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

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

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

Спектральные и энергетические характеристики отражённого радиолокационного сигнала содержат информацию о параметрах рассеивающей поверхности. В настоящее время при обработке радиолокационных данных основным информационным параметром является сечение обратного рассеяния, которое определяется геометрией подстилающей поверхности. Информация о движении морской поверхности содержится в доплеровском спектре отражённого радиолокационного сигнала. В данной работе рассмотрены свойства доплеровского спектра при малых углах падения, когда доминирующим является квазизеркальный механизм обратного рассеяния. Построены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от скорости и направления ветра, угла падения. Показано, что даже для одномодового ветрового волнения существует неоднозначная связь скорости ветра и параметров доплеровского спектра, которая приводит к неоднозначности при решении обратной задачи. Численные оценки показали, что диаграмма направленности антенны оказывает сильное влияние на ширину и смещение доплеровского спектра и этот эффект может быть использован для создания более простых схем измерения и разработки новых алгоритмов, что особенно актуально для орбитальных радиолокаторов.

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

> Одобрена к печати: 15.10.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-221-234

Введение

Как известно, спектральные и энергетические характеристики радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона, отражённого морской поверхностью, содержат информацию о параметрах рассеивающей поверхности. В первых экспериментах, которые проводились в 1960– 1970-х гг., измерялось сечение обратного рассеяния и доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала (например, работы (Розенберг и др., 1966; Bass et al., 1968; Pidgeon, 1968; Valenzuela, Laing, 1970)). Было обнаружено, что сечение обратного рассеяния достаточно хорошо коррелирует со скоростью приводного ветра, а связь скорости ветра и доплеровского спектра оказалась менее очевидной.

В итоге сечение обратного рассеяния было выбрано в качестве основного информационного параметра, и это направление в радиолокационном зондировании активно развивалось. Было проведено множество экспериментов по изучению связи скорости приводного ветра и сечения обратного рассеяния, которые позволили предложить схемы измерения и разработать алгоритмы восстановления скорости и направления приводного ветра (см., например, публикации (Gohil et al., 2008; Stoffelen et al., 2009; Wentz, 1991; Wentz, Smith, 1999; Wentz et al., 1984)). В результате при обработке данных скаттерометров, радиовысотомеров и радиолокаторов с синтезированной апертурой применяются алгоритмы, опирающиеся на геофизические модельные функции (Geophysical Model Function — GMF). Алгоритмы позволяют восстанавливать поле приводного ветра, и эти данные активно используются в метеорологии. В перспективных разработках сечение обратного рассеяния продолжает оставаться одной из ключевых характеристик (см., например, работы (Nekrasov et al., 2018; Stoffelen et al., 2017; Zhu et al., 2016)). В настоящее время задача увеличения объёма и достоверности измеряемой информации является крайне актуальной. Измерение доплеровского спектра и разработка алгоритмов обработки — один из вариантов её решения.

Доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала является более информативной характеристикой, чем сечение обратного рассеяния, которое вычисляется интегрированием по доплеровскому спектру. Эта интегральная характеристика содержит информацию о геометрии рассеивающей поверхности, например о дисперсии уклонов.

Доплеровский спектр содержит информацию о параметрах волнения, связанных с движением морской поверхности. В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности свойства доплеровского спектра зависят от угла падения. При малых углах падения доминирующим является квазизеркальный механизм обратного рассеяния, а при средних углах рассеяние носит резонансный характер.

Измерение параметров крупномасштабного (по сравнению с длиной волны радиолокатора) волнения наиболее просто осуществить при малых углах падения. Первые теоретические модели доплеровского спектра для квазизеркального механизма обратного рассеяния были разработаны в 1960–1970-е гг. Их обзор приведён в работах (Басс, Фукс, 1972; Valenzuela, 1978).

В настоящее время повышенное внимание привлекает задача измерения морских течений с орбитальных носителей. В октябре 2018 г. во Франции прошла международная конференция "Doppler Oceanography from space", где были представлены различные концепции, которые развиваются и тестируются, например, в работах (Ardhuin, 2018; Gommenginger et al., 2018; Rodriguez et al., 2018). В основе всех методов лежат доплеровские измерения, что говорит об актуальности совершенствования моделей доплеровского спектра.

В данной публикации обсуждается модель доплеровского спектра радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью, с учётом диаграммы направленности антенны. Актуальность появления такой статьи обусловлена возросшим интересом к доплеровском измерениям, а необходимость обусловлена тем, что в ранее опубликованных работах (Каневский, Караев, 1996; Караев, Каневский, 2008; Кагаеv et al., 2008) не приведены формулы для доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния в общем виде и не рассмотрены параметры, влияющие на спектральные и энергетические характеристики отражённого радиолокационного сигнала. В работе приведены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от скорости и направления приводного ветра, длины ветрового разгона и рассмотрено влияние диаграммы направленности антенны на характеристики доплеровского спектра при малых углах падения. Диаграмма направленности антенны является тем параметром, который может быть использован для повышения эффективности дистанционных методов.

Модель доплеровского спектра

К недостатку большинства известных моделей доплеровского спектра можно отнести отсутствие параметров радиолокатора, в частности диаграммы направленности антенны. Обычно радиолокаторы имеют узкую диаграмму направленности антенны, что позволяет не учитывать её при рассмотрении доплеровского спектра. Однако в случае широкой диаграммы направленности необходимо учитывать её влияние.

Модели доплеровского спектра с учётом ширины диаграммы направленности антенны были предложены в работах (Гарнакерьян, Сосунов, 1978; Зубкович, 1968). Однако сравнение разработанных моделей и эксперимента не было проведено. Недостатком является упрощённое включение волнения в модель доплеровского спектра через гауссову корреляционную функцию. Кроме того, не было проведено подробного исследования влияния диаграммы направленности антенны на спектральные и энергетические характеристики отражённого радиолокационного сигнала. Кратко представим разработанную авторами модель доплеровского спектра, где отсутствуют оба этих недостатка.

