

Оценка характеристик отражённого радиолокационного сигнала при бистатическом зондировании водной поверхности в присутствии речного течения

Ю. А. Титченко, В. Ю. Караев, М. С. Рябкова, К. А. Понур

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

Преимущество бистатического дистанционного зондирования заключается в возможности проводить измерения в удалённой от приёмника и излучателя области, и при этом рассеяние будет оставаться в квазизеркальной области и описываться хорошо изученным приближением Кирхгофа. Это позволяет получить связь характеристик рассеяния с параметрами водной поверхности в явном виде, что открывает возможности для создания новых алгоритмов решения обратной задачи по восстановлению параметров волнения. Кроме того, уровень мощности принимаемого сигнала в квазизеркальной области отражения значительно превосходит область резонансного рассеяния, что позволяет использовать для задач дистанционного зондирования отражённые от подстилающей поверхности сигналы спутниковых навигационных систем. Данная работа посвящена представлению оригинального подхода расчёта характеристик микроволнового излучения, прямо отражённого от ветровых волн, сформированных в присутствии постоянного течения. В рамках этого подхода для задания спектра поверхностных волн в присутствии постоянного течения по волновым числам используются понятия эффективных скорости и направления ветра, зависящих от скорости и направления течения. Для задания частотного спектра волн дополнительно пересчитываются частоты гармоник в зависимости от скорости и направления течения. В работе приводится зависимость спектра волнения от скорости течения и от угла между направлением ветра и течения. Далее по спектрам вычисляются статистические моменты волнения второго порядка, которые необходимы для вычисления доплеровского спектра (ДС) отражённого излучения. Для вычисления ДС используется подход, учитывающий скорости движения приёмника и излучателя, диаграммы направленности приёмной и излучающей антенн, а также зависящий от шести статистических моментов второго порядка, описывающих отражающую поверхность. В работе построены зависимости удельной эффективной площади бистатического рассеяния, ширины и смещения ДС отражённого излучения от азимутального угла плоскости зондирования и направления ветра. Предложен алгоритм восстановления скорости и направления течения при измерении характеристик ДС отражённого водной поверхностью сигнала навигационных спутников (GPS, ГЛОНАСС и др.) приёмниками, установленными на мосту через реку.

Ключевые слова: сечение рассеяния, доплеровский спектр, приближение Кирхгофа, квазизеркальное рассеяние, ГЛОНАСС, GPS, дисперсия уклонов, дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости, бистатическое зондирование, течение, ветер, волны, спектр волн

Одобрена к печати: 23.03.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-258-270

Введение

В настоящее время одним из наиболее развивающихся направлений дистанционного зондирования Мирового океана стали исследования, посвящённые анализу отражённых сигналов спутниковых навигационных систем. В их основе лежат принципы многопозиционной радиолокации. Идея анализировать сигналы спутниковых навигационных систем, отражённых водной поверхностью, для измерения высоты приливов была предложена ещё в 1993 г. (Martin-Neira, 1993). Предложение использовать отражённое излучение спутниковых навигационных систем для решения широкого круга задач дистанционного зондирования показалось перспективным, и теоретические аспекты такого подхода к дистанционному зондированию стали быстро развиваться (Cardellach et al., 2011; Zavorotny et al., 2014). На сегодняшний

момент с помощью анализа отражённых сигналов навигационных спутников восстанавливают параметры морской поверхности, почвы, растительности, ледяного и снежного покровов.

Малые спутники английской миссии мониторинга катастроф UK-DMC (*англ.* Disaster Monitoring Constellation) начиная с 2004 г. успешно провели ряд экспериментов для демонстрации возможностей анализа отражённых GPS-сигналов (*англ.* Global Positioning System — система глобального позиционирования) от воды, суши и ледяного покрова (Clarizia et al., 2009; Gleason, 2006). Уникальные эксперименты по приёму отражённых сигналов ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) водной поверхностью с учётом их особенностей и преимуществ были проведены на морском полигоне в Швеции (Hobiger et al., 2014).

Значительным шагом вперёд для этого направления стал запуск в 2016 г. американским космическим агентством миссии CYGNSS (*англ.* Cyclone Global Navigation Satellite System — глобальная спутниковая система навигации циклона) (Ruf et al., 2016), состоящей из восьми двигающихся друг за другом малых космических аппаратов, оборудованных приёмниками GPS-сигналов, предназначенной для изучения параметров поверхностного волнения в тропических циклонах. Начиная с 2017 г. система полностью функционирует, и результаты измерений доступны в открытом доступе. В 2019 г. была запущена на орбиту группа из двух китайских спутников BuFeng-1A/B, предназначенных для восстановления скорости приводного ветра на основе анализа отражённых сигналов навигационных спутниковых систем (Jing et al., 2019)

В России была разработана система для построения радиолокационных изображений подстилающей поверхности на основе приёма навигационных сигналов на беспилотных летательных аппаратах (Авдеев и др., 2012; Фатеев и др., 2012). Был проведён энергетический расчёт возможности размещения приёмника отражённых сигналов GPS/ГЛОНАСС на малых космических аппаратах для мониторинга состояния морской поверхности (Сахно и др., 2009).

Настоящее исследование проводилось для ответа на вопрос о влиянии течения на измеряемые величины, поставленный к предыдущим работам (Титченко и др., 2019; Titchenko et al., 2020), которые посвящены бистатическому эксперименту, проведённому на мосту через р. Оку в Нижнем Новгороде. Кроме того, задача измерения и мониторинга глобального поля морских течений становится актуальной и привлекает внимание учёных во всём мире. Известны проекты космических радаров, которые могут быть использованы для измерения течений (Rodríguez et al., 2019), где предлагается анализировать спектральные характеристики отражённого радиолокационного сигнала. Доплеровский спектр (ДС) отражённого сигнала содержит информацию о характеристиках водной поверхности, в том числе и связанных с её движением, и необходимо научиться эту информацию извлекать.

Наиболее проработанной видится концепция измерения течений при средних углах падения, когда доминирующим оказывается резонансный механизм обратного рассеяния. Успешные примеры использования этой концепции для измерения течений есть и для космического (Romeiser et al., 2007), и для самолётного (Rodríguez et al., 2018; Wineteer et al., 2020) применений.

В области квазизеркального отражения сигнал формируется зеркальными участками волнового профиля крупномасштабного волнения. На течении происходит трансформация спектра волнения, что приводит к изменению статистических характеристик рассеивающей поверхности и влияет на спектральные характеристики отражённого радиолокационного сигнала. Однако экспериментальные подтверждения эффективности восстановления скорости и направления течений в рамках данного подхода в настоящее время отсутствуют. Первые моностатические измерения в рамках этого метода были выполнены в 2019 г. (Рябкова и др., 2020, Karaev et al., 2020, Ryabkova et al., 2020) в речных условиях, где скорость и направление течения легко контролируются.

