

## **Детектирование ледяного покрова по доплеровскому спектру отраженного излучения двухпозиционного радара**

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

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН  
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46.*

*E-mail: [yuriy@ipfran.ru](mailto:yuriy@ipfran.ru)*

<sup>2</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений*

*141570, Московская область, Солнечногорский район, п/о Менделеево*

*E-mail: [loratin@vniiftri.ru](mailto:loratin@vniiftri.ru)*

*Результатом исследования является разработка подхода построения полуэмпирических моделей доплеровского спектра микроволнового сигнала, бистатически отраженного ледяным покровом. В данной работе построена полуэмпирическая модель доплеровского спектра для Ку-диапазона длин волн. Показано, что для определения типа подстилающей поверхности (лед или морская поверхность) можно анализировать коэффициент эксцесса доплеровского спектра бистатически отраженного сигнала.*

*Ключевые слова: двухпозиционная радиолокация, доплеровский спектр, морские волны, ледяной покров, полуэмпирическая модель*

## **Detection of ice cover using the Doppler spectrum of the reflected radiation of a two-position radar**

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

<sup>1</sup> *Institute of Applied Physics of RAS.*

<sup>2</sup> *VNIIFTRI.*

*The result of the study is the development of an approach for constructing semi-empirical models of the Doppler spectrum of a microwave signal bistatically reflected by an ice cover. In this work, a semi-empirical model of the Doppler spectrum for the Ku-band wavelengths is constructed. It is shown that to determine the type of underlying surface (ice or sea waves), it is possible to analyze the kurtosis coefficient of the Doppler spectrum of the bistatically reflected signal.*

*Keywords: bistatic, doppler spectrum, semi-empirical model, ice cover, sea waves*

### **Введение**

Одним из основных факторов, влияющих на жизнь человечества в ближайшем будущем может стать глобальное изменение климата Земли. В связи с этим проблема непрерывного и глобального контроля площади, занимаемой ледяным покровом, становится особенно актуальной. Традиционно инструментами, предоставляющими большую часть информации о площади ледяного покрова, являются микроволновые радиометры и скаттерометры с разрешением порядка 25 км. Радары с синтезированной апертурой антенны и спутниковые альтиметры предоставляют лучшее разрешение, но имеют особенности глобального покрытия Земли.

В настоящее время большой интерес научного сообщества привлекают методы детектирования ледяного покрова по данным отраженных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) [1, 2]. Важным преимуществом таких методов является относительная простота необходимого для зондирования

оборудования. Так как требуется только приемник сигналов, а в качестве излучателей используются существующие группировки GNSS, такие как GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo и другие. Прием сигнала происходит в квазизеркальной области отражения что обеспечивает достаточный уровень отраженного сигнала для приема даже на орбите. Дополнительно преимуществом квазизеркальной области отражения является возможность описания отраженного сигнала в приближении Кирхгофа (так же известно как приближение касательной плоскости).

В предыдущих работах авторов была разработана теоретическая модель доплеровского спектра сигнала, отраженного взволнованной водной поверхностью в бистатической постановке задачи [3, 4]. Данная работа направлена на построение полуэмпирической модели доплеровского спектра (ДС) бистатически отраженного ледяным покровом СВЧ-сигнала. В работе приводится сравнение некоторых свойств доплеровского спектра, отраженного ледяным покровом и морскими волнами. В ходе исследования используются зависимости коэффициента отражения излучения ледяным покровом от угла падения [5]. Они получены с помощью двухчастотного дождевого радиолокатора, установленного на спутнике миссии GPM [6] над Охотским морем.

### Постановка задачи

Рассмотрим схему измерения на рис. 1. Средний уровень отражающей поверхности (ледяной покров или взволнованная водная поверхность) находится в плоскости  $Z=0$ . Излучатель располагается в точке 1 на высоте  $H_1$  от среднего уровня отражающей поверхности и движется со скоростью  $V_1$  имеющую только компоненту вдоль оси  $X$ . Приемник располагается в точке 2 на высоте  $H_2$  и движется со скоростью  $V_2$  имеющую только компоненту вдоль оси  $X$ . Пересечение оси диаграмм направленности излучающей и приемной антенны со средним уровнем отражающей поверхности происходит в точке  $(x_0, y_0)$ . Угол скольжения излучающей антенны -  $\psi_{01}$ , приемной -  $\psi_{02}$ . Углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  задают азимутальные углы от оси  $X$  до линии соединяющей текущую точку  $(x, y, 0)$  и излучатель или приемник. Дальность от текущей точки  $(x, y, 0)$  до приемника  $R_2$  и до излучателя  $R_1$ . Угол между плоскостью  $Z=0$  и линиями, соединяющими текущую точку с излучателем -  $\psi_1$ , с приемником -  $\psi_2$ . Излучается сферическая волна с волновым числом  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения.