На *рис. 1* (см. с. 223) показана схема измерения. На высоте H_0 расположен радиолокатор, и зондирование ведётся под углом падения θ_0 .

Расстояние до центра рассеивающей площадки равно R_0 , а R_1 и R_2 — расстояния до рассеивающих участков на морской поверхности. Морское волнение предполагается стационарным и однородным процессом, который описывается случайной функцией $\zeta(\mathbf{r}, t)$. Радиус-вектор \mathbf{r}_{0} направлен в центр рассеивающей пло-Направление щадки. распространение волнения — ϕ_w .

Для упрощения конечных формул ориентация антенны была выбрана вдоль оси Х. Это не ограничивает общность постановки задачи для случая неподвижного радиолокатора, так как изменение направления распространения волнения равнозначно изменению направления зондирования.



Рис. 1. Схема измерения

. I

Форма доплеровского спектра радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью, описывается следующей формулой:

$$S(\omega) = \frac{|F(0)|^{2} \sqrt{\pi}}{2k \cos^{4} \theta_{0} \cdot \sqrt{\alpha_{n0}}} \exp\left[-\frac{tg^{2} \theta_{0}}{2\alpha_{n0}} \sigma_{yy}^{2}\right] \left\{ \frac{\exp\left[\frac{tg^{2} \theta_{0}}{4 \times 5,52 \alpha_{n0}^{2}} \left[\frac{\sigma_{yy}^{4} \delta_{x}^{2}}{\alpha_{v0}} + \frac{\delta_{y}^{2} K_{\varphixy}^{2}}{\alpha_{r0} \cos^{2} \theta_{0}}\right]\right]}{\sqrt{\omega_{s}} \sqrt{\left[1 + \frac{\sigma_{yy}^{2} \delta_{x}^{2}}{11,04 \alpha_{n0}} \right] \cdot \left[1 + \frac{\sigma_{xx}^{2} \delta_{y}^{2}}{11,04 \alpha_{n0} \cos^{2} \theta_{0}}\right]}} \right\}} \times$$
(1)
$$\times \exp\left[-\frac{(\omega + k\omega_{r})^{2}}{4k^{2}\omega_{s}}\right],$$

где

$$\begin{split} \alpha_{n0} &= \sigma_{yy}^{2} \sigma_{xx}^{2} - K_{\zeta xy}^{2}; \quad \alpha_{v0} = \frac{11,04 \,\alpha_{n0} + \sigma_{yy}^{2} \delta_{x}^{2}}{11,04 \,\alpha_{n0}}; \quad \alpha_{r0} = \frac{11,04 \cos^{2} \theta_{0} \cdot \alpha_{n0} + \sigma_{xx}^{2} \delta_{y}^{2}}{11,04 \cos^{2} \theta_{0} \cdot \alpha_{n0}}; \\ \alpha_{p} &= 2K_{\zeta yt} + \frac{2K_{\zeta yy} K_{\zeta xt}}{\sigma_{xx}^{2}}; \quad \alpha_{u0} = \frac{2K_{\zeta xt}}{\sigma_{xx}^{2}} + \frac{\alpha_{p} K_{\zeta xy}}{\alpha_{n0}}; \quad \alpha_{t} = \sigma_{t}^{2} \sigma_{xx}^{2} - K_{\zeta xt}^{2}; \quad \alpha_{y0} = \frac{2K_{\zeta yy}}{\sigma_{xx}^{2}}; \\ \alpha_{00} &= \frac{2\sigma_{yy}^{2}}{\cos \theta_{0} \cdot \left(\sigma_{yy}^{2} \sigma_{xx}^{2} - K_{\zeta yy}^{2}\right)}; \\ \omega_{t} &= \sin \theta_{0} \cdot \left(\frac{2K_{\zeta xt}}{\sigma_{xx}^{2}} + \frac{\alpha_{p} K_{\zeta xy}}{\alpha_{n0}} - \frac{\alpha_{u0} \delta_{x}^{2} \sigma_{yy}^{2}}{(11,04 \alpha_{n0} + \sigma_{yy}^{2} \delta_{x}^{2})} - \frac{\alpha_{p} \sigma_{xx}^{2} K_{\zeta xy} \delta_{y}^{2}}{11,04 \alpha_{n0}^{2} \alpha_{r0} \cos^{2} \theta_{0}}\right]; \\ \omega_{s} &= \frac{\delta_{y}^{2} \alpha_{p}^{2} \sigma_{xx}^{4}}{4 \times 5,52 \alpha_{r0} \alpha_{n0}^{2}} + \cos^{2} \theta \cdot \left(\frac{2\alpha_{t}}{\sigma_{xx}^{2}} - \frac{\alpha_{p}^{2} \sigma_{xx}^{2}}{2\alpha_{n0}} + \frac{\alpha_{u0}^{2} \delta_{x}^{2}}{4\alpha_{v0} \times 5,52}\right]; \end{split}$$

 σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 — дисперсии уклонов крупномасштабного (по сравнению с длиной волны радиолокатора) волнения вдоль осей X и Y соответственно; σ_{tt}^2 — дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости; K_{gxt} и K_{gyt} — коэффициенты корреляции уклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости; K_{gxy} — коэффициент корреляции уклонов вдоль осей Х и У. Численные значения всех коэффициентов будут вычислены по модели спектра волнения (Караев, Баландина, 2000).

