

Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения: эксперимент

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

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

Продолжен анализ свойств доплеровского спектра радиолокационного сигнала сверхвысокочастотного диапазона, отражённого морской поверхностью, при углах падения меньше 19° . Данные были получены в ходе эксперимента на морской океанографической платформе, расположенной в Чёрном море. Для описания доплеровского спектра помимо ширины и смещения впервые применялись коэффициенты асимметрии и эксцесса. Показано, что коэффициенты растут при увеличении угла падения и могут быть использованы для разработки количественного критерия перехода от квазизеркального (метод Кирхгофа) к резонансному (метод возмущений) механизму обратного рассеяния. Разработана оригинальная процедура калибровки данных радиолокатора, опирающаяся на теоретическую модель рассеяния и позволяющая сравнивать измерения разных радиолокаторов. При обработке данных эксперимента применялась процедура определения эффективной скорости ветра и эффективного безразмерного ветрового разгона для заданной модели спектра ветрового волнения. Восстановленный таким образом спектр волнения использовался для вычисления статистических моментов второго порядка и определения спектральных и энергетических характеристик отражённого сигнала. Численные оценки показали, что зависимости сечения обратного рассеяния, ширины и смещения доплеровского спектра от угла падения хорошо коррелируют с измерениями при малых углах падения ($<8-14^\circ$). Сравнение дисперсий уклонов крупномасштабного (по сравнению с длиной волны излучения) волнения, вычисленных по спектру ветрового волнения и восстановленных по угловой зависимости сечения обратного рассеяния, показало хорошее совпадение. Для описания рассеяния в переходной области углов падения ($\sim 10-20^\circ$) необходимо учитывать резонансный механизм обратного рассеяния.

Ключевые слова: ширина и смещение доплеровского спектра, метод Кирхгофа, двухмасштабная модель рассеивающей поверхности, малые углы падения, ветровое волнение, диаграмма направленности антенны

Одобрена к печати: 30.12.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-149-161

Введение

Для изучения механизмов обратного рассеяния электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона морской поверхностью при малых углах падения ($<8-14^\circ$) и в переходной области углов падения ($\sim 10-20^\circ$) разрабатываются теоретические модели, применяется численное моделирование и выполняются измерения доплеровского спектра (ДС) отражённого сигнала (например, работы (Басс, Фукс, 1972; Voisot et al., 2016; Fois et al., 2015; Johnson et al., 2001; Li, Xu, 2011; Nougier et al., 2011, 2018; Toporkov, Brown, 2000, 2002; Toporkov, Sletten, 2018; Wang, Xu, 2016)).

Дистанционное зондирование открыло возможности для оперативного получения глобальной информации о состоянии приповерхностного слоя Мирового океана, и в этом направлении достигнуты значительные успехи. Как показывают последние реализованные и перспективные проекты (Ardhuin, 2018; Hauser et al., 2017), связанные с орбитальными радиолокаторами, особое внимание начинает уделяться измерению спектральных и энергетических характеристик отражённого радиолокационного сигнала при малых углах падения. Измерение сечения обратного рассеяния при малых углах падения выполняют орбитальные радиолокаторы СВЧ-диапазона, установленные на спутниках GMP и CFOSAT (GPM..., 2014; Hauser et al., 2017).

Анализ данных дождевых радиолокаторов спутников TRMM и GPM показал, что при углах падения меньше 12° метод Кирхгофа в рамках двухмасштабной модели морской поверхности хорошо описывает зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения (например, работы (Chu et al., 2012; Freilich, Vanhoff, 2003)). Разработанные алгоритмы позволяют измерять дисперсию уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной электромагнитной волны, волнения (например, публикации (Караев и др., 2012; Freilich, Vanhoff, 2003; Panfilova et al., 2018a)).

При отражении радиолокационного сигнала от морской поверхности происходит изменение энергетических и спектральных характеристик. Первые результаты сравнения модельного (теоретического) и измеренного ДС при малых углах падения приведены, например, в работах (Караев и др., 2018; Панфилова и др., 2017; Panfilova et al., 2019).

В данной статье продолжен анализ свойств ДС радиолокационного СВЧ-сигнала, отражённого морской поверхностью, при малых углах падения (Караев и др., 2019; Panfilova et al., 2019). Целью исследования является обобщение применяемых при обработке методов и подходов на примере данных эксперимента, состоявшегося 4 октября 2016 г. на стационарной океанографической платформе, установленной в Чёрном море. Был проведён анализ эффективности разработанной процедуры обработки данных и выполнено сравнение измеренных параметров ДС с параметрами, вычисленными по модели ДС, построенной в приближении метода Кирхгофа.

Параметры доплеровского спектра

Обычно для описания ДС используются только два параметра: ширина ΔF и смещение f_{shift} . Для гладкой (модельной) функции в качестве смещения ДС можно использовать положение максимума. Для измеренного ДС такой подход является неэффективным из-за изрезанности формы спектра $S_{DS}(f)$, поэтому обычно для вычисления смещения применяют следующую формулу:

$$f_{shift} = \frac{\int f_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df}. \tag{1}$$

Определение ширины ДС не является общепринятым и отличается у разных авторов. В данной статье основным будет следующее определение для ширины ДС:

$$\Delta F = 2 \sqrt{\frac{\int f^2 S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} - f_{shift}^2}. \tag{2}$$

В дополнение к нему введём ещё одно определение ширины ДС, вычисляемое через моменты более высокого порядка:

$$\Delta F_0 = 2 \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_2}} = 2 \sqrt{\frac{\mu_4}{\sigma^2}}, \tag{3}$$

где μ_n является центральным моментом n -го порядка, а σ^2 — дисперсия.

