К вопросу о физической природе рассеяния микроволнового излучения Ка-диапазона на взволнованной водной поверхности

С.А. Ермаков, И.А. Сергиевская, В.А. Доброхотов, И.А. Капустин, А.В. Купаев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия E-mail: stas.ermakov8@gmail.com

Работа посвящена исследованию динамических характеристик гравитационно-капиллярных волн см-дм-диапазона длин с конечной амплитудой и их влиянию на характер обратного рассеяния радиоволн Ка-диапазона при умеренных углах падения излучения в лабораторных условиях. С использованием оригинальной методики визуализации исследованы профили крутых гравитационно-капиллярных волн см-дм-диапазона, для которых характерно наличие ряда особенностей, в том числе областей с высокой кривизной и паразитной капиллярной рябью мм-диапазона длин на переднем склоне несущих волн. Получены зависимости дисперсии наклонов паразитной ряби и кривизны гребней волн от их амплитуды, а также от поверхностной концентрации плёнки поверхностно-активных веществ на водной поверхности. Показано, что интенсивность обратного радиолокационного рассеяния от чистой поверхности определяется как брэгговской, так и небрэгговской (неполяризованной) компонентами, при этом паразитная рябь определяет в основном брэгговскую компоненту, а гребни с высокой кривизной — небрэгговскую. В присутствии плёнки вклад небрэгговской компоненты в радиолокационное рассеяние увеличивается. Это, как показал эксперимент, связано с тем, что поверхностно-активная плёнка сильнее подавляет паразитную рябь, чем уменьшает кривизну гребней волн.

Ключевые слова: гравитационно-капиллярные волны, паразитная капиллярная рябь, bulge, дисперсия наклонов ряби, кривизна гребня, брэгговская/небрэгговская компоненты, поверхностно-активная плёнка

Одобрена к печати: 27.11.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-235-241

Введение

Проблема корректного описания механизмов рассеяния микроволн на ветровом волнении и построения соответствующих моделей обсуждается в литературе в течение многих десятилетий, в том числе весьма активно в последние годы в связи с появлением новых данных натурных наблюдений (см., например, работы (Ermakov et al., 2018; Yurovsky et al., 2019) и цитированную литературу). Одним из наиболее общепризнанных для условий радиолокационного зондирования при умеренных углах падения зондирующего излучения является брэгговский механизм и основанная на нём двухмасштабная модель (Рытов и др., 1978; Bass, Fuks, 1979). Однако данные механизм и модель не могут объяснить целый ряд особенностей радиолокационных (РЛ) сигналов микроволнового диапазона. К таким особенностям относятся, в частности: высокая изменчивость РЛ-сигнала — наличие сильных всплесков интенсивности РЛ-сигнала в условиях, когда облучаемая радиолокатором область поверхности достаточно мала по сравнению с характерными длинами энергонесущих ветровых волн; меньшее, чем это предсказывает двухмасштабная модель, различие в интенсивностях сигналов на соосных вертикальной (ВВ) и горизонтальной (ГГ) поляризациях; различие в доплеровских сдвигах РЛ-сигнала на разных поляризациях (см., например, работы (Ермаков и др., 2014; Sergievskaya et al., 2019). В литературе высказывается предположение о связи указанных особенностей с обрушениями ветровых волн (Yurovsky, Malinovsky, 2012). При этом, однако, однозначная связь всплесков РЛ-сигнала с сильными (с образованием «барашков») обрушениями волн метрового диапазона не подтверждается. Напротив, как показывают наблюдения (см. разд. «Натурные наблюдения»), сильные всплески интенсивности РЛ-сигнала возникают

обычно при наличии коротких волн дм-см-диапазона с острыми гребнями при большой их кривизне. Такое волнение может быть охарактеризовано как «сулой» или «волновая толчея» (Монин, Красицкий, 1985).