В формуле (1) можно выделить три части. Первый член формулы (до фигурных скобок) описывает доплеровский спектр без учёта диаграммы направленности антенны. Влияние диаграммы направленности антенны в качестве «амплитудного» множителя входит во второй член произведения (в фигурных скобках). Третий член формулы (после фигурных скобок) зависит от частоты и определяет форму доплеровского спектра. Как видим из формулы, диаграмма направленности влияет на амплитуду, ширину и смещение доплеровского спектра.

Форма доплеровского спектра является гауссовой, основные характеристики — это ширина и смещение, которые задаются следующими выражениями:

$$f_{shift} = -\frac{\sin\theta_0}{\lambda} \left[\frac{2K_{gxt}}{\sigma_{xx}^2} + \frac{\alpha_p K_{gxy}}{\alpha_{n0}} - \frac{\alpha_{u0} \delta_x^2 \sigma_{yy}^2}{\left(11,04\alpha_{n0} + \sigma_{yy}^2 \delta_x^2\right)} - \frac{\alpha_p \sigma_{xx}^2 K_{gxy} \delta_y^2}{11,04\alpha_{n0}^2 \alpha_{r0} \cos^2\theta_0} \right],$$
(2)

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{\ln 10}}{\lambda} \sqrt{\omega_s}.$$
(3)

Ширина доплеровского спектра определена на уровне -10 дБ от максимума, и её легко оценить по графику. При работе с экспериментальными данными точное определение максимума может быть затруднительным из-за шума, поэтому для оценки можно использовать дисперсию:

$$\Delta f_{disp} = \frac{\sqrt{2\omega_s}}{\lambda}.$$
 (4)

Если доплеровский спектр проинтегрировать по частоте, то получим формулу для сечения обратного рассеяния:

$$\sigma_{0} = \frac{|F(0)|^{2}}{2\cos^{4}\theta_{0} \cdot \sqrt{\alpha_{n0}}} \exp\left[-\frac{\mathrm{tg}^{2}\theta_{0}}{2\alpha_{n0}}\sigma_{yy}^{2}\right] \left\{ \frac{\exp\left[\frac{\mathrm{tg}^{2}\theta_{0}}{4\times5,52\alpha_{n0}^{2}}\left(\frac{\sigma_{yy}^{4}\delta_{x}^{2}}{\alpha_{v0}} + \frac{\delta_{y}^{2}K_{gxy}^{2}}{\alpha_{r0}\cos^{2}\theta_{0}}\right)\right]}{\sqrt{\left[1 + \frac{\sigma_{yy}^{2}\delta_{x}^{2}}{11,04\alpha_{n0}}\right]} \sqrt{\left[1 + \frac{\sigma_{xx}^{2}\delta_{y}^{2}}{11,04\alpha_{n0}\cos^{2}\theta_{0}}\right]}}\right]}.$$
(5)

Первый член формулы (5) (до фигурных скобок) совпадает со стандартным выражением для сечения обратного рассеяния без учёта диаграммы направленности антенны, а второй множитель (в фигурных скобках) учитывает влияние диаграммы направленности.

Особенности модели доплеровского спектра при малых углах падения

Рассмотрим, что влияет на ширину и смещение доплеровского спектра. Чтобы упростить формулы для дальнейшего обсуждения, предположим, что волнение распространяется вдоль оси *X*, тогда коэффициенты *K*_{суу} и *K*_{суу} будут равны нулю. В этом случае формула для смещения доплеровского спектра упрощается:

$$f_{shift} = -\frac{\sin\theta_0}{\lambda} \cdot \frac{2K_{cxt}}{\sigma_{xx}^2} \left(\frac{11,04\sigma_{xx}^2}{11,04\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2} \right).$$
(6)

Для того чтобы сделать более очевидной «физическую» интерпретацию причин смещения доплеровского спектра, упростим спектр волнения до одной синусоиды с частотой ω₁ и волновым числом \varkappa_1 . Тогда:

$$f_{shift} \sim \frac{\omega_1}{\varkappa_1} \sin \theta_0 = v_1 \sin \theta_0,$$

т.е. смещение доплеровского спектра пропорционально фазовой скорости синусоидальной волны *v*₁. Результат можно рассматривать как проекцию фазовой скорости волны на направление зондирования.

При переходе к спектру волнения вместо фазовой скорости одной волны получим некую среднюю фазовую скорость спектра волнения. Отсюда следует, что чем длиннее волны, тем больше будет смещение доплеровского спектра. Надо отметить, что высота волнения в явном виде не влияет на величину доплеровского сдвига и смещение не зависит от дисперсии орбитальных скоростей.

Можно предложить другую «физическую» интерпретацию данной формулы, если её записать в следующем виде:

$$f_{shift} = -2k\sin\theta_0 \cdot \frac{K_{cxt}}{2\pi\sigma_{xx}^2} \left(\frac{11,04\sigma_{xx}^2}{11,04\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2} \right) \sim -2k\sin\theta_0 \cdot v_1,$$

т.е. «резонансная» длина волна ($2k\sin\theta_0$) умножается на фазовую скорость подстилающей поверхности (движение поверхности).

Морское волнение является анизотропным, поэтому смещение доплеровского спектра радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью, будет зависеть от угла между направлением зондирования и направлением распространения волнения. Смещение доплеровского спектра будет равно нулю при зондировании перпендикулярно направлению распространения волнения и максимально при распространении волнения на радиолокатор.

