

Двухпозиционное зондирование морской поверхности сигналами коротковолновых радиовещательных станций

С. Б. Кащеев, Ю. М. Ямпольский, А. В. Зализовский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: zaliz@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 16 января 2001 г.

В ходе 5-й Украинской антарктической экспедиции исследована возможность проведения радиоокеанографических измерений параметров взволнованной морской поверхности по сигналам КВ вещательных станций. Эксперименты проведены на борту научно-исследовательского судна “Горизонт”. В спектрах сигналов, рассеянных морской поверхностью, зарегистрированы брэгговские максимумы первого порядка. Построена модель, включающая “подсветку” морской поверхности ионосферной (пространственной) модой, резонансное рассеяние на гравитационной компоненте морского волнения и прием рассеянного сигнала в виде поверхностной волны. Показана возможность азимутальной избирательности за счет частотной селекции. Предложена методика измерения углов места ионосферной волны по частотному сдвигу брэгговских максимумов.

Під час 5-ї Української антарктичної експедиції досліджено можливість проведення радіоокеанографічних вимірювань параметрів морської поверхні, що хвилюється, за допомогою сигналів КХ широкоповних радіостанцій. Експерименти проведено на борту науково-дослідного судна “Горизонт”. У спектрах сигналів, що розсіяні морською поверхнею, зареєстровано бреггівські максимуми першого порядку. Побудовано модель, що розглядає “підсвічення” морської поверхні іоносферною (просторовою) модою та резонансне розсіяння на гравітаційній компоненті морського хвилювання і прийом розсіяного сигналу у вигляді поверхневої хвилі. Показано можливість азимутальної селекції за рахунок частотної селекції. Запропоновано методику вимірювання кутів місця іоносферної хвилі за частотним зсувом бреггівських максимумів.

Введение

Бесконтактные исследования параметров морского волнения с использованием радиолокационных станций УКВ и КВ диапазонов были начаты под руководством С. Я. Брауде в Академии наук Украины около полувека назад [1]. Исследовались амплитудно-временные и спектральные характеристики обратно рассеянного сигнала. В полученных спектрах было обнаружено два ярко выраженных пика, симметрично смещенных относительно несущей частоты. Известное физическое объяснение

этих максимумов предложил Кромби [2]: основная энергонесущая компонента эхо-сигнала формируется за счет резонансного обратного рассеяния на морских волнах, длина которых в два раза меньше длины облучающих радиоволн. Пики получили название максимумов первого порядка или, по аналогии с оптикой, брэгговских. Поскольку к КВ диапазону относятся радиоволны длиной $\lambda = 10 \div 100$ м, ответственными за рассеяние первого порядка являются морские волны длиной $\Lambda = 5 \div 50$ м, т. е. гравитационные

волны. Дисперсионное уравнение однозначно связывает скорость и длину морских волн, а доплеровский сдвиг максимума рассеянного сигнала $F_{B\pm}$ относительно несущей частоты f записывается в виде:

$$F_{B\pm} = \pm\sqrt{g/\pi\lambda} = \pm\sqrt{g/2\pi\Lambda}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, знак плюс соответствует движению рассеивающих волн к наблюдателю, а знак минус – от наблюдателя.

В результате комплексных статистических исследований были установлены связи между состоянием морской поверхности и спектром рассеянного сигнала. Они сводятся к следующему.

В открытом океане амплитуда превалирующего брэгговского максимума при $\lambda \leq 30$ м практически не зависит от интенсивности волнения. Соотношение амплитуд максимумов первого порядка зависит от направления ветра, действующего на рассеивающую площадку. Сдвиг по частоте обоих максимумов первого порядка на одну и ту же величину относительно несущей свидетельствует о наличии в пределах рассеивающей площадки поверхностного течения или ветрового сноса волнения.

Спектр отражений высших порядков несет информацию об интенсивности волнения. Это обусловлено тем, что он формируется в результате взаимодействия с более длинными морскими волнами, чем волны, ответственные за рассеяние первого порядка.

В большинстве известных работ, посвященных радиоокеанографическим исследованиям в КВ диапазоне, применяется однопозиционная схема построения РЛС. Станция может использовать поверхностную электромагнитную волну и размещаться как на берегу [3], так и на судне [4]. Дальность действия РЛС поверхностной волны зависит от рабочей частоты, мощности и, как правило, составляет несколько десятков километров. Если станция размещается на судне, океанографические параметры могут измеряться в открытом море на значительном расстоянии

от берега, причем неконтактные методы можно сопоставлять с визуальными и контактными измерениями и таким образом проводить калибровку и корректировку. Однако в этом случае исследователи сталкиваются с дополнительными проблемами. Они связаны с размещением на судне сравнительно громоздких направленных антенн КВ диапазона и необходимостью устранения влияния на диаграмму направленности многочисленных корабельных металлических надстроек, а также нестабильностей скорости хода и курса судна [4].

