УДК 551.466

# О ДОПЛЕРОВСКИХ СДВИГАХ ЧАСТОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА ПРИ РАССЕЯНИИ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С. А. Ермаков<sup>1,2,3,4</sup>\*, И. А. Капустин<sup>1,2,3</sup>, В. Н. Кудрявцев<sup>2</sup>, И. А. Сергиевская<sup>1,2,3</sup>, О. В. Шомина<sup>1,2,3</sup>, Б. Шапрон<sup>2</sup>, Ю. Ю. Юровский<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

 $^2$ Российский государственный гидромете<br/>орологический университет, г. Санкт-Петербург;

<sup>3</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

<sup>5</sup> Морской гидрофизический институт НАНУ, г. Севастополь, Россия

В натурном эксперименте исследованы частотные спектры радиолокационных сигналов, рассеянных ветровыми волнами на морской поверхности. Для различных поляризаций зондирующей волны проанализированы два вида радиолокационных доплеровских сдвигов максимума спектров, а именно: усреднённый сдвиг мгновенного спектра рассеянного сигнала и сдвиг максимума среднего по времени спектра сигнала — как функции угла падения, а также скорости и направления ветра. Продемонстрировано существенное различие между средним сдвигом мгновенного спектра и сдвигом максимума среднего спектра. Показано, что это различие хорошо объясняется эффектом модуляции радиолокационного сигнала в поле длинных поверхностных волн. Полученные результаты крайне важны для корректного восстановления скоростей морских поверхностных течений по данным спутниковых измерений радиолокационных доплеровских сдвигов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Радиолокаторы сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, в частности спутникового базирования, широко используются для решения задач дистанционного зондирования океана при исследовании океанических и атмосферных процессов по их проявлениям на морской поверхности (см., например, публикации [1–4] и цитируемую там литературу). Особенно широкое развитие получили спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой, которые с недавнего времени начали применяться для измерения скоростей морских течений с использованием информации о радиолокационных доплеровских сдвигах. Так, в работах [5, 6] проанализированы доплеровские сдвиги по данным радиолокатора с синтезированной апертурой Envisat, построены их экспериментальные зависимости от условий наблюдения и скорости ветра для различных поляризаций радиоизлучения и предложены эмпирические выражения для восстановления скоростей течений. В работе [6] описан ряд интересных особенностей наблюдаемых в эксперименте доплеровских сдвигов, в том числе их существенное различие для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Однако физические механизмы, определяющие эти особенности, остались не до конца изученными.

Для физического обоснования алгоритмов восстановления скоростей поверхностных течений по характеристикам рассеянного поверхностью радиолокационного сигнала требуются детальный анализ и уточнение имеющихся моделей рассеяния электромагнитных волн. Если говорить о доплеровских сдвигах, проблема сводится к вопросу о скорости рассеивающих элементов на взволнованной водной поверхности. Вопрос этот весьма нетривиален и связан с особенностями механизмов рассеяния.

С.А. Ермаков, И.А. Капустин, В.Н. Кудрявцев и др.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Волжская государственная академия водного транспорта, г. Нижний Новгород;

<sup>\*</sup> stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru

В модели брэгговского рассеяния и являющейся её обобщением двухмасштабной модели (см., например, публикации [7, 8]) скорость рассеивателей — это фазовая скорость поверхностных волн с резонансной длиной. Причём резонансные рассеивающие волны могут быть как «свободными» и распространяться с фазовой скоростью гравитационно-капиллярных волн, так могут быть и «вынужденными» (паразитными), возбуждаться за счёт нелинейности более длинными волнами и распространяться со скоростью этих длинных несущих волн [9–16]. Отметим, что механизмы возбуждения и характеристики вынужденных волн существенно зависят от их длины и могут сильно различаться для разных диапазонов частот зондирующих радиолокационных сигналов.

В условиях квазизеркального рассеяния на длинных поверхностных волнах (приближение Кирхгофа, см. публикации [7, 8]) скорость рассеивателей соответствует проекции скорости зеркальных точек (движущихся с фазовой скоростью длинной волны) на направление волнового вектора зондирующего излучения.

Не до конца выяснен механизм рассеяния из зон обрушений волн и, соответственно, вопрос о скорости рассеивателей в этих зонах, хотя развитию соответствующих моделей рассеяния уделяется значительное внимание в работах [17–19].

Важным аспектом задачи о радиолокационном доплеровском сдвиге является и анализ модуляции радиолокационного сигнала длинными волнами согласно работам [20–22]. Как будет показано ниже, модуляция может существенно сказаться на этом сдвиге.