В настоящей работе представлены результаты лабораторных исследований, подтверждающих связь характеристик РЛ-рассеяния в Ка-диапазоне с особенностями профиля сильнонелинейных гравитационно-капиллярных волн (ГКВ).

Натурные наблюдения

Исследование особенностей обратного рассеяния микроволн проводились в 2018 г. на Горьковском водохранилище с использованием скаттерометра Ка-диапазона (рабочая длина волны 8,7 мм), установленного на борту исследовательского судна. Скаттерометр работал в режиме непрерывного излучения с синусоидальной модуляцией несущей частоты, что позволяло проводить настройку на заданную дальность. Высота размещения прибора составляла 7 м над поверхностью воды, наблюдения проводились на ВВ-поляризации при угле падения излучения около 45°, масштаб засвеченного пятна на поверхности воды был порядка 1 м. В условиях умеренного ветра (5-6 м/с) количество сильных (с образованием пенных гребней) обрушений волн метрового диапазона было достаточно мало, тогда как более короткие волны характеризовались ярко выраженной несинусоидальностью профиля с острыми волновыми гребнями. Типичный характер волнения иллюстрирует снимок на puc. 1a. На puc. 16 приведена запись интенсивности РЛ-сигнала, изображение отвечает моменту времени 490 с. На рис. 16 хорошо видны всплески сигнала, характерные временные интервалы между которыми составляют 1-2 с, что значительно меньше, чем временные интервалы между более редкими событиями прохождения обрушающихся гребней. Это указывает на то, что именно сильнонелинейные ГКВ дм-см-диапазона и определяют нестационарный характер РЛ-сигнала.



Рис. 1. Изображение ветрового волнения (*a*); запись интенсивности РЛ-сигнала Ка-диапазона на ВВ-поляризации (б). Белый овал — контур области, облучаемой скаттерометром; стрелками указано направление скорости ветра

Лабораторный эксперимент

Для изучения природы обратно рассеянного РЛ-сигнала была проведена серия лабораторных экспериментов по зондированию ГКВ одновременно с оптической регистрацией их профиля в овальном ветроволновом бассейне Института прикладной физики Российской академии

наук (ИПФ РАН). Схема лабораторной установки приведена на *рис. 2*, где цифрами обозначены: 1 — волнопродуктор квазисинусоидальных волн; 2 — скаттерометр Ка-диапазона; 3 — лазер для подсветки поверхности; 4 — капельница; 5 — струнный волнограф; 6 — пляжволногаситель. Характеристики ГКВ изучались как для чистой поверхности воды, так и в присутствии плёнки поверхностно-активного вещества (ПАВ) — раствора олеиновой кислоты в этиловом спирте. Плёнка непрерывно наносилась на поверхность воды вблизи волнопродуктора с помощью капельницы с регулируемой скоростью истечения ПАВ и дрейфовала в поле течения, индуцированного ГКВ в зону наблюдений. Оптическая регистрация профиля проводилась следующим образом: поверхность и приповерхностный слой воды, подкрашенный флуоресцентным красителем, освещались лазерным пучком ножевидной формы, создаваемой с помощью цилиндрической линзы (Ермаков и др., 2014), подсвеченная область фотографировалась. Примеры полученных изображений представлены на рис. За, б (см. с. 238), соответствующие им оцифрованные профили — на рис. Зв, г. На профилях крутых ГКВ длиной 10 см хорошо видны нелинейные структуры: «валообразная» форма гребня (англ. bulge) и паразитная капиллярная рябь (ПКР) на переднем склоне ГКВ (см. работы (Ермаков и др., 1980; Longuet-Higgins, 1992). Возникновение данных нелинейных структур носит квазипороговый характер и отвечает значениям крутизны переднего склона ГКВ порядка 0,1 и более. Характерная длина паразитной капиллярной ряби вблизи гребня ГКВ — около 5-6 мм и уменьшается вниз по склону ГКВ (Ермаков и др., 1980). Следует отметить, что ГКВ из-за модуляционной неустойчивости испытывали флуктуации по амплитуде порядка 10–15%, при этом наклоны ряби и кривизна гребней вблизи порога возбуждения ряби и образования заострённых гребней флуктуировали значительно сильнее, вплоть до практически полного исчезновения паразитной ряби. В качестве количественных характеристик для описания нелинейных структур были приняты дисперсия наклонов паразитной капиллярной ряби, которая определялась первыми 3-4 колебаниями, следующими после гребня, и кривизна bulge на гребне ГКВ. Для определения кривизны bulge выбиралась наилучшая аппроксимация формы гребня и рассчитывалась вторая производная на гребне. Полученные зависимости кривизны bulge и дисперсии паразитной ряби приведены на *рис.* 4 и 5 (см. с. 238). Видно, что при одном и том же изменении крутизны переднего склона дисперсия наклонов ряби менялась приблизительно в 35 раз, а кривизна bulge — в 10, что свидетельствует о том, что паразитная капиллярная рябь более чувствительна к высоте энергонесущей волны, чем острые гребни волн. Зависимости средних значений дисперсии наклонов паразитной капиллярной ряби и кривизны гребня как функций поверхностной концентрации ПАВ приведены на рис. 6, который демонстрирует, что дисперсия ряби более чувствительна также и к наличию плёнки ПАВ на водной поверхности, чем кривизна гребня. Это можно объяснить тем, что плёнка приводит к сильному затуханию паразитной ряби с длинами волн порядка 5-6 мм при её распространении вдоль склона ГКВ, для большего же по масштабу bulge (порядка 1 см) влияние плёнки оказывается более слабым.



