

Моделирование доплеровского спектра сигнала, отражённого морским ледяным покровом, в бистатической схеме измерения в L- и Ku-диапазонах

Ю. А. Титченко¹, Д. А. Ковалдов¹, В. Ю. Караев¹, В. П. Лопатин², В. Ф. Фатеев²

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: yuriy@ipfran.ru*

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

В связи с широким применением методов дистанционного зондирования для контроля площади, занимаемой ледяным покровом в Мировом океане, и активным развитием двухпозиционной (бистатической) радиолокации с помощью сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) актуальной задачей становится моделирование отражённого сигнала ГНСС, принимаемого на различных носителях. В данной работе развивается подход построения полуэмпирических моделей доплеровского спектра микроволнового сигнала, бистатически отражённого ледяным покровом. Для сравнения рассматривается бистатическое дистанционное зондирование в L- и Ku-диапазонах. Показано, что для определения типа подстилающей поверхности (лёд или морская поверхность) можно анализировать коэффициент эксцесса и ширину доплеровского спектра бистатически отражённого сигнала. В некоторых случаях эта ширина совпадает для ледяного покрова и открытой воды со слабым приводным ветром в L-диапазоне. При этом коэффициент эксцесса доплеровского спектра существенно отличается, что позволяет распознавать ледяной покров даже в случаях слабого волнения.

Ключевые слова: квазизеркальное рассеяние, двухпозиционная радиолокация, бистатика, доплеровский спектр, морские волны, ледяной покров, полуэмпирическая модель, ГНСС, L-диапазон, Ku-диапазон

Одобрена к печати: 21.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-178-191

Введение

Морской лёд занимает значительную часть поверхности Мирового океана. В арктических районах постоянный ледяной покров может существовать на северных широтах выше 72°, а в зимнее время простираться в средние широты. В результате морской лёд является важным климатическим фактором и представляет значительную опасность для судоходства.

В настоящее время при моностатическом (приёмник и излучатель на одном спутнике) радиолокационном зондировании ледяного покрова основным информационным параметром служит сечение обратного рассеяния.

Для обнаружения морского льда с помощью скаттерометра, помимо относительно большого значения сечения обратного рассеяния, существенными становятся две отличительные особенности по сравнению с открытой водой: во-первых, рассеяние льдом значительно более изотропно и, во-вторых, различие между вертикальной и горизонтальной соосной поляризацией существенно меньше, чем для морской поверхности. Именно последняя особенность применяется для повышения точности алгоритмов, в частности, у двухполяризационных радиолокаторов (Nekrasov et al., 2020). Для диагностики льда с помощью радаров с синтезированной апертурой антенны также используется поляризационный подход (Радиолокационные..., 2007).

Альтернативно традиционным моностатическим спутникам дистанционного зондирования в последнее время развиваются методы двухпозиционной радиолокации (бистатической, когда приёмник и излучатель находятся на разных космических аппаратах). Преимущество бистатической радиолокации заключается в возможности проводить измерения в удалённой от приёмника и излучателя области и при этом оставаться в квазизеркальной области отра-

жения. Работа в квазизеркальной области обеспечивает высокий уровень мощности принимаемого сигнала, а, например, при отражении от водной поверхности существует простое и точное теоретическое описание отражённого сигнала. Основы бистатической радиолокации в квазизеркальной области отражения для задач дистанционного зондирования водной поверхности были заложены ещё во второй половине XX в. (Басс, Фукс, 1972; Гарнакерьян, Сосунов, 1978; Зубкович, 1968; Исакович, 1952; Калмыков и др., 1966). Проверка теоретических основ проводилась в том числе в наземных бистатических экспериментах (Бондур и др., 2009) и в случае приёма отражённых спутниковых сигналов на самолётах (Sutton et al., 1973). Идеи бистатического дистанционного зондирования с помощью спутников высказывались начиная со второй половины 80-х гг. XX в. (Кучерявенков и др., 1986; Сахно и др., 2009). Первые опыты по бистатической радиолокации на спутниковых носителях были посвящены дистанционному зондированию других небесных тел, например Луны, Венеры, Марса, Солнца (Павельев и др., 1988; Яковлев, 1985). Далее были проведены бистатические эксперименты по дистанционному зондированию различных земных поверхностей с помощью приёмников и излучателей, расположенных на спутниках (Павельев и др., 1997; Потемкин и др., 2012; Рубашкин и др., 1993).

В качестве излучателей наиболее выгодно оказалось использовать системы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Во-первых, излучателей ГНСС на орбите всегда довольно много, и их количество растёт (https://gssc.esa.int/navipedia//index.php/GNSS_signal). Сигналы ГНСС излучаются в удобном для дистанционного зондирования L-диапазоне длин волн, в котором отсутствует чувствительность к осадкам в атмосфере. При этом излучение в L-диапазоне используется для измерения солёности и температуры воды, а также других параметров подстилающей поверхности. Приёмники сигналов ГНСС легкодоступны, компактны и энергоэффективны благодаря широкой распространённости. При этом сигналы обладают высокой стабильностью частоты и их кодовые модуляции известны с хорошей точностью (Бакитько и др., 2005; Galileo..., 2023), так что нет необходимости принимать прямой сигнал для получения информации об излучённом сигнале. В традиционных приложениях (навигационных) сигналы ГНСС, поступающие на антенну приёмника от отражающих поверхностей (многолучевое распространение), создают помехи сигналам, полученным непосредственно от спутников, что часто может приводить к снижению точности позиционирования. Начиная с 1993 г. для приложений дистанционного зондирования исследователи стали использовать отражённые сигналы ГНСС при различном расположении приёмника: наземном (Hobiger et al., 2014; Martín-Neira et al., 2002), самолётном (Авдеев и др., 2012; Nogues-Correig et al., 2007) и орбитальном (Lopatin, Fateev, 2022; Martín-Neira, 1993). В рамках этой концепции передатчик ГНСС вместе с приёмником, способным обрабатывать отражённые сигналы ГНСС, становятся двухпозиционным радиолокатором. Такая схема измерений активно используется для дистанционного зондирования ледяного покрова (Gleason, 2010). В частности, есть исследования, позволяющие в данной схеме измерений определять наличие и толщину ледяного покрова (Li et al., 2017; Schiavulli et al., 2017). Для создания новых схем измерения и алгоритмов нахождения ледяного покрова и его параметров, а также для лучшего понимания взаимодействия сигналов ГНСС с подстилающей поверхностью требуется разработать подход моделирования характеристик отражённого ледяным покровом сигнала ГНСС.

В предыдущих работах авторов была создана теоретическая модель доплеровского спектра (ДС) сигнала, отражённого взволнованной водной поверхностью в бистатической постановке задачи (Titchenko, 2020). Данное исследование направлено на построение полуэмпирической модели ДС бистатически отражённого ледяным покровом СВЧ-сигнала. В работе приводится сравнение некоторых свойств ДС сигнала, отражённого ледяным покровом и морскими волнами. В ходе исследования используются зависимости коэффициента отражения излучения ледяным покровом от угла падения (диаграмма рассеяния (ДР) поверхности) для Ku- и L-диапазонов. Они получены с помощью двухчастотного дождевого радиолокатора (для Ku-диапазона), установленного на спутнике миссии GPM (*англ.* Global Precipitation Measurement) (Nouguier et al., 2016), и спутника TDS-1 (*англ.* TechDemoSat-1) (Unwin et al., 2016) английской миссии мониторинга катастроф (для L-диапазона).

