

## Доплеровские спектры радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона, измеренные при движении над ледяным покровом и морской поверхностью: сравнение моделей и определение типа отражающей поверхности

В. Ю. Караев, Ю. А. Титченко, М. А. Панфилова, М. С. Рябкова, Е. М. Мешков

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

Обычно при радиолокационном зондировании ледяного покрова основным информативным параметром становится сечение обратного рассеяния, что не всегда позволяет однозначно определить тип рассеивающей поверхности (лёд/вода). В настоящей работе обсуждается возможность использования доплеровского спектра отражённого радиолокационного сигнала для оценки площади ледяного покрова. Впервые построена полумпирическая модель доплеровского спектра радиолокационного СВЧ-сигнала, отражённого ледяным покровом, для радиолокатора с широкой диаграммой направленности, установленного на движущемся носителе, при малых углах падения зондирующего излучения ( $0-19^\circ$ ). Было рассмотрено несколько конфигураций антенной системы и показано, что для измерений необходимо применять широкую или ножевую (по углу падения) антенну. Вычисления подтвердили предположение, что при измерении с движущегося носителя доплеровский спектр выступает надёжным индикатором перехода от одного типа рассеивающей поверхности к другой для случая сплошного ледяного покрова и в качестве критериев можно использовать смещение и ширину доплеровского спектра, а также коэффициенты асимметрии и эксцесса для формы доплеровского спектра.

**Ключевые слова:** доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала, ледяной покров, морское волнение, диаграмма направленности антенны, ширина и смещение доплеровского спектра, коэффициенты асимметрии и эксцесса

Одобрена к печати: 30.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-247-258

### Введение

Один из индикаторов глобального изменения климата — площадь ледяного покрова в Арктике и Антарктике, поэтому для её измерения активно применяются дистанционные методы, способные обеспечить глобальное покрытие. Для выполнения оперативного мониторинга больших акваторий на аэрокосмические носители могут быть установлены радиометры, радиолокаторы с реальной и синтезированной апертурой, оптические и инфракрасные датчики (Радиолокация..., 1990; Anderson, Long, 2005; Carsey, 1992; Haykin et al., 1994; Lebedev et al., 2019).

В настоящее время при радиолокационном зондировании ледяного покрова основным информационным параметром является сечение обратного рассеяния. Для примера на *рис. 1* (см. с. 248) приведена зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для ледяного покрова и морского волнения, построенная по данным скаттерометра ASCAT (*англ.* Advanced Scatterometer) (Муртазин и др., 2015).

Наблюдаемый на рисунке разброс сечения обратного рассеяния над водной поверхностью и ледяным покровом обусловлен многими причинами, например скоростью приводного ветра и типом льда (нилас, блинчатый, серый лёд и т. д.). При таком разбросе значений сечения обратного рассеяния по одиночным измерениям нельзя определить тип подстилающей поверхности, так как нет однозначной связи между сечением обратного рассеяния и типом подстилающей поверхности.

Усреднённые значения на рисунке обозначены белыми маркерами, отрезок показывает дисперсию. Наблюдается небольшое различие в угловой зависимости водной поверхности и льда, поэтому появляется возможность разделить ледяной покров и морское волнение. Однако и в этом случае результат носит вероятностный характер.

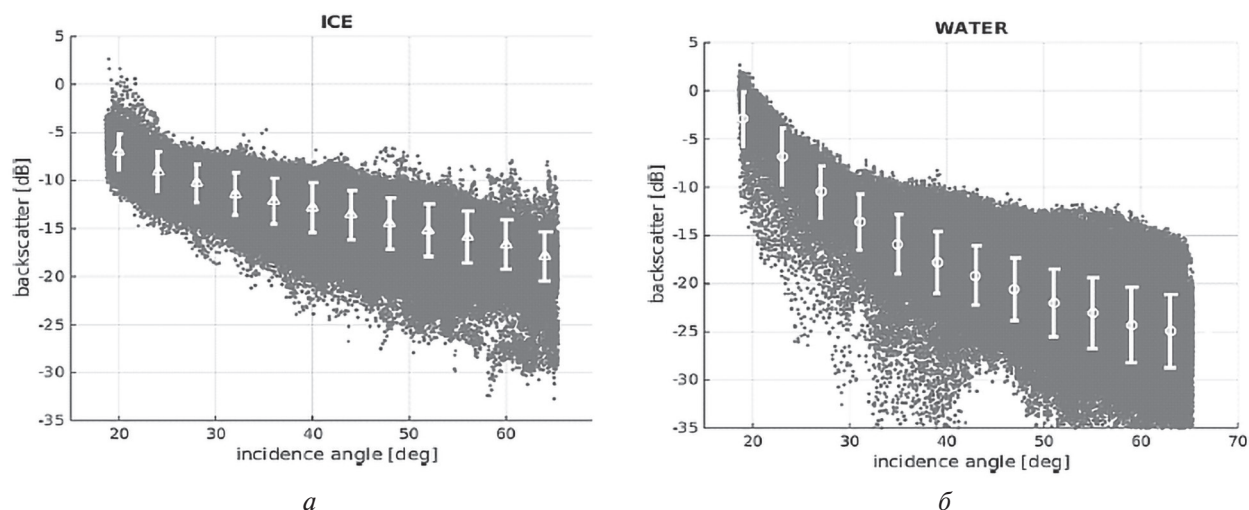


Рис. 1. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для ледяного покрова (а) и морского волнения (б) (Муртазин и др., 2015)

Следовательно, при средних углах падения решение задачи классификации подстилающей поверхности (лёд/вода) может существовать для усреднённых данных (белые маркеры внутри «облака» данных), и решение становится неоднозначным для неусреднённых значений.