Известны также уникальные РЛС КВ диапазона, например, загоризонтные локаторы [5]. Они используют пространственную электромагнитную волну и позволяют получать океанографическую информацию в пределах дальности односкачкового распространения, от сотен до тысяч километров. Однако за счет искажений, вносимых ионосферным каналом, точность определения параметров морского волнения в этом случае уступает точности станций поверхностной волны.

В настоящей работе предложен и рассмотрен гибридный вариант построения двухпозиционной океанографической РЛС КВ диапазона, в котором в качестве передатчика используется вещательная станция, а приемно-обрабатывающий комплекс установлен на судне. В таком варианте совместно используются пространственная электромагнитная волна – для “подсветки” морской поверхности, и поверхностная волна – для приема рассеянного сигнала. Эта схема построения РЛС, будучи значительно проще однопозиционного варианта, установленного на судне, также позволяет совмещать неконтактные и контактные измерения состояния морской поверхности на больших расстояниях от берега. При этом, в отличие от однопозиционного варианта, она в принципе позволяет параллельно исследовать поведение морских волн длиной от 5 до 50 м.

В ходе 5-й Украинской антарктической экспедиции были проведены испытания двухпозиционной РЛС. Приведенные в статье результаты экспериментальных измерений спектра рассеянного морем сигнала демонстрируют работоспособность станции и возмож-

ность измерять с ее помощью некоторые океанографические параметры.

Разработана модель, описывающая спектр рассеянного морем сигнала в двухпозиционном варианте. Сравнение с результатами эксперимента показало качественное совпадение полученных и модельных спектров.

Аппаратура и методика проведения эксперимента

На земном шаре постоянно работают около 6000 вещательных станций КВ диапазона. На волнах длиной от 10 до 50 метров они обеспечивают передачу информации практически по всей поверхности Земли. Спектр излучаемого сигнала в режиме амплитудной модуляции состоит из стабильной по частоте несущей (относительная нестабильность современных КВ станций обычно не более 10^{-7}) и двух расположенных симметрично относительно нее модуляционных полос звуковых частот. Интервал от несущей до нижней модулирующей частоты ($30 \div 50$ Гц в зависимости от особенностей передатчика и характера передачи) является “чистым”. По нашим оценкам уровень шумов передатчика в полосе 0.1 Гц на частотах $5 \div 10$ Гц ниже несущей не менее чем на 60 дБ. Особенности спектра излучения вещательных станций позволяют, после выделения узкополосным фильтром полосы шириной порядка 20 Гц, проводить вблизи несущей спектральный анализ с высоким разрешением, фактически преобразуя псевдослучайное излучение в квазимонохроматическое. Такое преобразование ранее позволило разработать (с участием авторов настоящей статьи) несколько методик квазимонохроматического зондирования ионосферы на односкачковых радиотрассах средней протяженности на частотах ниже, выше и вблизи максимально применимых частот $f_{\text{МПЧ}}$ [6, 7, 8].

Заметим, что в соответствии с (1) наибольший частотный сдвиг берегового максимума первого порядка не превосходит 0.6 Гц для верхней границы КВ диапазона. Многолетние исследования спектральных характеристик

ионосферных сигналов на односкачковых радиолиниях, проводившиеся с участием авторов, показали, что в условиях невозмущенной ионосферы для одномодового режима распространения (мода $1F_2$) характерное уширение несущей не превышает 0.5 Гц на уровне –40 дБ. Следовательно, для локации морской поверхности можно использовать квазимонохроматический режим излучения вещательных станций, выделяя приемным устройством узкую полосу вблизи несущей частоты.

Экспериментальный приемно-обрабатывающий комплекс двухпозиционной РЛС был установлен на научно-исследовательском судне “Горизонт”. Он состоял из антенно-фидерной системы, собственно когерентного доплеровского приемника и системы обработки. Антенна комплекса обеспечивала прием рассеянного морской поверхностью сигнала, который распространялся под скользящими углами над хорошо проводящей поверхностью в виде вертикально поляризованной электромагнитной поверхностной волны. В качестве антенны был использован несимметричный вертикальный вибратор, роль заземления выполнял корпус судна. Применение слабонаправленной антенны, с одной стороны, значительно упрощает комплекс, с другой – не позволяет осуществлять азимутальную селекцию. Ниже будет показано, что при двухпозиционной схеме построения РЛС угловая селекция может быть осуществлена за счет частотного разрешения.