Метод моделирования доплеровского спектра

Рассмотрим схему измерений двухпозиционного радиолокатора на *рис. 1*. Средний уровень отражающей поверхности (ледяной покров или взволнованная водная поверхность) находится в плоскости $Z = 0$. Характеристики отражающей поверхности задаются с помощью ДР отражающей поверхности $RCS(\theta)$ (англ. Radar Cross-Section) для конкретного частотного диапазона радара (Ковалдов и др., 2024). В моностатическом случае ДР вводится как нормированная мощность сигнала, отражённого в обратном направлении при падении излучения под углом θ к вертикали. При двухпозиционной схеме измерений, когда приёмник находится в области квазизеркального отражения, ДР показывает распределение нормированной мощности отражённого сигнала от угла отклонения от вертикали нормали к поверхности в точке отражения. В результате ДР отражающей поверхности может быть измерена, а затем использована для моделирования как в моностатической, так и в бистатической постановке задачи.

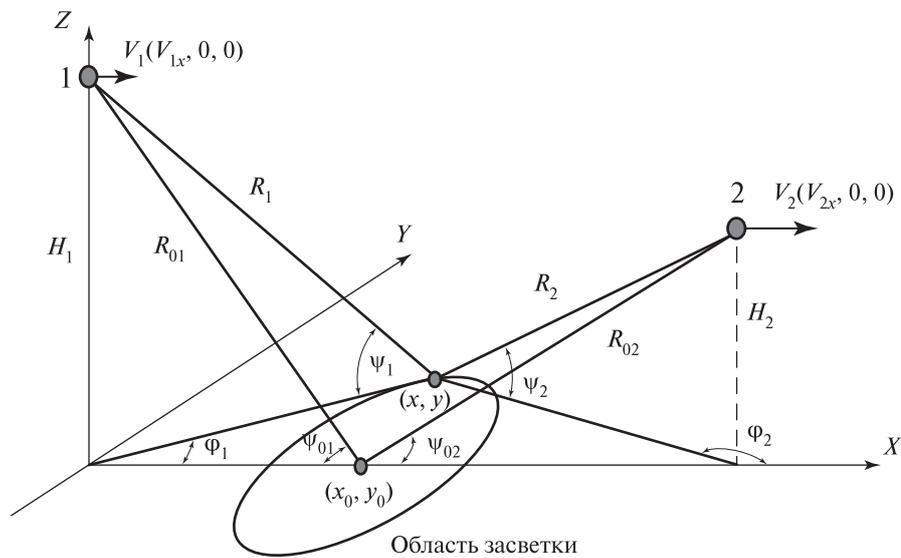


Рис. 1. Схема измерений

Излучатель располагается в точке 1 на высоте H_1 от среднего уровня отражающей поверхности и движется со скоростью V_1 , обладающей только компонентой вдоль оси X . Приёмник находится в точке 2 на высоте H_2 и движется со скоростью V_2 , обладающей только компонентой вдоль оси X . Условие о равенстве нулю проекций скорости носителей на оси Z и Y использовано для упрощения схемы измерений и легко может быть изменено при сохранении дальнейших рассуждений. Пересечение оси диаграмм направленности (ДН) излучающей и приёмной антенны со средним уровнем отражающей поверхности происходит в точке (x_0, y_0) . Угол скольжения излучающей антенны ψ_{01} , приёмной — ψ_{02} . Углы ϕ_1 и ϕ_2 задают азимутальные углы от оси X до линий, соединяющих текущую точку $(x, y, 0)$ и проекции на плоскость $Z = 0$ расположения излучателя и приёмника. Дальность от текущей точки до приёмника R_2 и до излучателя R_1 . Угол между плоскостью $Z = 0$ и линиями, соединяющими текущую точку с излучателем — ψ_1 , с приёмником — ψ_2 . Излучается сферическая волна с волновым числом $k = 2\pi/\lambda$, где λ — длина волны излучения.

Для каждой точки засвечиваемой области проекция относительной скорости будет:

$$V_{\tau}(x, y) = -V_{1x} \cos \psi_1 \cdot \cos \phi_1 - V_{2x} \cos \psi_2 \cdot \cos \phi_2.$$

Для нахождения ДС необходимо посчитать проекцию относительной скорости для каждой точки поверхности. Скорость даёт нам частоту в ДС по следующей формуле: $f(x, y) = V_{\tau}(x, y)/\lambda$.

Амплитуду ДС будем считать как произведение коэффициента отражения Френеля, ДН приёмной и излучающей антенны и ДР отражающей поверхности:

$$S(f(x, y)) = \left| R^{ii}(x, y) \right|^2 G_1^2(x, y) G_2^2(x, y) \times 10^{\text{RCS}(\theta(x, y))/10}, \quad (1)$$

где угол $\theta = (\psi_1 - \psi_2)/2$; символы ii у коэффициента Френеля R означают излучаемую (первый) и принимаемую (второй) поляризацию (Zavorotny, Voronovich, 2000), $i = H, V, R, L$, где H — горизонтальная поляризация, V — вертикальная, R — правая круговая, L — левая круговая:

$$R^{HH} = \frac{\sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}}{\sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}}, \quad R^{VV} = \frac{\varepsilon \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}}{\varepsilon \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}}},$$

$$R^{RR} = R^{LL} = \frac{1}{2}(R^{VV} + R^{HH}), \quad R^{RL} = R^{LR} = \frac{1}{2}(R^{VV} - R^{HH}).$$

Диаграммы направленности передающей и принимающей антенны будем считать гауссовыми и выразим следующим образом (Зубкович, 1968):

$$G_1(x, y) = \exp \left\{ -1,38 \frac{\sin^2 \psi_{01}}{R_{01}^2 \delta_{1x}^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_{01}^2 \delta_{1y}^2} \right\}, \quad G_2(x, y) = \exp \left\{ -1,38 \frac{\sin^2 \psi_{02}}{R_{02}^2 \delta_{2x}^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_{02}^2 \delta_{2y}^2} \right\},$$

где δ_{1x} и δ_{1y} — ширина ДН излучающей антенны; δ_{2x} и δ_{2y} — ширина ДН приёмной антенны. Ширина всех ДН антенн задаётся на уровне половинной мощности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

При повторяющейся частоте для разных текущих точек необходимо суммировать все амплитуды ДС на одинаковой частоте.

Надо отметить, что в данной работе не учитывается азимутальная зависимость коэффициента отражения, так как, в отличие от морского волнения, ледяной покров практически изотропен.