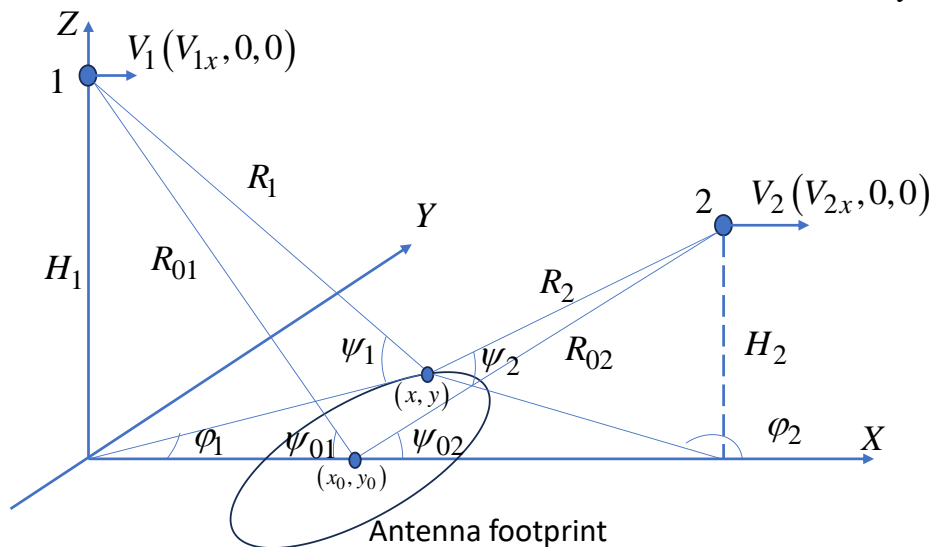


Рис. 1. Схема измерений

Для каждой точки засвечиваемой области проекция относительной скорости будет:

$$V_{\tau}(x, y) = -V_{1x} \cos \psi_1 \cos \varphi_1 - V_{2x} \cos \psi_2 \cos \varphi_2. \quad (1)$$

Для нахождения доплеровского спектра (ДС) необходимо считать проекцию относительной скорости для каждой точки поверхности. Скорость дает нам частоту в ДС по следующей формуле:

$$f(x, y) = V_{\tau}(x, y) / \lambda. \quad (2)$$

А амплитуду ДС будем считать, как произведение коэффициента отражения Френеля, диаграммы направленности и зависимости коэффициента отражения поверхности от угла падения:

$$S(f(x, y)) = \left| R^{ii}(x, y) \right|^2 G_1^2(x, y) G_2^2(x, y) \times 10^{RCS(\theta(x, y))/10} \quad (3)$$

где буквы  $ii$  у коэффициента Френеля означают излучаемую (первая  $i=H, V, R, L$ ) и принимаемую (вторая  $i=H, V, R, L$ ) поляризации [7]:

$$R^{HH} = \frac{\sin \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2}}}{\sin \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2}}}, \quad (4)$$

$$R^{VV} = \frac{\varepsilon \sin \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2} - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2}}}{\varepsilon \sin \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2} + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2}}}, \quad (5)$$

$$R^{RR} = R^{LL} = \frac{1}{2}(R^{VV} + R^{HH}), \quad (6)$$

$$R^{RL} = R^{LR} = \frac{1}{2}(R^{VV} - R^{HH}). \quad (7)$$

Буква H - для горизонтальной, V - для вертикальной, R - для правой круговой поляризации, L - для левой круговой.

Диаграммы направленности передающей и принимающей антенны будем считать гауссовыми и выразим следующим образом:

$$G_1(x, y) = \exp \left\{ -1,38 \frac{\sin^2 \psi}{R_{01}^2 \delta_{1x}^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_{01}^2 \delta_{1y}^2} \right\}, \quad (8)$$

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

где  $\delta_{1x}$  и  $\delta_{1y}$  - ширины диаграммы направленности излучающей антенны,

$\delta_{2x}$  и  $\delta_{2y}$  - ширины диаграммы направленности приемной антенны на уровне половинной мощности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

$$\text{Угол } \theta = \frac{\Psi_1 - \Psi_2}{2}. \quad (9)$$

При повторяющейся частоте необходимо суммировать все амплитуды доплеровского спектра 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.

