

Об определении скоростей течений при микроволновом зондировании морской поверхности при умеренных углах падения

И. А. Сергиевская^{1,2,3}, С. А. Ермаков^{1,2,3}, Л. М. Плотников^{1,3},
И. А. Капустин^{1,2,3}, А. В. Ермошкин^{1,3}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: i.sergia@ipfran.ru*

² *Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, 603005, Россия*

³ *Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Нижний Новгород, 603022, Россия*

Определение скоростей и структуры поверхностных течений по данным микроволновых радиолокаторов — одна из важных проблем дистанционного зондирования морской поверхности. В статье представлены некоторые результаты измерений скоростей поверхностных течений по доплеровским спектрам, полученным поляризационным многочастотным радиолокатором (X-/C-/S-диапазоны) при умеренных углах падения излучения (40–70°) в направлении навстречу ветру и сравнение их с независимыми измерениями поверхностных течений с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP). Скорости радиолокационных рассеивателей определялись по центру тяжести доплеровского спектра (доплеровскому сдвигу) обратно рассеянного сигнала на VV- и HH-поляризациях, а затем для брэгговской (поляризованной) и небрэгговской (неполяризованной) компонент. Показано, что скорость течения, восстановленная по доплеровским сдвигам брэгговской компоненты после вычитания собственной скорости брэгговских волн, хорошо согласуется с данными независимых измерений. Для неполяризованной компоненты скорость рассеивателей близка к сумме скорости поверхностного течения и скорости дециметровых волн с длинами 10–70 см, резкое изменение скорости рассеивателей наблюдается при скоростях ветра порядка 5–7 м/с. Последнее объясняется вкладом в рассеяние неполяризованной компоненты, связанной с мелкомасштабными обрушениями,двигающимися со скоростью коротких дециметровых волн (20–30 см), и отдельными сильными обрушениями волн (пенными гребнями),двигающимися со скоростями метровых волн. При скоростях ветра, при которых на поверхности появляются сильные обрушения, средневзвешенная скорость рассеивателей резко увеличивается из-за появления быстрых рассеивателей.

Ключевые слова: трёхчастотный микроволновый поляризационный доплеровский радиолокатор, скорости брэгговских (поляризованных) и небрэгговских (неполяризованных) рассеивателей, поверхностное течение

Одобрена к печати: 27.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-212-222

Введение

Определение скоростей поверхностных течений по данным обратного рассеяния микроволновых радиолокаторов, в частности установленных на искусственных спутниках Земли, выступает одной из актуальных задач дистанционной диагностики взволнованной морской поверхности (Ермошкин и др., 2020; Chapron et al., 2005; Martin et al., 2022; Moiseev et al., 2020; Mouche et al., 2012 и цитируемая в публикациях литература). Основная сложность восстановления скоростей связана с тем, что доплеровский радиолокатор измеряет не скорость течений, а скорость движения рассеивателей излучения. Поэтому исследование механизмов обратного рассеяния радиоволн микроволнового диапазона представляется актуальной задачей на протяжении многих десятилетий (см., например, работы (Басс, Фукс, 1972; Fois et al., 2015; Valenzuela, 1978; Voronovich, Zavorotny, 2006)). Один из методов восстановления скорости поверхностного течения основан на определении центра тяжести доплеровского спектра

обратного рассеяния (Moiseev et al., 2020) (доплеровского сдвига). Как известно, скорость рассеивателей складывается из их собственной скорости, скорости поверхностного течения и скорости ветрового дрейфа. Кроме того, в зависимости от методики обработки может возникать и «волновая компонента» доплеровского сдвига из-за модуляции радиолокационного сигнала длинными поверхностными волнами (см., например, работу (Ермаков и др., 2004)). Скорость ветрового дрейфа, по данным многочисленных исследований, составляет 2–3 % от скорости ветра (см., например, публикацию (Karustin et al., 2019)). «Волновая» компонента, которая определяется величиной коэффициента модуляции интенсивности обратного рассеяния, амплитудами модулирующих длинных поверхностных волн, условиями наблюдения и временными и пространственными масштабами анализа доплеровского спектра, может оказаться сравнимой со скоростью течения (Martin et al., 2016; Nougquier et al., 2018). Поскольку обратное рассеяние от морской поверхности представляет собой сумму брэгговской компоненты, определяемой короткими брэгговскими волнами сантиметровых длин, и небрэгговской (неполяризованной) компоненты, связанной с обрушениями гравитационных волн (длины порядка и более дециметра) (Kudryavtsev et al., 2003), то средневзвешенная скорость рассеивателей представляет собой комбинацию скоростей этих типов рассеивателей и определяется их относительным вкладом в полную интенсивность радиолокационного сигнала.

Настоящая работа включает результаты натурных измерений доплеровских сдвигов двухполяризованного радиолокатора, функционирующего в трёх микроволновых диапазонах, и оценки скоростей течений. Приведено сравнение измеренной в эксперименте и восстановленной по данным радиолокатора скоростей поверхностных течений.

Натурный эксперимент

Эксперименты проводились со стационарной океанографической платформы Морского гидрофизического института РАН в прибрежной зоне Чёрного моря. Два доплеровских поляризационных радиолокатора (трёхчастный радиолокатор X-/C-/S-диапазонов и скаттерометр X-диапазона), работающих на двух соосных на приём и передачу поляризациях, были размещены на высоте 14 м, азимутальный угол излучения менялся в пределах 90° в сторону моря. Направления наблюдения обоих радиолокаторов были параллельны, но наблюдаемые области на поверхности не совпадали, так как места расположения радиолокаторов на палубе платформы были разнесены на несколько метров. Скорость и направление ветра измерялись ультразвуковым анемометром, установленным на высоте 22 м. Акустический доплеровский профилограф скорости течения (*англ.* Acoustic Doppler Current Profilers — ADCP) вывешивался с выноса в мористую сторону платформы на тросах и располагался на расстоянии 15–20 м от области засветки радиолокаторов.