Для моделирования ДС сигнала, отражённого ледяным покровом, предлагается использовать экспериментально измеренные зависимости ДР для разных диапазонов длин волн для ледяного покрова Охотского моря. Для расчётов возьмём ДР подстилающей поверхности от угла падения в децибелах, измеренные спутником GPM в Ku-диапазоне и TDS-1 в L-диапазоне. Воспользуемся результатами регрессионного анализа экспериментальных данных для ледяного покрова из работ (Караев и др., 2022; Karaev et al., 2022) для Ku-диапазона и публикации (Ковалдов и др., 2025) для L-диапазона:

$$\text{RCS}_{ice}(\theta) = a_{ice} + b_{ice} \theta + c_{ice} \theta^2 + d_{ice} \exp(-e_{ice} |\theta|),$$

где значения коэффициентов приводятся в *таблице*.

Значения коэффициентов регрессий для диаграммы рассеяния

	a_{ice}	b_{ice}	c_{ice}	d_{ice}	e_{ice}
Ku-диапазон	-3,151789	-0,008708	-0,016928	26,01349	0,528842
L-диапазон	33,152630	$1,52 \cdot 10^{-8}$	-0,083420	12,86333	0,690166

Для морской поверхности разработана теоретическая модель ДС (Titchenko, 2020), но для проверки эффективности предлагаемого подхода воспользуемся регрессионной зависимостью, полученной по данным GPM для водной поверхности в Ku-диапазоне (Караев и др., 2022):

$$RCS_{sea}(\theta) = a_{sea} + b_{sea}\theta + c_{sea}\theta^2 + d_{sea}\theta^3 + e_{sea}\theta^4 + f_{sea}\theta^5,$$

где $a_{sea} = 11,291178$, $b_{sea} = 0,0062640913$, $c_{sea} = -0,04076229$, $d_{sea} = -0,00010407121$, $e_{sea} = 1,3805852 \cdot 10^{-5}$, $f_{sea} = 7,9111159 \cdot 10^{-8}$.

На *рис. 2* приведено сравнение регрессий ДР ледяного покрова и морской поверхности от угла падения θ .

Так как значения ДР ледяного покрова для L-диапазона не калибровались, то все точки зависимости сдвинуты на одинаковую величину так, чтобы максимум графика совпал с максимумом ДР для Ku-диапазона, которая получена по калиброванным данным сечения обратного рассеяния. Таким образом, зависимость для L-диапазона можно использовать только для определения скорости спадания, а не абсолютных значений. В результате далее в работе мы не будем анализировать абсолютные значения ДС отражённых сигналов, а только их форму. На *рис. 2* видно, что зависимость ДР для L-диапазона спадает медленнее. Возможно, это связано с тем, что более длинные волны лучше проникают в морской лёд и более значительный вклад в отражённый сигнал начинает вносить объёмное рассеяние от включений в толщу ледяного покрова. Так как диэлектрические свойства ледяного покрова могут существенно различаться, то для корректного моделирования отражённого сигнала L-диапазона возможно применять региональные модели ДР ледяного покрова. В данном исследовании используются экспериментальные данные, полученные в феврале – марте только в Охотском море.

Далее на основе этих данных об отражающих поверхностях рассмотрим моделирование ДС отражённого сигнала по формуле (1).

Для примера рассмотрим моделирование ДС отражённого сигнала в Ku-диапазоне. Сначала на *рис. 3* мы берём случай стационарного излучателя, расположенного на высоте 500 м. Приёмник движется на высоте 5 км со скоростью 200 м/с, что соответствует движению самолёта. Антенны передатчика и приёмника симметричные, с шириной ДН 30 и 14° соответственно. Угол скольжения передающей антенны 70°, приёмной — 60°.

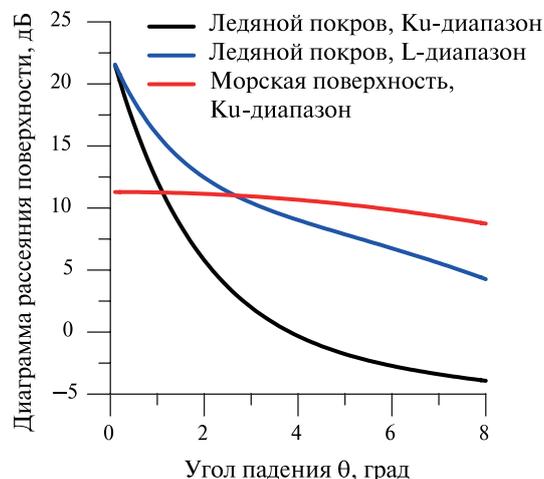


Рис. 2. Диаграммы рассеяния ледяного покрова и морского волнения от угла падения

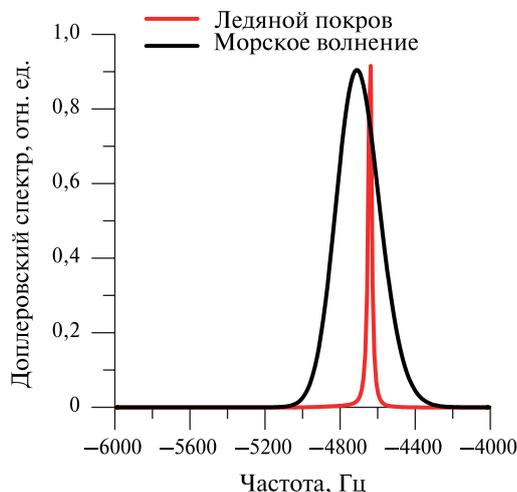


Рис. 3. Доплеровские спектры сигнала в Ku-диапазоне, отражённого ледяным покровом (красная линия) и водной поверхностью (чёрная), для стационарного передатчика и приёмника на самолёте

На *рис. 3* видно, что ДС различаются шириной. Ширина ДС на уровне -10 дБ сигнала, отражённого от ледяного покрова, — 178 Гц, а для воды — 505 Гц. Так же заметно, что отличается сама форма зависимости. Коэффициент эксцесса (КЭ) ДС для ледяного покрова равен 24, а для воды — 0,15.

Далее смоделируем ДС сигналов, отражённых ледяным покровом в L- и Ku-диапазонах, и сравним с измеренными ДС в L-диапазоне (GPS (*англ.* Global Positioning System) сиг-

нал) на спутнике TDS-1 (рис. 4). Для расчётов возьмём ДН принимающей антенны 30° . Угол скольжения излучающей и приёмной антенны $60,7^\circ$. Расстояние до центра ДН от излучателя 21 055 км, а от приёмника — 731 км. Модуль скорости приёмника 7,6 км/с, излучателя — 2,7 км/с.

