей поверхности.

Литература 1

- [1] D. Hauser, C. Tison, T. Amiot, L. Delaye, N. Corcoral and P. Castillan, “SWIM: The First Spaceborne Wave Scatterometer”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, Vol. 55, No. 5, pp. 3000-3014.
- [2] D. Hauser, C. Tourain, J-M. Lachiver. “CFOSAT : A new mission in orbit to observe simultaneously wind and waves at the ocean surface”, Space Research Today, 2019, 206, pp.15-21.
- [3] Jaxa, GPM Data Utilization Handbook. First Edition, edited by JAXA, Tokyo, 2014, 92 p.
- [4] C. Peureux, N. Longépé, A. Mouche, C. Tison, C. Tourain, J-M. Lachiver, & D. Hauser, “Sea-ice detection from near-nadir Ku-band echoes from CFOSAT/SWIM scatterometer”, Earth and Space Science, 2022, Vol. 9, e2021EA002046.
<https://doi.org/10.1029/2021EA002046>
- [5] V. Karaev, K. Ponur, M. Panfilova, M. Ryabkova, Yu. Titchenko, Eu. Meshkov, “Radar sensing of sea ice at the small incidence angles: simulation and comparison of the different approaches”, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2022), Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2022, pp. 3818-3821.

Литература 2

- [6] M. Panfilkova, M. Ryabkova, V. Karaev, “Determination of the position of the sea ice cover from the data of the SWIM radar on the CFOSAT satellite” (in Russian), XX International Conference "Modern problems of remote sensing of the Earth from space", 2022, Abstracts, p. 206, doi: 10.21046/20DZZconf-2022a
- [7] V. Karaev, Y. Titchenko, M. Panfilova, M. Ryabkova, E. Meshkov, K. Ponur, “Application of the Doppler Spectrum of the Backscattering Microwave Signal for Monitoring of Ice Cover: A Theoretical View”, Remote Sensing, 2022, Vol. 14, p. 2331. doi: 10.3390/rs14102331
- [8] K. Ponur, Yu. Titchenko, V. Karaev, E. Meshkov, M. Panfilova, I. Lebedev, A. Krylov, E. Khakin, “Experiment with the X-band radar at the Nizhny Novgorod cable car: First Results”, Russian Journal of Geophysical Researches, Vol. 23, No. 1, ES1001, doi: 10.2205/2022ES000822, 2023.
- [9] V. Karaev, M. Panfilova, Y. Titchenko, E. Meshkov, G. Balandina and Z. Andreeva, "Monitoring of Inland Waters by Dual-Frequency Precipitation Radar: First Results," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 11, No. 11, pp. 4364-4372, doi: 10.1109/JSTARS.2018.2874697, 2018.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН FFUF-2021-0006.

Авторы выражают благодарность НПФ «Микран» за разработку и изготовление радиолокатора X-диапазона. Также авторы благодарят сотрудников АО «Нижегородские канатные дороги» за их помощь в проведении эксперимента и сотрудников нижегородского филиала компании «EFT GROUP» за участие в эксперименте и проведение измерений с помощью GNSS приемника.