В качестве приемного устройства использовался стандартный связной приемник с высокостабильными гетеродинами (относительная нестабильность не более 10^{-8}), позволявший осуществлять прием на всех частотах КВ диапазона и проводить спектральный анализ с высоким частотным разрешением. Сигнал второй промежуточной частоты приемника дополнительно преобразовывался на низкую частоту ($5 \div 10$ Гц) и после прохождения через полосовой фильтр с диапазоном $0.2 \div 20$ Гц поступал на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Темп оцифровки составлял 40 Гц [6].

С выхода АЦП данные поступали на компьютер типа Pentium-II. Система регистрации и специализированная программа обработки

данных позволяли в реальном времени визуализировать сам сигнал и его мгновенные спектры и таким образом давали возможность оператору в реальном времени анализировать текущие характеристики принимаемого сигнала. Пакет многофункциональных прикладных программ был разработан ранее в Радиоастрономическом институте НАН Украины и использован в многочисленных ионосферных экспериментах [6].

Экспериментальное апробирование двухпозиционной РЛС было осуществлено во время морской части 5-й Украинской антарктической экспедиции (февраль – май 2000 г.). Протяженность маршрута (г. Севастополь – Украинская антарктическая станция “Академик Вернадский”) составляла более 10000 морских миль. На период эксперимента по данным, предоставленным Международным союзом электросвязи, были выбраны КВ вещательные станции, для которых выполнялись условия односкачкового распространения радиоволн между судном и передатчиком. Из всей совокупности радиотрасс отбирались такие, для которых рабочая частота наиболее близка к $f_{МПЧ}$ слоя F_2 . Приемник настраивался на выбранную рабочую частоту, и визуально оценивалось поведение спектра принятого зондирующего сигнала. Если спектр несущей удовлетворял необходимым условиям – был одномодовым и достаточно стабильным по частоте и амплитуде – принималось решение о проведении радиоокеанографических измерений. Общее время регистраций рассеянного морской поверхностью сигнала превышает 100 часов. Все записи сопровождалось измерениями направления и скорости ветра и интенсивности волнения моря с помощью метеостанции, установленной на судне. Регистрировались также курс и скорость движения корабля.

Результаты экспериментов

Форма спектра рассеянного сигнала зависит от целого ряда факторов: рабочей частоты вещательной станции, скорости и курса судна относительно линии визирования, направления и силы ветра, наличия на рассеивающей пло-

щадке поверхностных течений и т. д. В настоящей работе подробному анализу и интерпретации будут подвергнуты только те данные, которые были получены во время стоянок в открытом море. Поскольку судно двигалось практически непрерывно, количество таких измерений сравнительно невелико – 3 сеанса (общей длительностью порядка 5 часов), записанных 17 марта 2000 г. во время продолжительной якорной стоянки в точке с координатами 34.19° ю. ш. и 54.30° з. д. В качестве зондирующего передатчика использовалась станция SGO (г. Сантьяго, 33.27° ю. ш. и 70.41° з. д.). Измерения проводились на двух частотах $f_1 = 21.5$ МГц и $f_2 = 21.55$ МГц. Протяженность радиотрассы передатчик – приемник составляла 1520 км. Схема эксперимента (в горизонтальной плоскости) приведена на рис. 1. На рисунке приняты обозначения: $\vec{k}_{гор}$ – проекция направления распространения зондирующего сигнала на горизонтальной плоскости, \vec{k}_r – направление распространения принимаемого рассеянного сигнала под одним из азимутальных углов α , \vec{V}_Λ – направление скорости распространения резонансно рассеивающих морских волн, $\vec{V}_в$ – направление скорости ветра во время эксперимента, Λ – длина резонансно рассеивающих морских волн.

Типичный фрагмент измерений текущих амплитудных спектров рассеянного сигнала в режиме водопада при $f_1 = 21.5$ МГц приведен на рис. 2. По горизонтальной оси отложена частота в герцах, а по вертикали – время от начала сеанса в секундах. Спектры сняты с разрешением около 0.04 Гц (длительность одной реализации 25.6 сек). На спектрограмме отчетливо просматриваются 3 максимума. Центральный соответствует “перенесенному” на частоту около 10 Гц зондирующему ионосферному сигналу f_i (сигналу “подсветки”). Два других сдвинуты относительно зондирующего сигнала на частоту, близкую к брэгговской при однопозиционной локации (см. формулу (1)). Все три пика медленно синхронно флуктуируют по частоте. Левый максимум превалирует по амплитуде, что связано с погодными условиями в момент эксперимента: ветер дул под