В общем случае перечисленные механизмы действуют совместно, а результирующий доплеровский сдвиг определяется их относительным вкладом в рассеяние. Поэтому для дальнейшего определения роли различных механизмов и развития моделей рассеяния требуется проводить специальные экспериментальные исследования характеристик радиолокационных сигналов, в том числе их доплеровских спектров, при различных поляризациях радиоизлучения, геометрии наблюдения, скоростях ветра и амплитуде длинных волн на морской поверхности.

Целью настоящей работы являлось получение новых данных о доплеровских сдвигах в Xдиапазоне радиоволн и оценка влияния эффектов модуляции интенсивности радиолокационного сигнала на доплеровские сдвиги.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ



Рис. 1. Океанографическая платформа Морского гидрофизического института

Эксперименты проводились в сентябре 2012 года с океанографической платформы Морского гидрофизического института (рис. 1), расположенной в прибрежной зоне Чёрного моря примерно в 0,6 км от берега. Глубина моря вблизи платформы составляет 30 м. Когерентный скаттерометр Х-диапазона работал на длине волны 3,2 см с офсетной антенной с шириной диаграммы направленности около 5°. Скаттерометр был установлен на платформе на высоте 12 м над невозмущённой поверхностью воды. Рассеянный на морской поверхности сигнал принимался в той же поляризации (вертикальной или горизонтальной), что и поляризация излучаемого сигнала. В ходе экспериментов по-

ляризация изменялась путём поворота антенны вокруг её оси на 90°. Угол падения зондирующей волны варьировался в пределах  $25^{\circ} \div 55^{\circ}$ , азимутальный угол наблюдения по отношению к направлению ветра менялся от 0° до 180°. Скорость и направление ветра измерялись ультразвуковым анемометром WIND SONIC, установленным на высоте 15 м.

Скорости ветра в серии экспериментов изменялись в интервале 7÷14 м/с, а периоды и длины энергонесущих ветровых волн составляли соответственно 3÷5 с и 30÷50 м. Линейный размер облучаемой скаттерометром области на поверхности воды составлял 2÷4 м в зависимости от угла падения, т. е. был порядка 0,1 длины энергонесущих волн, которые и определяли модуляцию интенсивности радиолокационного рассеяния.

Мгновенный (текущий) доплеровский спектр детектированного радиолокационного сигнала  $S(\omega,t)$  вычислялся на временах, меньших периода длинных волн (последний принимался в расчётах равным 0,125 или 0,25 с). Соответствующий текущему спектру  $S(\omega,t)$  доплеровский сдвиг  $F_{\rm I}(t)$ , т. е. сдвиг мгновенного спектра, определялся как положение на частотной оси «центра тяжести» функции  $S(\omega,t)$  (см. Приложение). Средний сдвиг мгновенного спектра получался усреднением функции  $F_{\rm I}(t)$  за время порядка 10÷15 мин, т. е. за время, существенно превышающее период энергонесущих волн.



Рис. 2. Примеры полученных в экспериментах доплеровских спектров S отражённого радиолокационного сигнала: кривая 1 — мгновенный спектр вблизи гребня длинной волны, 2 — средний спектр

При вычислении среднего доплеровского спектра и соответствующего ему доплеровского сдвига среднего спектра время усреднения спектра определялось в процессе обработки данных. При





Рис. 3. Пример спектров  $S_F$  доплеровского сдвига мгновенного спектра (a) и рассчитанных модуля модуляционной передаточной функции  $|m(\Omega)|$  (б) и функции когерентности  $\gamma(\Omega)$  (b). Доверительные интервалы рассчитаны согласно работе [20]

С.А. Ермаков, И.А. Капустин, В.Н. Кудрявцев и др.

обработке было установлено, что оценка доплеровского сдвига среднего спектра практически переставала зависеть от времени при временах усреднения порядка и более 10 мин; флуктуации оценки этой величины и, соответственно, ошибка её определения составляли 1÷2 Гц. Примеры мгновенного и среднего доплеровского спектров приведены на рис. 2.

Модуляционная передаточная функция вычислялась согласно её определению (см. Приложение, а также, например, публикации [20–22]). Для нахождения фурье-компонент орбитальной скорости  $U(\Omega)$  длинных поверхностных волн, модулирующих интенсивность радиолокационного сигнала, использовались временные ряды сдвигов мгновенных спектров. При этом, разумеется, предполагалось, что средний сдвиг мгновенного спектра пропорционален некоторой постоянной скорости рассеивателей, а переменная часть этого сдвига — амплитуде орбитальной скорости (или связанной с ней линейным соотношением амплитудой смещения) длинных волн. Максимум спектра мгновенного доплеровского сдвига располагался в интервале  $0,2\div0,35$  Гц. Поскольку, однако, максимум функции когерентности (см. Приложение) располагался на несколько более высоких частотах,  $0,25\div0,5$  Гц (см. рис. 3), амплитуда и фаза модуляционной передаточной функции вся реализация с длительностью порядка  $10\div15$  минут разбивалась на несколько отрезков (число отрезков много больше единицы) с длительностями, значительно большими периода длинной волны (в данном случае 32 с).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### 2.1. Доплеровские сдвиги

Рассмотрим зависимости доплеровских сдвигов от угла падения радиоволны, полученные в ходе эксперимента и приведённые на рис. 4.

