

УДК 621.396.967

РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВО ВРЕМЯ 7-ОЙ УКРАИНСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ

А.С. Кашеев¹, С.Б. Кашеев¹, А.В. Колосков¹, И.И. Пикулик¹, А.С. Брюховецкий², Ю.М. Ямпольский¹

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Краснознамённая, 4. E-mail: kascheev@rian.kharkov.ua

² Институт радиофизики и электроники НАН Украины, 61085, Украина, г. Харьков, ул. Академика Прокура, 12. E-mail: apertura@ire.kharkov.ua

Реферат: Приводится методика измерений и результаты исследований радиосигналов коротковолновых вещательных станций, отраженных от ионосферы и рассеянных взволнованной поверхностью моря; эксперименты выполнены в ходе морской части 7-ой Украинской антарктической экспедиции на борту научно-исследовательского судна “Горизонт”. Теоретически исследуется спектр электромагнитных волн, рассеянных морской поверхностью, рассматривается случай линейной всенаправленной антенны, расположенной вблизи освещаемой падающим полем морской поверхности, учитывается конечная проводимость морской воды, скользящее распространение рассеянных волн. Проведено сопоставление экспериментальных спектров рассеяния с модельным, показано качественное совпадение теории и эксперимента. Рассмотрены возможные физические причины, объясняющие особенности спектральной структуры сигналов. Сделан вывод о возможности проведения океанографических исследований с использованием излучения вещательных станций.

Radio sounding of the sea surface during 7-th Ukrainian Antarctic expedition by A. Kashcheyev, S. Kashcheyev, A. Koloskov, I. Pikulik, A. Bryuhovetsky, Yu. Yampolsky

Abstract: The paper presents measurement techniques and results of studying HF radio signals from broadcasting stations that are reflected from the ionosphere and scattered by a rough sea surface. The experiments were carried out during the 7th Ukrainian Antarctic expedition on board the research vessel “Horizont”. The paper considers the theoretical first-order perturbation spectrum of electromagnetic waves scattered by the sea surface. The case of a linear non directional vertical antenna placed near the surface illuminated by an incident field is discussed, with account of the finite conductivity of the sea water, small grazing angles of the scattered waves and currents on the sea surface. The experimental spectra are compared with simulated results. A qualitative agreement between theory and experiment has been found, and possible physical reasons for specific features of the signal spectrum are discussed. The feasibility of oceanographic measurements with the use of radiation from broadcasting radios has been confirmed.

Key words: Radio waves, sea surface, wave scattering, gravity waves, spectra.

1. Введение

Экспериментальные и теоретические исследования радиосигналов коротковолнового диапазона, рассеянных взволнованной поверхностью моря, начаты более полувека назад. За это время было дано физическое объяснение наблюдаемых особенностей спектров сигналов и показано, что они связаны с состоянием морской поверхности. В результате были созданы радиолокационные станции, которые позволяют неконтактным способом измерять параметры морского волнения. В то же время на земном шаре постоянно работает более 5000 вещательных радиостанций КВ диапазона, облучающих практически всю поверхность Земли. Первые попытки авторов использовать это излучение были предприняты во время морского рейса 5-ой Украинской антарктической экспедиции (УАЭ) (Кашеев и др., 2000).

Отражаясь от ионосферы, радиоизлучение вещательной станции “освещает” морскую поверхность и находящийся на судне приёмный комплекс, оборудованный всенаправленной антенной. Он одновременно принимает ионосферный сигнал подсветки и сигнал, рассеянный поверхностью моря. Спектр сигнала подсветки состоит из несущей частоты и двух полос звуковых частот, симметрично отстоящих от несущей на несколько десятков герц. Благодаря таким особенностям спектра имеется возможность, выделив с помощью фильтра узкую

полосу, “преобразовать” случайный модулированный сигнал в монохроматический. Высокая стабильность современных передающих устройств позволяет в дальнейшем анализировать вариации несущей частоты и спектральные компоненты вблизи неё, обусловленные движущимися ионосферными неоднородностями и резонансным рассеянием на гравитационной компоненте морского волнения. Таким образом, имеется техническая возможность использовать неспециальное излучение для радиодиагностики ионосферы (Галушко, 1984) и задач радиоокеанографии на значительной части поверхности Земли.