Для удобства дальнейшего обсуждения введём понятие нормированного коэффициента корреляции, который задаётся следующим образом:

$$r_{xt} = \frac{K_{\text{cxt}}}{\sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{tt}^2}}.$$

С точки зрения «физики» смещение доплеровского спектра можно объяснить следующим образом. Коэффициент корреляции уклонов и орбитальных скоростей характеризует связь этих величин. В приближении метода Кирхгофа отражение происходит от участков волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Если коэффициент корреляции равен нулю, то рассеивающие площадки с одинаковым углом наклона могут двигаться с произвольной скоростью и смещение доплеровского спектра отсутствует. Если нормированный коэффициент корреляции равен единице, то все отражающие площадки для данного угла падения имеют одинаковую скорость и смещение доплеровского спектра максимально. Следовательно, можно предположить, что ширина доплеровского спектра будет максимальна при коэффициенте корреляции равном нулю и минимальна (равна нулю) при нормированном коэффициенте корреляции равном единице.

Проверим это предположение. Для волнения, распространяющегося вдоль оси *X*, формула для ширины доплеровского спектра на уровне –10 дБ примет следующий вид:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2\ln 10}}{\lambda} \cos \theta \cdot \left[\sigma_{tt}^2 - \frac{K_{\text{gxt}}^2}{\left[\sigma_{xx}^2 + \frac{\delta_x^2}{11,04} \right]} \right]^{1/2}.$$
 (7)

Из формулы видно, что ширина доплеровского спектра зависит от дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости σ_{tt}^2 . Если коэффициент корреляции вертикальной составляющей орбитальной скорости и уклонов равен нулю, то ширина доплеровского спектра максимальна. С увеличением нормированного коэффициента корреляции ширина доплеровского спектра будет уменьшаться и для узкой диаграммы направленности антенны станет равной нулю, когда нормированный коэффициент корреляции станет равным единице. С точки зрения «физики» это соответствует движению всех отражающих площадок с одинаковой скоростью.

Дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости не зависит от угла между направлением зондирования и направлением распространения волнения, поэтому ширина доплеровского спектра для узкой антенны тоже будет слабо зависеть от азимутального угла.

Таким образом, при малых углах падения параметры крупномасштабного волнения оказываются основными факторами, которые влияют на ширину и смещение доплеровского спектра. Это является принципиальным отличием от доплеровского спектра при средних углах падения и открывает возможности для измерения статистических параметров волнения с использованием доплеровского спектра.

Свойства доплеровского спектра

Для эффективного использования доплеровского спектра при решении задач дистанционного зондирования необходимо предложить схему измерения, которая позволит восстанавливать информацию о параметрах волнения. Для этого надлежит исследовать влияние состояния морской поверхности на характеристики доплеровского спектра.

Рассматриваемая в работе модель доплеровского спектра была построена в рамках двухмасштабной модели морской поверхности и применима в области малых углов падения, поэтому при обработке можно будет восстановить только параметры крупномасштабного волнения. Для оценки параметров мелкомасштабной составляющей спектра волнения лучше использовать измерения при средних углах падения, когда механизм обратного рассеяния является резонансным.

Спектр одномодового ветрового волнения определяется скоростью ветра на высоте 10 м (U_{10}) и длиной безразмерного ветрового разгона (\tilde{x}) .

При численном моделировании исследуем зависимость ширины и смещения доплеровского спектра от скорости и направления ветра, ширины диаграммы направленности антенны и от угла падения для случая одномодового ветрового волнения.

В случае ветрового волнения скорость и направление приводного ветра однозначно определяют ключевые характеристики морского волнения. Для вычислений будет использоваться модель спектра волнения, которая зависит от скорости ветра и длины ветрового разгона (Караев, Баландина, 2000).

Прежде всего, рассмотрим зависимость доплеровского спектра от скорости приводного ветра для следующих значений безразмерного ветрового разгона: 2000, 4000, 8000, 16 000, 20 170. Последнее значение относится к случаю полностью развитого ветрового волнения.

На *рис. 2* (см. с. 227) показана зависимость ширины (см. *рис. 2a*) и смещения (см. *рис. 2б*) доплеровского спектра от скорости приводного ветра при условии распространения волнения (ветра) на направление зондирования ($\varphi_w = 180^\circ$). При вычислении предполагалось, что длина волны радиолокатора равна 2,1 см, угол падения — 5°, диаграмма направленности антенны — $1 \times 1^\circ$.

При увеличении скорости ветра происходит рост интенсивности волнения и увеличение доминантной длины волны в спектре волнения. Это приводит к росту ширины и смещения доплеровского спектра, что иллюстрирует *рис. 2.* На рисунке видно, что для одной скорости ветра наблюдается значительный разброс ширины и смещения доплеровского спектра, обусловленный разной длиной ветрового разгона. Это ведёт к слабой корреляции скорости ветра и доплеровского спектра, что подтверждается в экспериментах.

В выбранной схеме измерения (см. *рис. 1*) направление распространения волнения и угол между направлением зондирования и направлением распространения волнения совпадают. Для удобства назовём этот угол «азимутальным» и заменим процесс «поворота» радиолокатора изменением направления распространения волнения.

На *рис. 3* показана зависимость ширины (см. *рис. 3a*) и смещения (см. *рис. 3б*) доплеровского спектра от азимутального угла. Вычисления были проведены для тех же условий, что и на *рис. 2*.



Рис. 2. Зависимость ширины на уровне –10 дБ (*a*) и смещения (*б*) доплеровского спектра от скорости ветра для безразмерного ветрового разгона от 2000 до 20 170 (длина безразмерного ветрового волнения увеличивается снизу вверх) и направления распространения 180°. Угол падения — 5°; длина волны радиолокатора — 2,1 см



Рис. 3. Зависимость ширины на уровне –10 дБ (*a*) и смещения (б) доплеровского спектра от азимутального угла для безразмерного ветрового разгона от 2000 до 20 170 и скорости ветра 5 м/с. Угол падения — 5°; длина волны радиолокатора — 2,1 см

Рисунок 3 подтверждает сделанные ранее предположения: слабую чувствительность ширины доплеровского спектра к азимутальном углу и сильную азимутальную зависимость смещения доплеровского спектра. Эти свойства могут использоваться при разработке алгоритмов восстановления параметров волнения.