Из представленных экспериментальных зависимостей следует: а) средний доплеровский сдвиг мгновенного спектра и доплеровский сдвиг среднего спектра растут с увеличением угла падения; б) средние доплеровские сдвиги мгновенных спектров меньше, чем доплеровские сдвиги средних спектров как при наблюдении по ветру, так и навстречу ветру; в) средние доплеровские сдвиги среднии по ветру и навстречу ветру имеют близкие значения, в то время как доплеровские сдвиги средних спектров в случае наблюдения навстречу ветру больше, чем при измерении по ветру. Кроме того, доплеровские сдвиги, особенно средний доплеровский сдвиг мгновенного спектра, сравнительно слабо зависят от скорости ветра в исследуемом диапазоне её величин, что видно из довольно малого разброса сдвигов для скоростей ветра, меняющихся от 7 до 14 м/с. Вклад ветрового дрейфа в доплеровский сдвиг в данных условиях мал, этим и объясняется слабая зависимость доплеровских сдвигов от скорости ветра.

#### 2.2. Модуляционная передаточная функция

Анализ модуляции радиолокационных сигналов показал, что модуль модуляционной передаточной функции зависит от скорости ветра, угла наблюдения относительно направления ветра, угла падения и поляризации зондирующей электромагнитной волны. Она спадает с ростом угла падения и скорости ветра. Для горизонтальной поляризации модуль модуляционной передаточной функции при наблюдении против ветра выше, чем при наблюдении по ветру. Модуляция для горизонтальной поляризации оказываются существенно (в 2÷3 раза) более сильной, чем для вертикальной. Фаза модуляционной передаточной функции равнялась  $0,5\div1,5$  при наблюдении навстречу ветру и  $-(0,5\div1,5)$  при наблюдении по ветру. В целом полученные в эксперименте

270



Рис. 4. Зависимости доплеровских сдвигов F от угла падения при наблюдении навстречу ветру: усреднённый сдвиг мгновенного спектра рассеянного сигнала (a), сдвиг максимума среднего по времени спектра сигнала  $(\delta)$ . Чёрные точки соответствуют горизонтальной поляризации радиоизлучения, белые — вертикальной. Панели (6) и (c) — то же, что и на панелях (a) и  $(\delta)$ , но для наблюдения по ветру

Рис. 5. Модуль модуляционной передаточной функции  $|m(\Omega)|$  как функция угла падения при скоростях ветра  $10\div13$  м/с для горизонтальной поляризации радиоизлучения при наблюдении навстречу ветру (символы +) и по ветру ( $\blacklozenge$ ), а также для вертикальной поляризации при наблюдении навстречу ветру ( $\times$ ) и по ветру ( $\diamondsuit$ ). Теоретические кривые 1 соответствуют горизонтальной поляризации радиоизлучения, 2 — вертикальной поляризации радиоизлучения, 2 — вертикальной поляризации, пунктирные кривые соответствуют наблюдения наблюдения по ветру, сплошные — навстречу ветру



С. А. Ермаков, И. А. Капустин, В. Н. Кудрявцев и др.

модули модуляционной передаточной функции согласуются с приводимыми в литературе (см., например, работы [20, 22]). Её экспериментальные значения как функции угла падения для вертикальной и горизонтальной поляризаций при скоростях ветра 10÷13 м/с приведены на рис. 5.

#### 2.3. Анализ и обсуждение результатов

Из полученных данных следует, что средние доплеровские сдвиги мгновенных спектров практически одинаковы для обеих поляризаций при наблюдении радиолокационного рассеяния как по ветру, так и навстречу ветру.

Одним из основных механизмов рассеяния при умеренных углах падения принято считать брэгговский (см. публикации [7, 8]), согласно которому мощность радиолокационного сигнала определяется спектральной интенсивностью поверхностных волн с резонансной (брэгговской) длиной  $\lambda_{\rm B}$ , удовлетворяющей соотношению

$$\lambda_{\rm B} = \lambda_0 / (2\sin\theta),\tag{1}$$

где  $\lambda_0$  — длина электромагнитной волны,  $\theta$  — её угол падения.