При отражении электромагнитного излучения происходит изменение не только энергетических, но и спектральных характеристик радиолокационного сигнала, которые для ледяного покрова, вероятно, не анализировались — нам неизвестны исследования, посвящённые доплеровскому спектру.

В отличие от сечения обратного рассеяния, которое содержит информацию о диэлектрических свойствах ледяного покрова, спектральные характеристики отражённого радиолокационного сигнала определяются геометрией рассеивающей поверхности. В общем случае «геометрии» ледяного покрова и взволнованной водной поверхности кардинально различаются, что повлияет на характеристики доплеровских спектров, и это позволит определить тип рассеивающей поверхности. Отметим, что о механических свойствах льда и других параметрах, важных для судовождения, по доплеровскому спектру узнать нельзя.

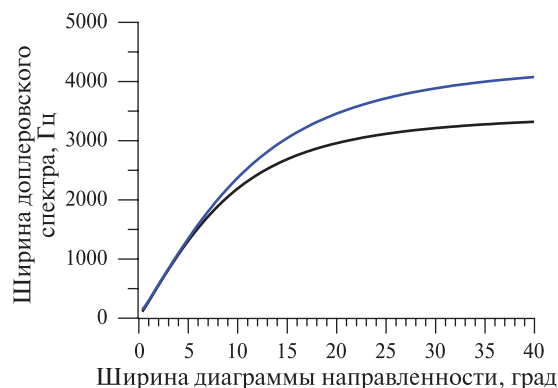
В настоящей работе основное внимание уделяется построению модели доплеровского спектра для ледяного покрова и исследованию свойств доплеровского спектра с точки зрения разделения подстилающей поверхности по критерию «лёд — вода». В ходе исследования использовались данные двухчастотного дождевого радиолокатора, полученные над Охотским морем (GPM..., 2014).

### Постановка задачи

В исследовании будем рассматривать область малых углов падения, когда в случае морской поверхности доминирующим представляется квазизеркальный механизм обратного рассеяния и для нахождения отражённого сигнала используется метод Кирхгофа (Басс, Фукс, 1972; Исакович, 1952; Barrick, 1968; Valenzuela, 1978).

Очевидно, что для ледяного покрова понятие «доплеровский спектр» существует только при измерении с движущегося носителя. В проведённых ранее исследованиях было показано, что в случае быстро движущегося носителя для морской поверхности ширина доплеровского спектра зависит от параметров волнения только для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны (Karaev et al., 2005), а для узкой диаграммы направленности ширина доплеровского спектра зависит от скорости движения. Вычисления были выполнены для орбитального радиолокатора (скорость 7000 м/с), поэтому повторим их для самолётного варианта — скорости полёта 200 м/с.

Рис. 2. Зависимость ширины доплеровского спектра от ширины диаграммы направленности антенны для скорости приводного ветра 5 м/с (чёрная кривая), 10 м/с (синяя кривая) и полностью развитого ветрового волнения. Скорость носителя — 200 м/с вдоль оси  $Y$ ; угол падения  $\theta_0 = 5^\circ$ ; направление зондирования —  $45^\circ$ . Длина волны радиолокатора — 0,021 м



На рис. 2 приведена зависимость ширины доплеровского спектра от ширины диаграммы направленности антенны для двух значений скорости ветра (5 и 10 м/с, полностью развитое ветровое волнение) для движущегося носителя.

Из рисунка видно, что для узкой диаграммы направленности антенны основным фактором, влияющим на ширину доплеровского спектра, становится скорость движения носителя. Несмотря на то что параметры волнения для разных значений скорости ветра сильно различаются, это не влияет на ширину доплеровского спектра и для узкой диаграммы направленности антенны кривые совпадают.

С увеличением ширины диаграммы направленности антенны происходит разделение зависимости ширины доплеровского спектра для разных величин интенсивности морского волнения (значений скорости ветра).

Из теоретической модели доплеровского спектра следует, что с увеличением скорости носителя для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны ключевым фактором оказывается не орбитальная скорость (движение поверхности), а дисперсия уклонов (Мешков, Караев, 2004; Karaev et al., 2005, 2008).

Сделав ряд предположений о направлениях движения и зондирования (вдоль оси  $Y$ ), направлении распространения волнения (вдоль оси  $X$ ) и считая, что скорость движения носителя значительно превосходит скорость движения самой поверхности (много больше орбитальных скоростей), формулу (Karaev et al., 2008) можно упростить. В результате формула для ширины доплеровского спектра примет следующий вид:

$$\Delta F_{20} \sim V_{rad} \cos \theta_0 \sqrt{\frac{\delta_\beta^2 \sigma_{yy}^2}{11,04 \sigma_{yy}^2 + \delta_\beta^2}},$$

где  $\sigma_{yy}^2$  — дисперсия уклонов крупномасштабного волнения вдоль оси  $Y$ . Из формулы видно, что если используем узкую диаграмму направленности антенны ( $\delta_\beta < \delta_{yy}$ ), то можно ею пренебречь в сумме, и дисперсия уклонов сократится. В результате ширина доплеровского спектра будет пропорциональна ширине диаграммы направленности антенны. И наоборот, для широкой диаграммы направленности антенны дробь сократится таким образом, что ширина доплеровского спектра будет пропорциональна дисперсии уклонов крупномасштабного волнения.