На рис. 1а (см. с. 151) приведён ДС, измеренный при угле падения $3,68^\circ$: смещение $f_{shift} = -17,13$ Гц, ширина $\Delta F = 72,78$ Гц и $\Delta F_0 = 128,14$ Гц. Этой информации вполне достаточно для описания ДС, измеренного при малых углах падения, когда спектр является симметричным относительно максимума. Однако в переходной области углов падения ($\sim 10-20^\circ$) ДС становится несимметричным (рис. 1б). Он сильнее смещён относительно несущей частоты ($f_{shift} = -62,05$ Гц) и становится шире ($\Delta F = 118,36$ Гц и $\Delta F_0 = 240,72$ Гц). В результате только ширины и смещения уже недостаточно для характеристики формы спектра, т.е. на рисунке спектры с одинаковыми шириной и смещением могут сильно различаться. Форма ДС становится дополнительным информационным параметром, характеризующим отражённый

сигнал, поэтому будем использовать коэффициенты асимметрии A и эксцесса E , которые определены стандартным образом:

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

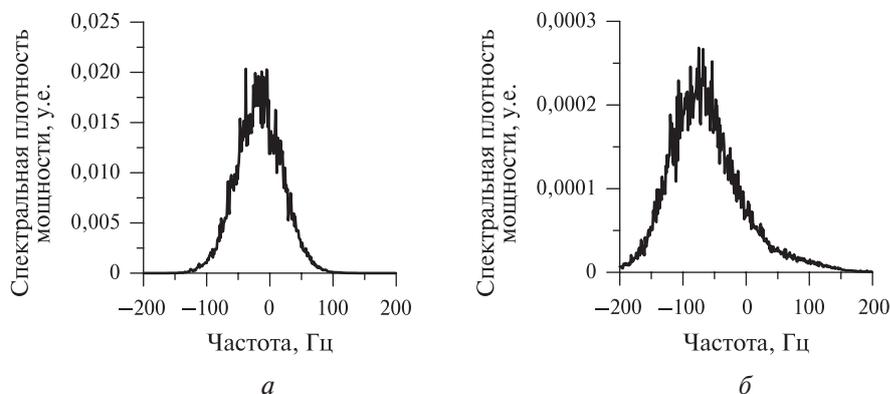


Рис. 1. Пример доплеровского спектра: a — угол падения $3,68^\circ$; b — угол падения $18,68^\circ$ (длина волны $0,0083$ м)

Нам неизвестны работы, где для анализа ДС отражённого радиолокационного сигнала применялись асимметрия и эксцесс. Ещё одной характеристикой ДС является сечение обратного рассеяния, которое вычисляется интегрированием по ДС.

Эксперимент

Эксперимент проводился в октябре 2016 г. на морской океанографической платформе, которая расположена в Чёрном море ($44^\circ 23' 38''$ с.ш., $33^\circ 59' 15''$ в.д.) на расстоянии примерно 500 м от берега (пос. Качивели, Крым). Глубина моря в районе платформы — около 28 м. Для измерений использовался когерентный доплеровский радиолокатор с симметричной антенной ($6 \times 6^\circ$), который работал на частоте 36,1 ГГц (длина волны 0,0083 м, Ка-диапазон) и был установлен на высоте примерно 13,5 м над уровнем моря. Радиолокатор был закреплён на поворотной площадке, которая обеспечивала равномерный шаг по углу падения и по азимуту в 1° . Скорость и направление ветра измерялись на высоте 22 м, а спектр волнения определялся струнным волнографом, закреплённым на океанографической платформе.

В данной статье обсуждаются результаты эксперимента, который проводился 4 октября 2016 г. с 14:00 до 16:00. По данным струнного волнографа, высота значительного волнения во время эксперимента находилась в интервале 0,274–0,295 м. Скорость ветра лежала в диапазоне от 6,74 до 7,9 м/с. При модельных оценках предполагалось, что направление ветра определяет направление распространения волнения. В ходе эксперимента исследовалась зависимость спектральных и энергетических характеристик отражённого сигнала от угла падения для фиксированного азимутального угла. Отрицательное значение смещения ДС (см. рис. 1) объясняется тем, что волнение распространялось от радиолокатора.

Обработка данных: доплеровский спектр

Эксперимент подтвердил результаты численного моделирования (например, работы (Fois et al., 2015; Li, Xu, 2011; Torokov, Brown, 2000; Wang, Xu, 2016)), что при малых углах падения смещение ДС f_{shift} увеличивается с ростом угла. При углах падения около 20° смещение достигало максимального значения и потом начинало уменьшаться. Как видно на рис. 2а (см. 152), рост останавливается при угле падения около 16° и начинается уменьшение, когда

угол падения больше 18° . На *рис. 2б* показано, что при малых углах падения ширина ДС ΔF остаётся примерно постоянной или даже немного уменьшается при увеличении угла падения, а потом начинается монотонный рост. Аналогичное поведение ширины ДС наблюдалось и в численном моделировании. Чтобы объяснить причины такого поведения, на *рис. 3* приведены коэффициенты асимметрии (см. *рис. 3а*) и эксцесса (см. *рис. 3б*).

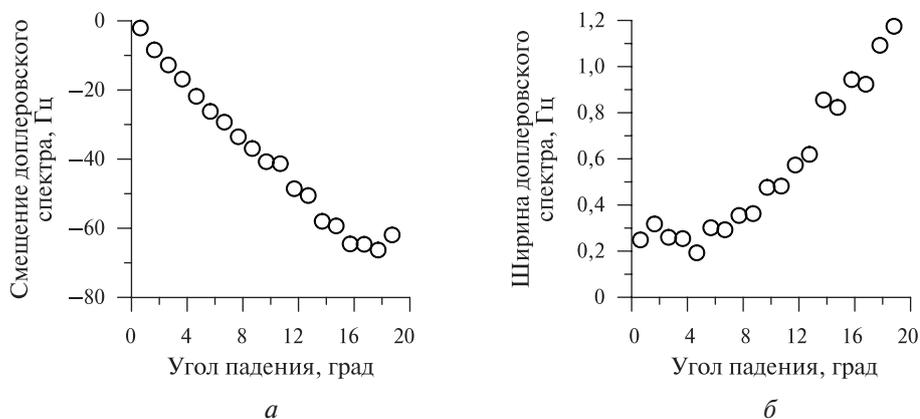


Рис. 2. Зависимость смещения (*а*) и ширины (*б*) доплеровского спектра от угла падения (длина волны 0,0083 м)