Выше отмечалось, что брэгговские волны могут быть как свободными, т.е. распространяющимися со скоростями линейных гравитационно-капиллярных волн, так и вынужденными, т.е. порождаемыми (из-за нелинейности) более длинными волнами и движущимися со скоростями последних. Наряду с резонансным (брэгговским) механизмом в литературе [16–19, 23–25] обсуждается и нерезонансное рассеяние, при котором возникающая неполяризованная компонента рассеянного излучения обусловлена обрушением волн. Значительная роль нерезонансного механизма в формировании радиолокационного сигнала подтверждается, в частности, наличием коротких и интенсивных пиков (всплесков) в зависимости его интенсивности от времени. При этом поляризационное отношение — отношение интенсивностей сигнала с вертикальной и горизонтальной поляризациями — при умеренных углах падения (когда механизм зеркального отражения несуществен) может приближаться к единице, т. е. быть существенно меньше, чем значения, предсказываемые брэгговской моделью. В ряде работ (см., в частности, [3, 4, 26]) для описания нерезонансной компоненты было предложено учитывать эффект дифракции на клиньях, роль которых в данном случае играют заострённые гребни волн, которые длиннее и движутся



Рис. 6. Сглаженные экспериментальные зависимости усреднённых доплеровских сдвигов F мгновенных спектров для различных поляризаций радиоизлучения и условий наблюдения (кривые 1 и 2 соответствуют горизонтальной поляризации, кривые 3 и 4 — вертикальной; кривые 1 и 3 соответствуют наблюдениям по ветру, 2 и 4 — против ветра) и модельная зависимость (пунктир) для брэгговского рассеяния на свободной ряби. Для измерений против ветра сдвиг F > 0, по ветру — F < 0. Доверительный интервал определяется разбросом измеренных значений



50 |F|

Γц

40

30

20

10

0∟ 20



Рис. 7. Примеры реализаций доплеровского сдвига  $F_{\rm I}(t)$  мгновенного спектра и интенсивности сигнала P(t), нормированной на её среднее значение, для вертикальной (a) и горизонтальной (b) поляризаций

с бо́льшими скоростями, чем свободная брэгговская рябь. Детальное обсуждение природы нерезонансной компоненты, однако, выходит за рамки данной работы, в которой основное внимание уделяется отличию между доплеровскими сдвигами мгновенного и среднего спектров.

Теоретическая зависимость доплеровских сдвигов мгновенного спектра от угла падения для брэгговской компоненты рассеяния на свободных волнах приведена на рис. 6 (пунктир), где для сравнения построены полученные в эксперименте сглаженные зависимости средних доплеровских сдвигов мгновенных спектров для двух поляризаций при зондировании по ветру и против ветра. Можно заключить, что брэгговская модель даёт хотя и меньшие, но всё-таки довольно близкие к экспериментальным значения доплеровского сдвига (некоторое исключение составляет случай горизонтальной поляризации при зондировании навстречу ветру). Получается, таким образом, что, с одной стороны, небрэгговская компонента вносит значительный вклад в интенсивность рассеяния, а, с другой стороны, доплеровские сдвиги радиолокационного сигнала близки к предсказываемым брэгговской моделью величинам.

Объяснение этого кажущегося противоречия сводится к следующему. Как показывает анализ данных эксперимента, вклад нерезонансного рассеяния сосредоточен в основном в сильных всплесках сигнала, интенсивность которых существенно (в 5÷10 раз) превышает среднюю интенсивность (см. рис. 7). Поэтому, несмотря на малую относительную длительность всплесков (суммарная длительность всплесков менее 0,1 от длительности реализации), их энергия сравнима со средней. Таким образом, доля нерезонансной компоненты рассеяния сопоставима с брэгговской, что и обусловливает значительное отличие поляризационного отношения от предсказываемого брэгговской моделью. Доплеровские сдвиги во всплесках, как правило, превышают средние по реализации, но это превышение невелико (примерно в 2 раза, см. рис. 7). С учётом малой длительности всплесков их доплеровские сдвиги слабо влияют на результирующий доплеровский сдвиг, поэтому его величина и оказывается сравнимой с оценками, даваемыми брэгговской моделью.

При зондировании локатором сантиметрового диапазона вынужденные брэгговские волны имеют длины порядка нескольких сантиметров и могут являться гармониками более длинных, дециметровых, поверхностных волн. В таком случае доплеровский сдвиг увеличивается, поскольку фазовая скорость дециметровых волн и их гармоник больше, чем у свободной резонансной ряби. Однако для корректного учёта этого эффекта необходимы данные измерений характеристик дециметровых волн и амплитуд их высших гармоник. Оценка доплеровского сдвига мгновенного спектра растёт также из-за ненулевого диаметра области на морской поверхности, облучаемой радиолокатором. Строго говоря, в эксперименте определяется доплеровский сдвиг не мгновенного спектра, а спектра, усреднённого по пятну локатора. Соответственно, модуляция брэгговской ряби волнами с длинами короче, чем диаметр пятна даёт дополнительный вклад в средний доплеровский сдвиг мгновенного спектра вполне аналогично тому, как модуляция радиолокационного сигнала длинными по сравнению с размером пятна волнами обусловливает различие доплеровских сдвигов мгновенных и средних спектров (см. ниже).