Рис. 2. Схема лабораторной установки (размеры указаны в сантиметрах)



Рис. 3. Типичные снимки и профили ГКВ (длина волны 10 см) на чистой воде (a, b) и в присутствии органической плёнки (f, c)



Рис. 4. Кривизна bulge как функция крутизны переднего склона ГКВ на чистой воде и в присутствии плёнок с концентрациями 0,17 и 0,25 мг/м²



Рис. 5. Дисперсия ПКР как функция крутизны переднего склона ГКВ на чистой воде и в присутствии плёнок с концентрациями 0,17 и 0,25 мг/м²



Рис. 6. Средний наклон ГКВ, кривизна bulge, дисперсия наклонов ПКР как функции поверхностной концентрации плёнки

Рассмотрим теперь результаты экспериментов по РЛ-зондированию ГКВ. Когерентный скаттерометр Ка-диапазона был установлен на высоте около 1 м над поверхностью воды, угол падения — 56° . Облучаемая область составляла примерно 15×20 см, измерения проводились последовательно на ВВ- и ГГ-поляризациях. Скаттерометр настраивался на заданную дальность, что позволяло отфильтровать сигналы, приходящие с других дальностей в результате многократных отражений излучения от стенок и взволнованной поверхности воды; отражение от неподвижных конструкций отвечало «нулевым» частотам в доплеровском спектре и также отфильтровывалось. Поскольку длины волн паразитной капиллярной ряби отвечают условию брэгговского резонанса с падающими микроволнами, можно полагать, что именно рябь даёт основной вклад в брэгговскую компоненту РЛ-сигнала. Рассеяние на заострённых гребнях можно рассматривать в квазиоптическом приближении как рассеяние на части кругового цилиндра, на котором при достаточно большой кривизне имеется область квазизеркального отражения. Поскольку радиус «цилиндра» сравним с длиной волн Ка-диапазона или больше неё, то интенсивность РЛ-сигнала практически одинакова на ВВи ГГ-поляризациях и можно сказать, что рассеяние на bulge определяет неполяризованную (небрэгговскую) компоненту рассеяния.