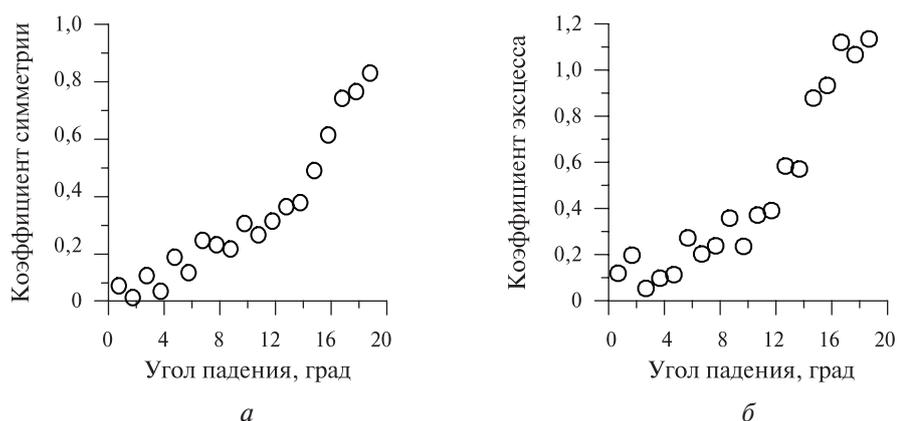


Рис. 3. Зависимость коэффициентов асимметрии (*а*) и эксцесса (*б*) доплеровского спектра от угла падения (длина волны 0,0083 м).

Как видно на *рис. 3*, с увеличением угла падения увеличиваются коэффициенты асимметрии и эксцесса. Форма ДС становится несимметричной относительно максимума и более узкой по сравнению с нормальным распределением.

Таким образом, введение в рассмотрение дополнительных параметров позволяет обнаружить «смену» доминирующего (квазизеркального) механизма обратного рассеяния, так как в приближении метода Кирхгофа форма спектра должна быть гауссовой (Басс, Фукс, 1972; Караев и др., 2019).

При описании рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью часто используют понятие двухмасштабной модели рассеивающей поверхности (например, работы (Курьянов, 1962; Фукс, 1966; Wright, 1968)), в соответствии с которой спектр волнения делится на крупно- и мелкомасштабные составляющие относительно длины волны радиолокатора.

Рассеяние при малых углах падения является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, образованного крупномасштабной составляющей спектра волнения, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Как было показано в работе

(Караев и др., 2019), смещение доплеровского спектра квазизеркальной компоненты связано с величиной средней фазовой скорости, которая вычисляется по спектру волнения (крупномасштабной составляющей спектра). Смещение брэгговской компоненты в первом приближении определяется фазовой скоростью резонансной длины волны, т.е. оно существенно меньше, чем доплеровский сдвиг квазизеркальной компоненты.

В переходной области углов падения происходит уменьшение вклада в отражённый сигнал «быстрой» квазизеркальной компоненты и возрастает роль «медленной» брэгговской компоненты. Это ведёт к уменьшению смещения суммарного ДС и росту ширины ДС при увеличении угла падения, что мы видим через изменение коэффициентов асимметрии и эксцесса. При средних углах падения коэффициенты асимметрии и эксцесса снова станут малыми.

При средних углах падения механизм обратного рассеяния является резонансным и происходит на мелкой ряби, расположенной на крупной волне. А в переходной области углов падения вклад обоих механизмов рассеяния становится сравнимым по величине, что приводит к изменению формы ДС (Karaev et al., 2018).

Формулы для ширины ΔF и смещения f_{shift} ДС квазизеркальной компоненты (метод Кирхгофа) с учётом диаграммы направленности антенны при малых углах падения приведены в работе (Караев и др., 2019).

Обработка данных: определение параметров волнения

Проведение эксперимента и последующая обработка позволили получить зависимость спектральных и энергетических характеристик отражённого сигнала от угла падения. Это позволяет перейти к решению обратной задачи.

В рамках метода Кирхгофа спектральные и энергетические характеристики отражённого сигнала зависят от статистических моментов морской поверхности, поэтому решение обратной задачи состоит в том, чтобы по ширине и смещению ДС определить моменты второго порядка для морского волнения и попробовать оценить высоту значительного волнения. Известны алгоритмы, которые позволяют вычислить статистические характеристики волнения (Титченко, Караев, 2012; Titchenko, Karaev 2017), однако для этого необходимо проводить измерения под разными азимутальными углами или использовать антенны с разными диаграммами направленности. В ходе эксперимента направление зондирования не менялось, поэтому нельзя воспользоваться этими алгоритмами. В результате был применён другой подход.

Традиционно ветровое волнение описывается спектром, поэтому задача формулируется следующим образом: по измеренным ширине и смещению ДС в рамках заданной модели спектра волнения необходимо определить скорость ветра U_{10} и длину безразмерного ветрового разгона \tilde{x} .

Как было ранее показано (Караев и др., 2011; Панфилова и др., 2017), при переходе на так называемую радиолокационную плоскость «ширина – смещение» ДС задача определения скорости ветра и длины ветрового разгона может быть решена (например, работа (Panfilova et al., 2018b)). Для упрощения решения рассмотрим случай одномодового ветрового волнения. В качестве модели спектра волнения использовалась модифицированная модель волнения (Ryabkova, Karaev, 2018; Ryabkova et al., 2019), которая зависит от скорости ветра и длины ветрового разгона. Скорость ветра и длина ветрового разгона определяют спектр ветрового волнения, по которому вычисляются статистические моменты.

На океанографической платформе скорость ветра измерялась анемометром, однако связь скорости ветра и параметров волнения в морских условиях является неоднозначной и зависит от множества факторов, например от прихода волн зыби, стабильности скорости и направления ветра в процессе развития ветрового волнения.

В формулы для ДС входят только статистические характеристики волнения (Караев и др., 2019), поэтому форма спектра волнения не так важна. Однако по восстановленному в процессе

обработки спектру волнения (скорость ветра, длина ветрового разгона) можно вычислить высоту значительного волнения. Эта характеристика волнения не влияет непосредственно на ширину и смещение ДС, поэтому не может быть восстановлена по измеренному ДС.

Для малых углов падения основным является квазизеркальный механизм обратного рассеяния, поэтому форма ДС должна быть гауссовой. Из рис. 3 видим, что коэффициенты асимметрии и эксцесса остаются небольшими до углов падения 6° . Можно предположить, что точность измерения угла падения в эксперименте была не выше $0,5-1^\circ$, т.е. для углов падения в $2-3^\circ$ погрешность по этой причине может достигать $30-50\%$. Для уменьшения влияния этого фактора был выбран угол в середине интервала углов падения ($0-10^\circ$), где доминирующим механизмом обратного рассеяния является квазизеркальное рассеяние (метод Кирхгофа), а коэффициенты асимметрии и эксцесса невелики (угол падения $5,68^\circ$).