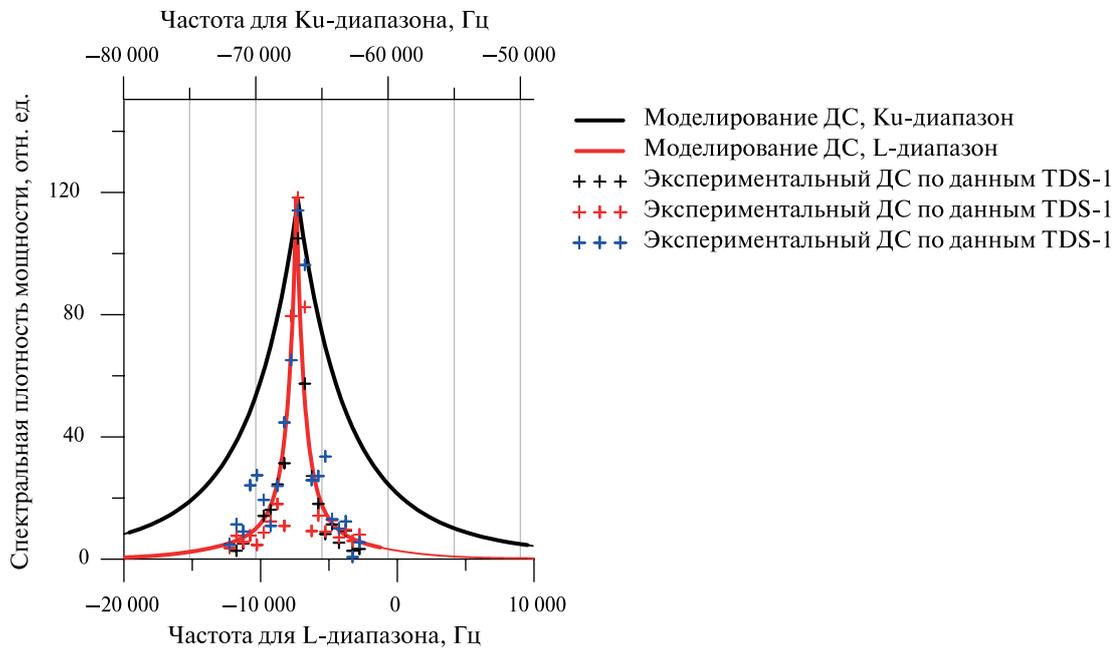


Рис. 4. Доплеровские спектры отражённого ледяным покровом сигнала, полученные по регрессиям для L-диапазона (красная линия) и Ku-диапазона (чёрная), в сравнении с экспериментально измеренными ДС (плюсы разных цветов) по данным спутника TDS-1 в 2017 г.

Экспериментальные измерения выполнены TDS-1 в Охотском море в 2017 г. (Ковалдов и др., 2025) в области, где сплочённость ледяного покрова всё время была близка к 100 % (0 % — чистая вода, 100 % — сплошной лёд).

По рис. 4 видно, что ДС, полученный в результате моделирования с использованием регрессии для L-диапазона (красная линия), проходит внутри «облака» экспериментальных точек (плюсы), что было ожидаемо, так как регрессия построена в том числе с применением этих экспериментальных измерений. Также можно отметить, что ширина ДС в 10 раз выше для Ku-диапазона, что связано с разницей частот зондирования. При этом КЭ для Ku-диапазона соответствует 24, для L-диапазона — 4, что при прочих равных условиях определяется только ДР отражающих поверхностей, приведённых на рис. 2.

Зависимости доплеровского спектра отражённого сигнала

Используя описанный в предыдущем разделе подход для моделирования, рассмотрим влияние некоторых параметров на ширину и КЭ ДС отражённого сигнала. Везде далее предполагается, что излучается правая круговая поляризация, принимается левая круговая поляризация.

Рассмотрим влияние скорости приёмника на параметры ДС отражённого сигнала на рис. 5 (см. с. 184). Для расчётов возьмём ДН принимающей и излучающей антенны 30° . Углы скольжения излучающей и приёмной антенны 60° . Излучатель находится на орбите 20 000 км и движется со скоростью 3 км/с. От высоты орбиты приёмника результат практически не зависит, но она задана равной 500 км.

По рис. 5 видно, что ширина ДС, отражённого любой поверхностью, растёт линейно с увеличением скорости приёмника. При этом ДР отражающей поверхности существенно

влияет на результат. Одновременно КЭ ДС отражённого сигнала не зависит от скорости приёмника и при этом для ледяного покрова всегда отличен от нуля. Таким образом, можно отметить, что КЭ ДС отражённого сигнала содержит информацию об отражающей поверхности независимо от скорости приёмника.

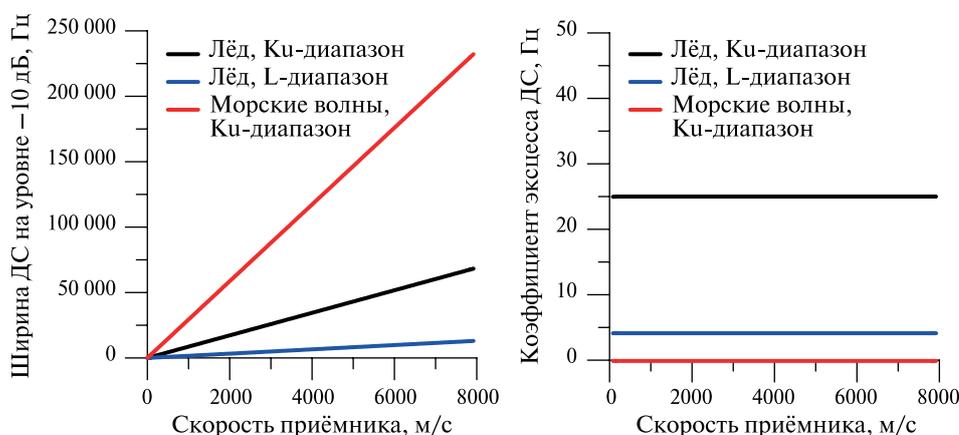


Рис. 5. Ширина (слева) и коэффициент эксцесса (справа) доплеровского спектра сигнала, отражённого ледяным покровом (по регрессии для L-диапазона (синяя линия) и Ку-диапазона (чёрная)) и морскими волнами (красная) (по регрессии в Ку-диапазоне), в зависимости от скорости движения приёмника

Далее рассмотрим влияние ДН приёмной антенны на параметры ДС отражённого сигнала на рис. 6. Угол скольжения излучающей и приёмной антенны 60° . Скорость излучателя 3 км/с, приёмника — 7,6 км/с. Излучатель располагается на орбите 20 000 км, приёмник на 500 км. Для сравнения, помимо ранее используемых регрессий, воспользуемся теоретической моделью ДС отражённого сигнала (Titchenko, 2020) с учётом модели спектра волнения (Ryabkova et al., 2019).