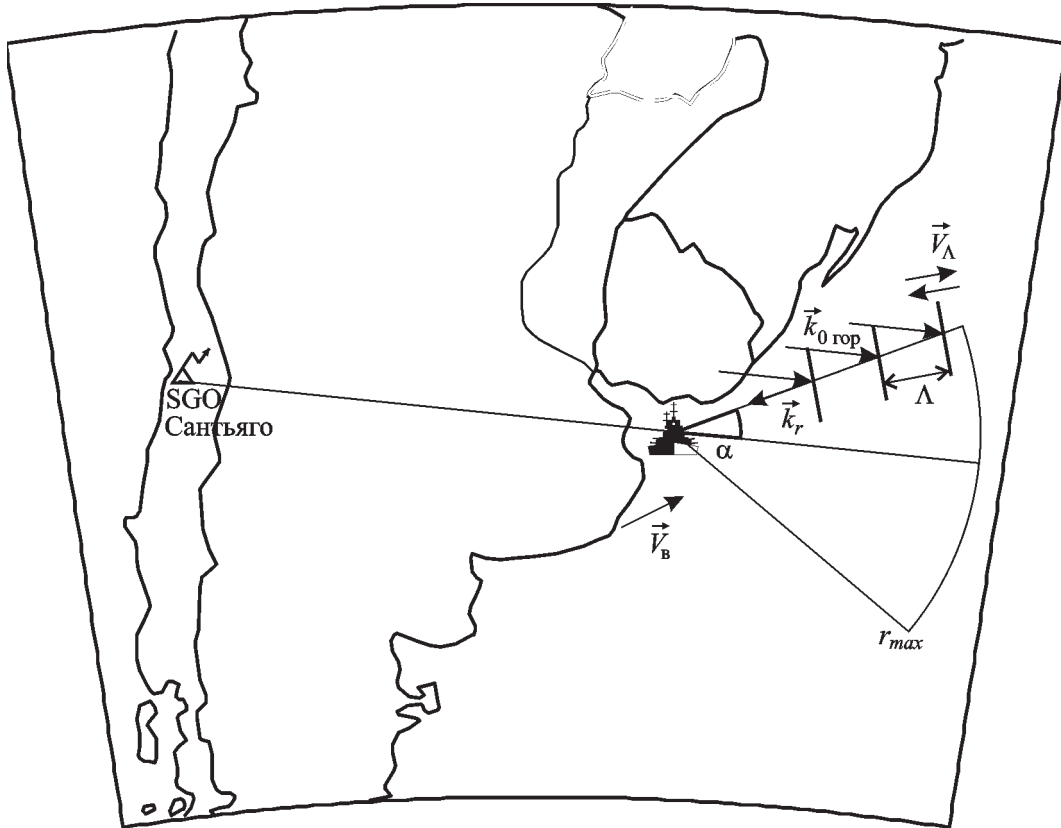


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

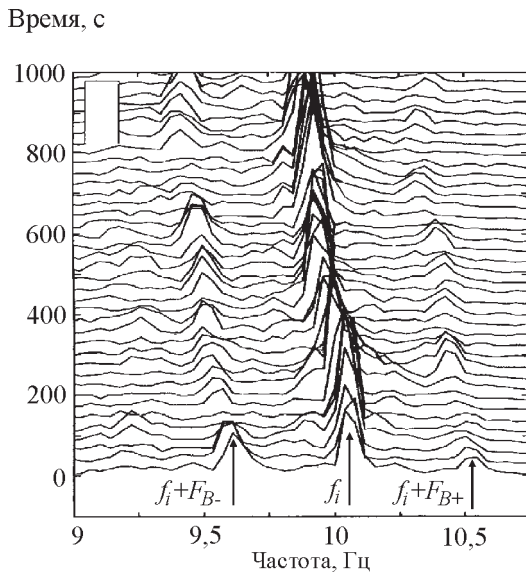


Рис. 2. “Водопад” амплитудных спектров. Частотное разрешение ≈ 0.04 Гц. Начало сеанса 17 марта в 18:42 UT

углом около 45° к трассе передатчик-приемник (см. \vec{V}_B на рис. 1), скорость ветра в начале эксперимента составляла ~ 10 м/с, а в конце – $3 \div 4$ м/с.

Для частоты 21.5 МГц максимумы первого порядка, согласно формуле (1), должны отстоять друг от друга на 0.946 Гц. Обратим внимание на то, что в эксперименте эта величина несколько меньше. Для уточнения величины частотного разнеса между брэгговскими максимумами были выделены отдельные участки реализаций, в которых хорошо проявляются оба спектральных пика. Усредненное за 102.4 с значение разности брэгговских частот составляет 0.935 Гц. Различие между расчетным и измеренным частотным сдвигом обусловлено падением ионосферного сигнала “подсветки” на морскую поверхность не под нулевым углом места ϵ .