Именно благодаря уклону отражающей поверхности происходит изменение диаграммы рассеяния поверхности (зависимость сечения обратного рассеяния от угла отражения), что в итоге влияет на ширину доплеровского спектра при измерении с движущегося носителя.

Дисперсии уклонов ледяного покрова и морского волнения сильно различаются, поэтому возникло предположение, что при измерении с движущегося носителя по ширине и смещению доплеровского спектра можно будет разделить ледяной покров и морское волнение. Настоящая работа посвящена проверке этого предположения.

### Полуэмпирическая модель доплеровского спектра для льда

Для морской поверхности существует аналитическое описание через спектр волнения или статические моменты второго порядка, что позволяет получить аналитические выражения

для доплеровского спектра (см. например, (Каневский, Караев, 1996; Мешков, Караев, 2004; Караев et al., 2008)).

Для ледяного покрова нам неизвестно спектральное описание, поэтому, опираясь на экспериментальные данные (GPM..., 2014), построим полуэмпирическую модель доплеровского спектра.

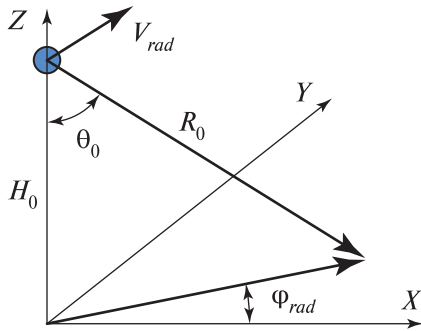


Рис. 3. Схема измерения

Схема измерения приведена на рис. 3. Радиолокатор установлен на самолёте, который движется со скоростью  $V_{rad}$  вдоль оси  $Y$  на высоте  $H_0$ . Угол падения равен  $\theta_0$ , и зондирование ведётся под углом  $\varphi_{rad}$  в плоскости  $XY$ . Наклонная дальность до точки отражения равна  $R_0$ .

Тогда радиальная компонента скорости для этой точки задаётся следующей формулой:

$$V_r = V_{rad} \sin \varphi_{rad} \cdot \sin \theta_0.$$

При измерении доплеровского спектра с движущегося носителя большое значение приобретает диаграмма направленности антенны, которая определяет размер отражающей площадки и разброс радиальной скорости. При вычислениях предполагаем диаграмму направленности антенны гауссовой и запишем её в следующем виде:

$$G(\alpha, \beta) = \exp \left[ -1,38 \left( \frac{(\theta_0 - \alpha)^2}{\delta_\alpha^2} + \frac{(\varphi_{rad} - \beta)^2}{\delta_\beta^2} \right) \right],$$

где  $\delta_\alpha$  и  $\delta_\beta$  — ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности;  $\alpha$  и  $\beta$  — угол падения и азимутальный угол внутри диаграммы направленности антенны, отсчитываемые от оси диаграммы  $(\theta_0, \varphi_{rad})$ , т. е.  $\theta = \theta_0 + \alpha$  и  $\varphi = \varphi_{rad} + \beta$ .

Изменение азимутального угла  $\varphi$  приводит к изменению угла падения, поэтому для правильного вычисления радиальной скорости необходимо пересчитывать угол падения по следующей формуле:

$$\theta_N = \arctg \left( \frac{\tg \theta}{\cos \beta} \right). \quad (1)$$

Для нахождения доплеровского спектра отражённого сигнала необходимо проинтегрировать по рассеивающей площадке (Зубкович, 1968):

$$S_{dop}(V_r) \sim \int \int_S G^4(\alpha, \beta) d\alpha d\beta.$$

После интегрирования получим спектр доплеровских скоростей (функция распределения радиальной компоненты скорости). Более привычным оказывается представление доплеровского спектра на частотной оси, поэтому для перехода воспользуемся следующей формулой:

$$f_r = \frac{2V_{rad}(\alpha, \beta)}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — длина электромагнитной волны.

На рис. 4 (см. с. 251) приведены примеры доплеровских спектров для движущегося носителя ( $V_{rad} = 200$  м/с), угла падения  $\theta_0 = 5^\circ$ , азимутального угла  $\varphi_{rad} = 45^\circ$  и четырёх значений диаграммы направленности антенны:  $2 \times 2^\circ$ ,  $2 \times 20^\circ$ ,  $20 \times 2^\circ$ ,  $20 \times 20^\circ$ . Для удобства сравнения была выполнена нормировка каждого спектра на свой максимум, и первые два спектра показаны на рис. 4а, а последние два — на рис. 4б.

При переходе от узкой диаграммы направленности антенны ( $2 \times 2^\circ$  — чёрная кривая, см. рис. 4а) к ножевой ( $2 \times 20^\circ$  — синяя кривая, см. рис. 4а) за счёт широкой диаграммы антенны в азимутальной плоскости происходит увеличение диапазона углов падения (см. формулу (1)), что приводит к заметному расширению доплеровского спектра.