Скаттерометр X-диапазона работал в непрерывном режиме излучения с синусоидальной модуляцией (подробное описание скаттерометра приведено в работах (Sergievskaya et al., 2019, 2020)). Радиолокатор X-/C-/S-диапазона — это импульсная когерентная система, которая одновременно измеряет интенсивность обратного рассеяния и скорость рассеивателей на двух поляризациях (VV — вертикально-вертикальная и HH — горизонтально-горизонтальная)). Скорость рассеивателей определяется по величине центра тяжести доплеровского спектра. Радиолокатор позволяет стробировать обратно рассеянный сигнал по расстоянию, минимальный размер области рассеяния составляет 0,75 м, что при умеренных ветрах меньше длин энергонесущих ветровых волн. При работе со стационарной платформы временной масштаб усреднения составляет 0,5 с.

«Мгновенный» доплеровский сдвиг радиолокационного сигнала, определённый за время, меньшее характерных периодов энергонесущих ветровых волн, связан со скоростями рассеивателей V_{sc} , скоростями в приповерхностном слое воды V_c и орбитальными скоростями в длинных поверхностных волнах $U_{orb}(t)$ согласно соотношению $f = \frac{1}{2\pi} k_{br} (V_{sc} + V_c + U_{orb}(t))$,

где $k_{br} = 2k_r \sin \theta$ — брэгговское волновое число; k_r — волновое число электромагнитной волны; θ — угол падения излучения. Данная «волновая» добавка в доплеровском сдвиге зависит от времени Δt (пространственного масштаба) усреднения спектра и для спектральной компоненты длинной волны с частотой Ω может быть записана в виде (Ермаков и др., 2004; Hara, Plant, 1994):

$$f_{\Delta t} = \frac{k_{br}}{2\pi} \cdot \frac{\left\langle \left(V_{sc} + U_{orb} \cdot \cos(\Omega t + \psi) \right) \cdot \left(1 + m(k_{br}, \Omega) \frac{U_{orb}}{C} \cdot \cos(\Omega t + \psi + \phi) \right) \right\rangle_{\Delta t}}{\left\langle \left(1 + m(k_{br}, \Omega) \frac{U_{orb}}{C} \cdot \cos(\Omega t + \psi + \phi) \right) \right\rangle_{\Delta t}}, \quad (1)$$

где $m(k_{br}, \Omega)$ и ϕ — модуль и фаза модуляционной передаточной функции (Hara, Plant, 1994); ψ — случайная фаза гармоники длинных волн; скобки $\langle \dots \rangle_{\Delta t}$ означают усреднение по масштабу времени Δt . На рис. 1 приведена теоретическая оценка $f_{\Delta t}$ для локатора X-диапазона при $U_{orb} = 0,5$ м/с и $\Omega/2\pi \approx 0,33$ Гц; здесь же представлена и экспериментальная величина $f_{\Delta t}$, хорошо согласующаяся с расчётом. Для случая $\Delta t = 0,5$ с $f_{\Delta t}$ составляет порядка 1 Гц, что соответствует завышению скорости, определяемой по среднему сдвигу мгновенного доплеровского спектра, примерно на 2 см/с. Это можно рассматривать как систематическую ошибку, которой в условиях данных экспериментов можно пренебрегать.

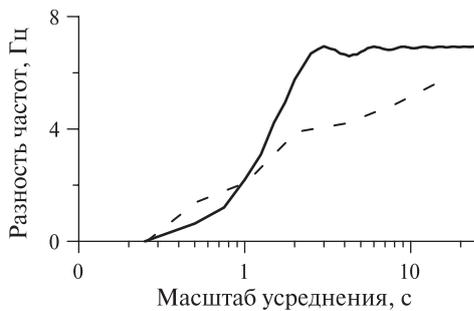


Рис. 1. Разность между усреднёнными по шкале времени и мгновенными доплеровскими сдвигами. Сплошные кривые — теоретическая оценка согласно выражению (1); пунктирные кривые получены для данных скаттерометра X-диапазона

Как было сказано выше, радиолокатор X-/C-/S-диапазонов регистрирует обратное рассеяние (σ_{VV} , σ_{HH}) и скорость рассеивателей (U_{VV} , U_{HH}) одновременно на двух поляризациях в трёх частотных диапазонах. По мгновенным значениям интенсивности и скорости рассеивателей для дальности, соответствующей максимальному значению интенсивности радиолокационного сигнала, определялись мгновенные скорости брэгговских и небрэгговских рассеивателей (BR и NBR соответственно) U_{BR} , U_{NBR} следующим образом:

$$U_{BR} = \frac{U_{VV}\sigma_{VV} - U_{HH}\sigma_{HH}}{(\sigma_{VV} - \sigma_{HH})}, \quad U_{NBR} = \frac{U_{VV}\sigma_{VV} - U_{HH}\sigma_{HH}R}{(\sigma_{VV} - \sigma_{HH}R)}, \quad (2)$$

где $R(\theta) = \frac{g_{VV}^2(\theta)}{g_{HH}^2(\theta)}$ — отношение коэффициентов рассеяния Френеля (Valenzuela, 1978). Для рассеяния на вертикальной поляризации коэффициент рассеяния Френеля

$$g_{VV}^2 = \frac{\cos^2 \theta \cdot (\epsilon - 1) [\epsilon(1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\epsilon \cdot \cos \theta + (\epsilon - \sin^2 \theta)^{1/2}]^2},$$

на горизонтальной поляризации —

$$g_{HH}^2 = \frac{\cos^2 \theta (\epsilon - 1)}{[\cos \theta + (\epsilon - \cos^2 \theta)^{1/2}]^2},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды. Затем среднее значение скорости определялось усреднением временного ряда «мгновенных» скоростей рассеивателей.