Проанализируем теперь причину различия между доплеровскими сдвигами средних и мгновенных спектров. Как показано в Приложении, различие между средним доплеровским сдвигом мгновенного спектра и сдвигом среднего спектра определяется модуляционной передаточной функцией. Оценим её модуль в рамках известной модели с учётом эффекта геометрической и гидродинамической модуляции.

Рассмотрим для простоты одномерные поверхностные волны. Компонента модуляционной передаточной функции, определяющая геометрическую модуляцию, имеет вид согласно [20–22]

$$m_{\rm g}(\Omega) = i \,{\rm th}(\kappa H) \left[ \frac{1}{R_{\rm p}} \frac{\mathrm{d}R_{\rm p}}{\mathrm{d}\theta} + \mathrm{tg}\,\theta + \mathrm{ctg}\,\theta \frac{\mathrm{d}\ln F(k_{\rm B})}{\mathrm{d}\ln k_{\rm B}} \right] + \frac{2\,{\rm th}(\kappa H)}{\kappa h}\,,\tag{2}$$

где  $R_{\rm p}$  — коэффициент радиолокационного рассеяния для волн с данной поляризацией (см., например, работы [2, 20]),  $F(k_{\rm B})$  — спектральная плотность ветрового волнения для брэгговского волнового числа  $k_{\rm B}$ , h — высота радиолокатора над поверхностью воды, H — глубина воды. Выражение (2) описывает геометрическую модуляцию интенсивности радиолокационного сигнала из-за вариаций дальности до рассеивающей области (обусловленных смещением поверхности воды длинной волной), а также из-за изменений коэффициента радиолокационного рассеяния, волнового числа и интенсивности рассеивающей брэгговской ряби (вызванных вариациями локального угла падения, определяемыми наклонами длинной волны).

Выражение для гидродинамической модуляции брэгговской ряби переменными орбитальными течениями в длинной волне имеет вид (см., например, [21, 22])

$$m_{\rm h}(\Omega) = -\frac{\mathrm{d}\ln N(k_{\rm B})}{\mathrm{d}k_{\rm B}} \left(1 - \frac{c_{\rm g}}{C} - \frac{i\beta_{\rm r}}{\Omega}\right)^{-1},\tag{3}$$

где  $N(k_{\rm B}) = F(k_{\rm B})/\omega(k_{\rm B}), \ \omega(k) = \sqrt{gk + \sigma k^3/\rho}$  — частота гравитационно-капиллярных волн,  $\beta_{\rm r}$  — параметр релаксации брэгговской ветровой ряби, определяемый как разность коэффициента ветрового возбуждения и коэффициента вязкого затухания,  $c_{\rm g}$  — групповая скорость ряби, C — фазовая скорость длинной волны. При расчётах производная — d ln  $F(k_{\rm B})/d \ln k_{\rm B}$  принималась равной 4, коэффициент ветрового возбуждения находился по известному эмпирическому выражению из работы [27] при скорости ветра 10 м/с, частота длинной волны полагалась равной 0,25 Гц. Результаты вычислений функции  $|m(\Omega)|$  с учётом гидродинамической и геометрической составляющих приведены на рис. 5 для условий наблюдения по ветру и против ветра. Здесь же показан модуль геометрической модуляционной передаточной функции (штрихпунктирная линия), который одинаков при зондировании по ветру и против ветра. Отсюда можно заключить,



Рис. 8. Зависимость разности  $\Delta F$  доплеровских сдвигов средних спектров и средних доплеровских сдвигов мгновенных спектров от угла падения для наблюдения навстречу ветру (положительные значения  $\Delta F$ ) и по ветру (отрицательные значения  $\Delta F$ ). Чёрные точки отвечают горизонтальной поляризации зондирующего радиоизлучения, белые — вертикальной. Теоретические расчёты для горизонтальной поляризации представлены сплошными линиями, для вертикальной — пунктиром

что в рамках данной модели геометрическая модуляция доминирует над гидродинамической для условий экспериментов. Теоретические кривые на рис. 6 находятся в качественном соответствии с данными эксперимента.

Оценим теперь теоретическую разность между доплеровским сдвигом среднего спектра и средним доплеровским сдвигом мгновенного спектра с использованием выполненных модельных расчётов модуляционной передаточной функции. Такие оценки на основе выражения (П11) из Приложения приведены на рис. 8. При расчётах учитывалась модуляция на частотах энергонесущих волн вблизи максимума функции когерентности. Удовлетворительное в целом согласие оценок и результатов эксперимента позволяет сделать вывод, что модуляция радиолокационного сигнала при наличии длинных ветровых волн объясняет основные особенности различий между средними доплеровскими сдвигами мгновенных спектров и доплеровскими сдвигами средних спектров, а также особенности сдвигов среднего спектра для разных поляризаций. Отметим, что наблюдаемое на рис. 8 расхождение теории и эксперимента при значительных углах падения (в нашем эксперименте 55°) может быть связано с возрастанием вклада в рассеяние от нерезонансных рассеивателей при росте угла падения (см. работу [26]).