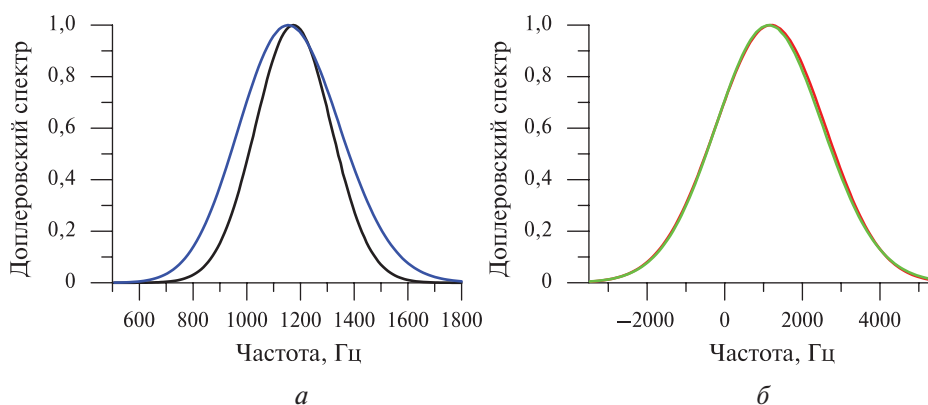


Рис. 4. Нормированные доплеровские спектры для движущегося носителя ( $V_r = 200$  м/с), угла падения  $\theta_0 = 5^\circ$ , азимутального угла  $\phi_0 = 45^\circ$  и четырёх значений диаграммы направленности антенны: *a* —  $2 \times 2^\circ$  (чёрная кривая),  $2 \times 20^\circ$  (синяя); *б* —  $20 \times 2^\circ$  (красная),  $20 \times 20^\circ$  (зелёная кривая)

Этот эффект практически не проявляется при переходе от ножевой антенны ( $20 \times 2^\circ$  — красная кривая, см. рис. 4б) к широкой антенне ( $20 \times 20^\circ$  — зелёная кривая, см. рис. 4б), так как в отличие от первого случая изменение угла падения за счёт изменения азимутального угла будет мало по сравнению с шириной диаграммы направленности антенны по углу падения.

При вычислениях предполагалось, что все точки поверхности обладают одинаковым коэффициентом отражения, что не соответствует действительности, поэтому следующий шаг в построении модели доплеровского спектра связан с учётом диаграммы обратного рассеяния ледяного покрова (или зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения).

В своих исследованиях мы используем данные дождевого радиолокатора Ку-диапазона ( $\lambda = 0,021$  м) спутников TRMM (англ. Tropical Rain Measuring Mission) и DPR (англ. Global Precipitation Measurement) (GPM..., 2014; TRMM..., 2001).

В Ку-диапазоне измерения выполняются в диапазоне углов падения  $0-19^\circ$ . Данные дождевого радиолокатора спутника GPM (англ. Global Precipitation Measurement или англ. Global Precipitation Mission), полученные над Охотским морем, использовались для проведения регрессии и получения формул для диаграмм обратного рассеяния ледяного покрова и морской поверхности. Пример зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для сухого ледяного покрова (отрицательная температура воздуха, однолетний лёд) приведён на рис. 5 (Караев и др., 2020а, б; Karaev et al., 2021a). На рисунке звёздочки разного цвета относятся к разным дням.

В результате регрессионного анализа угловая зависимость диаграммы обратного рассеяния для ледяного покрова была аппроксимирована следующей формулой:

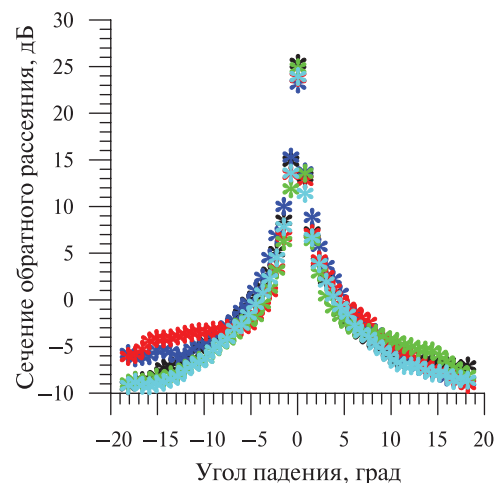
$$RCS_{ice}(\theta) = a_{ice} + b_{ice}\theta + c_{ice}\theta^2 + d_{ice} \exp(-e_{ice}|\theta|), \quad (2)$$

где

$$a_{ice} = -3,1517893; b_{ice} = -0,0087084779; \\ c_{ice} = -0,016928228; d_{ice} = 26,013494; e_{ice} = 0,52884205.$$

Таким образом, для вычисления доплеровского спектра отражённого радиолокационного сигнала необходимо проинтегрировать по рассеивающей площадке:

Рис. 5. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения (Ку-диапазон) для «сухого» ледяного покрова (отрицательная температура воздуха)



$$S_{dop}(V_r) \sim \iint_S G^4(\alpha, \beta) \cdot RCS_{ice}(\theta) d\alpha d\beta. \quad (3)$$

Надо отметить, что для ледяного покрова можно не учитывать азимутальную зависимость диаграммы обратного рассеяния (направление зондирования), так как в отличие от морского волнения поверхность практически изотропна.

### Полуэмпирическая модель доплеровского спектра для морского волнения

Для удобства сравнения доплеровских спектров повторим рассуждения для морской поверхности и диаграмму обратного рассеяния зададим в следующем виде:

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

где

$$a_{ice} = 11,291178; b_{ice} = 0,0062640913; c_{ice} = -0,04076229; \\ d_{ice} = -0,00010407121; e_{ice} = 1,3805852 \cdot 10^{-3}; f_{ice} = 7,911159 \cdot 10^{-8}.$$

Для построения зависимости использовались измерения дождевого радиолокатора над Охотским морем в летний сезон, усреднённые за несколько дней.