Отметим, что поляризационное отношение $PR = \sigma_{VV} / \sigma_{HH}$ может изменяться от 1 до значений порядка $R(\theta)$ (Sergievskaya et al., 2019), поэтому в некоторых случаях величины поляризационной разности $\sigma_{VV} - \sigma_{HH}$ и неполяризованной компоненты $\frac{\sigma_{VV} - \sigma_{HH} R}{(1 - R)}$ могут быть малы (или равны нулю), что приводит к тому, что скорости, определяемые по выражению (2), становятся бесконечными. Такие случаи не учитываются при расчёте средней скорости рассеивателей.

Проекция скорости на направление зондирования, определённая по доплеровскому сдвигу, может быть записана как сумма собственной скорости рассеивателей $V_{BR(NBR)}$, скорости поверхностного течения V_c , скорости ветрового дрейфа V_w (обычно полагается равной 2–3 % от скорости ветра (см., например, работу (Karustin et al., 2019) и цитируемую в ней литературу)) и «волновой» добавки ΔV (в нашем случае, как отмечено выше, малой):

$$V = V_{BR(NBR)} + V_c + V_w + \Delta V.$$

Скорости поверхностного течения и ветра берутся в проекции на направление наблюдения.

Результаты

На рис. 2 и 3 приведён пример измерений скорости течений по данным ADCP и локатора при разных углах зондирования.

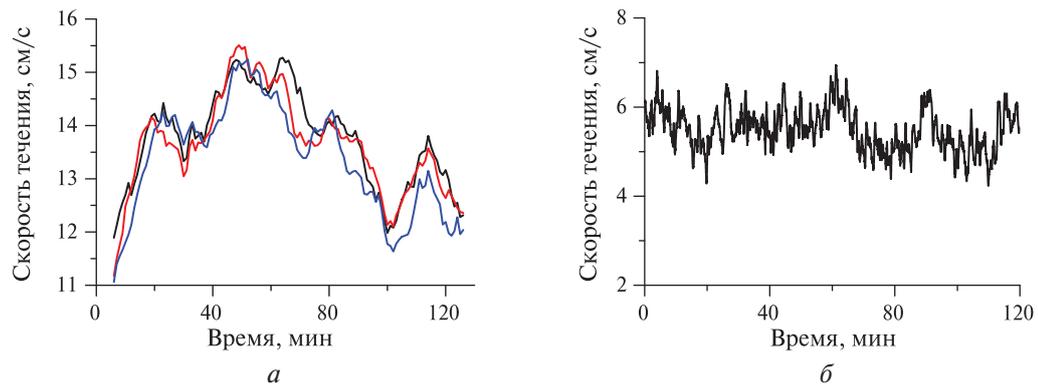


Рис. 2. Временные ряды скорости течения на трёх горизонтах (1, 2, 3 м — чёрная, красная, синяя кривые) (а) и скорость ветра в проекции на направление зондирования (б)

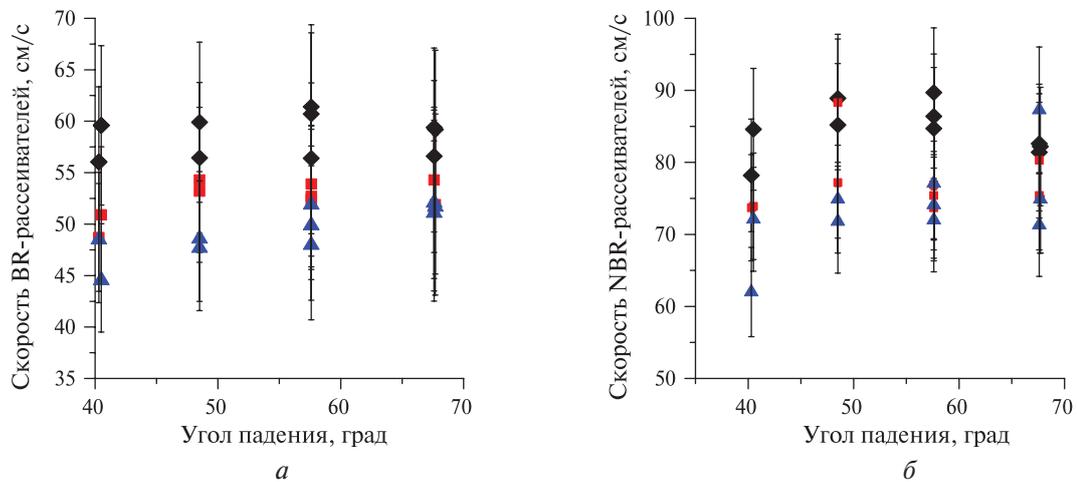


Рис. 3. Скорости рассеивателей от угла падения: а — брэгговские; б — небрэгговские. Чёрные маркеры — 3 ГГц, красные — 6 ГГц, синие — 10 ГГц. Вертикальные прямые — 90%-е доверительные интервалы

На *рис. 2* приведены временные ряды скорости течения в проекции на направление зондирования (направление течения менялось в пределах $\pm 15^\circ$) на глубине 1, 2 и 3 м и скорости ветра в проекции на направление зондирования (направление ветра менялось в пределах $\pm 20^\circ$) во время проведения эксперимента. На *рис. 3* представлены усреднённые мгновенные скорости брэгговских и небрэгговских рассеивателей от угла падения излучения. Наблюдение проводилось в направлении навстречу ветру, на морской поверхности наблюдались отдельные обрушения («барашки»).