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнены натурные исследования доплеровских сдвигов радиолокационного сигнала X-диапазона при разных поляризациях, углах падения излучения и скоростях и направлениях ветра. Показано, что усреднённый сдвиг мгновенного спектра растёт с увеличением угла падения, относительно слабо зависит от скорости и направления ветра и оказывается достаточно близким для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Доплеровский сдвиг удовлетворительно согласуется с оценками по брэгговской модели рассеяния даже при наличии сильно нелинейных (обрушивающихся) волн.

В свою очередь, доплеровский сдвиг среднего спектра превышает усреднённый сдвиг мгновенных спектров, различен для вертикальной и горизонтальной поляризаций, а также при зондировании против ветра и по ветру. Особенности доплеровских сдвигов среднего спектра удовлетворительно объясняются влиянием модуляции интенсивности радиолокационного сигнала в поле длинных ветровых волн.

Полученные результаты важны для корректной оценки скорости течений по измерениям доплеровских сдвигов, в частности радиолокаторами спутникового базирования. Действительно, элементы разрешения в изображении морской поверхности для спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой составляют обычно десятки метров (PCA ERS-1, ERS-2, Envisat), а для локаторов с обычной (несинтезированной) апертурой могут быть существенно бо́льшими. Поэтому оцениваемые по данным радиолокационного зондирования доплеровские сдвиги содержат компоненту, определяемую модуляцией радиолокационного сигнала ветровыми волнами с длинами, меньшими размеров элемента разрешения, т. е. фактически являются доплеровскими сдвигами среднего спектра (в данном случае, что этот спектр является средним не по времени, а по пространству несущественно). Некорректный учёт этой компоненты может завышать оценки скорости течений, восстановленной по измерениям доплеровского сдвига.

Авторы благодарят В.В. Баханова за интерес к проведённым нами исследованиям и ценные замечания. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11–05–00295, 13–05–90429– Укр\_ф\_а, 13–05–97058, 13–05–97043, 14–05–00876), РАН (программа «Радиофизика»), ГФФИ Украины (договор Ф53/117–2013 от 04.06.2013) и Правительства РФ (грант 11.G34.31.0078).

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

## ДОПЛЕРОВСКИЕ СДВИГИ ЧАСТОТЫ И МОДУЛЯЦИОННАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

#### Основные определения

Пусть  $S(\omega, t)$  — мгновенный (текущий) спектр радиолокационного сигнала, анализируемый на временах, малых по сравнению с характерными периодами модулирующих длинных волн. Тогда доплеровский сдвиг мгновенного спектра можно определить как

$$F_{\rm I}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S(\omega, t)\omega \, \mathrm{d}\omega \bigg/ \int_0^\infty S(\omega, t) \, \mathrm{d}\omega. \tag{II1}$$

С. А. Ермаков, И. А. Капустин, В. Н. Кудрявцев и др.

Доплеровский сдвиг  $F_{\rm A}$  среднего спектра радиолокационного сигнала определим согласно выражению

$$F_{\rm A}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \omega \overline{S}(\omega, t) \, \mathrm{d}\omega \bigg/ \int_{0}^{\infty} \overline{S}(\omega, t) \, \mathrm{d}\omega, \tag{\Pi2}$$

где спектр

$$\overline{S}(\omega,t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} S(\omega,t) \, \mathrm{d}t \tag{II3}$$

находится как среднее по времени  $T \gg 2\pi/\Omega$ , существенно большему характерных периодов длинных (энергонесущих) ветровых волн  $2\pi/\Omega$ .

Определение модуляционной передаточной функции основано на представлении интенсивности радиолокационного сигнала, отражённого от морской поверхности, в виде

$$P(t) = \overline{P}\left[1 + \int m(\Omega) \frac{U(\Omega)}{C(\Omega)} \exp(i\Omega t) \,\mathrm{d}\Omega\right] + P_{\mathrm{r}},\tag{II4}$$

где  $U(\Omega)$  и  $C(\Omega)$  — фурье-компоненты горизонтальной орбитальной и фазовой скоростей длинных волн на частоте  $\Omega$ ,  $\overline{P}$  — средняя интенсивность радиолокационного сигнала,  $P_{\rm r}$  — флуктуирующая часть радиолокационного сигнала, некоррелированная с длинной волной. Модуляционная передаточная функция  $m(\Omega)$  при этом определяется выражением

$$m(\Omega) = \frac{C(\Omega)}{\overline{P}} \, \frac{\overline{P(\Omega)U^*(\Omega)}}{|U(\Omega)|^2} \,, \tag{II5a}$$