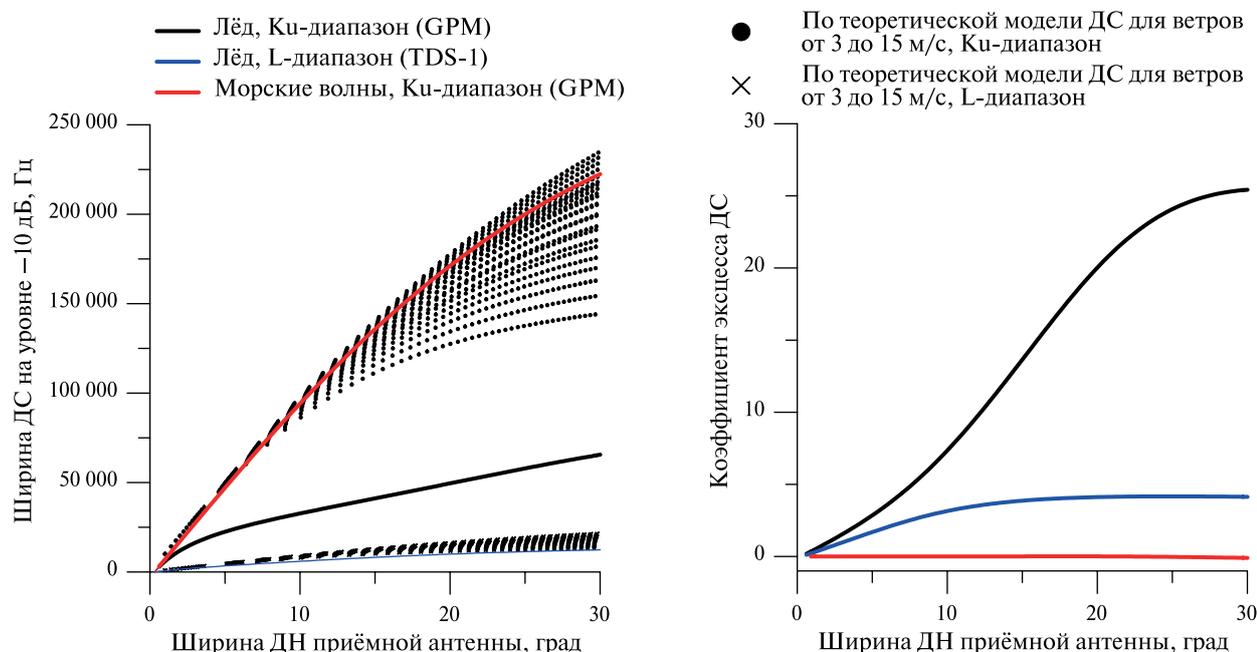


Рис. 6. Ширина (слева) и коэффициент эксцесса (справа) доплеровского спектра сигнала, отражённого ледяным покровом (по регрессии для L-диапазона (синяя линия) и Ку-диапазона (чёрная)) и морскими волнами (красная) (по регрессии в Ку-диапазоне), в зависимости от ширины ДН приёмной антенны. Символами обозначены расчёты по теоретической модели ДС для случаев ветрового волнения со скоростью ветра от 3 до 15 м/с

На *рис. 6* точками (для Ku-диапазона) и наклонными крестиками (для L-диапазона) обозначена ширина ДС сигнала, отражённого от водной поверхности заданной моделью спектра волнения для соответствующего частотного диапазона. Для расчётов выбраны полный диапазон ветрового разгона (от развивающегося до полностью развитого) и скорость ветра от 3 до 15 м/с. Таким образом, на *рис. 6* показан практически весь разброс ДС, который может наблюдаться при отражении от взволнованной водной поверхности для соответствующего частотного диапазона в данной постановке задачи.

Видно, что с ростом ДН возникает разброс в ширине ДС. Это связано с тем, что при увеличении ДН появляется чувствительность к параметрам ветрового волнения, зависящим от скорости ветра и ветрового разгона.

Для Ku-диапазона ширина ДС для воды и льда значительно различается, начиная уже с небольших значений ширины ДН антенны. А для L-диапазона ширина ДС для слабых ветров может быть близка к ширине ДС для ледяного покрова. Для этих случаев надёжным индикатором наличия ледяного покрова может стать КЭ, который отличается от нуля для ледяного покрова при использовании антенн с широкой ДН.

Коэффициент эксцесса для воды при любом ветровом волнении равен нулю. Исключением может быть случай абсолютно ровной водной поверхности, что наблюдается крайне редко.

В L-диапазоне при слабом волнении в случае зеркального отражения может присутствовать когерентная компонента сигнала (Zavorotny et al., 2020), которая способна искажать форму ДС отражённого сигнала, и КЭ, возможно, будет отличным от нуля. Однако этот эффект требует отдельного теоретического и экспериментального изучения.

Далее на *рис. 7* рассмотрим зависимости параметров ДС отражённого сигнала от угла скольжения осей ДН приёмной ψ_{02} и излучающей ψ_{01} антенны. Излучатель располагается на орбите 20 000 км, приёмник на 500 км. Диаграмма направленности принимающей антенны 14° , излучающей — 30° . Скорость излучателя 3 км/с, приёмника — 7,6 км/с.

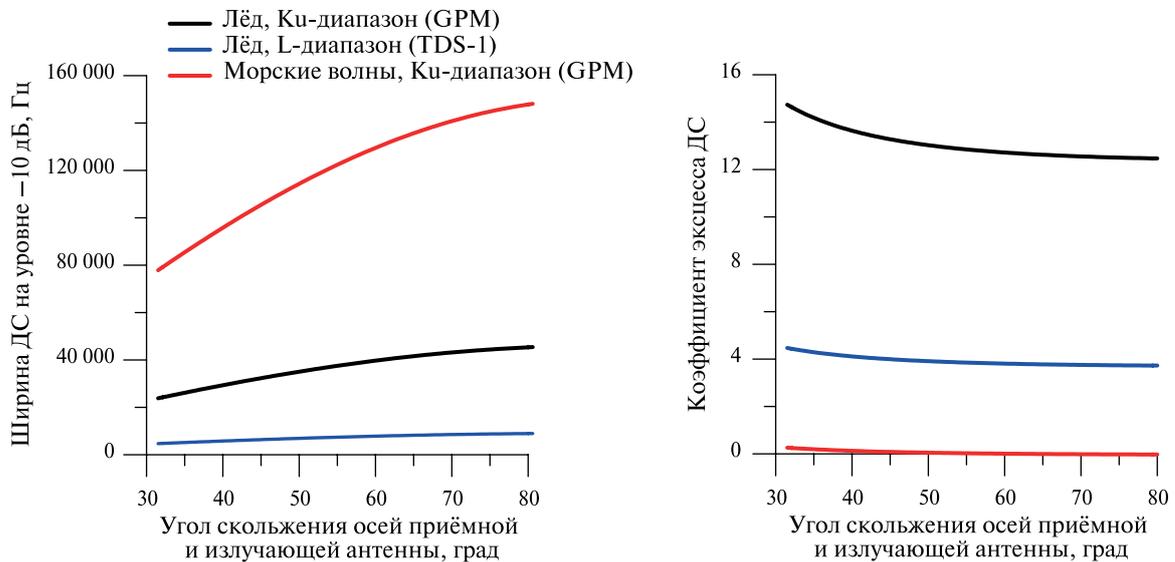


Рис. 7. Ширина (*слева*) и коэффициент эксцесса (*справа*) доплеровского спектра сигнала, отражённого ледяным покровом (по регрессии для L-диапазона (синяя линия) и Ku-диапазона (чёрная)) и морскими волнами (красная) (по регрессии в Ku-диапазоне), в зависимости от угла скольжения осей диаграммы направленности приёмной и излучающей антенны

Из *рис. 7* видно, что угол зондирования практически не оказывает влияния на ширину ДС в L-диапазоне при отражении от ледяного покрова. Что позволяет при неизменной скорости и ДН антенны приёмника записывать отражённый сигнал в заранее заданных

границах. Например, для TDS-1 диапазон частоты сохраняемого ДС всегда фиксированный (от -5000 до 4500 Гц относительно частоты максимума). Коэффициент эксцесса при малых углах скольжения отличается от нуля для водной поверхности и от константы для ледяного покрова.