Оптимальную схему измерения можно представить следующим образом: поворачиваем антенну в азимутальной плоскости и определяем угол, при котором смещение равно нулю (азимутальный угол равен 90°). После этого поворачиваем антенну на 90° и измеряем смещение доплеровского спектра.

На *рис.* 4 (см. с. 228) показана зависимость ширины (см. *рис.* 4*a*) и смещения (см. *рис.* 4*б*) доплеровского спектра от угла падения. Вычисления были проведены для тех же условий, что и на *рис.* 3.

Результат ожидаем, т.е. с увеличением угла падения смещение растёт, а ширина доплеровского спектра уменьшается. В условиях шумов и флуктуаций отражённого сигнала лучше работать при максимально большом угле падения, чтобы повысить точность измерений.



Рис. 4. Зависимость ширины на уровне –10 дБ (*a*) и смещения (*б*) доплеровского спектра от угла падения для безразмерного ветрового разгона от 2000 до 20 170 (2000, 4000, 8000, 16 000, 20 170) и направления распространения 180°. Угол падения — 5°; длина волны радиолокатора — 2,1 см

Ограничение на увеличение угла падения связано с механизмом обратного рассеяния. Интервал углов падения, где работает метод Кирхгофа, в рамках которого были получены формулы, определяется дисперсией уклонов крупномасштабного волнения. Предполагается, что обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению.

В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности морское волнение делится на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие. Дисперсия уклонов крупномасштабного (по сравнению с длиной волны падающего излучения) волнения влияет на характеристики отражённого сигнала и входит в формулы для доплеровского спектра. Очевидно, дисперсия уклонов крупномасштабного волнения будет меньше дисперсии «оптических» уклонов, измеренных в работе (Cox, Munk, 1954). Это подтвердилось в ходе проведённых исследований, например в работах (Караев и др., 2012; Chu et al., 2012; Danilytchev et al., 2009; Freilich, Vanhoff, 2003).

Было показано, что квазизеркальный механизм обратного рассеяния является доминирующим до углов падения $10-14^{\circ}$ (зависит от интенсивности волнения), а при дальнейшем увеличении угла падения необходимо учитывать вклад резонансного механизма (брэгговское рассеяние). Это приведёт к искажению формы доплеровского спектра, и формулы (1)–(5) не будут описывать измеренный доплеровский спектр.

На *рис.* 4 вычисления приведены для более широкого интервала углов падения, чтобы при наличии экспериментальных данных можно было легко оценить расхождение теории и эксперимента.

Для определения параметров волнения оптимальным будет проведение измерений при углах падения порядка 5–10°, когда доминирующим остаётся квазизеркальный механизм обратного рассеяния.

Зависимость доплеровского спектра от диаграммы направленности антенны

Основное отличие рассматриваемой в статье модели доплеровского спектра от большинства известных моделей связано с учётом диаграммы направленности антенны. Это дополнительный параметр, который можно использовать при выполнении измерений. Не меняя направления зондирования и угол падения, можно получить дополнительную информацию о волнении, если предложить оптимальную схему эксперимента за счёт выбора диаграммы направленности антенны.

Для численных оценок будем использовать следующие антенны: с узкой диаграммой направленности $(1 \times 1^{\circ})$, с ножевыми диаграммами $(1 \times 25 \text{ и } 25 \times 1^{\circ})$ и широкой диаграммой $(25 \times 25^{\circ})$.

В основе различия доплеровских спектров, измеренных радиолокаторами с разными диаграммами направленности антенны, лежит физика процесса рассеяния, и наблюдаемые эффекты зависят от ориентации диаграммы.

Из формул (6) и (7) видно, что при зондировании по оси X основное влияние на ширину и смещение доплеровского спектра оказывает «раскрыв» диаграммы вдоль оси X, т. е. δ_{x} .

Увеличение ширины диаграммы направленности антенны ведёт к уменьшению смещения доплеровского спектра и к увеличению ширины доплеровского спектра. С точки зрения «физики» этот эффект легко объяснить: отражённый сигнал приходит с разных углов падения, что увеличивает интервал наблюдаемых орбитальных скоростей, и ширина доплеровского спектра растёт. Одновременно это приводит к уменьшению доплеровского сдвига, так как принимается сигнал от разных участков волнового профиля, которые движутся с разными скоростями.

Приведём количественные оценки влияния диаграммы направленности антенны на ширину и смещение доплеровского спектра. Вычисления выполнены для полностью развитого ветрового волнения и скорости ветра 5 м/с.

На *рис. 5* показаны зависимости ширины (см. *рис. 5a*) и смещения (см. *рис. 5б*) доплеровского спектра от скорости ветра для четырёх диаграмм направленности антенны: $1 \times 1^{\circ}$, 1×25 , 25×1 и $25 \times 25^{\circ}$.



Рис. 5. Зависимость ширины на уровне −10 дБ (*a*) и смещения (*б*) доплеровского спектра от скорости ветра для полностью развитого ветрового волнения и направления распространения 180°. Угол падения — 5°; длина волны радиолокатора — 2,1 см. Синяя кривая — диаграммы антенн равны 25×1 и 25×25°; чёрная кривая — диаграммы антенн равны 1×1, 1×25°

В данном случае произошло «объединение», поэтому вместо четырёх кривых на рисунке изображены только две: 1) синяя кривая для антенн с диаграммами 25×1 и $25 \times 25^{\circ}$; 2) чёрная — 1×1 и $1 \times 25^{\circ}$. Ключевым является «раскрыв» диаграммы направленности антенны по дальности (углу падения), а не по азимуту.