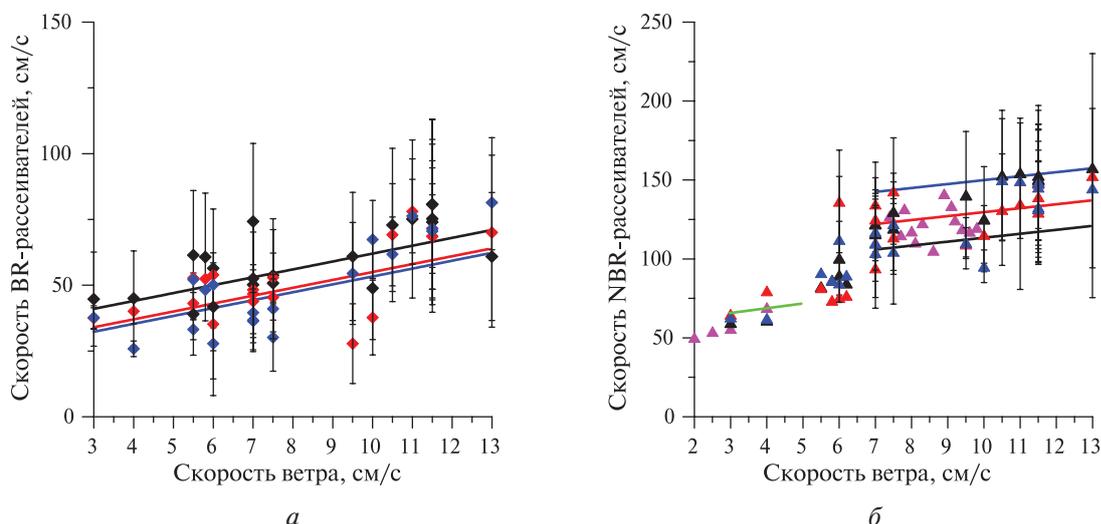


Рис. 4. Скорости рассеивателей: *а* — брэгговские; *б* — небрэгговские. Маркеры — измеренные значения: чёрные — 3 ГГц, красные — 6 ГГц, синие — 10 ГГц. Прямые линии — скорости свободных волн: чёрная — 6 см, красная — 3 см, синяя — 2 см (*а*); чёрная — 50 см, красная — 70 см, синяя — 100 см, зелёная — 20 см (*б*). Розовые символы — данные скаттерометра X-диапазона

Рисунок 4а, б демонстрирует зависимости скоростей брэгговских и небрэгговских рассеивателей от скорости ветра, полученные в разные дни при разных скоростях течений. Видно, что скорость рассеивателей растёт с увеличением скорости ветра, причём при скоростях 5–7 м/с наблюдается быстрый рост скоростей NBR-рассеивателей.

Обсуждение результатов

Проанализируем возможность восстановления скорости течения по данным радиолокатора X-/С-/S-диапазонов. На *рис. 5а* (см. с. 217) представлены скорости с *рис. 3а* после вычета собственных скоростей брэгговских волн. Видно, что измеренные скорости сноса (скорость поверхностного течения плюс 2,5 % скорости ветра) близки к определённым по данным радиолокатора, ошибка составляет $\pm 15\%$. На *рис. 5б* представлены собственные скорости NBR-рассеивателей, определённые по доплеровскому сдвигу скорости U_{NBR} минус скорость сноса. Чёрные, красные и синие линии — скорости брэгговских волн для трёх диапазонов радиолокатора; лиловая, зелёная и жёлтая прямые — скорости 30-, 20- и 10-сантиметровой волны. Видно, что величины скоростей рассеивателей зависят от длины волны и значительно превышают скорость брэгговских рассеивателей, отвечая скоростям коротких дециметровых волн.

Проанализируем зависимости скоростей BR- и NBR-рассеивателей от скорости ветра, представленные на *рис. 4*. Сплошными линиями на *рис. 4а* приведены скорости рассеивателей, рассчитанные как сумма ветрового дрейфа (3 %) и собственных скоростей брэгговских волн. Видно, что сделанная оценка в некоторых случаях значительно превышает или занижает измеренные значения. Это, видимо, связано с тем, что при оценке не учитывались ско-

рости течения, не всегда измеряемые во время эксперимента. Однако в целом можно сказать, что между оценкой и измерениями наблюдается хорошее качественное соответствие для всех трёх диапазонов. Рисунок 4б демонстрирует, что при малых скоростях ветра (до 5 м/с) собственные скорости небрэгговских рассеивателей близки к скоростям свободных волн с длинами около 20 см, при скоростях ветра более 7 м/с — к скоростям более длинных волн. Это связано с тем, что согласно работам (Ermakov et al., 2021; Phillips, 1988) небрэгговское рассеяние формируется двумя типами рассеивателей: нелинейными структурами (*англ.* bulges, toes), связанными с короткими дециметровыми волнами и движущимися со скоростями этих волн, а при больших скоростях ветра — ещё и сильными обрушениями (пенными гребнями), которые приводят к кратковременным всплескам во временном ряду интенсивности (спайкам) и к мгновенным увеличениям доплеровского сдвига.