### Экспериментальные данные

Для расчетов возьмем данные зависимости коэффициента отражения поверхности от угла падения в децибелах, выполненные спутником GPM в Ku-диапазоне. Воспользуемся результатами регрессионного анализа экспериментальных данных из работ [8, 9] для ледяного покрова и водной поверхности:

$$RCS_{ice}(\theta) = a_{ice} + b_{ice}\theta + c_{ice}\theta^2 + d_{ice} \exp(-e_{ice}|\theta|), \quad (10)$$

где  $a_{ice} = -3,151789$ ,

$$b_{ice} = -0,0087084,$$

$$c_{ice} = -0,01692822,$$

$$d_{ice} = 26,01349,$$

$$e_{ice} = 0,52884205.$$

$$RCS_{sea}(\theta) = a_{sea} + b_{sea}\theta + c_{sea}\theta^2 + d_{sea}\theta^3 + e_{sea}\theta^4 + f_{sea}\theta^5, \quad (11)$$

где  $a_{sea} = 11,291178$ ,

$$b_{sea} = 0,0062640913,$$

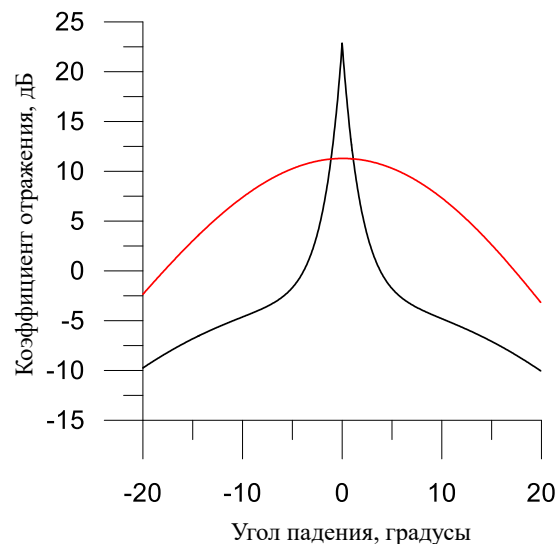
$$c_{sea} = -0,04076229,$$

$$d_{sea} = -0,00010407121,$$

$$e_{sea} = 1,3805852 \cdot 10^{-5},$$

$$f_{sea} = 7,9111159 \cdot 10^{-8}.$$

На рис. 2 приведено сравнение регрессий коэффициента отражения от угла падения для ледяного покрова и для морских волн.



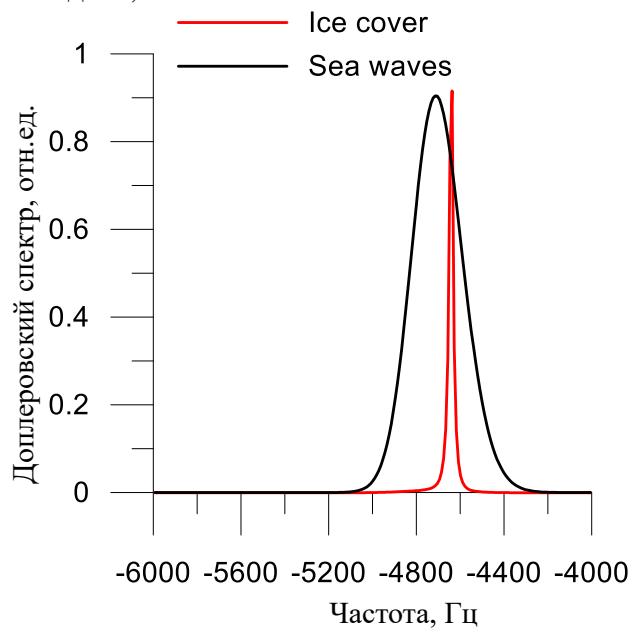
**Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от угла падения для ледяного покрова (черная линия) и морских волн (красная линия)**

Далее на основе этих данных об отражающих поверхностях рассмотрим моделирование ДС отраженного сигнала по формуле (3).

### Моделирование доплеровского спектра

Рассмотрим моделирование ДС отраженного сигнала в Ku-диапазоне. Сначала на рис. 3 мы рассматриваем случай стационарного излучателя, расположенного на небольшой высоте 500 м. Приемник движется на высоте 5 км со скоростью 200 м/с, что соответствует движению самолета. Антенна передатчика симметричная, шириной диаграммы направленности 30 градусов. Приемная антенна симметричная с шириной диаграммы направленности 14 градусов. Угол скольжения передающей антенны 70 градусов, приемной антенны 60 градусов.