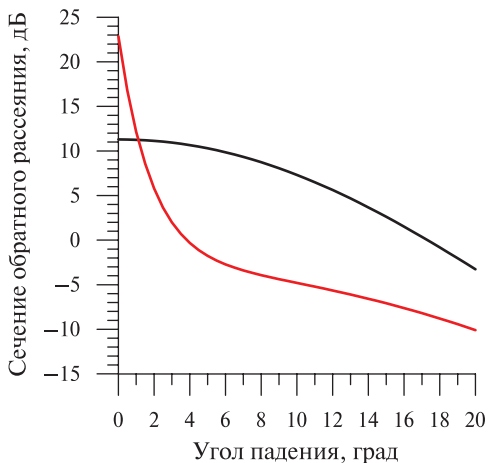


Рис. 6. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для ледяного покрова (красная кривая) и морского волнения (чёрная кривая)

На рис. 6 приведено сравнение модельных диаграмм обратного рассеяния для ледяного покрова (чёрная кривая, формула (2)) и морского волнения (красная кривая, формула (4)). При построении графиков был сделан переход к децибелам. Из рисунка видно, что поведение угловых зависимостей для ледяного покрова и морского волнения принципиально различно, и это свойство используется в алгоритме классификации типа рассеивающей поверхности (лёд/вода) по сечению обратного рассеяния (Панфилова и др., 2018; Panfilova et al., 2020).

Как и в случае со средними углами падения (см. рис. 1), сечение обратного рассеяния будет сильно зависеть от состояния рассеивающей поверхности, например от скорости приводного ветра, однако форма зависимости не изменится, т. е. вторая производная сохранит знак.

### Доплеровский спектр: основные характеристики

Обычно только два параметра используются для описания доплеровского спектра: ширина  $\Delta F_{20}$  и смещение  $f_{shift}$ . Для измеренного доплеровского спектра  $S_{dop}(f)$  ширина и смещение вычисляются по следующим формулам:

$$f_{shift} = \frac{\int f S_{dop}(f) df}{\int S_{dop}(f) df}.$$

Для ширины доплеровского спектра существует несколько определений. В настоящей работе будет использоваться следующее:

$$\Delta F_{20} = 2 \sqrt{\frac{\int f^2 S_{dop}(f) df}{\int S_{dop}(f) df} - f_{shift}^2}.$$

Кроме того, введём дополнительно ещё одно определение ширины доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$ , которое вычисляется через центральные статистические моменты второго порядка  $\mu_2$  и  $\mu_4$ :

$$\Delta F_{42} = \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_2}} = \sqrt{\frac{\mu_4}{\sigma^2}},$$

где  $\sigma^2$  — дисперсия.

Если форма доплеровского спектра близка к гауссовской форме, то для его описания достаточно двух параметров: ширины и смещения. Если отличается, то её можно рассматривать как дополнительный информационный параметр и необходимо использовать. Поэтому, чтобы сделать описание доплеровского спектра более полным, введём в рассмотрение ещё две характеристики: коэффициенты эксцесса  $A$  и асимметрии  $E$ :

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \text{ и } E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3.$$

В других статьях, посвящённых доплеровскому спектру, мы не встречали упоминания о применении коэффициентов асимметрии и эксцесса. Однако это важные характеристики доплеровского спектра, которые дают новую информацию, в частности о доминирующем механизме обратного рассеяния, о течениях (Рябкова и др., 2020; Karaev et al., 2021b).

### Доплеровские спектры при малых углах падения

Включение в модель доплеровского спектра (3) диаграммы обратного рассеяния позволяет вычислить и сравнить доплеровские спектры для двух типов подстилающей поверхности: морского волнения и ледяного покрова — и проверить корректность сделанного предположения о возможности применения доплеровского спектра для классификации типа рассеивающей поверхности (лёд/вода) с движущегося носителя.

Предположим, что доплеровский радиолокатор (длина волны 2,1 см) движется горизонтально со скоростью 200 м/с (см. рис. 2). Зондирование ведётся под углом падения  $\theta_0 = 5^\circ$  и азимутальным углом  $\varphi_{rad} = 45^\circ$ . Снова рассмотрим четыре варианта диаграммы направленности антенны:  $2 \times 2^\circ$ ,  $2 \times 14^\circ$ ,  $14 \times 2^\circ$ ,  $14 \times 14^\circ$ .