Процедура определения скорости ветра U_{10} и длины безразмерного ветрового разгона \tilde{x} была протестирована в работах (Панфилова и др., 2017; Panfilova et al., 2018b, 2019) и подтвердила свою эффективность. В таблице приведены результаты обработки: измеренные и восстановленные параметры (высота значительного волнения SWH; φ_{az} — направление распространения ветрового волнения (скорости ветра); σ_{xx}^2 — дисперсия уклонов крупномасштабного волнения).

Измеренные и восстановленные параметры ДС и спектра волнения

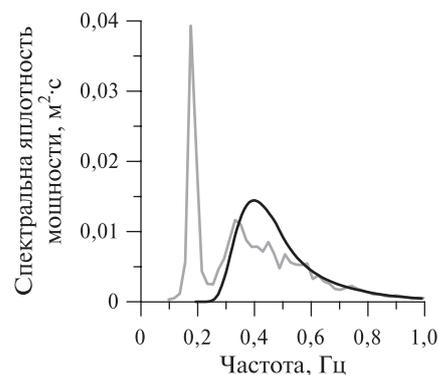
		Измеренные параметры			Восстановленные параметры					
θ	φ	SWH, м	ΔF , Гц	f_{sift} , Гц	U_{10}	\tilde{x}	ΔF , Гц	f_{sift} , Гц	SWH, м	σ_{xx}^2
$5,68^\circ$	30°	0,274	75,12	-26,44	3,28	20170	75,14	-26,4	0,248	0,011

Надо отметить, что восстановленная таким образом скорость ветра в общем случае не будет совпадать со скоростью ветра, измеряемой анемометром во время эксперимента. В процессе ветрового разгона скорость ветра крайне редко остаётся постоянной на протяжении длительного времени. В результате развитие волнения происходит при переменной скорости и направлении ветра, поэтому связь скорости ветра и параметров волнения даже в случае одномодового ветрового волнения не является сильной, а с учётом возможного прихода волн зыби становится слабой. Будем называть восстановленные параметры модели спектра волнения «эффективной скоростью ветра» и «эффективным разгоном». Модельный спектр, задаваемый этими параметрами, необходим для вычисления статистических характеристик волнения, которые входят в формулу для ДС.

В таблице появилась ещё одна статистическая характеристика волнения. Это дисперсия уклонов вдоль направления зондирования σ_{xx}^2 , которая была вычислена по модели спектра волнения. В отличие от других параметров волнения она может быть измерена независимым способом по угловой зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения, что позволяет оценить качество подборки эффективного ветра и эффективного разгона. Этот алгоритм применяется при обработке данных орбитальных дождевых радиолокаторов, которые измеряют сечение обратного рассеяния под разными углами падения (например, работы (Караев и др., 2012; Chu et al., 2012; Freilich, Vanhoff, 2003; Panfilova et al., 2018b)).

Для обработки были выбраны два интервала углов падения: $[2,68^\circ, 6,68^\circ]$ и $[2,68^\circ, 9,68^\circ]$. Это компромиссное решение: если взять мало углов падения, то на результат могут повлиять шумы (флуктуации мощности принимаемого сигнала), а если выбрать много углов, то может потребоваться учёт вклада резонансного механизма обратного рассеяния. Для обработки использовался разработанный алгоритм (Panfilova et al., 2018b). Для каждого интервала были вычислены дисперсии уклонов крупномасштабного волнения: $\sigma_{xx}^2 = 0,011$ и $0,012$ соответственно. Близость восстановленных значений дисперсии уклонов для обоих интервалов углов падения свидетельствует, что опасения были преувеличены.

Рис. 4. Зависимость спектральной плотности мощности спектра высот от частоты: светлая кривая — измеренный спектр; чёрная — модельный спектр



Два независимых подхода (по модели спектра волнения (см. таблицу) и по угловой зависимости сечения обратного рассеяния) дают близкие значения дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, что говорит об эффективности разработанной процедуры обработки.

Из таблицы видно, что измеренная струнным волнографом и вычисленная по спектру волнения высоты значительного волнения не совпадают и ошибка составляет примерно 10 %. Это обусловлено двумя причинами.

Высота значительного волнения не является тем параметром, который непосредственно влияет на параметры ДС. При подборе эффективной скорости ветра и эффективного разгона происходит сравнение измеренного и модельного ДС. Результат работы алгоритма критичен к дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, дисперсии орбитальных скоростей, коэффициентам корреляции, но не к высоте значительного волнения.

Задача усложняется, когда кроме ветрового волнения на поверхности присутствуют волны зыби, как это произошло в данном эксперименте. Во время эксперимента струнный волнограф измерял длинноволновую часть спектра волнения (частота < 1 Гц), поэтому можно сравнить измеренный и модельный спектры волнения.

На рис. 4 измеренный струной спектр высот показан светлой кривой, а модельный спектр — чёрной. Как видно из рисунка, во время проведения измерений на морской поверхности кроме ветрового волнения присутствовали волны зыби. Надо отметить, что параметры смешанного волнения сильно зависят от угла между направлением распространения ветрового волнения и направлением волн зыби, поэтому пока не стали рассматривать случай смешанного волнения. Определение эффективной скорости ветра и эффективного ветрового разгона проводилось для ветрового волнения.

Доминирующим во время эксперимента было ветровое волнение, поэтому обработка оказалась успешной, а присутствие волн зыби в спектре волнения частично компенсировалось завышением спектральной плотности ветрового волнения по сравнению с измеренным спектром.

Обсуждение результатов

При описании условий проведения эксперимента было отмечено, что скорость ветра и параметры волнения не оставались постоянными и, следовательно, это приводило к изменчивости параметров ДС. В связи с тем, что усреднение по волнению и скорости ветра выполнялось для 20 мин, а сеанс измерения ДС занимал 5 мин, невозможно отслеживать изменения в состоянии морской поверхности для каждого сеанса измерений радиолокатора. Это стало ещё одним аргументом в пользу выбора в качестве образца угла падения $5,68^\circ$, так как по времени это середина сеанса измерений в квазизеркальной области отражения ($0-10^\circ$). Для этого угла были определены эффективная скорость приводного ветра и эффективный разгон, которые в дальнейшем использовались для всего эксперимента.