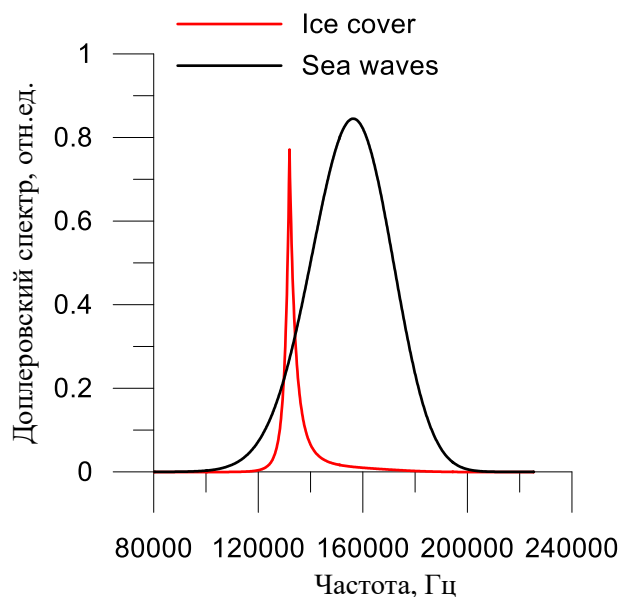
По рисунку видно, что доплеровские спектры различаются шириной. Ширина ДС на уровне -10 дБ сигнала, отраженного от ледяного покрова 178 Гц, а для воды 505 Гц. Так же видно, что различается сама форма зависимости, например эксцесс ДС для ледяного покрова равен 24, а для воды 0,15.



**Рис. 3. Нормированные доплеровские спектры сигнала, отраженного ледяным покровом (красная линия) и водной поверхностью (черная линия) для стационарного передатчика и приемника на самолете**

На рис. 4 мы также рассматриваем другой вариант зондирования. Передатчик находится на геостационарной орбите высотой 20 000 км и движется со скоростью 4 км/с. Приемник движется по низкой околоземной орбите 500 км со скоростью 4 км/с в сторону передатчика. Антенна передатчика симметричная, шириной 30 градусов. Приемная антенна симметричная с шириной диаграммы направленности 14 градусов. Угол скольжения передающей антенны 70 градусов, приемной антенны 60 градусов.

В данном случае ширина ДС на уровне -10 дБ сигнала, отраженного от ледяного покрова 40,5 кГц, а для воды 66,5 кГц. Эксцесс для ДС, отраженного ледяным покровом 8,7, а для воды ровно 0. Именно критерий на эксцесс отраженного ДС в будущем может стать надежным индикатором типа подстилающей поверхности.



**Рис. 4. Нормированные доплеровские спектры сигнала, отраженного ледяным покровом (красная линия) и водной поверхностью (черная линия) для орбитального расположения приемника и передатчика**

### Выводы

Таким образом впервые построена полуэмперическая модель ДС СВЧ-сигнала, отраженного ледяным покровом в бистатической постановке задачи. При численном моделировании для описания зависимости коэффициента отражения ледяного покрова от угла падения использовались экспериментальные данные полученные по спутнику миссии GPM. Поэтому в данной работе моделировался ДС отраженного сигнала в Ku-диапазоне.

Показано, что в бистатической постановке задачи можно определить тип подстилающей поверхности по форме ДС отраженного сигнала. Коэффициент эксцесса может выступать критерием для определения наличия ледяного покрова.

В дальнейшем предлагается распространить предлагаемый подход на ДС отраженного ледяным покровом сигнала GNSS. Для этого требуется получить модель коэффициента отражения ледяного покрова в L-диапазоне, которая в настоящее время отсутствует для области квазизеркального отражения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10064, <https://rscf.ru/project/23-77-10064/>.*

### Литература

1. Yan Q., Huang W. Sea Ice Remote Sensing Using GNSS-R: A Review // Remote Sensing. – 2019. – Т. 11, № 21. – С. 2565.
2. 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. – Т. 2, № 4. – С. 8-45.
3. Titchenko Y. A. Bistatic doppler spectrum of radiation reflected by a water surface // Russian Journal of Earth Sciences. – 2020. – Т. 20, № 6.
4. Titchenko Y., Zuikova E., Karaev V., Meshkov E., Panfilova M., Ryabkova M. Bistatic doppler spectra of the signal reflected by rough water surface measured by modified monostatic radar // 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) – Virtual Symposium: IEEE, 2020. – С. 5713-5716.

5. Karaev V., Panfilova M., Ryabkova M., Titchenko Y., Meshkov E. Remote Sensing of Sea Ice at Small Incidence Angles: Verification of Theoretical Models // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 10.1109/igarss47720.2021.9554163 –, 2021. – C. 5629-5632.
6. GPM Data Utilization Handbook. / JAXA, 2014.
7. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 2000. – T. 38, № 2. – C. 951-964.
8. 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 Sensing. – 2022. – T. 14, № 10. – C. 2331.
9. Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M., Ryabkova M., Meshkov E., Ponur K. Doppler Spectrum as the Perspective Instrument for Detection of the Ice Cover // IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 10.1109/igarss46834.2022.9884290 – 2022. – C. 3919-3922.