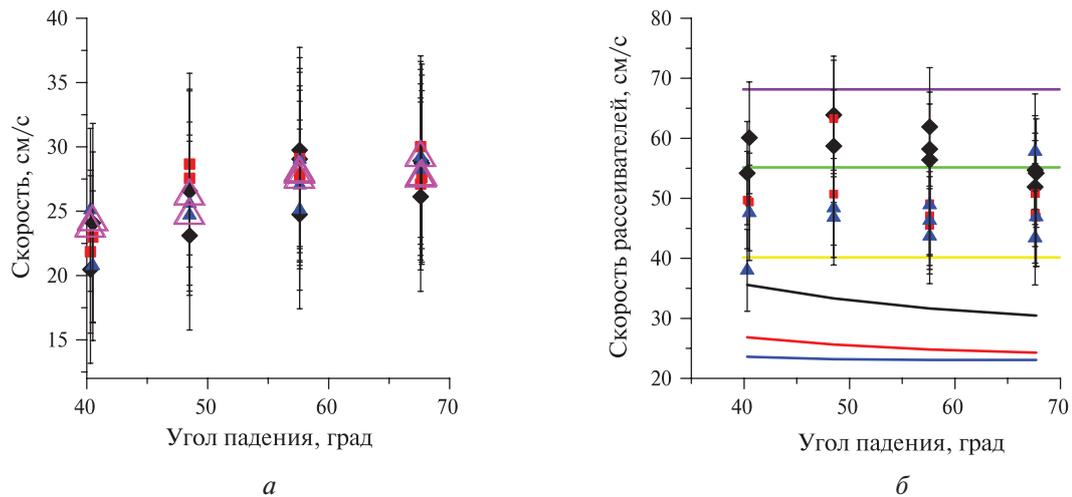


Рис. 5. Скорость сноса, определённая по поляризационной разности (сплошные маркеры), и скорость по ADCP — прозрачные треугольники (см. рис. 2) (а). Собственные скорости NBR-рассеивателей (б). Чёрные маркеры — 3 ГГц, красные — 6 ГГц, синие — 10 ГГц. Вертикальные прямые — 90%-е доверительные интервалы

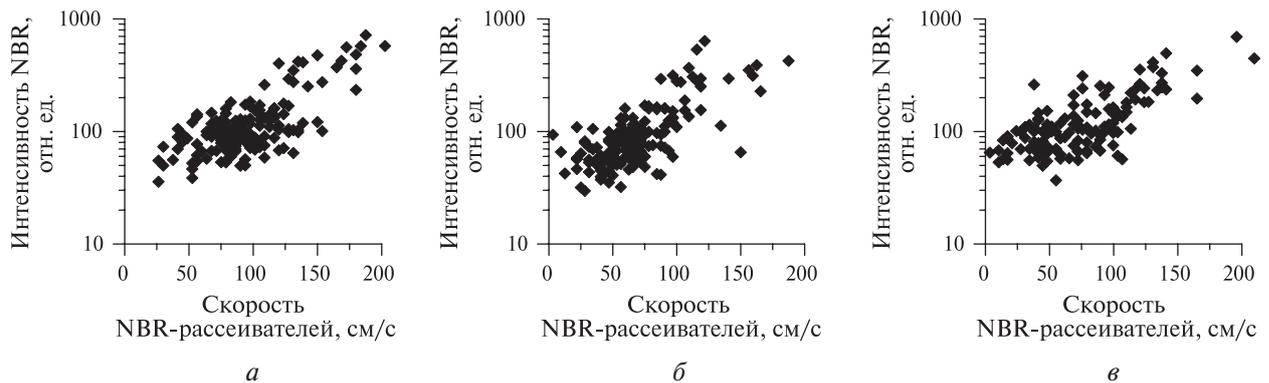


Рис. 6. Интенсивность и скорости NBR при скорости ветра 10 м/с: а — 3 ГГц; б — 6 ГГц; в — 10 ГГц

На рис. 6 показана связь между доплеровскими сдвигами и интенсивностью радиолокационного сигнала при угле падения 60° и при скорости ветра 10 м/с. Рисунок показывает, что большие интенсивности соответствуют в среднем большим доплеровским сдвигам, т. е. большим скоростям рассеивателей, а рассеиватели с меньшими скоростями имеют в среднем меньшую интенсивность. Для тех же данных на рис. 7 (см. с. 218) приведены гистограммы интенсивности (относительное число точек с заданной интенсивностью сигнала) и энергии (относительная энергия в заданном интервале интенсивностей) сигнала.