В бистатической постановке задачи влияние течения рассчитывалось для техники GNSS-R-рефлектометрии (*англ.* Global Navigation Satellite Systems reflectometry) на основе сигналов спутниковых навигационных систем (Ghavidel, Camps, 2016; Li et al., 2020). Указанные работы используют подход трансформации спектра волнения на течении, предложенный в публикации (Huang et al., 1972).

В настоящей работе для расчёта характеристик отражённого сигнала использован подход, развитый в исследованиях (Titchenko, 2020; Titchenko, Karaev, 2018), а для оценки спектра волнения, сформировавшегося на речном течении, — подход, впервые предложенный в работе (Рябкова и др., 2021).

Постановка задачи

Экспериментальные измерения показали, что при рассеянии волн морской поверхностью можно выделить четыре характерные области (Басс, Фукс, 1972; Valenzuela, 1978). При углах отражения, близких к зеркальным, рассеяние носит квазизеркальный характер и хорошо описывается методом касательной плоскости (приближением Кирхгофа). В этом случае отражение волны в каждой точке поверхности происходит так же, как и от бесконечной касательной плоскости, если на касательной плоскости можно выделить площадку с линейными размерами, большими по сравнению с длиной волны излучения. Движение этих отражающих площадок и формирует ДС отражённого излучения.

В области средних отклонений от зеркального луча доминирует резонансное рассеяние, описываемое методом возмущений. В переходной области углов отражения для описания рассеяния необходимо использовать оба метода одновременно. При малых углах скольжения излучателя или приёмника большую роль начинают играть затенения, и для описания рассеяния необходимо использовать другие подходы. Рассмотрим рассеяние волн морской поверхностью при квазизеркальном отражении. На рис. 1 приведена постановка задачи бистатистического дистанционного зондирования.

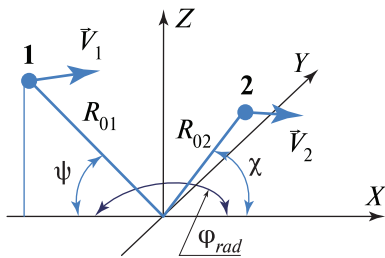


Рис. 1. Постановка задачи

На рисунке цифрой 1 отмечен излучатель, генерирующий волну с волновым числом $k = 2\pi/\lambda$, где λ — длина волны. В работе все вычисления выполнены для $\lambda = 0,23$ м. Цифрой 2 отмечен приёмник. Точки 1 и 2 движутся со скоростями $\vec{V}_1(V_x, V_y, V_z)$ и $\vec{V}_2(V_r, V_r, V_r)$. Диаграммы направленности (ДН) антенн задаются гауссовой формой, а $\delta_{хпр}^2$, $\delta_{упр}^2$, $\delta_{хиз}^2$, $\delta_{уиз}^2$ — ширина ДН приёмной и излучающей антенн на уровне половинной мощности в плоскостях X и Y. Угол скольжения излучателя — ψ . Угол скольжения приёмника — χ . Расстояние от излучателя до центра ДН на водной поверхности — R_{01} . Расстояние от приёмника до центра ДН

на водной поверхности — R_{02} . По сравнению с геометрией, рассмотренной в работе (Titchenko, Karaev, 2018), в данном случае сделано предположение, что приёмник, излучатель и точка пересечения центра ДН антенн с водной поверхностью располагаются в одной плоскости (плоскости зондирования), так что азимутальный угол между т. 1 и 2 всегда составляет 180° , как в работе (Titchenko, 2020). Угол ϕ_{rad} задаёт азимутальный угол поворота плоскости зондирования, который отсчитывается от положительного направления оси X и для случая на рис. 1 равен 180° . В этом случае, чтобы смоделировать ситуацию обратного рассеяния, угол скольжения приёмника должен рассчитываться следующим образом: $\chi = 180^\circ - \psi$.

В приближении Кирхгофа для зоны Фраунгофера в предположении нормального распределения высоты поверхности и отсутствия затенений форма ДС будет описываться формулой гауссового вида (Караев и др., 2019; Titchenko, 2020). ДС описывается тремя характеристиками (Караев и др., 2019; Titchenko, Karaev, 2018), которые анализируются в работе: удельной эффективной площадью бистатистического рассеяния (УЭПБР), шириной ДС на уровне -10 дБ от максимума и смещением ДС. Эти характеристики полностью определяются шестью статистическими моментами поверхности: дисперсией уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной волны излучения — σ_{xx}^2 , σ_{yy}^2 ; волнением вдоль осей X и Y соответственно; дисперсией вертикальной составляющей орбитальной скорости — σ_{tt}^2 ; коэффициентами корреляции уклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости — K_{xt} , K_{yt} ; коэффициентом корреляции уклонов вдоль осей X и Y — K_{xy} .

Статистические моменты поверхности второго порядка рассчитываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx}^2 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_x^2 S(\kappa, f) d\kappa df, & \sigma_{yy}^2 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_y^2 S(\kappa, f) d\kappa df, & \sigma_{\omega\omega}^2 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \omega^2 S(\kappa, f) d\kappa df, \\ K_{xt} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_x \omega S(\kappa, f) d\kappa df, & K_{yt} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_y \omega S(\kappa, f) d\kappa df, & K_{xy} &= - \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_x \kappa_y S(\kappa, f) d\kappa df, \end{aligned} \right\} (1)$$

где $S(\kappa, \varphi)$ — спектральная плотность мощности возвышений; κ — модуль волнового вектора; φ — азимутальный угол. Значение граничного волнового числа κ_b зависит от скорости ветра и длины излучаемой волны.

В настоящей работе все расчёты приведены для вертикальной поляризации излучаемой и принимаемой электромагнитной волны.

Параметры взволнованной водной поверхности вычислены по модели спектра волнения из работы (Ryabkova et al., 2019) для развивающегося ветрового волнения с безразмерным ветровым разгоном 5000 и длины волны излучения 23 см (L -диапазон).

Рассмотрим ситуацию формирования ветровых волн на реке, течение в которой будем считать постоянным на длине ветрового разгона. Кроме того, длина ветрового разгона обычно ограничена, поэтому на поверхности присутствует развивающееся ветровое волнение и отсутствуют волны зыби. Схема направления течения и ветра в плоскости $Z=0$ представлена на рис. 2, где \vec{U}_{10} — вектор скорости ветра; φ_{wind} — направление ветра, которое отсчитывается от оси X против часовой стрелки, т.е. на рисунке показан отрицательный угол; \vec{V}_{curr} и φ_{curr} — вектор и направление течения.