где индекс «\*» означает комплексное сопряжение. При нахождении функции  $m(\Omega)$  по данным радиолокационных измерений полагается (см. [20–22]), что вариации доплеровского сдвига радиолокационного сигнала определяются орбитальными скоростями модулирующих длинных волн, так что вместо формулы (П5а) можно писать

$$m(\Omega) = k_{\rm e} \frac{C(\Omega)}{\pi \overline{P}} \frac{\overline{P(\Omega)} F_{\rm I}^*(\overline{\Omega})}{|F_{\rm I}(\Omega)|^2} \exp(-i\theta), \tag{II56}$$

где  $k_{\rm e} = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  — длина электромагнитной волны. Важной характеристикой при анализе модуляции радиолокационного сигнала является также функция когерентности

$$\gamma^2(\Omega) = \frac{|\overline{P(\Omega)U^*(\Omega)}|^2}{|\overline{P(\Omega)}|^2 |U(\Omega)|^2},\tag{II6}$$

которая характеризует степень корреляции флуктуаций радиолокационного сигнала с длинной волной. В формулах (П5а), (П5б) и (П6) величина  $P(\Omega)$  — фурье-компонента мощности радиолокационного сигнала, черта сверху обозначает усреднение по ансамблю (времени).

## Связь между доплеровскими сдвигами частоты и модуляционной передаточной функцией радиолокационного сигнала

Из определения мгновенного (текущего) спектра радиолокационного сигнала следует, что

$$S(\omega,t) = \frac{1}{2\pi} \int \overline{\operatorname{Re}[A(t)\exp[i\varphi(t)]\operatorname{Re}[A(t+\tau)\exp[i\varphi(t+\tau)]}\exp(i\omega t) \,\mathrm{d}\tau, \tag{II7}$$

где A(t) и  $\varphi(t) = 2k_{\rm e}r(t)$  — соответственно амплитуда и фаза рассеянной назад электромагнитной волны,  $\mathbf{r}(t)$  — радиус-вектор рассеивающего элемента. Полагая амплитуду A(t) медленно меняющейся за время порядка обратных доплеровских частот сигнала, несложно получить, что

$$S(\omega, t) = P(t) \left[ \delta(\omega - 2\mathbf{k}_{e}\mathbf{V}) + \delta(\omega + 2\mathbf{k}_{e}\mathbf{V}) \right]/2. \tag{II8}$$

Здесь  $\mathbf{V} = \mathrm{d}\mathbf{r}/\mathrm{d}t$  — скорость рассеивающего элемента на морской поверхности.

При выводе формулы (П8) для простоты полагалось, что диаграмма направленности антенны локатора достаточно узкая и размеры облучаемого пятна на морской поверхности порядка или меньше масштаба пространственной когерентности рассеивающей ряби. При этом можно считать, что в пределах пятна все рассеиватели движутся с одинаковой скоростью. Учёт различия в фазах волн, рассеянных разными участками поверхности в пределах пятна, из-за различия скоростей рассеивающих элементов приводит к некоторому размытию мгновенного спектра, что несущественно при нахождении его центра тяжести, т.е. доплеровского сдвига.

Из формул (П1) и (П8) следует, что доплеровский сдвиг

$$F_{\rm I}(t) = \pi k_{\rm e} \sin(\theta) \left[ C_{\rm p} + V_{\rm c} + U_{\rm orb}(t) \right]. \tag{II9}$$

В формуле (П9) полагается, что скорость рассеивающих элементов складывается из фазовой скорости рассеивающих волн  $C_{\rm p}$ , скорости среднего течения  $V_{\rm c}$  (включающий ветровой дрейф) и орбитальной скорости поля длинных волн  $U_{\rm orb}(t)$ , где  $\theta$  — угол падения электромагнитной волны. В выражении (П9) пренебрегается слагаемыми, пропорциональными высшим степеням малых наклонов длинных волн. Тогда средний доплеровский сдвиг мгновенного спектра

$$F_{\rm I} = \pi k_{\rm e} \sin(\theta) \left( C_{\rm p} + V_{\rm c} \right) \tag{\Pi10}$$

определяется фазовой скоростью брэгговской волны и средней скоростью течения.