Рассмотрим ДС, отражённые от водной поверхности, приведённые на *рис. 8 (слева)*. По ним видно, что при 50° и 70° угла скольжения ДС отражённого сигнала имеют гауссовый вид. Тогда как при угле скольжения 33° ДС заметно искажён и, соответственно, имеет отличный от нуля КЭ. Этот результат связан с поведением коэффициента отражения Френеля, зависимость которого представлена на *рис. 8 справа*.

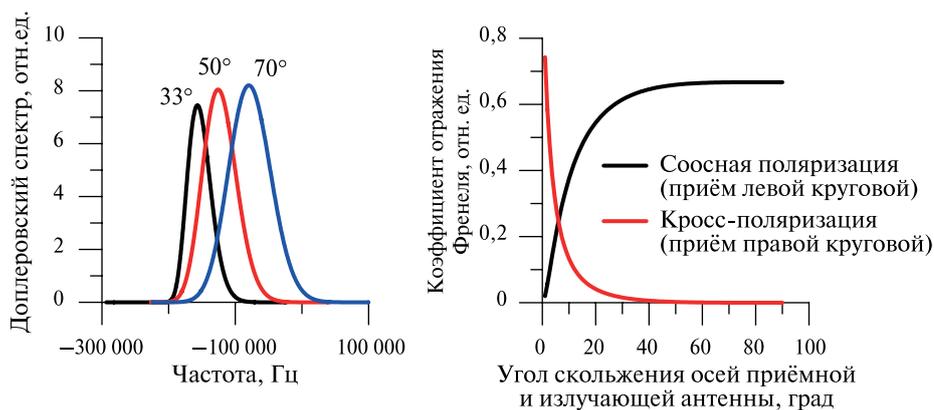


Рис. 8. Доплеровские спектры (*слева*) сигналов, отражённых в бистатической постановке задачи от водной поверхности, в Ku-диапазоне для углов скольжения приёмной антенны 33° , 50° и 70° . Зависимость коэффициента отражения Френеля (*справа*) для соосной и кросс-поляризации от угла скольжения приёмной и излучающей антенны

Так как, отражаясь от воды и ледяного покрова, круговая поляризация сигнала меняется, то для правой круговой поляризации навигационных сигналов соосной считаем левую круговую. Из *рис. 8* справа видно, что если ось приёмной антенны направлена под углом 30° , то за счёт ширины в 7° во все стороны от оси часть лучей будет принята с отличающимся коэффициентом Френеля, что и приводит к искажению ДС. Однако это искажение недостаточно велико, чтобы КЭ ДС от водной поверхности и ледяного покрова пересекались. В результате возможность определения типа поверхности по КЭ сохраняется даже при углах скольжения антенн от 30° . При меньших углах представленный в работе подход не работает, так как требуется учитывать эффекты затенения.

Заключение

В работе рассмотрено моделирование доплеровского спектра отражённого ледяным покровом сигнала с использованием эмпирической диаграммы рассеяния ледяного покрова для конкретного частотного диапазона. Впервые эти спектры смоделированы в бистатической постановке задачи для L-диапазона. Полученные результаты сравниваются с экспериментально измеренными ДС отражённого сигнала на спутнике TDS-1. Проведено исследование ширины и коэффициента эксцесса ДС отражённого сигнала в зависимости от скорости, ширины и угла скольжения оси диаграммы направленности антенны приёмника. В ходе изучения показано, что при широкой ДН антенны приёмника можно определять наличие ледяного покрова по КЭ ДС отражённого сигнала. Причём в случае слабого волнения КЭ может являться даже более надёжным индикатором типа поверхности, чем ширина ДС. Важным плюсом такого подхода является возможность анализа только формы ДС отражённого сигнала без необходимости калибровки мощностных характеристик.

Для проверки представленного в работе подхода моделирования ДС отражённого сигнала требуется провести сравнение с экспериментальными измерениями при разных параметрах схемы измерений и в различных диапазонах микроволнового излучения.

Дальнейшим направлением исследований в данной области будет оценка возможности определения других параметров ледяного покрова (например, сплочённости, солёности, температуры ледяного покрова) по измерениям различных параметров ДС двухпозиционным радаром с использованием сигналов ГНСС.

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

Литература

1. Авдеев В. А., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов А. А., Иванов В. Ф., Кошкарров А. С., Сахно И. В., Симонов А. Б., Ткачев Е. А., Успенский К. К., Шалдаев А. В., Шульженко А. В. Комплекс экспериментов по приему отраженных от земной поверхности сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Тр. Ин-та приклад. астрономии РАН. 2012. № 23. С. 303–306.
2. Бакитко Р. В., Булавский Н. Т., Горев А. П., Дворкин В. В., Ефименко В. С., Иванов Н. Е., Карпейкин А. В., Мищенко И. Н., Нартов В. Я., Перов А. И., Перьков А. Е., Тюбалин В. В., Урличич Ю. М., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: 3-е изд., перераб. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.
3. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
4. Бондур В. Г., Доброзраков А. Д., Курекин А. С., Курекин А. А., Пичугин А. П., Яцевич С. Е. Рассеяние радиоволн морской поверхностью при бистатической локации // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 6. С. 3–15.
5. Гарнакерьян А. А., Сосунов А. С. Радиолокация морской поверхности. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 1978. 144 с.
6. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Советское радио, 1968. 224 с.
7. Исакович М. А. Рассеяние волн от статистически-шероховатой поверхности // Журн. эксперим. и теор. физики. 1952. Т. 23. Вып. 3(9). С. 305–314.
8. Калмыков А. И., Курекин А. С., Островский И. Е., Пустовойтенко В. В. Двухпозиционное рассеяние радиоволн поверхностью моря при малых углах скольжения // Изв. вузов. Радиофизика. 1966. Т. 10. № 6. С. 1073–1082.
9. Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Панфилова М. А. и др. Доплеровские спектры радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона, измеренные при движении над ледяным покровом и морской поверхностью: сравнение моделей и определение типа отражающей поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 247–258. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-247-258.
10. Ковалдов Д. А., Титченко Ю. А., Караев В. Ю. и др. К вопросу об определении диаграммы рассеяния ледяного покрова по данным бистатического дистанционного зондирования в L-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 294–308. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308.
11. Ковалдов Д. А., Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Панфилова М. А. Особенности квазизеркального отражения СВЧ радиоволн морским льдом по данным бистатического дистанционного зондирования в L-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2025 (в печати).
12. Кучерявенков А. И., Милехин О. Е., Павельев А. Г. Анализ возможностей бистатической радиолокации Земли с помощью спутников // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 4. С. 86.
13. Павельев А. Г., Яковлев О. И., Кучерявенков А. И., Рубцов С. Н., Андреев Р. А., Мелихов А. Г. Опыт бистатической радиолокации Солнца с применением аппарата «Венера-16» // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 2. С. 127–132.
14. Павельев А. Г., Захаров А. И., Кучерявенков А. И., Сидоренко А. И., Кучерявенкова И. И., Павельев Д. А. Особенности распространения радиоволн, отраженных от земной поверхности при малых углах скольжения, на трассе связи низкоорбитальный спутник – геостационар // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 1. С. 51–57.