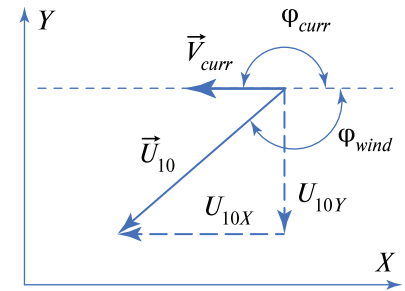


Рис. 2. Схема формирования волнения на течении

Подход расчёта параметров водной поверхности на постоянном течении взят из работы (Рябкова и др., 2021). Если перейдём в движущуюся систему координат, связанную с течением, то получим эффективные скорость U_{10_eff} и направление ветра φ_{wind10_eff} :

$$\left. \begin{aligned} U_{10_eff} &= \sqrt{U_{10_effX}^2 + U_{10_effY}^2}, & \varphi_{wind_eff} &= \arctg\left(\frac{U_{10_effY}}{U_{10_effX}}\right), \\ U_{10_effX} &= U_{10} \cos \varphi_{wind} - V_{curr} \cos \varphi_{curr}, & U_{10_effY} &= U_{10} \sin \varphi_{wind} - V_{curr} \sin \varphi_{curr}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Формирование волнения в движущейся системе координат будет проходить под влиянием эффективного ветра. Разница в параметрах волнения максимальна для ветров, направленных по течению и против него.

Далее возвращаемся в неподвижную систему отсчёта XYZ для расчёта параметров волнения, наблюдаемых в бистатической постановке задачи. Для этого необходимо пересчитать частоту в спектре волнения следующим образом:

$$\omega_0 = \omega + \vec{\kappa} \vec{V}_{curr}, \quad (3)$$

где ω — частота гармоники в подвижной системе отсчёта; ω_0 — частота в неподвижной системе отсчёта; κ — волновое число поверхностной волны. Выражение (3) получается из предположения, что в неподвижной системе отсчёта гармоники движутся с фазовой скоростью, равной фазовой скорости в подвижной системе отсчёта плюс скорость течения.

При равенстве фазовой скорости волны и скорости течения частота ω_0 становится равной нулю и при дальнейшем увеличении скорости течения становится отрицательной. Но это означает смену направления распространения волны в неподвижной системе координат, и необходимо изменить знак отрицательных частот: частота должна оставаться положительной.

Статистические параметры поверхности

Рассмотрим последовательно предлагаемый алгоритм расчёта параметров волнения для решения прямой задачи в данной схеме измерения.

1. Необходимо определить эффективную скорость и направление ветра в системе отсчёта, связанной с течением. На рис. 3 приведены зависимости эффективной скорости ветра и разницы между направлением ветра (в неподвижной системе координат) и эффективным направлением ветра от азимутального направления ветра для течения, направленного против оси X , $\varphi_{curr} = 180^\circ$ и для разных скоростей ветра. Из рисунка видно, что диапазон изменения эффективной скорости ветра достигает удвоенного значения скорости течения, а диапазон изменения эффективного направления ветра может достигать 20° и уменьшается с ростом скорости ветра.

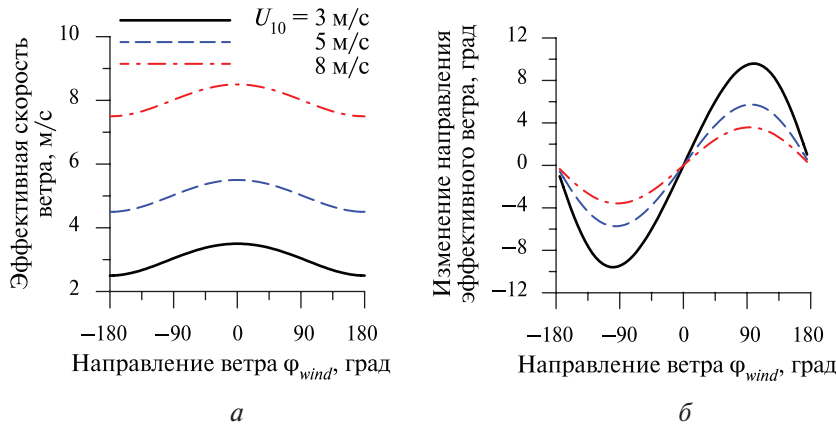


Рис. 3. Зависимость эффективной скорости ветра (а) и изменения направления эффективного ветра (б) под действием течения 0,5 м/с, направленного против оси X

2. Рассчитать спектр волнения, сформированного в системе отсчёта, связанной с течением. Формирование поверхностного волнения, а соответственно, и спектра в движущейся системе координат, происходит при эффективных скорости и направлении ветра. В рассматриваемом случае для этого в модель спектра волнения (Ryabkova et al., 2019) подставляем эффективную скорость и эффективное направление ветра.

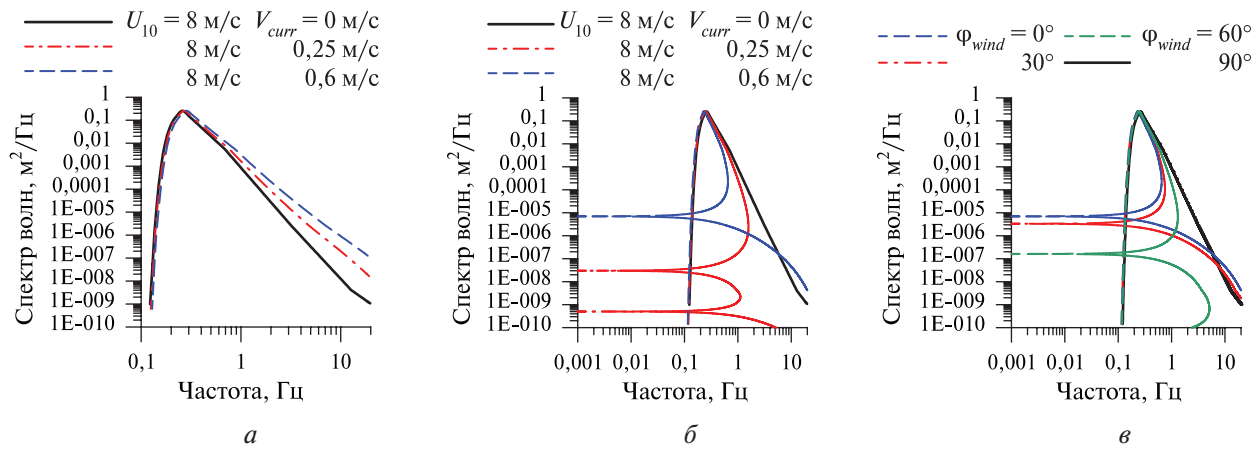


Рис. 4. Изменение частоты спектра волнения при переходе в неподвижную систему отсчёта в зависимости от скорости течения: а — при ветре, направленном вдоль течения, $\varphi_{wind} = 180^\circ$; б — при ветре, направленном против течения, $\varphi_{wind} = 0^\circ$; в — от направления ветра при $\varphi_{wind} = 180^\circ$