Легко показать, что угол места связан с частотами резонансных максимумов и рабочей частотой РЛС f следующим соотношением:

$$\varepsilon = \arccos \left(\frac{\pi c (F_{B+} - F_{B-})^2}{2gf} - 1 \right), \quad (2)$$

где c – скорость света.

Расчитанное по формуле (2) значение ε составляет 14.9° . В рамках лучевой модели распространения оценка ε (для действующей высоты отражения 250 км односкачковой моды $1F_2$) составляет 14.1° . Из этого результата следует, что при наличии в спектре рассеянного сигнала двух ярко выраженных брэгговских максимумов по их частотам может быть определен угол места ионосферного луча “подсветки”. Таким образом, морская поверхность играет роль антенной решетки. Пространственное (угловое) разрешение за счет регулярного движения резонансных компонент морского волнения преобразуется в частотное. В этом плане двухпозиционная система зондирования морской поверхности может играть роль морского интерферометра. По нашим оценкам при работе в верхней части КВ диапазона на односкачковых трассах малой и средней протяженности возможно реализовать угломестное разрешение порядка 2° .

Некоторая асимметрия брэгговских максимумов относительно частоты ионосферного сигнала объясняется ветровым сносом поверхностного слоя воды. На рис. 2 частотная асимметрия отрицательна и составляет величину порядка 0.01 Гц, что соответствует удалению поверхностного слоя с радиальной составляющей скорости 0.07 м/с. Как уже отмечалось, во время эксперимента скорость ветра уменьшалась, асимметрия по частоте становилась менее выраженной. К окончанию записи максимумы были практически симметричны. В связи с этим сдвиг был идентифицирован как ветровой снос, а не как поверхностное течение.

Интерпретация и численное моделирование

Расчитаем спектр рассеянного морем ионосферного сигнала. Пространственный спектр морского волнения будем рассматривать в модели Филлипса и считать для упрощения формул изотропным [9].

Предположим, что передатчик, “освещающий” ионосферной волной некоторую площадку вблизи судна, располагается от него бесконечно далеко, а само судно неподвижно и мало, так что можно пренебречь его влиянием на близлежащую морскую поверхность. Будем считать вклад нерезонансного рассеяния в суммарную энергию рассеянного сигнала несущественным. В соответствии с условиями Вульфа-Брэгга длина Λ морских волн, которые дают максимальный вклад в поле в точке приема, определяется уравнением:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)},$$

где θ – угол между волновыми векторами падающей и рассеянной радиоволн.

Введем декартову систему координат таким образом, чтобы приемник находился в точке (0, 0, 0), ось x была направлена вдоль линии передатчик-приемник, ось y – перпендикулярно к оси x в горизонтальной плоскости, а ось z – вертикально вниз. Разложим волновые векторы по ортогональным компонентам. Вектор волны, падающей на поверхность моря представляется в виде:

$$\vec{k}_0 = \vec{n}_x k_0 \cos \varepsilon + \vec{n}_z k_0 \sin \varepsilon,$$

где \vec{n}_x , \vec{n}_z – единичные векторы вдоль осей x и z соответственно; $k_0 = \frac{2\pi f}{c}$.

Волновой вектор принимаемого рассеянного поля лежит в горизонтальной плоскости и записывается в виде:

$$\vec{k}_r = -\vec{n}_x k_0 \cos \alpha - \vec{n}_y k_0 \sin \alpha,$$

где α – азимутальный угол, отсчитываемый от оси x против хода часовой стрелки; \vec{n}_y – орт оси y . Вектор рассеяния $\vec{k}_s = \vec{k}_r - \vec{k}_0$ можно представить следующим образом:

$$\vec{k}_s = -\vec{n}_x k_0 (\cos \alpha + \cos \varepsilon) - \vec{n}_y k_0 \sin \alpha - \vec{n}_z k_0 \sin \varepsilon.$$

Поскольку вектор фазовой скорости морской волны лежит в горизонтальной плоскости, нас будет интересовать лишь горизонтальная проекция вектора рассеяния \vec{k}_s . В резонансном рассеянии первого порядка будут принимать участие волны длиной

$$\Lambda = \frac{2\pi}{|\vec{k}_{s\text{гор}}|} \quad (\vec{k}_{s\text{гор}} - \text{проекция вектора рассеяния на горизонтальную плоскость}).$$

Кроме того, резонансно рассеивать будет лишь та пространственная гармоника морской поверхности, волновой фронт которой перпендикулярен горизонтальной проекции вектора рассеяния. Тогда длина морской волны Λ может быть выражена следующим образом:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \cos^2 \varepsilon + 2 \cos \alpha \cos \varepsilon}}.$$