Результаты измерений интенсивности РЛ-сигнала показывают, что отношение средних интенсивностей сигналов на ВВ- и ГГ-поляризациях (поляризационное отношение) для чи-

стой воды — около 7 (*рис.* 7), что меньше значений 10-12, которые предсказывает модель брэгговского рассеяния с учётом локального угла падения. Присутствие плёнки слабо меняет интенсивность рассеяния на ГГ-поляризации, но существенно уменьшает сигнал на ВВ-поляризации. Как видно на *рис.* 7, поляризационное отношение падает с ростом концентрации ПАВ. Это связано с тем, что брэгговская компонента рассеяния существенно уменьшается в ВВ-сигнале, в то время как небрэгговская компонента практически остаётся постоянной.

Рис. 7. Поляризационное отношение интенсивности РЛ-сигнала как функции поверхностной концентрации плёнки



Учитывая, что интенсивность паразитной капиллярной ряби, которая определяет брэгговское рассеяние, падает с концентрацией ПАВ быстрее, чем кривизна bulge (см. *puc. 6*), естественно заключить, что рассеяние на bulge обеспечивает формирование небрэгговской компоненты рассеянного РЛ-сигнала.

Выводы

Проведённые эксперименты показали, что поляризованная брэгговская компонента при РЛ-зондировании дециметровых волн в Ка-диапазоне под умеренными углами падения излучения связана в основном с паразитной капиллярной рябью на переднем склоне волн, а интенсивность неполяризованной компоненты определяется кривизной заострённых гребней ГКВ. Плёнка ПАВ сильно гасит капиллярную рябь, что приводит к значительному уменьшению интенсивности поляризованной компоненты и в меньшей степени снижает кривизну гребней. В результате, соответственно, незначительно уменьшается неполяризованная компонента. То есть наличие плёнки уменьшает поляризационное отношение. Разумеется, данные выводы носят несколько схематизированный характер. Более же детальный количественный анализ брэгговской и неполяризованной компонент будет представлен в дальнейших работах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-05-00448, 19-05-00605), а также темы государственного задания «Разработка радиофизических методов исследования океана» (0035-2019-0006).

Литература

- 1. Ермаков С.А., Рувинский К.Д., Салашин С.Г., Фрейдман Г.Н. Экспериментальное исследование генерации капиллярно-гравитационной ряби сильнонелинейными волнами на поверхности глубокой жидкости // Изв. Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 22. № 10. С. 1072–1080.
- 2. Ермаков С.А., Капустин И.А., Кудрявцев В. Н., Сергиевская И.А., Шомина О.В., Шапрон Б., Юровский Ю. Ю. О доплеровских сдвигах частоты радиолокационного сигнала при рассеянии на морской поверхности // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 4. С. 267–280. DOI: 10.1007/ s11141-014-9507-8.
- 3. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 375 с.
- 4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1978. 463 с.
- 5. Bass F. G., Fuks M. Wave Scattering From Statistically Rough Surfaces. UK, Oxford: Pergamon, 1979. 540 p.
- 6. *Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V., Molkov A.A., da Silva J.C.B.* Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X // Remote Sensing. 2018. V. 10(7). P. 1097. DOI: 10.3390/rs10071097.
- 7. Longuet-Higgins M. S. Capillary rollers and bores // J. Fluid Mechanics. 1992. V. 240. P. 659–579. DOI: 10.1017/S0022112092000259.
- Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., Shomina O.V. Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves // Remote Sensing. 2019. V. 11(4). P. 423. DOI: 10.3390/rs11040423.
- 9. *Yurovsky Yu. Yu., Malinovsky V. V.* Radar Backscattering from Breaking Wind Waves: Field Observation and Modelling // Intern. J. Remote Sensing. 2012. V. 33(8). P. 2462–2481. DOI: 10.1080/01431161.2011.614966.
- 10. *Yurovsky Yu. Yu., Kudryavtsev V.N., Grodsky S.A., Chapron B.* Sea Surface Ka-Band Doppler Measurements: Analysis and Model Development // Remote Sensing. 2019. V. 11(7). P. 839. DOI: 10.3390/rs11070839.