3. В частотном спектре волнения пересчитать частоты по формуле (3). Получившиеся отрицательные частоты означают смену направления волн, но частота у них остаётся положительной, поэтому необходимо поменять знак отрицательных частот. Получится, что на некоторых частотах могут присутствовать несколько гармоник с разной интенсивностью. Рассмотрим процесс преобразования спектра волнения в присутствии течения, направленного против оси X , на *рис. 4* (см. с. 262). Безразмерный ветровой разгон, используемый в модели для всех расчётов, в настоящей работе равен 5000, скорость ветра на *рис. 4* — 8 м/с. По *рис. 4а* видно, что с увеличением скорости попутного течения частота гармоник смещается в сторону увеличения.

Трансформация спектра волнения выглядит необычно для случая встречного волнения и при наличии встречной проекции волнения на *рис. 4б, в*.

4. Для получения спектра волнения, который может быть измерен неподвижным струнным волнографом, необходимо сложить амплитуды гармоник на одинаковых частотах. Результат сложения представлен на *рис. 5*.

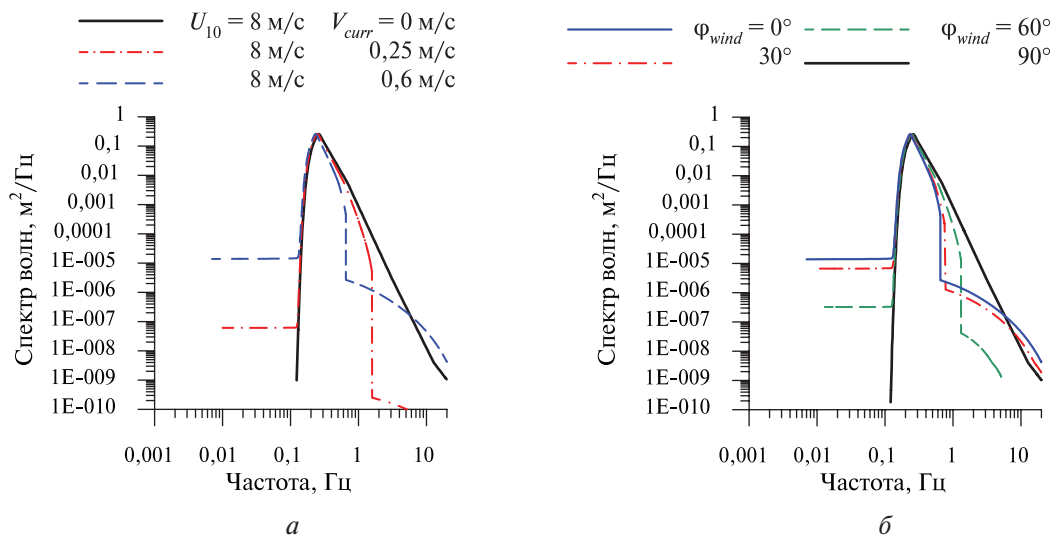


Рис. 5. Изменение частотного спектра волнения при переходе в неподвижную систему отсчёта в зависимости от скорости течения (*а*) и направления ветра (*б*)

Из рисунка видно, что высокочастотная часть спектра значительно ослабляется при наличии встречной проекции волнения на направление течения, что приводит к изменению статистических моментов поверхности (1).

5. В завершение необходимо рассчитать параметры водной поверхности по формулам (1). Надо отметить, что спектр по волновым числам не изменится при переходе в неподвижную систему координат, поэтому дисперсии высот и уклонов сохранятся. Однако влияние течения скажется на тех статистических моментах (1), куда входит частота. Это необходимо учитывать при интегрировании.

Дисперсия уклонов зависит от скорости ветра, поэтому принимает максимальные значения, когда эффективная скорость максимальна, и не меняется при переходе из движущейся в неподвижную систему отсчёта. Дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости увеличивается в подвижной системе отсчёта с ростом эффективной скорости ветра. Однако в неподвижной системе отсчёта происходит изменение частоты, и интеграл по спектру для дисперсии орбитальной скорости становится меньше. Аналогичная ситуация складывается с коэффициентом корреляции уклонов с орбитальной скоростью: происходит уменьшение с ростом эффективной скорости. Для 8 м/с оно практически незаметно, однако с уменьшением скорости ветра этот эффект увеличивается. Коэффициент корреляции между уклонами в двух плоскостях растёт с увеличением эффективной скорости ветра.

Характеристики доплеровского спектра

Рассчитаем характеристики ДС отражённого излучения для случая приёма отражённого сигнала навигационных спутников приёмниками, установленными на мосту через реку. Возьмём скорость движения навигационного спутника в обычной наземной системе отсчёта (ECEF — *англ.* earth-centered, earth-fixed): $V_x = 2523$ м/с, $V_y = 361$ м/с, $V_z = 1163$ м/с, $Vr_x = Vr_y = Vr_z = 0$ м/с; расстояние от центра диаграммы направленности на морской поверхности до излучателя и приёмника: $R_{01} = 20\,000\,000$ м. Следует отметить, что в данном случае, когда расстояние до излучателя много больше по сравнению с расстоянием до приёмника, эффективная ДН антенны определяется только приёмной антенной и не зависит от антенны излучателя. Диаграмма направленности приёмной антенны предполагается симметричной с шириной по уровню половинной мощности в 1 или 30° . В этом случае рассмотрим зависимости характеристик ДС отражённого излучения от направления ветра на *рис. 6*. Скорость ветра — 8 м/с, азимутальный угол плоскости зондирования — как на *рис. 1*: $\varphi_{rad} = 180^\circ$.