Первые экспериментальные результаты радиозондирования с использованием неспециального излучения были интерпретированы в рамках упрощенной модели рассеяния. Тем не менее, они показали перспективность такого метода дистанционной диагностики состояния морской поверхности. Получило экспериментальное подтверждение также предположение о возможности определения угла падения сигнала ионосферной подсветки по частотному сдвигу максимумов в спектре рассеянного сигнала (Кашеев и др., 2000).

Целью данной работы является интерпретация новых экспериментальных данных в рамках разработанной строгой теоретической модели рассеяния.

2. Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования, представленные в работе, были проведены во время морской части 7-ой УАЭ по маршруту г. Севастополь – станция Академик Вернадский. Для приема и обработки зондирующих сигналов в РИ НАН Украины был изготовлен приёмный комплекс, построенный по принципу прямого преобразования входного сигнала в низкочастотную область. Роль гетеродина выполнял синтезатор частоты с относительной нестабильностью не более 10^{-9} . В качестве антенны использовался вертикальный несимметричный диполь. Поле в каждой из антенн формировалось суперпозицией ионосферной волны - сигналом подсветки - и компоненты, рассеянной взволнованной морской поверхностью вблизи судна (земная волна). Суммарный сигнал преобразовывался приемником к низкой частоте, отфильтровывался (полоса пропускания фильтра 15 – 30 Гц), усиливался и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя. Дальнейший анализ проводился в цифровом виде. Разработанный пакет прикладных программ позволял в реальном времени проводить спектральный анализ с различным разрешением, визуализировать и накапливать данные.

Для уменьшения влияния многомодовости ионосферного сигнала при измерениях выбирались радиолинии, у которых частота f_p была близка к оптимальной рабочей частоте слоя F_2 . Тем не менее, из-за ионосферных возмущений спектр сигнала подсветки не всегда был пригоден для исследования эффектов морского рассеяния. Характерные примеры различных видов динамических спектров зондирующих сигналов приведены на рис. 1. На рис. 1А представлена спектрограмма стабильного одномодового сигнала. По горизонтальной оси отложено время (UT), а по вертикальной – частота F в герцах. Длина единичной анализируемой реализации составляла около 20 сек. На рис. 1Б приведен динамический спектр также одномодового зондирующего сигнала в случае отражения от крупномасштабного перемещающегося ионосферного возмущения. В случаях А, Б, как правило, удавалось выделить сигнал, рассеянный морем. Наконец, на рис. 1В приведена спектрограмма многолучевого сигнала при наличии фокусировок на френелевых неоднородностях и быстрых флуктуациях частоты. Выделить рассеянный сигнал при многолучевом зондировании, как правило, не удавалось. Таким образом, предварительный этап обработки экспериментальных данных заключался в выборе сигнала подсветки, который удовлетворял следующим условиям: был одномодовым; достаточно сильно превалировал над внешними шумами; вариации сигнала по частоте были достаточно медленными.

Дальнейший теоретический анализ показал, что учёт влияния всех параметров рассеяния (поверхностное течение, высота антенны, движение судна, пространственная неоднородность волнения) значительно усложняет анализ физической модели. Поэтому в

работе рассматриваются только случаи неподвижного наблюдателя в приближении пространственно одномерного волнения.