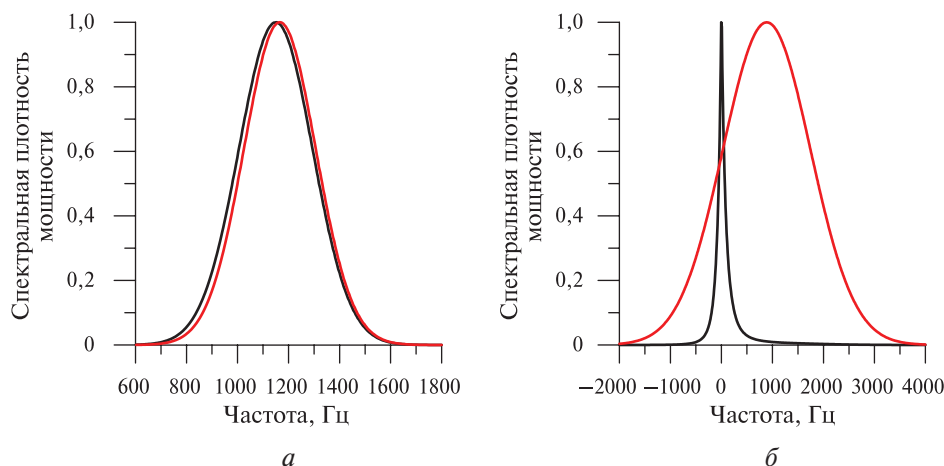


Рис. 7. Нормированные доплеровские спектры для движущегося носителя ( $V_r = 200$  м/с), угла падения  $\theta_0 = 5^\circ$ , азимутального угла  $\varphi_0 = 45^\circ$  и двух значений диаграммы направленности антенны:  $a$  —  $2 \times 2^\circ$ ;  $b$  —  $14 \times 2^\circ$ ; красная кривая — морское волнение, чёрная — ледяной покров

На рис. 7 приведены нормированные доплеровские спектры для ледяного покрова (чёрная кривая) и морского волнения (красная кривая) для вариантов диаграммы направленности

антенны  $2 \times 2^\circ$  (см. рис. 7а) и  $14 \times 2^\circ$  (см. рис. 7б). Из рисунка видно, что для узкой диаграммы направленности антенны доплеровские спектры для морского волнения и ледяного покрова практически не различаются. Это соответствует выводам, которые следуют из рис. 2: параметры поверхности слабо влияют на доплеровский спектр для узкой диаграммы направленности антенны и ширина доплеровского спектра определяется скоростью движения радиолокатора.

При увеличении ширины диаграммы направленности антенны отражающая поверхность начинает участвовать в формировании доплеровского спектра, и это хорошо видно на рис. 7б. «Шероховатость» морской поверхности существенно выше, чем ледяного покрова, поэтому доплеровский спектр шире. Движение самой поверхности в данном случае не оказывает заметного влияния на результат.

В таблице приведены параметры доплеровского спектра для рассмотренных случаев: sea — для морского волнения и ice — для ледяного покрова.

Параметры доплеровского спектра для морского волнения и ледяного покрова

	$\delta_\alpha$ , град	$\delta_\beta$ , град	$f_{shift}$ , ГГц	$\Delta F_{20}$ , ГГц	$\Delta F_{42}$ , ГГц	$A$	$E$
1 sea	2	2	1166	282	244	0,0028	0,0008
1 ice			1149	290	251	-0,0139	0,0070
2 sea	14		887	1712	1474	0,0055	-0,0347
2 ice			100	749	1733	3,5103	18,4040

Таким образом, при использовании ножевой ( $14 \times 2^\circ$ ) или широкой ( $14 \times 14^\circ$ ) антенн происходит изменение параметров доплеровского спектра, что легко обнаружить при обработке. Изменяются пять параметров: две ширины и смещение доплеровского спектра, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Ширина и смещение доплеровского спектра зависят от скорости движения радиолокатора, и следовательно, при измерениях предъявляется требование к движению с постоянной скоростью. Благодаря использованию коэффициентов асимметрии и эксцесса эта проблема снимается, так как они характеризуют изменение формы доплеровского спектра при изменении типа подстилающей поверхности.

При вычислении доплеровского спектра использовалась диаграмма рассеяния ледяного покрова для однолетнего сухого (отрицательная температура воздуха) льда. Температура воздуха (переход через ноль) и тип льда будут влиять на вид зависимости. Однако это скажется на абсолютных значениях сечения обратного рассеяния, а не на характере угловой зависимости, поэтому различия доплеровских спектров сохранятся и все результаты останутся в силе.

При моделировании предполагалось, что отражение происходит от сплошного ледяного покрова. Вопрос о влиянии сплочённости на доплеровский спектр заслуживает отдельного рассмотрения. Даже для резкой границы «лёд — вода» при движении носителя в элемент разрешения попадут лёд и вода в разных пропорциях при её пересечении.

При сплочённости меньше 100 % отражённый сигнал представляет собой сумму сигналов: отражённого от ледяного покрова и отражённого от морского волнения. В результате параметры доплеровского спектра будут зависеть от вклада каждой из компонент. Для ответа на вопрос, как это скажется на эффективности классификации типа рассеивающей поверхности, необходимы дальнейшие исследования.

### Заключение

Впервые построена полуэмпирическая модель доплеровского спектра радиолокационного сигнала сверхвысокочастотного диапазона, отражённого сплошным ледяным покровом, для движущегося радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны. При числен-



ном моделировании для описания зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения использовались усреднённые зависимости для однолетнего сухого льда (отрицательная температура воздуха), вычисленные по данным DPR. Для описания доплеровского спектра предложено использовать пять параметров (смещение, две ширины доплеровского спектра, коэффициенты асимметрии и эксцесса), что даёт более полную информацию для последующего анализа.

Показано, что для радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны ширина и смещение доплеровского спектра определяются скоростью движения радиолокатора, направлением зондирования, углом падения и не зависят от параметров рассеивающей поверхности.

В случае широкой (ножевой) диаграммы направленности антенны параметры доплеровского спектра становятся чувствительными к типу рассеивающей поверхности и по доплеровскому спектру можно легко разделить сплошной ледяной покров (сплочённость 100 %) и морскую поверхность. Происходит изменение всех параметров, характеризующих доплеровский спектр.