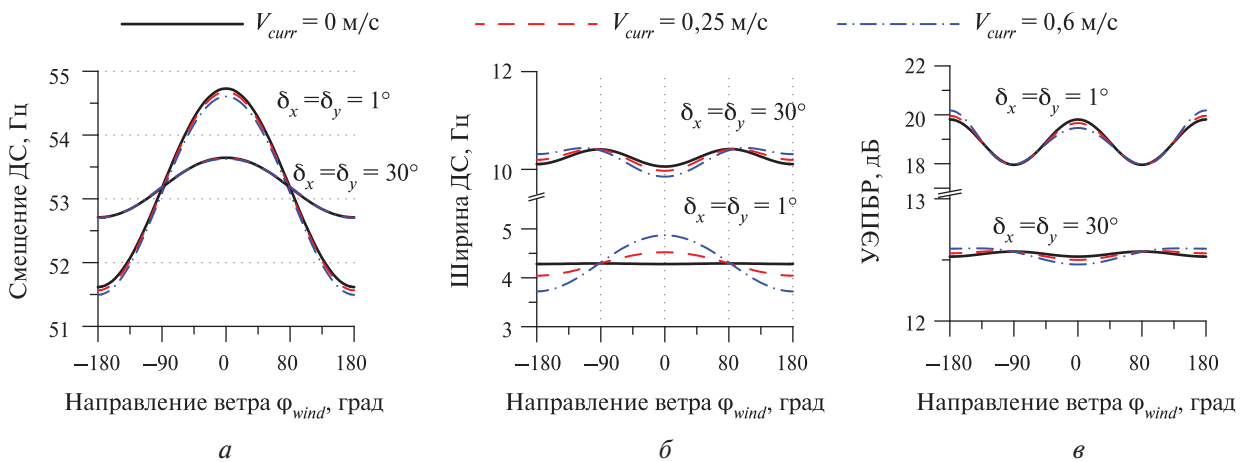


Рис. 6. Зависимости смещения (а) и ширины (б) ДС и УЭПБР (в) от эффективного направления ветра в присутствии течения при $\varphi_{curr} = 180^\circ$, $\psi = 65^\circ$, $\chi = 60^\circ$ для разных ДН

Наличие течения смещает положение зависимости смещения ДС, измеренного узкой антенной, по вертикали тем больше, чем больше скорость течения.

При отсутствии течения зависимость ширины ДС, измеренной узкой антенной, от направления ветра отсутствует. При появлении течения возникает сильная зависимость с максимумом при ветре, направленном против течения, и минимумом при направлении ветра по течению. При измерении широкой антенной ширина ДС при ветре против течения уменьшается, а при ветре по течению увеличивается так же, как и УЭПБР для всех антенн.

Однако во время проведения эксперимента угол между течением и ветром остаётся постоянным, и использовать полученные зависимости сложно. В эксперименте в азимутальной плоскости можно менять только направление зондирования.

Для тех же условий приёма отражённого водной поверхностью сигнала навигационного спутника приёмниками, установленными на мосту через реку, рассмотрим зависимости характеристик ДС от направления зондирования φ_{rad} на *рис. 7* (см. с. 265).

По рисунку видно, что течение в данной схеме измерений не влияет на смещение ДС и не чувствительно к изменению ветра и ДН приёмной антенны. Следует отметить, что проекции на оси координат скорости движения навигационного спутника здесь не меняются, что может соответствовать пролёту спутника над мостом во время отслеживания азимутального угла приёмником так, чтобы приёмник и спутник всегда лежали в плоскости зондирования. В этом случае смещение ДС полностью определяется скоростью движения спутника и направлением зондирования.

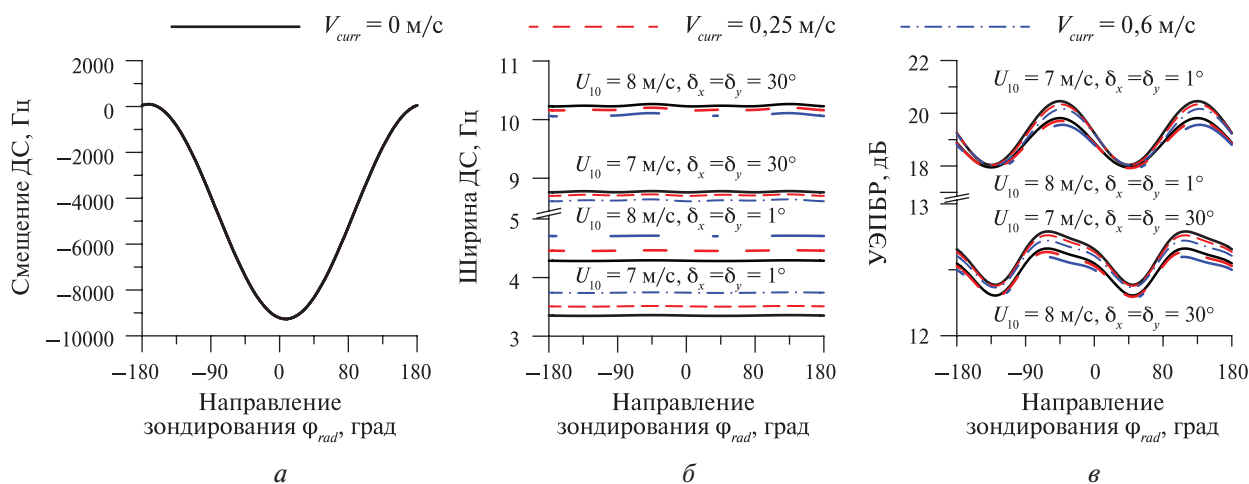


Рис. 7. Зависимости смещения (а) и ширины (б) ДС и УЭПБР (в) от направления зондирования в присутствии течения при $\varphi_{curr} = 180^\circ$, $\psi = 45^\circ$, $\psi = 65^\circ$, $\chi = 60^\circ$

УЭПБР уменьшается с ростом скорости течения, направленной против ветра, так же как с ростом скорости ветра. На рис. 7в видно, что зависимость УЭПБР, измеренная антенной с ДН 1° , от направления зондирования сильнее искажается (меняется положение максимумов) с ростом течения и становится несимметричной, так как при этом растёт изменение эффективного направления ветра. Этот эффект может использоваться для определения скорости течения по несовпадению положения максимумов на $2\text{--}4^\circ$ для выбранных условий.

Важный вывод по рис. 7 заключается в том, что ширина ДС, измеренная антенной с ДН 1° , при увеличении скорости течения противоположно ветру меняется таким образом, как если бы просто увеличивалась скорость ветра при неизменном течении. Тогда как ширина ДС, измеренная антенной с ДН 30° , при увеличении скорости течения и скорости ветра меняется противоположным образом. То есть при увеличении течения ширина ДС уменьшается, а при усилении скорости ветра — увеличивается. Этот эффект также может использоваться для определения течения.