Поправка, связанная с шириной диаграммы антенны по азимуту, намного меньше, и для её включения в модель необходимо учитывать азимутальную зависимость параметров волнения при выводе формул.

На *рис. 6* (см. с. 230) показаны зависимости ширины (см. *рис. 6a*) и смещения (см. *рис. 6б*) доплеровского спектра от азимутального угла для четырёх диаграмм направленности антенны: $1 \times 1^{\circ}$, 1×25 , 25×1 и $25 \times 25^{\circ}$ — для случая полностью развитого ветрового волнения, скорости ветра 5 м/с и угла падения 5°.

В данном случае зависимости, соответствующие разным антеннам, разделились, что открывает возможности построения оригинальных схем измерения.

Для антенны с узкой диаграммой направленности азимутальная зависимость ширины доплеровского спектра отсутствует, что было отмечено выше (чёрная кривая). Для широкой симметричной диаграммы появляется небольшая азимутальная зависимость (синяя кривая). Для ножевых антенн присутствует выраженная азимутальная зависимость, которая изменяется в интервале, задаваемом узкой и широкой антеннами.



Рис. 6. Зависимость ширины на уровне −10 дБ (*a*) и смещения (б) доплеровского спектра от азимутального угла для полностью развитого ветрового волнения (скорость ветра — 5 м/с). Угол падения — 5°; длина волны радиолокатора — 2,1 см. Чёрная кривая — 1×1°; синяя — 25×25°; зелёная — 25×1°; красная кривая — 1×25°

Следовательно, выбрав узкую симметричную антенну, можно минимизировать влияние азимутального угла на ширину доплеровского спектра. Выбрав ножевую антенну, получим азимутальную зависимость ширины доплеровского спектра, которая дополнит азимутальную зависимость смещения доплеровского спектра. Это повысит надёжность определения направления волнения.

Смещение доплеровского спектра (см. *рис. 66*) ведёт себя более привычно, т.е. максимальный сдвиг наблюдается при зондировании вдоль направления распространения. Величина доплеровского сдвига уменьшается при увеличении диаграммы направленности антенны и азимутальная зависимость становится более сглаженной.

Особого внимания заслуживает зависимость доплеровского спектра от угла падения. Дело в том, что в пределах диаграммы направленности антенны происходит изменение угла падения, что приведёт к изменению параметров доплеровского спектра.

На *рис.* 7 показаны зависимости ширины (см. *рис.* 7*a*) и смещения (см. *рис.* 7*b*) доплеровского спектра от угла падения для четырёх диаграмм направленности антенны: $1 \times 1^{\circ}$, 1×25 , 25×1 , $25 \times 25^{\circ}$ — для случая полностью развитого ветрового волнения (скорость ветра 5 м/с, 180°). Снова вычисления выполнены для более широкого интервала углов падения, чтобы при наличии экспериментальных данных можно было оценить расхождение теории и эксперимента.



Рис. 7. Зависимость ширины на уровне –10 дБ (*a*) и смещения (*б*) доплеровского спектра от угла падения для полностью развитого ветрового волнения (скорость ветра — 5 м/с, направление распространения волнения — 180°). Длина волны радиолокатора —2,1 см. Синяя кривая — 25×25 и 25×1°; красная кривая — 1×25 и 1×1°

В соответствии с *рис. 6* при направлении волнения 180° произошло «объединение» антенн с разными диаграммами направленности: (25×25 и 25×1°) и (1×25 и 1×1°).

Используя антенны с разными диаграммами направленности, можно разработать оптимальную схему измерения, учитывающую конкретные возможности проведения измерений.

Например, если сканирование возможно только в секторе ~90°, то, выбрав две ножевые антенны (25×1 и $1 \times 25^{\circ}$), можно однозначно определить направление распространения волнения (ветра) и восстановить параметры волнения.

Заключение

Одним из перспективных направлений в развитии спутниковой океанографии является построение глобальной карты морских течений. Такую информацию можно получить, используя доплеровские измерения с орбитальных носителей. В настоящее время на стадии концепций конкурируют два подхода: измерения при малых углах падения и средних углах падения.

В данной работе выполнен обзор свойств доплеровского спектра при малых углах падения. Для получения количественных оценок использовалась модель доплеровского спектра, созданная в приближении метода Кирхгофа с учётом ширины диаграммы направленности антенны.

Были построены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра для одномодового ветрового волнения от скорости и направления ветра, угла падения и длины ветрового разгона. Показано, что связь скорости ветра и параметров доплеровского спектра даже для одномодового ветрового волнения не является однозначной, что затрудняет решение обратной задачи.

Отдельно было рассмотрено влияние диаграммы направленности антенны на параметры доплеровского спектра. Было показано, что она является важным параметром, который необходимо использовать при развитии радиолокационных методов зондирования и определении оптимальной схемы измерения.

Надо отметить, что вычисления были выполнены в интервале углов падения $0-22^{\circ}$, а квазизеркальный механизм обратного рассеяния является доминирующим при углах падения менее $10-14^{\circ}$ (зависит от интенсивности волнения). При увеличении угла падения необходимо учитывать вклад резонансного механизма обратного рассеяния, и можно предположить, что полученные оценки по смещению являются завышенными, а по ширине доплеровского спектра — заниженными по сравнению с экспериментальными данными.

Вычисления были проведены за пределами углов падения, где модель квазизеркального рассеяния является доминирующей, в иллюстративных целях и чтобы предоставить потенциальную возможность сравнения с экспериментальными данными в более широком интервале углов падения.

В дальнейшем будет выполнен анализ свойств доплеровского спектра при средних углах падения, а также проведено сравнение с экспериментальными данными.