Для сравнения измеренного и модельного ДС на одном рисунке (в одном масштабе) необходимо провести коррекцию сечения обратного рассеяния. Предположим, что модель квазизеркального рассеяния (метод Кирхгофа) правильно предсказывает величину сечения обратного рассеяния. Это неоднократно подтверждалось при сравнении теории и эксперимента (например, работы (Karaev et al., 2002; Voronovich, Zavorotny, 2001)). Сравнив измеренную мощность отражённого сигнала и сечение обратного рассеяния, вычисленное по модели, определим коэффициент пересчёта измеряемой радиолокатором мощности (сечение обратного

рассеяния) в соответствующее волнению теоретическое значение сечения обратного рассеяния. Мощность радиолокатора (коэффициент усиления) оставалась постоянной в ходе измерений, поэтому для данного сеанса коэффициент пересчёта равен 14,613 и он применяется для всех углов падения.

Такой подход к процедуре калибровки радиолокатора имеет свои недостатки, однако он является универсальным и существенно упрощает процедуру калибровки разных радиолокаторов, так как для неё используется модель рассеяния.

Для примера на рис. 5 построены измеренный (светлая кривая) и модельный (чёрная кривая) ДС после проведения корректировки измеренного ДС (умножение на коэффициент пересчёта): угол падения $3,68^\circ$ (см. рис. 5а) и $7,68^\circ$ (см. рис. 5б).

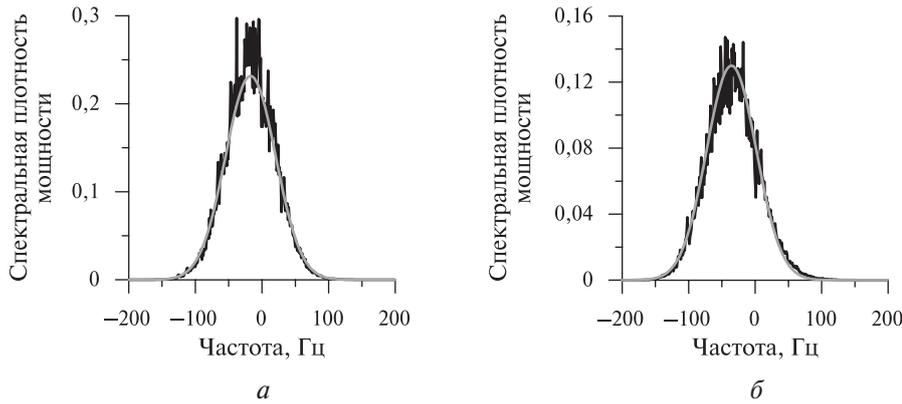


Рис. 5. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала: а — угол падения $3,68^\circ$; б — угол падения $7,68^\circ$. Чёрная кривая — измеренный спектр; светлая — модельный спектр

Для угла падения $3,68^\circ$ измеренное сечение обратного рассеяния оказалось чуть больше модельного (13,53 и 13,4 дБ). На рисунке это проявилось в том, что модельный ДС вблизи максимума оказался немного ниже измеренного.

На рис. 6 приведено сравнение зависимостей от угла падения измеренных и модельных оценок смещения (см. рис. 6а), ширины ДС (см. рис. 6б) и сечения обратного рассеяния (см. рис. 6в). Наблюдаемый на рисунке рост расхождения теории и эксперимента при увеличении угла падения объясняется переходом от квазизеркального механизма обратного рассеяния, доминирующего при малых углах падения, к брэгговскому рассеянию, справедливому при средних углах падения. При углах падения $8-20^\circ$ в модели рассеяния необходимо учитывать оба механизма рассеяния.

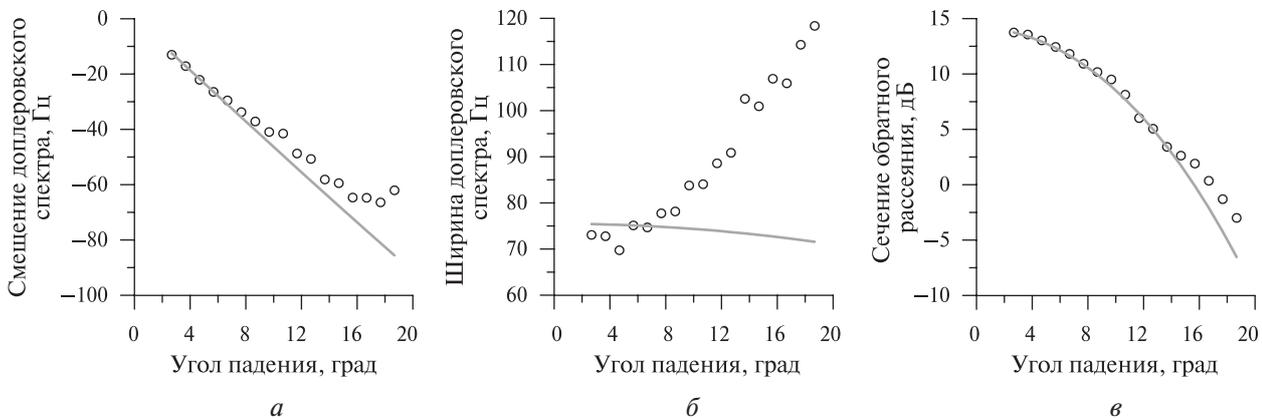


Рис. 6. Зависимость смещения (а), ширины (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от угла падения. Кружки — экспериментальные данные, кривая — вычисления по модели доплеровского спектра для полностью развитого ветрового волнения (эффективная скорость ветра 3,28 м/с и эффективный безразмерный разгон 20170)

Заключение

В настоящей работе проведён анализ данных, полученных во время эксперимента на стационарной океанографической платформе. Измерения выполнялись доплеровским радиолокатором (длина волны 0083 м) с шагом по углу падения 1° в интервале углов падения от $-1,32$ до $18,68^\circ$.

В ходе исследования был проведён анализ работоспособности разработанной процедуры обработки данных и выполнено сравнение измеренных параметров ДС с параметрами, вычисленными по модели ДС, построенной в приближении метода Кирхгофа в рамках двухмасштабной модели морской поверхности.