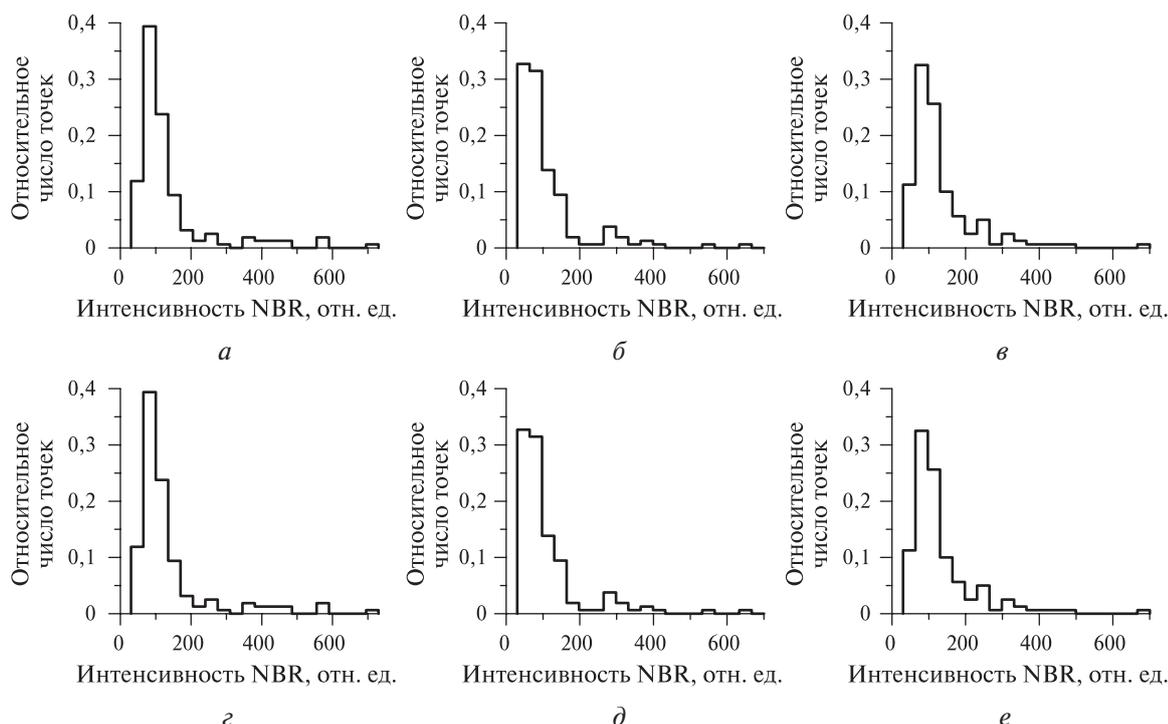


Рис. 7. Гистограммы интенсивности и энергии NBR: а, г — 3 ГГц; б, д — 6 ГГц; в, е — 10 ГГц

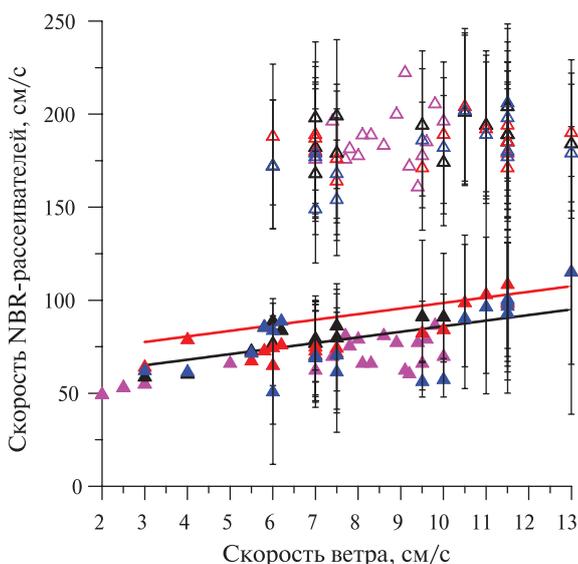


Рис. 8. Скорости NBR-рассеивателей. Сплошные треугольники — мелкомасштабное рассеяние, прозрачные — сильные обрушения. Линии — скорости свободных волн для длин 20 см (чёрная), 30 см (красная). Розовые символы — данные скаттерометра X-диапазона

Как видно, интенсивность рассеяния на редких сильных обрушениях сравнима с суммарной интенсивностью рассеяния на мелкомасштабных рассеивателях, что должно приводить к тому, что скорости небрэгговских рассеивателей при появлении обрушений на морской поверхности будут сильно увеличиваться. Это демонстрирует рис. 8, на котором NBR-рассеиватели разделены на две группы: мелкомасштабные рассеиватели (сплошные треугольники) и сильные обрушения (прозрачные треугольники), соответствующие всплескам интенсивности; критерием разделения было равенство энергии рассеяния на мелкомасштабных рассеивателях и на обрушениях. Сплошные линии — скорости свободных волн с длинами 20 и 30 см. Видно, что мелкомасштабные рассеиватели движутся со скоростью коротких дециметровых волн независимо от скорости ветра. При скоростях же ветра порядка 5–7 м/с появляются обрушения,двигающиеся с большими скоростями, и это приводит к тому, что средневзвешенные скорости рассеивателей резко увеличиваются (см. рис. 4).

Заключение

Проанализирована возможность определения скорости течения по данным радиолокатора X-/С-/S-диапазонов, работающего на двух взаимно перпендикулярных поляризациях. Показано, что по доплеровским сдвигам брэгговской компоненты можно оценить с удовлетворительной точностью скорости течений в поверхностном слое воды с учётом скорости рассеивателей как скорости свободных брэгговских сантиметровых волн, соответствующих диапазонам радиолокатора.