Ширина  $\Delta F_{20}$  и смещение доплеровского спектра зависят от скорости движения, поэтому желательно проводить измерения при неизменной скорости движения. Ширина  $\Delta F_{42}$ , коэффициенты корреляции и эксцесса чувствительны к типу рассеивающей поверхности и могут использоваться в качестве самостоятельного критерия в случае проведения измерений при разных скоростях движения носителя, когда смещение и ширина не могут быть использованы.

Отдельного внимания заслуживает случай ледяного покрова со сплочённостью ниже 100 %, и такое исследование будет проведено в дальнейшем.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00462а) и государственного задания ИПФ РАН (№ 0030-2021-0006).

## Литература

1. *Басс Ф. Г., Фукс И. М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. *Зубкович С. Г.*, Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Советское радио, 1968. 224 с.
3. *Исакович М. А.* Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1952. Т. 23. Вып. 3(9). С. 305–314.
4. *Каневский М. Б., Караев В. Ю.* Спектральные характеристики радиолокационного СВЧ сигнала, отраженного морской поверхностью при малых углах падения (обратное рассеяние) // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 5. С. 517–526.
5. *Караев В. Ю., Панфилова М. А., Митник Л. М., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Андреева З. В., Волгутов Р. В.* (2020а) К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона ледяным покровом в Охотском море при малых углах падения на примере данных дождевого радиолокатора // Материалы 18-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 нояб. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 212. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
6. *Караев В. Ю., Панфилова М. А., Митник Л. М., Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Андреева З. В., Волгутов Р. В.* (2020б) Особенности радиолокационного зондирования ледяного покрова при малых углах падения на примере Охотского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 187–202.
7. *Мешков Е. М., Караев В. Ю.* Определение параметров морского волнения по доплеровскому спектру радиолокационного СВЧ-сигнала, отраженного водной поверхностью // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 3. С. 231–244.
8. *Муртазин А. Ф., Евграфова К. Г., Кудрявцев В. Н.* Применение данных скаттерометра ASCAT для исследования ледового покрова в Арктике // Ученые записки Российского гос. гидролог. ун-та. 2015. Т. 40. С. 160–173.
9. *Панфилова М. А., Шиков А. П., Понур К. А., Виноградов И. Д., Рябкова М. С., Караев В. Ю.* Картографирование ледяного покрова по данным двухчастотного дождевого радиолокатора на примере

- Охотского моря // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 12–16 нояб. 2018, Москва. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 310. DOI: 10.21046/2070-16DZZconf-2018a.
10. Радиолокация поверхности Земли из космоса / под ред. Митника Л. М., Викторова С. В. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 196 с.
  11. *Рябкова М. С., Караев В. Ю., Панфилова М. А., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М.* Доплеровский спектр радиолокационного СВЧ-сигнала обратного рассеяния: эксперимент на реке // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 213–217. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-213-227.
  12. *Anderson H. S., Long D. G.* Sea ice mapping method for Seawinds // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 3. P. 647–657.
  13. *Barrick D. E.* Rough surface scattering based on the specular point theory // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1968. V. 16. No. 4. P. 449–554.
  14. *Carsey F. D.* Microwave Remote Sensing of Sea Ice. Geophysical Monograph 68. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1992. 446 p.
  15. GPM Data Utilization Handbook. First Edition / JAXA. Tokyo, 2014. 92 p.
  16. *Haykin S., Lewis E. O., Raney R. K., Rossiter J. R.* Remote Sensing of Sea Ice and Icebergs. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 1994. V. 13. 686 p.
  17. *Karaev V. Yu., Kanevsky M. B., Balandina G., Challenor P., Gommenginger C., Srokosz M.* The Concept of a Microwave Radar with an Asymmetric Knifelike Beam for the Remote Sensing of Ocean Waves // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2005. V. 22. No. 11. P. 1809–1820.
  18. *Karaev V., Kanevsky M., Meshkov Eu.* The effect of sea surface slicks on the doppler spectrum width of a backscattered microwave signal // Sensors. 2008. V. 8. P. 3780–3801. DOI: 10.3390/s8063780.
  19. *Karaev V., Panfilova M., Ryabkova M., Titchenko Yu., Meshkov Eu.* (2021a) Remote sensing of the sea ice at small incidence angles: verification of the theoretical models // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 5629–5632.
  20. *Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Yu., Meshkov Eu., Zuykova E.* (2021b) Microwave Doppler radar experiment on a river // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 7350–7353.
  21. *Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Popov S. K.* Satellite Altimetry of Sea Level and Ice Cover in the Barents Sea // Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 26–35.
  22. *Panfilova M., Shikov S., Karaev V.* Sea ice detection using Ku-band onboard GPM satellite // 33<sup>rd</sup> General Assembly and Scientific Symp. Intern. Union of Radio Science 2020. Rome, Italy, 29 Aug. – 5 Sept. 2020. 3 p.
  23. TRMM Data Users Handbook / National Space Development Agency of Japan. Earth Observation Center. 2001. 226 p.
  24. *Valenzuela G.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review // Boundary Layer Meteorology. 1978. V. 13. P. 61–86.