Алгоритм определения течения для данной схемы измерения будет следующим: 1) по азимутальной зависимости УЭПБР (ДН 30°) определяем возможную скорость ветра, с которой могло бы сформироваться наблюдаемое волнение при отсутствии течения; 2) по отклонению измеренной ширины ДС от предполагаемой для возможной скорости ветра определяем проекцию скорости течения на направление ветра; 3) по сдвигу положения максимумов азимутальной зависимости УЭПБР (ДН 1°) определяем направление течения.

Заключение

В проведённом исследовании сделана попытка оценить влияние течения на характеристики доплеровского спектра отражённого излучения при бистатических измерениях. Также исследовалась возможность восстановления скорости и направления течения при таких измерениях. Приведён пошаговый алгоритм расчёта параметров водной поверхности в присутствии постоянного течения с произвольным направлением относительно ветра.

В работе использовалось выражение для ДС (Titchenko, 2020) отражённого сигнала в бистатической постановке задачи. Постановка задачи позволяет задавать произвольные скорости движения излучателя и приёмника, а также учитывает диаграмму направленности их антенн. Выражение ДС зависит от шести статистических параметров волнения, которые могут быть восстановлены в дальнейшем при решении обратной задачи.

Бистатическая постановка задачи позволяет расширить зону применимости квазизеркальной модели рассеяния для зондирования подстилающей поверхности по сравнению с моностатической.

В работе рассмотрен случай излучения сигнала навигационным спутником и приём отражённого водной поверхностью излучения приёмником на мосту через реку. В результате показано, что в данной схеме по измерениям характеристик ДС могут быть определены скорость и направление течения.

По сравнению с наиболее популярным способом расчёта характеристик отражённых сигналов навигационных спутников (Zavorotny, Voronovich, 2000) применяемый в настоящей статье подход не требует использования модели спектра волнения, ему необходимы статистические параметры поверхности. С одной стороны, это позволяет использовать для расчёта характеристик доплеровского спектра известные параметры волнения или измеренные другими способами, например с помощью подводного акустического волнографа (Титченко, Караев, 2012) или космических аппаратов, применяемых, в частности, в миссии GPM (англ. Global Precipitation Measurement) (Панфилова, Караев, 2017). С другой стороны, используемый подход открывает возможности для восстановления параметров волнения (Титченко, Караев, 2012).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых учёных (МК-1130.2020.5).

Литература

1. Авдеев В. А., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов А. А., Иванов В. Ф., Кошкарлов А. С., Сахно И. В., Симонов А. Б., Ткачев Е. А., Успенский К. К., Шалдаев А. В., Шульженко А. В. Комплекс экспериментов по приему отраженных от земной поверхности сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Тр. Ин-та прикладной астрономии РАН. 2012. № 23. С. 303–306.
2. Басс Ф., Фукс И. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Панфилова М. А., Рябкова М. С. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 221–234.
4. Панфилова М. А., Караев В. Ю. Использование данных орбитального дождевого радиолокатора Ku-диапазона для исследования изменения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в слике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 187–194.
5. Рябкова М. С., Караев В. Ю., Панфилова М. А., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М. Доплеровский спектр радиолокационного СВЧ-сигнала обратного рассеяния: эксперимент на реке // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 213–227.
6. Рябкова М. С., Караев В. Ю., Панфилова М. А., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М. К вопросу о влиянии речного течения на доплеровский спектр отраженного радиолокационного сигнала при малых углах падения // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2021 (в печати).
7. Сахно И. В., Ткачев Е. А., Гаврилов Д. А., Успенский К. К. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 4. С. 34–39.
8. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Метод определения параметров морского волнения с помощью модифицированного акустического волнографа // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 8. С. 544–554.
9. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Зуйкова Э. М., Мешков Е. М., Панфилова М. А., Рябкова М. С. Натурные измерения бистатистических характеристик отраженного водной поверхностью излучения с помощью модифицированного радиолокатора // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 149.
10. Фатеев В. Ф., Ксендзук А. В., Обухов П. С., Крапивкин Г. И., Тимошенко Г. В., Король Г. Н., Фатеев О. В., Новиков В. А., Герасимов П. А., Шахалов К. С. Многопозиционная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны по отраженным сигналам ГНСС ГЛОНАСС // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. Т. 17. № 5. С. 62–68.