15. Потемкин Е. О., Кучерявенков И. А., Матюгов С. С., Павельев А. Г. Бистатическая радиолокация Земли с помощью спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 37–46.
16. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цымбала. Киев: Авиадиагностика, 2007. 440 с.
17. Рубашкин С. Г., Павельев А. Г., Яковлев О. И., Кучерявенков А. И., Сидоренко А. И., Захаров А. И. Отражение радиоволн поверхностью океана при бистатической локации с использованием двух спутников // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 3. С. 447–453.
18. Сахно И. В., Качев Е. А., Гаврилов Д. А., Успенский К. К. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 4. С. 34–39.
19. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в космосе. М.: Наука, 1985. 216 с.
20. Galileo Open Service Signal-in-Space Interface Control Document (OS SIS ICD). Iss. 2.1. European Union, 2023. 115 p. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.1.pdf.
21. 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. No. 8. P. 2017–2039. <https://doi.org/10.3390/rs2082017>.
22. 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.
23. Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M. et al. Application of the Doppler spectrum of the backscattering microwave signal for monitoring of ice cover: A theoretical view // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 10. Article 2331. <https://doi.org/10.3390/rs14102331>.
24. Li W., Cardellach E., Fabra F. et al. First spaceborne phase altimetry over sea ice using TechDemoSat-1 GNSS-R signals // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. Iss. 16. P. 8369–8376. <https://doi.org/10.1002/2017GL074513>.
25. Lopatin V., Fateev V. Methods of bistatic GNSS-radio altimetry for determining height profile of the ocean and their experimental verification // 5th Symp. Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019). Intern. Association of Geodesy Symp. 2022. V. 153. P. 127–132. https://doi.org/10.1007/1345_2022_139.
26. Martín-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry // ESA J. 1993. V. 17. No. 4. P. 331–355.
27. Martín-Neira M., Colmenarejo P., Ruffini G., Serra C. Altimetry precision of 1 cm over a pond using the wide-lane carrier phase of GPS reflected signals // Canadian J. Remote Sensing. 2002. V. 28. No. 3. P. 394–403. <https://doi.org/10.5589/m02-039>.
28. Nekrasov A., Khachaturian A., Labun J. et al. Towards the sea ice and wind measurement by a C-band scatterometer at dual VV/HH polarization: A prospective appraisal // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 20. Article 3382. <https://doi.org/10.3390/rs12203382>.
29. Nogues-Correig O., Cardellach Gali E., Sanz Campderros J., 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.
30. Nouguier F., Mouche A., Rasclé N. et al. Analysis of dual-frequency ocean backscatter measurements at Ku- and Ka-bands using near-nadir incidence GPM radar data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2016. V. 13. No. 9. P. 1310–1314. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2583198.
31. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Y. A review of wave spectrum models as applied to the problem of radar probing of the sea surface // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. No. 10. P. 7104–7134. <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
32. Schiavulli D., Frappart F., Ramillien G. et al. Observing sea/ice transition using radar images generated from TechDemoSat-1 delay Doppler maps // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. V. 14. No. 5. P. 734–738. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2676823.
33. Sutton R., Schroeder E., Thompson A., Wilson S. 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.1973.109169.
34. Titchenko Y. Bistatic Doppler spectrum of radiation reflected by a water surface // Russian J. Earth Sciences. 2020. V. 20. No. 6. Article ES6007. 8 p. DOI: 10.2205/2020ES000745.
35. Unwin M., Jales P., Tye J. et al. Spaceborne GNSS-reflectometry on TDS-1: Early mission operations and exploitation // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. Iss. 10. P. 4525–4539. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2603846.

36. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. No. 2. P. 951–964. DOI: 10.1109/36.841977.
37. Zavorotny V., Loria E., O'Brien A. et al. Investigation of coherent and incoherent scattering from lakes using CYGNSS observations // IGARSS 2020 — 2020 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2020. P. 5917–5920. DOI: 10.1109/igarss39084.2020.9323677.

Modeling of Doppler spectrum of signal reflected by sea ice cover in bistatic measurement scheme in L- and Ku-bands

Yu. A. Titchenko¹, D. A. Kovaldov¹, V. Yu. Karaev¹, V. P. Lopatin², V. F. Fateev²

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: yuriy@ipfran.ru

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

In connection with the widespread use of remote sensing methods for monitoring the area occupied by ice cover in the World Ocean and the active development of two-position (bistatic) radar techniques using global navigation satellite systems (GNSS) signals, modeling the reflected GNSS signal received on various carriers becomes an urgent task. In this paper, an approach to constructing semi-empirical models of Doppler spectrum of a microwave signal bistatically reflected by ice cover is developed. For comparison, bistatic remote sensing in L- and Ku-bands is considered. It is shown that to determine the type of the underlying surface (ice or sea surface), it is possible to analyze the kurtosis coefficient and the width of the Doppler spectrum of the bistatically reflected signal. In some cases, the width of Doppler spectrum of the reflected signal may coincide for the ice cover and open water with a weak surface wind in L-band. At the same time, the kurtosis coefficient of Doppler spectrum differs significantly, which makes it possible to distinguish ice cover even in case of weak waves.

Keywords: quasi-specular scattering, bistatic radar, Doppler spectrum, sea waves, ice cover, semi-empirical model, GNSS, L-band, Ku-band

Accepted: 21.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-178-191

References

1. Avdeev V. A., Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Gerasimenko I. S., Dobrikov V. A., Ivanov A. A., Ivanov V. F., Koshkarov A. S., Sakhno I. V., Simonov A. B., Tkachev E. A., Uspenskii K. K., Shaldaev A. V., Shul'zhenko A. V., A set of experiments on receiving signals reflected from the Earth's surface from satellite radio navigation systems GLONASS/GPS, *Trudy Instituta prikladnoi astronomii RAN*, 2012, No. 23, pp. 303–306 (in Russian).
2. Bakit'ko R. V., Bulavskii N. T., Gorev A. P., Dvorkin V. V., Efimenko V. S., Ivanov N. E., Karpeikin A. V., Mishchenko I. N., Nartov V. Ya., Perov A. I., Per'kov A. E., Tyubalin V. V., Urlichich Yu. M., Kharisov V. N., *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and functioning), 3rd ed., Moscow: Radiotekhnika, 2005 (in Russian).
3. Bass F. G., Fuks I. M., *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave scattering from statistically rough surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p. (in Russian).
4. Bondur V. G., Dobrozrakov A. D., Kurekin A. S., Kurekin A. A., Pichugin A. P., Yatsevich S. E., Radio scattering by the sea surface during bistatic location, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 3–15 (in Russian).
5. Garnaker'yan A. A., Sosunov A. S., *Radiolokatsiya morskoi poverkhnosti* (Sea surface radio location), Rostov-on-Don: Izd. Rostovskogo universiteta, 1978, 144 p. (in Russian).