Для описания ДС использовались традиционные параметры: ширина и смещение. Эксперимент показал, что форма ДС зависит от угла падения, поэтому для более точного описания ДС необходимо использовать коэффициенты асимметрии и эксцесса. Коэффициенты могут быть использованы для разработки количественного критерия перехода от квазизеркального к брэгговскому механизму обратного рассеяния с отслеживанием изменения формы ДС.

Оказалось, что сечение обратного рассеяния является наиболее «грубым» параметром и наблюдается хорошее совпадение модели и эксперимента до угла падения 14° . Это объясняется тем, что падение мощности квазизеркальной компоненты компенсируется увеличением вклада брэгговской компоненты в суммарный сигнал.

Смещение и ширина ДС демонстрируют расхождение теории и эксперимента, начиная с угла падения примерно в 10° . Это происходит, когда коэффициенты асимметрии и эксцесса становятся больше 0,2–0,3. Форма ДС чувствительна к изменению механизма обратного рассеяния, и это можно использовать в алгоритмах обработки.

Предложена оригинальная процедура калибровки радиолокатора, которую можно применять при малых углах падения. Она опирается на подтверждаемое экспериментами предположение, что метод Кирхгофа хорошо описывает обратное рассеяние при малых углах падения, поэтому можно использовать сечение обратного рассеяния, вычисленное по модели, в качестве эталонного значения сечения обратного рассеяния для калибровки радиолокатора. Такой подход является универсальным и позволит сравнивать измерения разных радиолокаторов. Результат не зависит от характеристик радиолокатора: мощности передатчика, коэффициента усиления приёмного тракта, диаграммы направленности антенны и т. д.

При обработке для определения эффективной скорости ветра и эффективной длины безразмерного ветрового разгона используется модель спектра ветрового волнения. Необходимо, чтобы вычисляемые по спектру волнения статистические моменты второго порядка обеспечивали близкие к измеренным в эксперименте значения ширины и смещения ДС для одного угла падения. Во время проведения измерений на поверхности присутствовали волны зыби, т. е. поверхностное волнение было двухмодовым, но ветровое волнение оставалось доминирующим. Сравнение смоделированного спектра волнения со спектром, измеренным струнным волнографом, показало, что произошла частичная компенсация зыби в модели спектра: ветровое волнение стало более интенсивным, чем измеренное струнным волнографом.

В связи с тем, что параметры ДС зависят не от формы спектра волнения, а от интегральных характеристик (статистических моментов второго порядка), расхождение формы измеренного и модельного спектров волнения не становится критичным для результата. Сравнение дисперсий уклонов крупномасштабного волнения, вычисленных по модельному спектру волнения и восстановленных по угловой зависимости сечения обратного рассеяния, показало хорошее совпадение.

Таким образом, проведённый анализ показал, что модель ДС, построенная в приближении метода Кирхгофа с учётом диаграммы направленности антенны для двухмасштабной модели рассеивающей поверхности, хорошо описывает ДС при малых углах падения, а разработанная процедура обработки является эффективной и позволяет определять эффективную скорость ветра и эффективный разгон.

Программы, использованные в статье для вычисления ДС и параметров волнения по модели спектра, будут высланы заинтересованным читателям.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00939а).

Литература

1. *Басс Ф., Фукс И.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М: Наука, 1972. 424 с.
2. *Караев В., Каневский М., Мешков Е.* Упрощенное описание морского волнения для задач радиолокационного дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 2. С. 26–39.
3. *Караев В., Панфилова М., Баландина Г., Чу К.* Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабных волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 62–77.
4. *Караев В., Рябкова М., Панфилова М., Титченко Ю., Мешков Е.* Свойства доплеровского спектра радиолокационного СВЧ-сигнала, отраженного морской поверхностью при малых углах падения // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. 12–16 нояб. 2018. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 278.
5. *Караев В., Титченко Ю., Мешков Е., Панфилова М., Рябкова М.* Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отраженного морской поверхностью при малых углах падения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 6. С. 221–234.
6. *Курьянов Б. Ф.* Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей // Акустический журн. 1962. Т. 8. № 3. С. 325–333.
7. *Панфилова М. А., Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Рябкова М. А.* Восстановление статистических характеристик ветрового волнения по ширине и смещению доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. 13–17 нояб. 2017. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 296.
8. *Титченко Ю. А., Караев В. Ю.* Метод определения параметров морского волнения с помощью модифицированного акустического волнографа // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. «Радиофизика». 2012. Т. 55. № 8. С. 544–554.
9. *Фукс И. М.* К теории рассеяния радиоволн на взволнованной поверхности моря // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. «Радиофизика». 1966. Т. 9. № 5. С. 876–887.
10. *Ardhuin F.* The SKIM Mission: a Pathfinder for Doppler Oceanography from Space // Doppler Oceanography from Space: Proc. Workshop. Brest, France. 10–12 Oct. 2018. 47 p. URL: <https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Ardhuin.pdf> (accessed 14.10.2019).
11. *Boisot O., Amarouche L., Lalaurie J.-C., Guerin C.-A.* Dynamical Properties of Sea Surface Microwave Backscatter at Low-Incidence: Correlation Time and Doppler Shift // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54. No. 12. P. 7385–7395.
12. *Chu X., He Y., Karaev V., Chen G.* Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 11. P. 4599–4609. DOI 10.1109/TGRS.2012.2191560.
13. *Fois F., Hoogeboom P., Chavalier F., Stoffelen A.* An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. P. 988–1015.
14. *Freilich M. H., Vanhoff B. A.* The relation between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM Precipitation Radar measurements // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. No. 4. P. 549–562.
15. GPM Data Utilization Handbook. First Edition. Japan Aerospace Exploration Agency, 2014. 92 p.
16. *Hauser D., Tison C., Amiot T., Delaye L., Corcoral N., Castellan P.* SWIM: the first spaceborne wave scatterometer // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. No. 5. P. 3000–3014.
17. *Johnson J., Toporkov J., Brown G.* A Numerical Study of Backscattering From Time-Evolving Sea Surfaces: Comparison of Hydrodynamic Models // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 11. P. 2411–2420. DOI: 10.1109/36.964977.
18. *Karaev V., Kanevsky M., Balandina G., Cotton P., Challenor P., Gommenginder C., Srocosz M.* On the problem of the near ocean surface wind speed retrieval by radar altimeter: two-parametric algorithm // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. No. 16. P. 3263–3283.
19. *Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Yu., Meshkov Eu.* The Doppler spectrum of the microwave radar signal backscattered by the sea surface at low incidence angles // Proc. IGARSS. 2018. P. 979–982.
20. *Li X., Xu X.* Scattering and Doppler spectral analysis for two-dimensional linear and nonlinear sea surfaces // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 2. P. 603–611.