Собственная же скорость небрэгговских рассеивателей значительно превышает скорость брэгговских волн и резко увеличивается при появлении на поверхности сильных обрушений, что объясняется значительным вкладом обрушений более длинных, чем брэгговские, волн дециметрового и метрового диапазона, имеющих большие скорости. Определение скорости течений по доплеровским сдвигам небрэгговской компоненты затруднительно, поскольку пока недостаточно точно исследованы границы спектра дециметровой и метровой волны, которые определяют среднюю скорость небрэгговских рассеивателей.

Авторы благодарят А. В. Купаева и О. В. Шомину за помощь в проведении измерений и обработке данных.

Работа в основной её части (натурный эксперимент, обработка и анализ данных) выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-77-10066 (<https://rscf.ru/project/18-77-10066/>). Анализ погрешностей, связанных с влиянием модуляции в поле длинных волн, выполнен С. А. Ермаковым и Л. М. Плотниковым в рамках госзадания Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (№ 0729-2020-0037).

Литература

1. *Басс Ф. Г., Фукс И. М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. *Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Зуйкова Э. М., Щегольков Ю. Б.* Модуляция радиолокационных сигналов длинными волнами при рассеянии на морской поверхности, покрытой пленками поверхностно-активных веществ // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 102–111.
3. *Ермошкин А. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Богатов Н. А.* Определение скорости течения на морской поверхности доплеровским радиолокатором X-диапазона // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 93–103. DOI: 10.7868/S2073667320030089.
4. *Chapron F., Collard F., Ardhuin F.* Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation // J. Geophysical Research: Oceans. 2005. V. 110. No. C7. <https://doi.org/10.1029/2004JC002809>.
5. *Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Dobrokhotov V. A., Lazareva T. N.* Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2021. V. 60. Art. No. 3086627. 12 p. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3086627.
6. *Fois F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A.* An analytical model for the description of the full polarimetric sea surface Doppler signature // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. P. 988–1015. DOI: 10.1002/2014JC010589.
7. *Hara T., Plant W. J.* Hydrodynamic modulation of short wind-wave spectra by long waves and its measurement using microwave backscatter // J. Geophysical Research: Oceans. 1994. V. 99. No. C5. P. 9767–9784. DOI: 10.1029/93JC03514.
8. *Kapustin I. A., Shomina O. V., Ermoshkin A. V., Bogatov N. A., Kupaev A. V., Molkov A. A., Ermakov S. A.* On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 7. Art. No. 840. <https://doi.org/10.3390/rs11070840>.
9. *Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B.* A semi-empirical model of the normalized radar cross section of the sea surface 1. Background model // J. Geophysical Research: Oceans. 2003. V. 108. No. C3. Art. No. 8054. <https://doi.org/10.1029/2001JC001003>.
10. *Martin A. C. H., Gommenginger C., Marquez J., Doody S., Navarro V., Buck C.* Wind-wave-induced velocity in ATI SAR ocean surface currents: First experimental evidence from an airborne campaign // J. Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. No. 3. P. 1640–1653. <https://doi.org/10.1002/2015JC011459>.

11. *Martin A. C. H., Gommenginger C. P., Jacob B., Staneva J.* First multi-year assessment of Sentinel-1 radial velocity products using HF radar currents in a coastal environment // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 268. Art. No. 112758. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112758>.
12. *Moiseev A., Johnsen H., Johannessen J. A.* Retrieving Ocean Surface Currents from the Sentinel-1 Doppler Shift Observations: A Case Study of the Norwegian Coastal Current // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2020)*. 2020. P. 5670–5673. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323496.
13. *Mouche A., Collard F., Chapron B., Dagestad K., Guitton G., Johannessen J. A., Kerbaol V., Hansen M. V.* On the Use of Doppler Shift for Sea Surface Wind Retrieval from SAR // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 7. P. 2901–2909. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2174998.
14. *Nouguier F., Chapron B., Collard F., Mouche A., Rascle N., Ardhuin F., Wu X.* Sea Surface Kinematics from Near-Nadir Radar Measurement // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. No. 10. P. 6169–6179. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2833200.
15. *Phillips O. M.* Radar returns from the sea surface — Bragg scattering and breaking waves // *J. Physical Oceanography*. 1988. V. 18. P. 1065–1074.
16. *Sergievskaya I., Ermakov S., Ermoshkin A., Kapustin I., Molkov A., Danilicheva O., Shomina O. V.* Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 4. Art. No. 423. DOI:10.3390/rs11040423.
17. *Sergievskaya I., Ermakov S., Ermoshkin A., Kapustin I., Shomina O., Kupaev A.* The Role of Micro Breaking of Small-Scale Wind Waves in Radar Backscattering from Sea Surface // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 24. Art. No. 4159. <https://doi.org/10.3390/rs12244159>.
18. *Valenzuela G. R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review // *Boundary-Layer Meteorology*. 1978. V. 13. No. 1–4. P. 61–85. DOI: 10.1007/BF00913863.
19. *Voronovich A. G., Zavorotny V. U.* A Numerical Model of Radar Scattering from Steep and Breaking Waves // *Proc. IEEE Intern. Symp. Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'06)*. Denver, 2006. P. 469–472. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.125.