Фазовая скорость гравитационной морской волны выражается формулой [2]:

$$V_\Lambda = \sqrt{\frac{g\Lambda}{2\pi}}. \quad (3)$$

Доплеровский сдвиг частоты сигнала, рассеянного произвольной точкой морской поверхности, будет определяться следующим соотношением:

$$F_D = \frac{1}{2\pi} \vec{k}_s \vec{V}_\Lambda. \quad (4)$$

Исходя из условия коллинеарности \vec{V}_Λ и $\vec{k}_{s\text{гор}}$, а также учитывая (3) и (4), зависимость частотного сдвига резонансно рассеянного сигнала от азимутального угла можно выразить следующей формулой:

$$F_D = \pm \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} (1 + \cos^2 \varepsilon + 2 \cos \alpha \cos \varepsilon)^{1/2}. \quad (5)$$

Используя (5), получим в явном виде зависимость азимутального угла рассеянной электромагнитной волны от доплеровского сдвига частоты:

$$\alpha(F_D) = \pm \arccos \frac{(2\pi F_D)^4 - g^2 k_0^2 (1 + \cos^2 \varepsilon)}{2g^2 k_0^2 \cos \varepsilon}. \quad (6)$$

Дифференциал функции $\alpha(F_D)$ имеет вид:

$$d\alpha = \pm \frac{32\pi^4 F_D^3}{g^2 k_0^2 \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{8\pi^4 F_D^4}{g^2 k_0^2 \cos \varepsilon} - \frac{1 + \cos^2 \varepsilon}{2 \cos \varepsilon} \right)^2}} dF_D. \quad (7)$$

Предположим, что мощность dP рассеянного сигнала, приходящего из элементарного сектора $d\alpha$, не зависит от α . В этом случае

$$dP \sim |d\alpha|,$$

и модуль $\left| \frac{d\alpha}{dF_D} \right|$ пропорционален искомой спектральной плотности средней мощности рассеянного сигнала. Таким образом, форма спектра мощности сигнала, рассеянного морем и принятого на неподвижном судне, будет определяться выражением:

$$B(F_D) \sim \frac{|F_D^3|}{\sqrt{1 - \left(\frac{8\pi^4 F_D^4}{g^2 k_0^2 \cos \varepsilon} - \frac{1 + \cos^2 \varepsilon}{2 \cos \varepsilon} \right)^2}} \quad (8)$$

Из анализа (6), (8) следует однозначная связь между азимутальной и частотной зависимостями рассеяния. На каждой частоте F_D (или в элементарной полосе частот) вклад в рассеяние вносят резонансные морские волны, соответствующие азимутальным углам $\pm \alpha$ (или элементарным азимутальным секторам). Отражения первого порядка от морской поверхности, приходящие под азимутальными углами, отличными от нуля, формируют спектральные составляющие между основными максимумами.

Следует заметить, что в рамках предлагаемой модели в резонансном рассеянии не будет принимать участие сектор поверхности моря, ограниченный азимутальными углами α_c ,

$$\alpha_c = \pi \pm \arccos \left(\frac{1 + \cos^2 \varepsilon}{2 \cos \varepsilon} - \frac{c^2}{2 \Lambda_{\max}^2 f_0^2 \cos \varepsilon} \right), \quad (9)$$

при выполнении условия:

$$\frac{2\pi}{|\vec{k}_{\text{гор}}|} > \Lambda_{\max},$$

здесь Λ_{\max} – максимальная длина гравитационной волны в модели Филлипса. Отметим, что величина “темного” сектора будет определяться скоростью ветра.

На рис. 3, а приведен расчетный амплитудный спектр принимаемого сигнала. Он смоделирован для изотропной модели морского волнения с максимальной длиной волны 50 м. Значения спектра вычислены с тем же частотным разрешением, что и в эксперименте. Для этого по формуле (8) оценивалась мощность в соответствующих частотных интервалах, а за-

тем из полученных значений извлекался квадратный корень. Точке с нулевым доплеровским сдвигом соответствует ионосферный сигнал, его амплитуда условно принята равной единице. Соотношение амплитуд спектрального максимума рассеянного сигнала и сигнала “подсветки” определялось по экспериментальным данным.