21. *Nouguier F., Guerin C., Soriano G.* Analytical Techniques for the Doppler Signature of Sea Surfaces in the Microwave Regime — II: Nonlinear Surfaces // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V. 49. No. 12. P. 4920–4927.
22. *Nouguier F., Chapron B., Collard F., Mouche A., Rasclé N., Ardhuin F., Wu X.* Sea Surface Kinematics from Near-Nadir Radar Measurements // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. No. 10. P. 6169–6179.
23. *Panfilova M., Karaev V., Guo J.* (2018a) Oil slick observation at low incidence angles in Ku-band // *J. Geophysical Research, Oceans*. 2018. V. 123. No. 3. P. 1924–1936. URL: <https://doi.org/10.1002/2017JC013377>.
24. *Panfilova M., Ryabkova M., Titchenko Y., Karaev V.* (2018b) Retrieving of significant wave height and period from the Doppler spectrum of backscattered microwave signal // 12th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP 2018): Proc. L., 2018. P. 1–3. DOI: 10.1049/cp.2018.1084.
25. *Panfilova M., Ryabkova M., Karaev V., Skiba E.* Retrieval of the statistical characteristics of wind waves from the width and shift of the Doppler spectrum of the backscattered microwave signal // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 20. No. 3. P. 1–7.
26. *Ryabkova M., Karaev V.* A modified wave spectrum for modeling in remote sensing problems // *Proc. IGARSS*. 2018. P. 3274–3277.
27. *Ryabkova M., Karaev V., Titchenko Y., Guo J.* A review of wave spectra models as applied to the problem of radar probing of the sea surface // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. No. 124. P. 1–31. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
28. *Titchenko Yu., Karaev V.* Sea surface waves parameters retrieval method based on the measurement of the Doppler spectrum of the quasispecular reflected waves // *Proc. IGARSS*. 2017. P. 721–724.
29. *Toporkov J., Brown G.* Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2000. V. 38. No. 4. P. 1616–625. DOI: 10.1109/36.851961.
30. *Toporkov J., Brown G.* Numerical Study of the Extended Kirchhoff Approach and the Lowest Order Small Slope Approximation for Scattering from Ocean-Like Surfaces: Doppler Analysis // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 2002. V. 50. No. 4. P. 417–425.
31. *Toporkov J., Sletten M.* Investigation of Doppler Spectra of Sea Backscatter through Large-Scale Monte Carlo Simulations: Direct Numerical Solution and Approximate Models // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2018): Proc. Valencia, 2018*. P. 41–44. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518836.
32. *Voronovich A., Zavorotny V.* Theoretical model for scattering of radar signals in Ku- and C-bands from a rough sea surface with breaking waves // *Waves Random Media*. 2001. V. 11. P. 247–269.
33. *Wang J., Xu X.* Doppler simulation and analysis for 2-D Sea surfaces up to Ku-band // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2016. V. 54. No. 1. P. 466–478.
34. *Wright J. W.* A new model for sea clutter // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 1968. V. 16. P. 217–223.

Doppler spectrum of microwave signal backscattered by sea surface at small incidence angles: experiment

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

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

The analysis of the properties of the Doppler spectrum of microwave radar signal backscattered by the sea surface at incidence angles less than 19° is continued. The data were obtained during an experiment on an offshore oceanographic platform located in the Black Sea. To describe the Doppler spectrum, in addition to width and shift, skewness and kurtosis coefficients were first used. It is shown that the coefficients grow with increasing incidence angle and can be used to develop a quantitative criterion for the transition from the quasi-specular (Kirchhoff method) to the resonant (perturbation method) backscattering mechanism. An original radar data calibration procedure has been developed based on a theoretical scattering model and allowing comparison of measurements of different radars. When processing the experimental data, we used the procedure for determining the effective wind speed and effective dimensionless wind fetch for a selected model of the spectrum of wind waves. The sea wave spectrum reconstructed in this way was used to calculate the second-order statistical moments

and determine the spectral and energy characteristics of the backscattered signal. Numerical estimates showed that the dependences of the backscattered radar cross section, width, and shift of the Doppler spectrum on the incidence angle correlate well with measurements at small incidence angles ($<8-14^\circ$). Comparison of the mean square slopes of the large-scale (compared to the radar wavelength) waves calculated from the wind wave spectrum and reconstructed from the angular dependence of the backscattered radar cross section, showed good agreement. To describe the scattering in the transition region of incidence angles ($\sim 10-20^\circ$), it is necessary to take into account the resonant backscattering mechanism.

Keywords: width and shift of the Doppler spectrum, Kirchhoff approximation, two-scale model of scattering surface, small incidence angles, wind waves, antenna beam