6. Zubkovich S. G., *Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoi poverkhnosti* (Statistical characteristics of radio signals reflected from the Earth's surface), Moscow: Sovetskoe radio, 1968, 224 p. (in Russian).
7. Isakovich M. A., Scattering of waves from a statistically rough surface, *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1952, V. 23, No. 3(9), pp. 305–314 (in Russian).
8. Kalmykov A. I., Kurekin A. S., Ostrovskii I. E., Pustovoitenko V. V., Two-position scattering of radio waves by the sea surface at small grazing angles, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 1966, V. 10, No. 6, pp. 1073–1082 (in Russian).
9. Karaev V. Yu., Titchenko Yu. A., Panfilova M. A. et al., Doppler spectra of a microwave signal measured during movement over ice cover and sea waves: Comparison of models and determination of the kind of scattering surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 247–258 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-247-258.
10. Kovaldov D. A., Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu. et al., On the issue of determining the scattering diagram of ice cover using bistatic remote sensing data in the L-band, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 294–308 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-294-308.
11. Kovaldov D. A., Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Peculiarities of quasi-specular reflection of microwave radio waves by sea ice based on bistatic remote sensing data in the L-band, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025 (in Russian) (in print).
12. Kucheryavenkov A. I., Milekhin O. E., Pavel'ev A. G., Analysis of the possibilities of bistatic radar of the Earth using satellites, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1986, No. 4, p. 86 (in Russian).
13. Pavel'ev A. G., Yakovlev O. I., Kucheryavenkov A. I. et al., Attempt to perform bistatic radio location of the Sun using Venera-16, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1988, V. 31, No. 2, pp. 91–95, <https://doi.org/10.1007/BF01039170>.
14. Pavel'ev A. G., Zakharov A. I., Kucheryavenkov A. I., Sidorenko A. I., Kucheryavenkova I. I., Pavel'ev D. A., Features of propagation of radio waves reflected from the Earth's surface at small grazing angles on the low-orbit satellite–geostationary satellite, *Radiotekhnika i elektronika*, 1997, V. 42, No. 1, pp. 51–57 (in Russian).
15. Potemkin E. O., Kucheryavenkov I. A., Matyugov S. S., Pavel'ev A. G., Bistatic radio location of the Earth's surface from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 4, pp. 37–46 (in Russian).
16. *Radiolokatsionnye metody i sredstva operativnogo distantsionnogo zondirovaniya Zemli s aehrokosmicheskikh nositelei* (Radar methods and means of operational remote sensing of the Earth from aerospace carriers), S. N. Konyukhova, V. I. Dranovskogo, V. N. Tsybala (eds.), Kiev: Aviadiagnostika, 2007, 440 p. (in Russian).
17. Rubashkin S. G., Pavel'ev A. G., Yakovlev O. I., Kucheryavenkov A. I., Sidorenko A. I., Zakharov A. I., Reflection of radio waves by the ocean surface in bistatic location using two satellites, *Radiotekhnika i elektronika*, 1993, V. 38, No. 3, pp. 447–453 (in Russian).
18. Sakhno I. V., Tkachev E. A., Gavrilov D. A., Uspenskii K. K., Small spacecraft for sea surface survey using signals from satellite radio navigation systems, *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2009, V. 52, No. 4, pp. 34–39 (in Russian).
19. Yakovlev O. I., *Rasprostranenie radiovoln v kosmose* (Propagation of radio waves in space), Moscow: Nauka, 1985, 216 p. (in Russian).
20. *Galileo Open Service Signal-in-Space Interface Control Document (OS SIS ICD). Iss. 2.1*, European Union, 2023, 115 p., https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.1.pdf.
21. 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, No. 8, pp. 2017–2039, <https://doi.org/10.3390/rs2082017>.
22. 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, pp. 271–282, DOI: 10.1002/2013RS005359.
23. Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M. et al., Application of the Doppler spectrum of the backscattering microwave signal for monitoring of ice cover: A theoretical view, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 10, Article 2331, <https://doi.org/10.3390/rs14102331>.
24. Li W., Cardellach E., Fabra F. et al., First spaceborne phase altimetry over sea ice using TechDemoSat-1 GNSS-R signals, *Geophysical Research Letters*, 2017, V. 44, Iss. 16, pp. 8369–8376, <https://doi.org/10.1002/2017GL074513>.
25. Lopatin V., Fateev V., Methods of bistatic GNSS-radio altimetry for determining height profile of the ocean and their experimental verification, *5th Symp. Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019). Intern. Association of Geodesy Symp.*, 2022, V. 153, pp. 127–132, DOI: https://doi.org/10.1007/1345_2022_139.

26. Martín-Neira M., A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry, *ESA J.*, 1993, V. 17, No. 4, pp. 331–355.
27. Martín-Neira M., Colmenarejo P., Ruffini G., Serra C., Altimetry precision of 1 cm over a pond using the wide-lane carrier phase of GPS reflected signals, *Canadian J. Remote Sensing*, 2002, V. 28, No. 3, pp. 394–403, <https://doi.org/10.5589/m02-039>.
28. Nekrasov A., Khachaturian A., Labun J. et al., Towards the sea ice and wind measurement by a C-band scatterometer at dual VV/HH polarization: A prospective appraisal, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 20, Article 3382, <https://doi.org/10.3390/rs12203382>.
29. Nogues-Correig O., Cardellach Gali E., Sanz Campderros J., 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, pp. 156–174, DOI: 10.1109/TGRS.2006.882257.
30. Nouguier F., Mouche A., Rasclé N. et al., Analysis of dual-frequency ocean backscatter measurements at Ku- and Ka-bands using near-nadir incidence GPM radar data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, V. 13, No. 9, pp. 1310–1314, DOI: 10.1109/LGRS.2016.2583198.
31. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Y., A review of wave spectrum models as applied to the problem of radar probing of the sea surface, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, V. 124, No. 10, pp. 7104–7134, <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
32. Schiavulli D., Frappart F., Ramillien G. et al., Observing sea/ice transition using radar images generated from TechDemoSat-1 dlay Doppler maps, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, V. 14, No. 5, pp. 734–738, DOI: 10.1109/LGRS.2017.2676823.
33. Sutton R., Schroeder E., Thompson A., Wilson S., Satellite-aircraft multipath and ranging experiment results at L band, *IEEE Trans. Communications*, 1973, V. 21, No. 5, pp. 639–647, DOI: 10.1109/TCOM.1973.109169.
34. Titchenko Y., Bistatic Doppler spectrum of radiation reflected by a water surface, *Russian J. Earth Sciences*, 2020, V. 20, No. 6, Article ES6007, 8 p., DOI: 10.2205/2020ES000745.
35. Unwin M., Jales P., Tye J. et al., Spaceborne GNSS-reflectometry on TDS-1: Early mission operations and exploitation, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, V. 9, Iss. 10, pp. 4525–4539, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2603846.
36. Zavorotny V. U., Voronovich A. G., Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, V. 38, No. 2, pp. 951–964, DOI: 10.1109/36.841977.
37. Zavorotny V., Loria E., O'Brien A. et al., Investigation of coherent and incoherent scattering from lakes using CYGNSS observations, *IGARSS 2020 — 2020 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2020, pp. 5917–5920, DOI: 10.1109/igarss39084.2020.9323677.