On the estimation of surface current velocities from microwave sea surface measurements at moderate incidence angles

I. A. Sergievskaya^{1,2,3}, S. A. Ermakov^{1,2,3}, L. M. Plotnikov^{1,3},
I. A. Kapustin^{1,3}, A. V. Ermoshkin^{1,3}

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: i.sergia@ipfran.ru

² *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603005, Russia*

³ *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603005, Russia*

Estimation of surface current velocities and their structure from microwave radar data is one of the important problems of remote sensing of the sea surface. The paper presents some results of measurements of surface current velocities from the Doppler spectra obtained by polarization multifrequency radar (X-/C-/S-bands) at moderate incident angles (40–70 degrees) of radiation in the upwind direction. A comparison of measured velocities with independent measurements of surface currents using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) is also presented. The radar scatterer velocities were determined from the Doppler spectrum centroid (Doppler shift) of the backscattered signal at VV and HH polarizations, and then for the Bragg (polarized) and non-Bragg (nonpolarized) components. It is shown that the flow velocity retrieved from the Doppler shift of the Bragg component after subtraction of the Bragg wave intrinsic velocity agrees well with the independent measurements. For the nonpolarized component, the scatterers velocities are close to the sum of surface current velocity and decimeter wave velocity with lengths of 10–70 cm, a sharp change in the scatterer velocity is observed for wind speeds of the order of 5–7 m/s. The latter is due to the contribution to the backscattering of the non-polarised component associated with small-scale breaking moving at the short decimeter wave velocities (20–30 cm) and individual strong wave breaking (foam crests) moving at the meter wave velocities. At wind speeds at which strong wave breaking appears at the surface, the weighted speed of the scatterers increases sharply due to the appearance of fast scatterers.

Keywords: three-frequency microwave polarization Doppler radar, Bragg (polarized) and non-Bragg (non-polarized) scatterers, surface current

Одобрена к печати: 27.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-212-222

References

1. Bass F. G., Fuchs I. M., *Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Scattering of waves by statistically rough surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p. (in Russian).
2. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Zuikova E. M., Shchegolkov Yu. B., Modulation of radar backscatter by long waves on the sea surface covered with a substances film, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2004, Vol. 40, No. 1, pp. 91–98.
3. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Bogatov N. A., Determination of the Sea Surface Current by a Doppler X-Band Radar, *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2020, Vol. 13, No. 3, pp. 93–103 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667320030089.
4. Chapron F., Collard F., Arduin F., Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2005, Vol. 110, No. C7, <https://doi.org/10.1029/2004JC002809>.
5. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Dobrokhoto V. A., Lazareva T. N., Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, Vol. 60, Art. No. 3086627, 12 p., DOI: 10.1109/TGRS.2021.3086627.
6. Fois F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A., An analytical model for the description of the full polarimetric sea surface Doppler signature, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 988–1015, DOI: 10.1002/2014JC010589.
7. Hara T., Plant W., Hydrodynamic modulation of short wind-wave spectra by long waves and its measurement using microwave backscatter, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, Vol. 99, No. C5, pp. 9767–9784, DOI: 10.1029/93JC03514.
8. Kapustin I. A., Shomina O. V., Ermoshkin A. V., Bogatov N. A., Kupaev A. V., Molkov A. A., Ermakov S. A., On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 7, Art. No. 840, <https://doi.org/10.3390/rs11070840>.
9. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semi-empirical model of the normalized radar cross section of the sea surface 1. Background model, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2003, Vol. 108, No. C3, Art. No. 8054, <https://doi.org/10.1029/2001JC001003>.
10. Martin A. C. H., Gommenginger C., Marquez J., Doody S., Navarro V., Buck C., Wind-wave-induced velocity in ATI SAR ocean surface currents: First experimental evidence from an airborne campaign, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2016, Vol. 121, No. 3, pp. 1640–1653, <https://doi.org/10.1002/2015JC011459>.
11. Martin A. C. H., Gommenginger C. P., Jacob B., Staneva J., First multi-year assessment of Sentinel-1 radial velocity products using HF radar currents in a coastal environment, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 268, Art. No. 112758, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112758>.
12. Moiseev A., Johnsen H., Johannessen J. A., Retrieving Ocean Surface Currents from the Sentinel-1 Doppler Shift Observations: A Case Study of the Norwegian Coastal Current, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2020)*, 2020, pp. 5670–5673, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323496.
13. Mouche A., Collard F., Chapron B., Dagestad K., Guitton G., Johannessen J., Kerbaol V., Hansen M., On the Use of Doppler Shift for Sea Surface Wind Retrieval From SAR, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 7, pp. 2901–2909, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2174998.
14. Nouguier F., Chapron B., Collard F., Mouche A., Rasclé N., Arduin F., Wu X., Sea Surface Kinematics from Near-Nadir Radar Measurement, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 56, No. 10, pp. 6169–6179, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2833200.
15. Phillips O. M., Radar returns from the sea surface — Bragg scattering and breaking waves, *J. Physical Oceanography*, 1988, Vol. 18, pp. 1065–1074.
16. Sergievskaya I., Ermakov S., Ermoshkin A., Kapustin I., Molkov A., Danilicheva O., Shomina O., Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 4, Art. No. 423, DOI:10.3390/rs11040423.
17. Sergievskaya I., Ermakov S., Ermoshkin A., Kapustin I., Shomina O., Kupaev A., The Role of Micro Breaking of Small-Scale Wind Waves in Radar Backscattering from Sea Surface, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 24, Art. No. 4159, <https://doi.org/10.3390/rs12244159>.

18. Valenzuela G. R., Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review, *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, No. 1–4, pp. 61–85, DOI: 10.1007/BF00913863.
19. Voronovich A. G., Zavorotny V. U., A Numerical Model of Radar Scattering from Steep and Breaking Waves, *Proc. IEEE Intern. Symp. Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'06)*, Denver, 2006, pp. 469–472, DOI: 10.1109/IGARSS.2006.125.