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

Работа выполнена в рамках государственного задания Института прикладной физики Российской академии наук (проект № 0035-2019-0006).

Литература

- 1. Басс Ф., Фукс И. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- 2. Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С. Радиолокация морской поверхности. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 1978. 144 с.
- 3. *Зубкович С. Г.* Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Советское радио, 1968. 224 с.
- 4. Каневский М., Караев В. Спектральные характеристики радиолокационного СВЧ-сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения // Изв. высших учеб. заведений. Сер. «Радиофизика». 1996. Т. 39. № 5. С. 517–525.

- 5. *Караев В., Баландина Г.* Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 1–12.
- 6. *Караев В., Каневский М.* Восстановление параметров поверхностного волнения по результатам радиолокационных измерений // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 44–55.
- 7. *Караев В.*, *Панфилова М.*, *Баландина Г.*, *Чу С*. Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабных волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 62–77.
- 8. *Розенберг А., Островский И., Калмыков А.* Сдвиг частоты при рассеянии радиоизлучения взволнованной поверхностью моря // Изв. высших учеб. заведений. Сер. «Радиофизика». 1966. Т. 9. № 2. С. 234–240.
- 9. Anderson C., Bonekamp H., Figa J., Wilson J., de Smet A., Duff C., Stoffelen A., Verhoef A., Portabella M., Verspeek J. Metop-A ASCAT Commissioning Quality Report / EUMETSAT OSI SAF SS3; EUMETSAT ASCAT Commissioning Team. 2009. 61 p.
- 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. Bass F., Fuks I., Kalmykov A., Ostrovsky I., Rosenberg A. Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface // IEEE Trans. Antennas Propagation. 1968. V. 16. No. 5. P. 554–568.
- 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. *Cox C., Munk W.* Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter // J. Optical Society of America. 1954. V. 44. No. 11. P. 838–850.
- Danilytchev M., Kutuza B., Nikolaev A. The Application of Sea Wave Slope Distribution Empirical Dependencies in Estimation of Interaction Between Microwave Radiation and Rough Sea Surface // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47. No. 2. P. 652–661. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2004410.
- 15. *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.
- 16. *Gohil B.S., Sarkar A., Agarwal V.* A New Algorithm for Wind-Vector Retrieval From Scatterometers // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2008. V. 5. No. 3. P. 387–391. DOI: 10.1109/LGRS.2008.917129.
- Gommenginger C., Chapron B., Martin A., Marquez J., Brownsword C., Buck C. SEASTAR: a new mission concept for high-resolution imaging of ocean surface current and wind vectors from space // Doppler Oceanography from Space: Proc. Workshop. Brest, France. 10–12 Oct. 2018. 22 p. URL: https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Gommenginger.pdf (accessed 14.10.2019).
- 18. *Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E.* The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal // Sensors. 2008. V. 8. P. 3780–3801.
- Nekrasov A., Khachaturian A., Abramov E., Popov D., Markelov O., Obukhovets V., Veremyev V., Bogachev V. Optimization of the airborne antenna geometry for the ocean surface scatterometric measurements // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 10. P. 1–23. URL: http://www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1501.
- 20. *Pidgeon V.* The Doppler dependence of radar sea-return // J. Geophysical Research. 1968. V. 73. No. 4. P. 1333-1341.
- 21. *Rodriguez E., Wineteer A., Perkovic-Martin D.* DopplerScatt Results: What we have learned and implications for a Winds and Currents Mission // Doppler Oceanography from Space Proc. Workshop. Brest, France. 10–12 Oct. 2018. 40 p. URL: https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Rodriguez.pdf.
- Stoffelen A., Aaboe S., Calvet J.-Ch., Cotton J., De Chiara G., Saldana J. F., Mouche A., Portabella M., Scipal K., Wagner W. Scientific Developments and the EPS-SG Scatterometer // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 5. P. 2086–2097. DOI: 10.1109/ JSTARS.2017.2696424.
- 23. *Valenzuela G*. Theories for interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review // Boundary Layer Meteorology. 1978. V. 13. P. 61–86.
- 24. *Valenzuela G., Laing M.* Study of Doppler spectra of radar sea echo // J. Geophysical Research. 1970. V. 75. No. 3. P. 551–563.
- 25. *Wentz F.J.* A Simplified Wind Vector Algorithm for Satellite Scatterometers // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 1991. V. 8. No. 5. P. 697–704.
- 26. *Wentz F., Smith D.* A model function for the ocean-normalized radar cross-section at 14 GHz derived from NSCAT observations // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. C5. P. 11499–11514.
- 27. Wentz F.J., Peteheryh S., Thomas L. A model function for ocean radar cross-sections at 14.6 GHz // J. Geophysical Research. 1984. V. 89. P. 3689–3704.
- 28. *Wentz D., Dong X., Yun R., Xu X.* Recent advances in developing the CFOSAT Scatterometer // Proc. IGARSS'16. Beijing, China. 2016. P. 5801–5803. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730515.

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

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

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

The spectral and energy characteristics of the backscattered microwave radar signal contain information about the parameters of the scattering surface. At present, the main information parameter is the backscattering radar cross section, which is determined by the geometry of the underlying surface. The information on the movement of the sea surface is contained in the Doppler spectrum of the reflected radar signal. In this paper, we consider the properties of the Doppler spectrum at small angles of incidence, when the quasi-specular backscattering mechanism dominates. The dependences of the width and shift of Doppler spectrum on the speed and direction of the wind and the incidence angle are constructed. It is shown that even for pure wind waves there is an ambiguous relationship between wind speed and Doppler spectrum parameters, which leads to ambiguity in solving the inverse problem. Numerical estimates showed that the parameters of antenna beam have a strong effect on the width and shift of the Doppler spectrum and this effect can be used to create simpler measurement schemes and develop new retrieval algorithms, which is especially important for orbital radars.