11. *Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O., Oliveras S., Ribó S., Rius A.* GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets // *Radio Science*. 2011. V. 46. No. 6. Art. No. RS0C04. 16 p. DOI: 10.1029/2011RS004683.
12. *Clarizia M. P., Gommenginger C. P., Gleason S. T., Srokosz M. A., Galdi C., Di Bisceglie M.* Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. No. 2. Art. No. L02608. 5 p. DOI: 10.1029/2008GL036292.
13. *Ghavidel A., Camps A.* Impact of Rain, Swell, and Surface Currents on the Electromagnetic Bias in GNSS-Reflectometry // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. No. 10. P. 4643–4649.
14. *Gleason S.* Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low earth orbit: Doctoral Thesis / University of Surrey. Guildford, UK, 2006. 223 p.
15. *Hobiger T., Haas R., Löfgren J. S.* GLONASS-R: GNSS reflectometry with a frequency division multiple access-based satellite navigation system // *Radio Science*. 2014. V. 49. No. 4. P. 271–282.
16. *Huang N. E., Chen D. T., Tung C., Smith J.* Interactions between Steady Non-Uniform Currents and Gravity Waves with Applications for Current Measurements // *J. Physical Oceanography*. 1972. V. 2. P. 420–431.
17. *Jing C., Niu X., Duan C., Lu F., Di G., Yang X.* Sea Surface Wind Speed Retrieval from the First Chinese GNSS-R Mission: Technique and Preliminary Results // *Remote Sensing*. 2019. V. 11(24). Art. No. 3013. 13 p. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11243013>.
18. *Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Y., Meshkov E., Zuikova E.* Application of doppler radar for measurement of current velocity at small incidence angles: the first experiments at the river // *IGARSS 2020 — 2020 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Waikoloa, HI, USA, 2020*. P. 5693–5696. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323494.
19. *Li B., Yu B., Yang L., Yang D., Han H.* Modeling and Simulation of GNSS-R Signals with Ocean Currents // *China Satellite Navigation Conf. (CSNC) 2020: Proc. V. I. Singapore: Springer, 2020*. P. 99–110.
20. *Martin-Neira M.* A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry // *ESA J.* 1993. V. 17. No. 4. P. 331–355.
21. *Rodríguez E., Wineteer A., Perkovic-Martin D., Gál T., Stiles B. W., Niamsuwan N., Rodriguez Monje R.* Estimating Ocean Vector Winds and Currents Using a Ka-Band Pencil-Beam Doppler Scatterometer // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 4. Art. No. 576. 59 p. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10040576>.
22. *Rodríguez E., Bourassa M., Chelton D., Farrar J. T., Long D., Perkovic-Martin D., Samelson R.* The Winds and Currents Mission Concept // *Frontiers in Marine Science*. 2019. V. 6. Art. No. 438. 8 p. DOI: 10.3389/fmars.2019.00438.
23. *Romeiser R., Runge H., Suchandt S., Sprenger J., Weilbeer H., Sohrmann A., Stammer D.* Current Measurements in Rivers by Spaceborne Along-Track InSAR // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2007. V. 45. No. 12. P. 4019–4031.
24. *Ruf C., Chang P., Clarizia M. P., Gleason S., Jelenak Z., Murray J., Morris M., Musko S., Posselt D., Provost D., Starkenburg D., Zavorotny V.* CYGNSS Handbook / University of Michigan. Ann Arbor, MI: Michigan Publishing, 2016. 143 p.
25. *Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Y.* A Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. No. 10. P. 7104–7134.
26. *Ryabkova M., Karaev V., Panfilova M., Titchenko Y., Meshkov E., Zuikova E.* Study of the Doppler Spectrum of the Microwave Radar Signal Backscattered from the Water Surface at Low Incidence Angles in the Presence of a Constant Current: Experiment and Modeling // *2020 33rd General Assembly and Scientific Symp. Intern. Union of Radio Science. Rome, Italy, 2020*. P. 1–4. DOI: 10.23919/ursigass49373.2020.9232433.
27. *Titchenko Y.* Bistatic Doppler spectrum of radiation reflected by a water surface // *Russian J. Earth Sciences*. 2020. V. 20. No. 6. P. 8.
28. *Titchenko Y., Karaev V.* Doppler Spectrum of Microwaves at Forward Scattering from the Sea Surface // *IGARSS 2018 — 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2018. P. 4127–4130. DOI: 10.1109/igarss.2018.8517326.
29. *Titchenko Y., Zuikova E., Karaev V., Meshkov E., Panfilova M., Ryabkova M.* Bistatic doppler spectra of the signal reflected by rough water surface measured by modified monostatic radar // *IGARSS 2020 — 2020 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Waikoloa, HI, USA, 2020*. P. 5713–5716. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323093.
30. *Valenzuela G.* Theories for interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review // *Boundary Layer Meteorology*. 1978. V. 13. P. 61–86.
31. *Wineteer A., Perkovic-Martin D., Monje R., Rodríguez E., Gál T., Niamsuwan N., Nicaise F., Srinivasan K., Baldi C., Majurec N., Stiles B.* Measuring Winds and Currents with Ka-Band Doppler Scatterometry: An Airborne Implementation and Progress towards a Spaceborne Mission // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 6. Art. No. 1021. 18 p. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12061021>.

32. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. No. 2. P. 951–964. DOI: 10.1109/36.841977.
33. Zavorotny V. U., Gleason S., Cardellach E., Camps A. Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2014. V. 2. No. 4. P. 8–45.

Evaluation of the characteristics of the reflected radar signal during bistatic sensing of the water surface in the presence of a river current

Yu. A. Titchenko, V. Yu. Karaev, M. S. Ryabkova, K. A. Ponur

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

The advantage of bistatic remote sensing is the ability to carry out measurements in a region far from the receiver and emitter, while the scattering remains in the quasi-specular region and is described by the well-studied Kirchhoff approximation. This makes it possible to obtain an explicit relationship between the scattering characteristics and the parameters of the water surface, which opens possibilities for creating new algorithms for solving the inverse problem of retrieving the wave parameters. In addition, the power level of the received signal in the quasi-specular reflection region significantly exceeds the resonant scattering region, which makes it possible to use signals from satellite navigation systems reflected from the underlying surface for remote sensing tasks. This work is devoted to the presentation of an original approach for calculating the characteristics of microwave radiation directly reflected from wind waves formed in the presence of a constant current. Within the framework of this approach, the concepts of effective wind speed and direction, depending on the speed and direction of the current, are used to define the wave number spectrum of surface waves in the presence of a constant current. To set the frequency spectrum of the waves, the harmonic frequencies are additionally recalculated depending on the speed and direction of the current. The paper presents the dependence of the wave spectrum on the current velocity and on the angle between the wind and current directions. Next, the spectra are used to calculate the second order statistical moments of waves, which are necessary to calculate the Doppler spectrum (DS) of the reflected radiation. To calculate the DS, an approach is used that considers the speeds of the receiver and emitter, the antenna patterns of the receiving and emitting antennas, and depends on 6 second order statistical moments describing the reflecting surface. In this work, the dependences of the bistatic radar cross section, the width and shift of the DS of the reflected radiation on the azimuthal angle of the sensing plane and the wind direction are presented. An algorithm is proposed for retrieving the speed and direction of the current when measuring the characteristics of the DS of the from navigation satellites (GPS, GLONASS, etc.) signal reflected by the water surface on a bridge or offshore platform.

Keywords: scattering cross section, Doppler spectrum, Kirchhoff approximation, quasi-specular scattering, GLONASS, GPS, slope, vertical orbital velocity variance, bistatic sensing, current, wind, waves, wave spectrum

Accepted: 23.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-258-270

References

1. Avdeev V. A., Bakholdin V. S., Gavrillov D. A., Gerasimenko I. S., Dobrikov V. A., Ivanov A. A., Ivanov V. F., Koshkarov A. S., Sakhno I. V., Simonov A. B., Tkachev E. A., Uspenskii K. K., Shaldaev A. V., Shulzhenko A. V., A set of experiments on the reception of signals from the satellite radio navigation systems GLONASS/GPS reflected from the earth's surface, *Trudy Instituta prikladnoi astronomii RAN*, 2012, No. 23, pp. 303–306 (in Russian).