## 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

**V. Yu. Karaev, Ya. A. Titchenko, M. A. Panfilova, M. S. Ryabkova, E. M. Meshkov**

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

Usually, in radar sounding of ice cover, the main informative parameter is the backscattered radar cross section, which does not always allow unambiguously determining the type of scattering surface (ice – water). This paper discusses the possibility of using the Doppler spectrum of the backscattered radar signal to solve this problem. For the first time, a semi-empirical model of the Doppler spectrum of a microwave radar signal reflected by an ice cover was constructed for a radar with a wide antenna beam installed on a moving carrier at small incidence angles of the probing radiation (0–19°). Several configurations of the antenna system were considered and it was shown that for measurements it is necessary to use a wide or knife (in incidence angle) antenna. The calculations confirmed the assumption

that, when measured from a moving carrier, the Doppler spectrum is a reliable indicator of the transition from one type of scattering surface to another, and the shift and width of the Doppler spectrum, as well as the skewness and kurtosis coefficients for the shape of the Doppler spectrum, can be used as criteria.

**Keywords:** Doppler spectrum of the backscattered microwave signal, ice cover, sea waves, antenna beam, width and shift of the Doppler spectrum, skewness and kurtosis coefficients

Accepted: 30.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-247-258

## References

1. Bass F. G., Fuks I. M., *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Scattering of waves on a statistically rough surface), Moscow: Nauka, 1972, 424 p. (in Russian).
2. 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).
3. Isakovich M. A., Scattering of waves from a statistically rough surface, *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1952, Vol. 23, No. 3(9), pp. 305–314 (in Russian).
4. Kanevskii M. B., Karaev V. Yu., Spectral characteristics of superhigh frequency (SHF) radar signal backscattered by the sea surface at small incidence angles, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 1996, Vol. 39, No. 5, pp. 517–526 (in Russian).
5. Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Mitnik L. M., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Andreeva Z. V., Volgutov R. V. (2020a), On the problem of backscattering of microwave electromagnetic waves by an ice cover in the Sea of Okhotsk at small incidence angles using the example of precipitation radar data, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 16–20 Nov. 2020, Moscow: IKI RAN, 2020, p. 212 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
6. Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Mitnik L. M., Ryabkova M. S., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Andreeva Z. V., Volgutov R. V. (2020b), Features of radar probing of ice cover at small incidence angles by the example of the Okhotsk Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 187–202 (in Russian).
7. Meshkov E. M., Karaev V. Yu., Determination of the parameters of sea surface roughness using the Doppler spectrum of a microwave radar signal reflected from a water surface, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 2004, Vol. 47, No. 3, pp. 231–244 (in Russian).
8. Murtazin A. F., Evgrafova K. G., Kudryavtsev V. N., Arctic Sea ice properties using ASCAT, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrologicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 40, pp. 160–173 (in Russian).
9. Panfilova M. A., Shikov A. P., Ponur K. A., Vinogradov I. D., Ryabkova M. S., Karaev V. Yu., Ice cover mapping based on dual-frequency precipitation radar data using the example of the Sea of Okhotsk, *16-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (16<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of abstr., Moscow, 12–16 Nov. 2018, Moscow: IKI RAN, 2018, p. 310 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-16DZZconf-2018a.
10. *Radiolokatsiya poverkhnosti Zemli iz kosmosa* (Radar of the Earth's surface from space), Mitnik L. M., Viktorov S. V. (eds.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 196 p. (in Russian).
11. Ryabkova M. S., Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Zuikova E. M., Doppler spectrum of backscattered microwave signal: experiment at the river, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 213–217 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-213-227.
12. Anderson H. S., Long D. G., Sea ice mapping method for Seawinds, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 3, pp. 647–657.
13. Barrick D. E., Rough surface scattering based on the specular point theory, *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, 1968, Vol. 16, No. 4, pp. 449–554.
14. Carsey F. D., *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, Geophysical Monograph 68, Washington D. C.: American Geophysical Union, 1992, 446 p.
15. *GPM Data Utilization Handbook. First Edition*, JAXA, Tokyo, 2014, 92 p.
16. Haykin S., Lewis E. O., Raney R. K., Rossiter J. R., *Remote Sensing of Sea Ice and Icebergs*, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 1994, Vol. 13, 686 p.

17. Karaev V. Yu., Kanevsky M. B., Balandina G., Challenor P., Gommenginger C., Srokosz M., The Concept of a Microwave Radar with an Asymmetric Knifelike Beam for the Remote Sensing of Ocean Waves, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, Vol. 22, No. 11, pp. 1809–1820.
18. Karaev V., Kanevsky M., Meshkov Eu., The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 3780–3801, DOI: 10.3390/s8063780.
19. Karaev V., Panfilova M., Ryabkova M., Titchenko Yu., Meshkov Eu. (2021a), Remote sensing of the sea ice at small incidence angles: verification of the theoretical models, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2021, pp. 5629–5632.
20. Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Yu., Meshkov Eu., Zuikova E. (2021b), Microwave Doppler radar experiment on a river, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2021, pp. 7350–7353.
21. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Popov S. K., Satellite Altimetry of Sea Level and Ice Cover in the Barents Sea, *Ecologica Montenegrina*, 2019, Vol. 25, pp. 26–35.
22. Panfilova M., Shikov S., Karaev V., Sea ice detection using Ku-band onboard GPM satellite, *33<sup>rd</sup> General Assembly and Scientific Symp. Intern. Union of Radio Science 2020*, Rome, Italy, 29 Aug. – 5 Sept. 2020, 3 p.
23. *TRMM Data Users Handbook*, National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Center, 2001, 226 p.
24. Valenzuela G., Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review, *Boundary Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, pp. 61–86.