Accepted: 30.12.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-149-161

References

1. Bass F., Fuks I., *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave scattering on a statistically rough surface), Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
2. Karaev V., Kanevskii M., Meshkov E., Uproshchennoe opisaniye morskogo volneniya dlya zadach radiolokatsionnogo distantsionnogo zondirovaniya (Simplified approach to sea roughness description for the problem of radar remote sensing of the sea surface), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 2, pp. 26–39.
3. Karaev V., Panfilova M., Balandina G., Chu K., Vosstanovlenie dispersii naklonov krupnomasshtabnykh voln po radiolokatsionnym izmereniyam v SVCh-diapazone (Retrieval of the slope variance by microwave measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 4, pp. 62–77.
4. Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Yu., Meshkov E., Svoistva doplerovskogo spektra radiolokatsionnogo SVCh-signal, otrazhennogo morskoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh padeniya (Properties of the Doppler spectrum of a microwave radar signal backscattered by a sea surface at low incidence angles), *16-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (16th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, 12–16 Nov. 2018, Moscow: IKI RAN, 2018, p. 278.
5. Karaev V., Titchenko Yu., Meshkov E., Panfilova M., Ryabkova M., Doplerovskii spektr radiolokatsionnogo signal, otrazhennogo morskoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh padeniya (Doppler spectrum of microwave signal backscattered by sea surface at small incidence angles), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 6, pp. 221–234.
6. Kur'yanov B. F., Rasseyaniye zvuka na sherokhovatoi poverkhnosti s dvumya tipami nerovnostei (Sound scattering on a rough surface with two types of roughness), *Akusticheskii zhurnal*, 1962, Vol. 8, No. 3, pp. 325–333.
7. Panfilova M. A., Karaev V. Yu., Titchenko Yu. A., Ryabkova M. A., Vosstanovlenie statisticheskikh kharakteristik vetrovogo volneniya po shirine i smeshcheniyu doplerovskogo spektra otrazhennogo radiolokatsionnogo signal (Retrieval of statistical characteristics of wind waves from the width and shift of the Doppler spectrum of the reflected radar signal), *15-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (15th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, 13–17 Nov. 2017, Moscow, IKI RAN, 2017, p. 296.
8. Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Metod opredeleniya parametrov morskogo volneniya s pomoshch'yu modifitsirovannogo akusticheskogo volnografa (Method for determining the parameters of sea waves using a modified acoustic wave gauge), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Ser. Radiofizika*, 2012, Vol. 55, No. 8, pp. 544–554.
9. Fuks I. M., K teorii rasseyaniya radiovoln na vzvolnovannoi poverkhnosti morya (On the theory of scattering of radio waves on an rough surface of the sea), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Ser. Radiofizika*, 1966, Vol. 9, No. 9, pp. 876–887.
10. Ardhuin F., The SKIM Mission: a Pathfinder for Doppler Oceanography from Space, *Doppler Oceanography from Space*, Proc. Workshop, Brest, France, 10–12 Oct. 2018, 47 p., URL: <https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Ardhuin.pdf> (accessed 14.10.2019).
11. Boisot O., Amarouche L., Lalaurie J.-C., Guerin C.-A., Dynamical Properties of Sea Surface Microwave Backscatter at Low-Incidence: Correlation Time and Doppler Shift, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 12, pp. 7385–7395.
12. Chu X., He Y., Karaev V., Chen G., Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 11, pp. 4599–4609, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2191560.

13. Fois F., Hoogeboom P., Chavalier F., Stoffelen A., An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 988–1015.
14. Freilich M. H., Vanhoff B. A., The relation between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM Precipitation Radar measurements, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, No. 4, pp. 549–562.
15. *GPM Data Utilization Handbook. First Edition*, Japan Aerospace Exploration Agency, 2014, 92 p.
16. Hauser D., Tison C., Amiot T., Delaye L., Corcoral N., Castillan P., SWIM: the first spaceborne wave scatterometer, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, No. 5, pp. 3000–3014.
17. Johnson J., Toporkov J., Brown G. A., Numerical Study of Backscattering from Time-Evolving Sea Surfaces: Comparison of Hydrodynamic Model, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 11, pp. 2411–2420, DOI: 10.1109/36.964977.
18. Karaev V., Kanevsky M., Balandina G., Cotton P., Challenor P., Gommenginder C., Srocosz M., On the problem of the near ocean surface wind speed retrieval by radar altimeter: two-parametric algorithm, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, No. 16, pp. 3263–3283.
19. Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Yu., Meshkov E., The Doppler spectrum of the microwave radar signal backscattered by the sea surface at low incidence angles, *Proc. IGARSS*, 2018, pp. 979–982.
20. Li X., Xu X., Scattering and Doppler spectral analysis for two-dimensional linear and nonlinear sea surfaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 2, pp. 603–611.
21. Nouguier F., Guerin F., Soriano G., Analytical Techniques for the Doppler Signature of Sea Surfaces in the Microwave Regime — II: Nonlinear Surfaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 12, pp. 4920–4927.
22. Nouguier F., Chapron B., Collard F., Mouche A., Rasclé N., Ardhuin F., Wu X., Sea Surface Kinematics From Near-Nadir Radar Measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 56, No. 10, pp. 6169–6179.
23. Panfilova M., Karaev V., Guo J. (2018a), Oil slick observation at low incidence angles in Ku-band, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, Vol. 123, No. 3, pp. 1924–1936, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JC013377>.
24. Panfilova M., Ryabkova M., Titchenko Y., Karaev V. (2018b), Retrieving of significant wave height and period from the Doppler spectrum of backscattered microwave signal, *12th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, Proc., London, 2018, pp. 1–3, DOI: 10.1049/cp.2018.1084.
25. Panfilova M., Ryabkova M., Karaev V., Skiba E., Retrieval of the statistical characteristics of wind waves from the width and shift of the Doppler spectrum of the backscattered microwave signal, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 1–7.
26. Ryabkova M., Karaev V., A modified wave spectrum for modeling in remote sensing problems, *Proc. IGARSS, Italy*, 2018, pp. 3274–3277.
27. Ryabkova M., Karaev V., Titchenko Y., Guo J., A review of wave spectra models as applied to the problem of radar probing of the sea surface, *J. Research: Oceans*, 2019, No. 124, pp. 1–31, available at: <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
28. Titchenko Yu., Karaev V., Sea surface waves parameters retrieval method based on the measurement of the Doppler spectrum of the quasispecular reflected waves, *Proc. IGARSS*, 2017, pp. 721–724.
29. Toporkov J., Brown G., Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 4, pp. 1616–1625, DOI: 10.1109/36.851961.
30. Toporkov J., Brown G., Numerical Study of the Extended Kirchhoff Approach and the Lowest Order Small Slope Approximation for Scattering From Ocean-Like Surfaces: Doppler Analysis, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2002, Vol. 50, No. 4, pp. 417–425, DOI: 10.1109/TAP.2002.1003376.
31. Toporkov J., Sletten M., Investigation of Doppler Spectra of Sea Backscatter through Large-Scale Monte Carlo Simulations: Direct Numerical Solution and Approximate Models, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2018)*, Proc., Valencia, 2018, pp. 41–44, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518836.
32. Voronovich A., Zavorotny V., Theoretical model for scattering of radar signals in Ku- and C-bands from a rough sea surface with breaking waves, *Waves Random Media*, 2001, Vol. 11, pp. 247–269.
33. Wang J., Xu X., Doppler simulation and analysis for 2-D Sea surfaces up to Ku-band, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 1, pp. 466–478.
34. Wright J.W., A new model for sea clutter, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1968, Vol. 16, pp. 217–223.