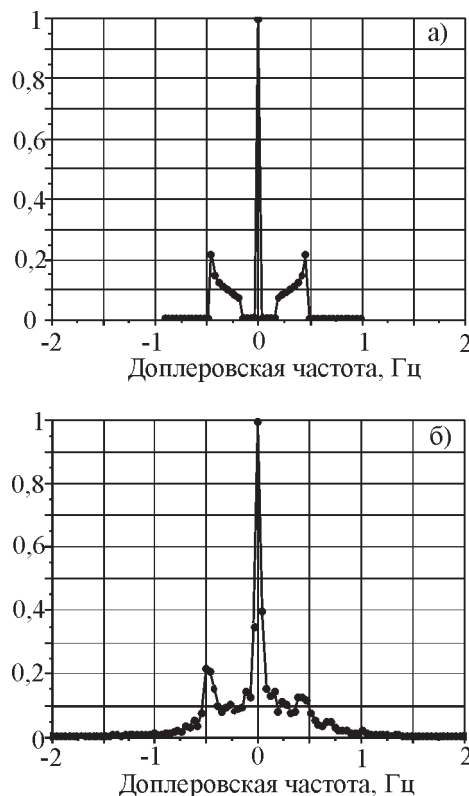


Рис. 3. Модельный (а) и экспериментальный (б) нормированные амплитудные спектры рассеяния пробного КВ сигнала морской поверхностью. Частота 21.5 МГц, время накопления 25.6 с. Для модельного спектра угол места $\varepsilon = 14^\circ$, $\Lambda_{\max} = 50$ м

На рис. 3, б приведен экспериментальный амплитудный спектр принятого сигнала, усредненный по 12 реализациям. Можно отметить качественное совпадение результатов моделирования и эксперимента. В обоих случаях имеются симметричные пики (как было отмечено выше, небольшая асимметрия в экспериментальном спектре объясняется ветро-

вым сносом). Различная амплитуда спектральных пиков в эксперименте обусловлена анизотропным спектром морского волнения в реальных условиях.

Анизотропию углового спектра можно учесть при моделировании. При этом частоты максимумов остаются постоянными, но несколько изменяется соотношение амплитуд между ними. Учет углового спектра также не влияет на точность измерений ветрового сноса и угла места сигнала “подсветки”. Таким образом, рассмотрение упрощенной изотропной модели не приводит к потере общности результатов.

Обратим внимание на существование спектральных составляющих между основными максимумами спектров. Как показано выше, они обусловлены приемом рассеянного сигнала под различными азимутальными углами. Отсутствие составляющих вблизи несущей на рис. 3, а объясняется “темным” сектором (см. формулу (9)). Наличие в этом месте спектральных составляющих на рис. 3, б обусловлено ионосферными искажениями зондирующего сигнала [6].

Оценим удельную эффективную площадь рассеяния морской поверхности. Для этого рассмотрим энергетические соотношения, характеризующие работу двухпозиционной РЛС. Уравнение радиолокации для рассматриваемой схемы построения РЛС может быть записано в виде:

$$dP_{\text{рас}} = \frac{P_{\text{п}} G_{\text{п}}}{4\pi R_{\text{и}}^2} \frac{\sigma_0 dS}{4\pi R_{\text{м}}^2} A, \quad (10)$$

где $dP_{\text{рас}}$ – мощность сигнала, рассеянного элементарной площадкой морской поверхности dS , на входе приемника; $P_{\text{п}}$ – мощность передатчика вещательной станции, используемой в эксперименте; $G_{\text{п}}$ – коэффициент усиления антенной системы вещательной станции в направлении местонахождения приемника (судна); $R_{\text{и}}$ – длина ионосферной трассы от передатчика до “освещаемой” поверхности; σ_0 – удельная эффективная поверхность рассеяния; $R_{\text{м}}$ – расстояние от площадки dS до приемника; A – эффективная площадь приемной антенны (для применяемой в эксперименте ненаправленной штыревой антенны она не зависит от азимута).

Учитывая, что $R_{\text{и}} \gg R_{\text{м}}$, для мощности сигнала подсветки на входе приемника $P_{\text{под}}$ можно записать:

$$P_{\text{под}} = \frac{P_{\text{п}} G_{\text{п}}}{4\pi R_{\text{и}}^2} A.$$

В эксперименте значение отношения мощности рассеянного сигнала на частоте левого спектрального пика $P_{\text{в}}$ в полосе частот $\Delta f = 0.02$ Гц к мощности сигнала “подсветки” составило $C = -16$ дБ. (Результат получен усреднением более 100 мгновенных спектров.) Из формулы (5) следует, что сигнал в этой полосе частот формируется за счет рассеяния из сектора, ограниченного азимутальными углами $\alpha = \pm 45^\circ$. Используя (10), оценим величину $P_{\text{в}}$:

$$P_{\text{в}} = \frac{P_{\text{п}} G_{\text{п}} \sigma_0}{4\pi R_{\text{и}}^2} A \iint_S \frac{dS}{4\pi R_{\text{м}}^2} = \frac{P_{\text{п}} G_{\text{п}}}{4\pi R_{\text{и}}^2} A \frac{\sigma_0}{8} \ln \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}},$$

где r_{min} – нижний предел интегрирования, r_{max} – дальность прямой видимости для приемной антенны РЛС (такая приблизительная оценка размеров рассеивающего сектора допустима, поскольку в верхней части КВ диапазона волны дифрагируют в область тени со значительным затуханием). Положим $r_{\text{max}} = 25$ км; по аналогии с [9] $r_{\text{min}} = 3\lambda$.