Выражение для доплеровского сдвига среднего спектра несложно получить из формул (П2), (П4), (П8) и (П9). Для случая наблюдения вдоль направления распространения длинных волн, т.е. вдоль направления ветра, имеем

$$F_{\rm A} = \bar{F}_{\rm I} + \frac{2k_{\rm e}}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^\infty m(\Omega) \, \frac{U(\Omega)}{C(\Omega)} \, \overline{U}^*(\Omega) \, (\sin\theta + i\cos\theta) \, \mathrm{d}\Omega, \tag{\Pi11}$$

где

$$\overline{U}(\Omega) = \int \frac{U(\Omega_1) \sin[(\Omega - \Omega_1) T/2]}{(\Omega - \Omega_1) T/2} \ \mathrm{d}\Omega_1 \approx U(\Omega) \, 4\pi/T$$

— амплитуда скоростей длинных поверхностных волн в полосе порядка  $4\pi/T$  вблизи частоты  $\Omega$ .

Таким образом, разность между доплеровскими сдвигами  $F_A$  и  $F_I$  определяется степенью модуляции радиолокационного сигнала и может быть значительной при наличии интенсивных длинных волн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 373 с.
- 2. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. С.В. Викторова, Л.М. Митника. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 200 с.
- Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др. // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173, № 1. С. 69.

С. А. Ермаков, И. А. Капустин, В. Н. Кудрявцев и др.

- 4. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
- 5. Chapron B., Collard F., Ardhuin F. // J. Geophys. Res. C. 2005. V. 110. Art. no. C07008.
- Mouche A. A., Collard F., Chapron B., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2012. V. 50, No. 7. P. 2901.
- Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972.
- Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1978.
- 9. Longuet-Higgins M. S. // J. Fluid Mech. 1963. V. 16. P. 138.
- 10. Ruvinsky K. D., Feldstein F. I., Freidman G. I. // J. Fluid Mech. 1991. V. 230. P. 339.
- 11. Ермаков С. А., Рувинский К. Д., Салашин С. Г., Фрейдман Г. И. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1986. Т. 22, № 10. С. 1072.
- 12. Longuet-Higgins M. // J. Fluid Mech. 1995. V. 301. P. 79.
- 13. Plant W. J., Keller W. C., Hesany V., et al. // J. Geophys. Res. C. 1999. V. 104, No. 2. P. 3243.
- 14. Gade M., Alpers W., Ermakov S. A., et al. // J. Geophys. Res. C. 1998. V. 103, No. 10. P. 21697.
- Ермаков С. А., Капустин И. А., Сергиевская И. А. // Изв. РАН. Сер. «Физическая». 2010. Т. 74, № 12. С. 1775.
- Ермаков С. А., Капустин И. А., Сергиевская И. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 7. С. 500.
- Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. // J. Geophys. Res. C. 2003. V. 108, No. 3. P. 8054.
- Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. // J. Geophys. Res. C. 2003. V. 108, No. 3. P. 1.
- Kudryavtsev V., Akimov D., Johannessen J., Chapron B. // J. Geophys. Res. C. 2005. V. 110. Art. no. 07016.
- 20. Hara T., Plant W. J. // J. Geophys. Res. C. 1994. V. 99, No. 5. P. 9767.
- Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Щегольков Ю. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 55, № 12. С. 1025.
- 22. Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Зуйкова Э. М., Щегольков Ю. Б. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 1. С. 102.
- 23. Kudryavtsev V. N., Makin V. K., Chapron B. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 7625.
- Rosenberg A., Ritter M., Melville W.K., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1999. V. 37, No. 2. P. 1052.
- 25. Lee P. H. Y., Barter J. D., Beach K. L., et al. // J. Geophys. Res. C. 1995. V. 100, No. 2. P. 2591.
- Кравцов Ю. А., Митягина М. И., Чурюмов А. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 3. С. 240.
- 27. Plant W. J. // J. Geophys. Res. C. 1982. V. 87, No. 1. P. 1961.

Поступила в редакцию 13 ноября 2013 г.; принята в печать 5 февраля 2014 г.

## ON DOPPLER FREQUENCY SHIFTS OF RADAR SIGNALS BACKSCATTERED FROM THE SEA SURFACE

S. A. Ermakov, I. A. Kapustin, V. N. Kudryavtsev, I. A. Sergievskaya, O. V. Shomina, B. Chapron, and Yu. Yu. Yurovskii

The frequency spectra of the radar signals backscattered by the wind waves from the sea surface are analyzed in the full-scale experiment. Two types of the radar Doppler shifts of the spectrum maximum, i.e., the averaged shift of the instantaneous spectrum of the scattered signal and the shift of the maximum of the time-averaged signal spectrum as functions of the incidence angle and the wind velocity and direction are analyzed for various sounding-wave polarizations. Significant difference between the mean shift of the instantaneous spectrum and the maximum shift of the mean spectrum is demonstrated. This difference is shown to be attributed to the radar-signal modulation effect in the field of long surface waves. The obtained results are very important for correct retrieval of the velocities of the marine-surface currents using the data of the satellite-borne measurements of the radar Doppler shifts.