On the physical nature of Ka-band microwave backscattering due to wavy water surface

S.A. Ermakov, I.A. Sergievskaya, V.A. Dobrokhotov, I.A. Kapustin, A.V. Kupaev

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia Email: stas.ermakov8@gmail.com

The work is devoted to the study of the dynamic characteristics of the gravity-capillary waves of the cm-dm range with finite amplitude and their influence on the nature of Ka-band microwave backscattering at moderate incidence angles under laboratory conditions. Using the original visualization technique, we studied the profiles of steep gravity-capillary waves of cm-dm range that are characterized by some features, including areas with high curvature (bulge) and parasitic capillary ripples on the forward slope of the basic waves. The dependences of the dispersion of parasitic ripple slopes and the curvature of wave crests on wave amplitude and on surface concentration of surfactant film on the water surface are obtained. It was shown that the intensity of radar return from a clean surface is determined by both the Bragg and non-Bragg (unpolarized) components, while parasitic ripples influence mainly the Bragg component and ridges with high curvature determine the non-Bragg component. In the presence of film, the contribution of the non-Bragg component in the radar backscattering increases. As the experiment showed, this is because surfactant film more strongly depresses the parasitic ripples than reduces the curvature of the wave crests.

Keywords: gravity-capillary waves, parasitic capillary ripples, bulge, dispersion of ripple slopes, crest curvature, Bragg/non-Bragg components, surfactant film

Accepted: 27.11.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-235-241

References

- 1. Ermakov S.A., Ruvinskii K.D., Salashin S.G., Freidman G.N., Eksperimental'noe issledovanie generatsii kapillyarno-gravitatsionnoi ryabi sil'nonelineinymi volnami na poverkhnosti glubokoi zhidkosti (Experimental investigations of the generation of capillary-gravity ripples by strongly nonlinear waves on the surface of a deep fluid), *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1980, Vol. 22, No. 10, pp. 1072–1080.
- Ermakov S.A., Kapustin I.A., Kudryavtsev V.N., Sergievskaya I.A., Shomina O.V., Chapron B., Yurovskii Yu. Yu., O doplerovskikh sdvigakh chastoty radiolokatsionnogo signala pri rasseyanii na morskoi poverkhnosti (On doppler frequency shifts of radar signals backscattered from the sea surface), *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2014, Vol. 57, No. 4, pp. 267–280, DOI: 10.1007/s11141-014-9507-8.
- 3. Monin A.S., Krasitskii V.P., *Yavleniya na poverkhnosti okeana* (Phenomena at the Ocean Surface), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 375 p.
- 4. Rytov S. M., Kravtsov Yu. A., Tatarskii V. I., *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku* (Introduction to Statistical Radiophysics), Moscow: Nauka, 1978, 463 p.
- 5. Bass F.G., Fuks M., Wave Scattering From Statistically Rough Surfaces, UK, Oxford: Pergamon, 1979, 540 p.
- Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V., Molkov A.A., da Silva J. C. B., Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(7), p. 1097, DOI: 10.3390/ rs10071097.
- 7. Longuet-Higgins M.S., Capillary rollers and bores, *J. Fluid Mechanics*, 1992, Vol. 240, pp. 659–579, DOI: 10.1017/S0022112092000259.
- 8. Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., Shomina O.V., Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(4), p. 423, DOI: 10.3390/rs11040423.
- 9. Yurovsky Yu. Yu., Malinovsky V.V., Radar Backscattering from Breaking Wind Waves: Field Observation and Modelling, *Intern. J. Remote Sensing*, 2012, No. 33(8), pp. 2462–2481, DOI: 10.1080/01431161.2011.614966.
- Yurovsky Yu. Yu., Kudryavtsev V. N., Grodsky S. A., Chapron B., Sea Surface Ka-Band Doppler Measurements: Analysis and Model Development, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(7), p. 839, DOI: 10.3390/ rs11070839.