Таким образом,

$$C = \frac{\sigma_0}{8} \ln \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}},$$

и $\sigma_0 \approx 0.03$. Этот результат несколько превосходит значение, рассчитанное Барриком ($\sigma_0 = 0.02$ [10]) для однопозиционного обратного рассеяния под скользящими углами. Возможно, полученное нами значение σ_0 обусловлено ненулевым углом места луча “подсветки”.

Выводы

Экспериментально показана работоспособность океанографической двухпозиционной доплеровской РЛС КВ диапазона, в которой

в качестве сигнала передатчика используется излучение вещательной станции, “освещающей” морскую поверхность ионосферной волной. Рассеянный морем сигнал регистрируется и анализируется приемно-обрабатывающим комплексом, установленным на судне.

Рассмотренная двухпозиционная РЛС позволяет измерить направление ветра и радиальную составляющую скорости поверхностного течения. Кроме этого, с помощью РЛС можно оценить угловой спектр морского волнения.

В локаторе может быть применена ненаправленная или слабо направленная приемная антенна, так как селекцию по азимуту можно отчасти заменить частотной селекцией. В связи с этим представляется возможным установить автоматический многочастотный приемный пункт двухпозиционной РЛС КВ диапазона на буре для периодической выдачи информации по каналу связи через ИСЗ.

Анализируя спектр рассеянного сигнала, можно также вычислить угол места волны “подсветки”. Имеется возможность регистрации сравнительно медленных флуктуаций этого угла, обусловленных процессами в ионосфере. Тем самым океанографические исследования могут быть совмещены с ионосферными.

В заключение авторы благодарят Украинский антарктический центр за предоставленную возможность участвовать в морской экспедиции и команду НИС “Горизонт” за содействие в проведении экспериментов. Мы также признательны коллегам из отдела ионосферного распространения радиоволн Радиоастрономического института НАН Украины В. С. Белею, А. В. Колоскову и В. Г. Галушко, готовившим аппаратуру и программное обеспечение для обработки данных, и сотруднику Центра радиофизического зондирования Земли НАН и НКА Украины И. А. Калмыкову за помощь в проведении измерений. Мы благодарны сотрудникам Международного союза электросвязи, предоставившим нам информацию о режимах вещания КВ станций.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины (НИР “Антарктида”, 2М/118), а также при частичной поддержке УНТЦ в рамках проекта №827.

Литература

1. Радиоокеанографические исследования морского волнения. Под ред. С. Я. Брауде. Киев, Изд. АН УССР, 1962, 116 с.
2. D. D. Crombie. *Nature*. 1955, **175**, pp. 681-682.
3. K.-W. Gurgel, H.-M. Essen, F. Schirmer. *IEEE J. Oceanic Eng.* 1986, **OE-11**, pp.251-257.
4. K.-W. Gurgel. *L'ONDE ELECTRIQUE*. 1994, **74**, No. 5, pp. 54-59.
5. S. J. Anderson. *IEEE J. Oceanic Eng.* 1986, **OE-11**, pp. 158-163.
6. V. S. Beley, V. G. Galushko, Y. M. Yampolski. *Radio Sci.* 1995, **30**, No. 6, pp. 1739-1752.
7. V. G. Bezrodny, P. V. Ponomarenko, Y. M. Yampolski. *Radio Sci.* 1997, **32**, No. 1, pp.219-229.
8. V. G. Galushko, Y. M. Yampolski. *Radio Sci.* 1996, **31**, No. 5, pp. 1109-1118.
9. S. J. Anderson, I. M. Fuks, J. Praschifka. *Waves in random media*. 1998, **8**, pp. 283-302.
10. D. E. Barrick. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1972, **AP-20**, pp. 2-10.

Bistatic Sounding of the Sea Surface by Signals from HF Broadcasting Stations

S. B. Kashcheev, Yu. M. Yampolski,
and A. V. Zalizovski

During the 5-th Ukrainian Antarctic expedition the possibility was investigated of performing remote measurements of sea surface parameters with the use of signals from HF broadcasting radios. The experiments were carried out on board of the research vessel “Gorizont”. First order Bragg peaks were recorded in the spectra of the HF signals scattered from the sea. The model used for interpretation involves illumination of the sea surface by the spatial mode, resonant scattering of the ground mode from the sea gravity wave component, and reception of the scattered signal as the surface wave. The possibility of angular (azimuth) selection owing to the frequency resolution has been demonstrated. A method of measuring the elevation angle of arrival of the ionospheric wave per the frequency shift of Bragg peaks is proposed.