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

Accepted: 15.10.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-221-234

References

- 1. Bass F., Fuks I., *Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave scattering on a statistically rough surface), Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
- 2. Garnaker'yan A.A., Sosunov A.S., *Radiolokatsiya morskoi poverkhnosti* (Radar sensing of the sea surface), Rostov-on-Don: Izd. Rostovskogo universiteta, 1978, 144 p.
- 3. 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.
- 4. Kanevsky M., Karaev V., Spektral'nye kharakteristiki radiolokatsionnogo SVCh-signala, otrazhennogo morskoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh padeniya (Spectral characteristics of superhigh frequency (SHF) radar signal backscattered by the sea surface at small incidence angles), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ser. "Radiofizika"*, 1996, Vol. 39, No. 5, pp. 517–525.
- 5. Karaev V., Balandina G., Modifitsirovannyi spektr volneniya i distantsionnoe zondirovanie (A modified wave spectrum and remote sensing of ocean), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 5, pp. 1–12.
- 6. Karaev V., Kanevsky M., Vosstanovlenie parametrov poverkhnostnogo volneniya po rezul'tatam radiolokatsionnykh izmerenii (Retrieval of sea surface parameters on radar data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 1, pp. 44–55.
- Karaev V., Panfilova M., Balandina G., Chu X., 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.
- 8. Rozenberg A., Ostrovsky I., Kalmykov A., Sdvig chastoty pri rasseyanii radioizlucheniya vzvolnovannoi poverkhnosť yu morya (Frequency shift in the scattering of radio waves by an sea surface), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ser. "Radiofizika"*, 1966, Vol. 9, No. 2, pp. 234–240.
- 9. Anderson C., Bonekamp H., Figa J., Wilson J., de Smet A., Stoffelen A., Verhoef A., Portabella M., Verspeek J., Duff C., *Metop-A ASCAT Commissioning Quality Report*, EUMETSAT OSI SAF SS3; EUMETSAT ASCAT Commissioning Team, 2009, 61 p.
- 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., available at: https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Ardhuin.pdf (accessed 14.10.2019).
- 11. Bass F., Fuks I., Kalmykov A., Ostrovsky I., Rosenberg A., Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1968, Vol. 16, No. 5, pp. 554–568.

- 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. Cox C., Munk W., Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter, *J. Optical Society of America*, 1954, Vol. 44, No. 11, pp. 838–850.
- Danilytchev M., Kutuza B., Nikolaev A., The Application of Sea Wave Slope Distribution Empirical Dependencies in Estimation of Interaction Between Microwave Radiation and Rough Sea Surface, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 2, pp. 652–661, DOI: 10.1109/ TGRS.2008.2004410.
- 15. 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.
- 16. Gohil B. S., Sarkar A., Agarwal V., A New Algorithm for Wind-Vector Retrieval from Scatterometers, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, Vol. 5, No. 3, pp. 387–391, DOI: 10.1109/LGRS.2008.917129.
- 17. Gommenginger C., Chapron B., Martin A., Marquez J., Brownsword C., Buck C., SEASTAR team, SEASTAR: a new mission concept for high-resolution imaging of ocean surface current and wind vectors from space, *Doppler Oceanography from Space*, Proc. Workshop, Brest, France, 10–12 Oct. 2018, 22 p., available at: https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Gommenginger.pdf (accessed 14.10.2019).
- 18. Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E., The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 3780–3801.
- Nekrasov A., Khachaturian A., Abramov E., Popov D., Markelov O., Obukhovets V., Veremyev V., Bogachev V., Optimization of the airborne antenna geometry for the ocean surface scatterometric measurements, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 10, pp. 1–23, available at: http://www.mdpi. com/2072-4292/10/10/1501.
- 20. Pidgeon V., The Doppler dependence of radar sea-return, *J. Geophysical Research*, 1968, Vol. 73, No. 4, pp. 1333–1341.
- 21. Rodriguez E., Wineteer A., Perkovic-Martin D., DopplerScatt Results: What we have learned and implications for a Winds and Currents Mission, *Doppler Oceanography from Space*, Proc. Workshop, Brest, France, 10–12 Oct. 2018, 40 p., available at: https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Rodriguez.pdf.
- Stoffelen A., Aaboe S., Calvet J.-Ch., Cotton J., De Chiara G., Saldana J. F., Mouche A., Portabella M., Scipal K., Wagner W., Scientific Developments and the EPS-SG Scatterometer, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 5, pp. 2086–2097, DOI: 10.1109/ JSTARS.2017.2696424.
- 23. Valenzuela G., Theories for interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review, *Boundary Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, pp. 61–86.
- 24. Valenzuela G., Laing M., Study of Doppler spectra of radar sea echo, *J. Research*, 1970, Vol. 75, No. 3, pp. 551–563.
- 25. Wentz F.J., A Simplified Wind Vector Algorithm for Satellite Scatterometers, J. Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, Vol. 8, No. 5, pp. 697–704.
- 26. Wentz F., Smith D., A model function for the ocean-normalized radar cross-section at 14 GHz derived from NSCAT observations, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. C5, pp. 11499–11514.
- 27. Wentz F.J., Peteheryh S., Thomas L., A model function for ocean radar cross-sections at 14.6 GHz, *J. Geophysical Research*, 1984, Vol. 89, pp. 3689–3704.
- 28. Zhu D., Dong X., Yun R., Xu X., Recent advances in developing the CFOSAT Scatterometer, *Proc. IGARSS'16*, Beijing, China, 2016, pp. 5801–5803, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730515.