2. Bass F., Fuks I., *Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p. (in Russian).
3. Karaev V. Yu., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Panfilova M. A., Ryabkova M. S., Doppler spectrum of microwave signal backscattered by sea surface at small incidence angles, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 221–234 (in Russian).
4. Panfilova M. A., Karaev V. Yu., Using spaceborne precipitation radar data to investigate variations of slope variance of large-scale waves in a slick, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 187–194 (in Russian).
5. Ryabkova M. S., Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Zuikova E. M., Doppler spectrum of a backscatter microwave signal: experiment on a river, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 213–227 (in Russian).
6. Ryabkova M. S., Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Zuikova E. M., On the problem of the river flow influence on the Doppler spectrum of the reflected radar signal at small angles of incidence, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2021 (in Russian, in press).
7. Sakhno I., Tkachev E., Gavrilov D., Uspensky K., Space vehicle of sea surface observation with use of signals from general navigation satellite systems, *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2009, Vol. 52, No. 4, pp. 34–39 (in Russian).
8. Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., The method of determining the sea wave parameters by using a modified acoustic wave gauge, *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 2012, Vol. 55, No. 8, pp. 544–554 (in Russian).
9. Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Zuikova E. M., Meshkov E. M., Panfilova M. A., Ryabkova M. S., In-situ measurements of bistatic characteristics of radiation reflected by a water surface using a modified radar, *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 17th Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 149 (in Russian).
10. Fateev V. F., Ksendzuk A. V., Obukhov P. S., Krapivkin G. I., Timoshenko G. V., Korol G. N., Fateev O. V., Novikov V. A., Gerasimov P. A., Shakhalov K. S., Multi-position non-radiating SAR with GNSS GLONASS transmitters, *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2012, Vol. 17, No. 5, pp. 62–68 (in Russian).
11. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O., Oliveras S., Ribó S., Rius A., GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets, *Radio Science*, 2011, Vol. 46, No. 6, Art. No. RS0C04, 16 p., DOI: 10.1029/2011RS004683.
12. Clarizia M. P., Gommenginger C. P., Gleason S. T., Srokosz M. A., Galdi C., Di Bisceglie M., Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. 2, Art. No. L02608, 5 p., DOI: 10.1029/2008GL036292.
13. Ghavidel A., Camps A., Impact of Rain, Swell, and Surface Currents on the Electromagnetic Bias in GNSS-Reflectometry, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 10, pp. 4643–4649.
14. Gleason S., *Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low earth orbit: Doctoral Thesis*, University of Surrey, Guildford, UK, 2006, 223 p.
15. Hobiger T., Haas R., Löfgren J. S., GLONASS-R: GNSS reflectometry with a frequency division multiple access-based satellite navigation system, *Radio Science*, 2014, Vol. 49, No. 4, pp. 271–282.
16. Huang N. E., Chen D. T., Tung C., Smith J., Interactions between Steady Non-Uniform Currents and Gravity Waves with Applications for Current Measurements, *J. Physical Oceanography*, 1972, Vol. 2, pp. 420–431.
17. Jing C., Niu X., Duan C., Lu F., Di G., Yang X., Sea Surface Wind Speed Retrieval from the First Chinese GNSS-R Mission: Technique and Preliminary Results, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(24), Art. No. 3013, 13 p., available at: <https://doi.org/10.3390/rs11243013>.
18. Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Titchenko Y., Meshkov E., Zuikova E., Application of doppler radar for measurement of current velocity at small incidence angles: the first experiments at the river, *IGARSS 2020—2020 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 5693–5696, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323494.
19. Li B., Yu B., Yang L., Yang D., Han H., Modeling and Simulation of GNSS-R Signals with Ocean Currents, *China Satellite Navigation Conf. (CSNC) 2020 Proc., Vol. I*, Singapore: Springer, 2020, pp. 99–110.
20. Martin-Neira M., A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry, *ESA J.*, 1993, Vol. 17, No. 4, pp. 331–355.
21. Rodríguez E., Wineteer A., Perkovic-Martin D., Gál T., Stiles B. W., Niamsuwan N., Rodríguez Monje R., Estimating Ocean Vector Winds and Currents Using a Ka-Band Pencil-Beam Doppler Scatterometer, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 4, Art. No. 576, 59 p., available at: <https://doi.org/10.3390/rs10040576>.

22. Rodríguez E., Bourassa M., Chelton D., Farrar J. T., Long D., Perkovic-Martin D., Samelson R., The Winds and Currents Mission Concept, *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6, Art. No. 438, 8 p., DOI: 10.3389/fmars.2019.00438.
23. Romeiser R., Runge H., Suchandt S., Sprenger J., Weilbeer H., Sohrmann A., Stammer D., Current Measurements in Rivers by Spaceborne Along-Track InSAR, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 12, pp. 4019–4031.
24. Ruf C., Chang P., Clarizia M. P., Gleason S., Jelenak Z., Murray J., Morris M., Musko S., Posselt D., Provost D., Starkenburg D., Zavorotny V., *CYGNSS Handbook*, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan Publishing, 2016, 143 p.
25. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Y.A., Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124, No. 10, pp. 7104–7134.
26. Ryabkova M., Karaev V., Panfilova M., Titchenko Y., Meshkov E., Zuikova E., Study of the Doppler Spectrum of the Microwave Radar Signal Backscattered from the Water Surface at Low Incidence Angles in the Presence of a Constant Current: Experiment and Modeling, *2020 33rd General Assembly and Scientific Symp. Intern. Union of Radio Science*, Rome, Italy, 2020, pp. 1–4, DOI: 10.23919/ursigass49373.2020.9232433.
27. Titchenko Y., Bistatic Doppler spectrum of radiation reflected by a water surface, *Russian J. Earth Sciences*, 2020, Vol. 20, No. 6, pp. 1–8.
28. Titchenko Y., Karaev V., Doppler Spectrum of Microwaves at Forward Scattering from the Sea Surface, *IGARSS 2018 — 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2018, pp. 4127–4130, DOI: 10.1109/igarss.2018.8517326.
29. Titchenko Y., Zuikova E., Karaev V., Meshkov E., Panfilova M., Ryabkova M., Bistatic doppler spectra of the signal reflected by rough water surface measured by modified monostatic radar, *IGARSS 2020 — 2020 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 5713–5716, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323093.
30. Valenzuela G., Theories for interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review, *Boundary Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, pp. 61–86.
31. Wineteer A., Perkovic-Martin D., Monje R., Rodríguez E., Gál T., Niamsuwan N., Nicaise F., Srinivasan K., Baldi C., Majurec N., Stiles B., Measuring Winds and Currents with Ka-Band Doppler Scatterometry: An Airborne Implementation and Progress towards a Spaceborne Mission, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 6, Art. No. 1021, 18 p., available at: <https://doi.org/10.3390/rs12061021>.
32. Zavorotny V. U., Voronovich A. G., Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 2, pp. 951–964, DOI: 10.1109/36.841977.
33. Zavorotny V. U., Gleason S., Cardellach E., Camps A., Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, Vol. 2, No. 4, pp. 8–45.