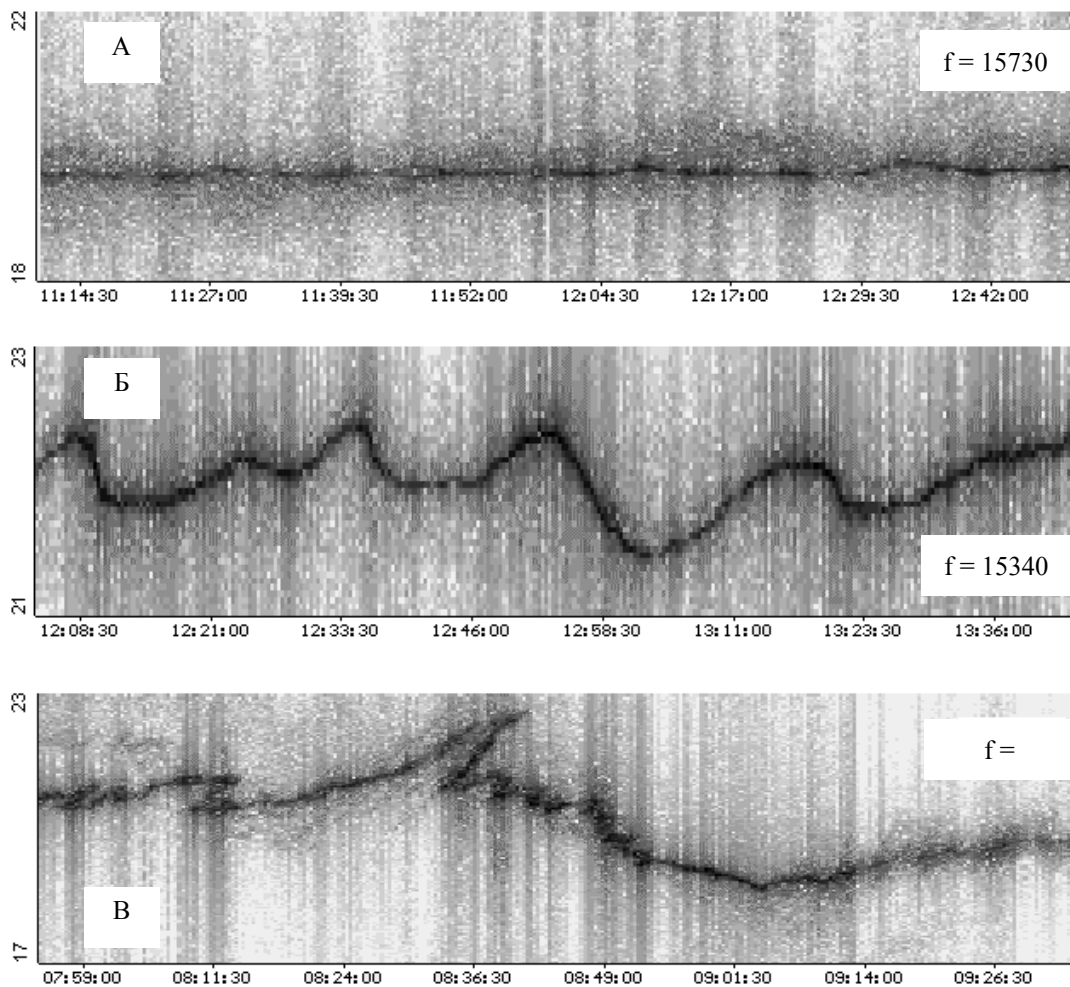


Рис 1. Динамические спектры зондирующего сигнала.

3. Обработка данных рассеяния

Рассмотрим некоторые особенности обработки рассеянных морской поверхностью коротковолновых сигналов.

На рис. 2 приведен фрагмент динамического спектра принятого сигнала во время стоянки судна 17.03.2000 г. в открытой Атлантике. Частота сигнала подсветки $f_p = 21500$ кГц, разрешение по частоте 0,04 Гц. На рисунке хорошо просматриваются три максимума. Центральный максимум соответствует зондирующему сигналу. Параллельно ему постоянно присутствуют два других, соответствующих резонансному рассеянию на морских волнах. Каждый отдельный мгновенный спектр является результатом отражения от случайной шероховатой поверхности. Для получения статистически достоверного результата измерений необходимо проводить последующее некогерентное усреднение. При этом необходимо учитывать, что при усреднении спектра флуктуирующего по частоте сигнала он может заметно расширится, и рассеянный сигнал на этом фоне не будет обнаружен. К тому же, при времени усреднения более 20-30 мин на результатах может сказываться нестационарность морского

волнения (Wu, 1969). Поэтому при обработке тщательно выбиралось время когерентной и последующей некогерентной обработки принятого сигнала.

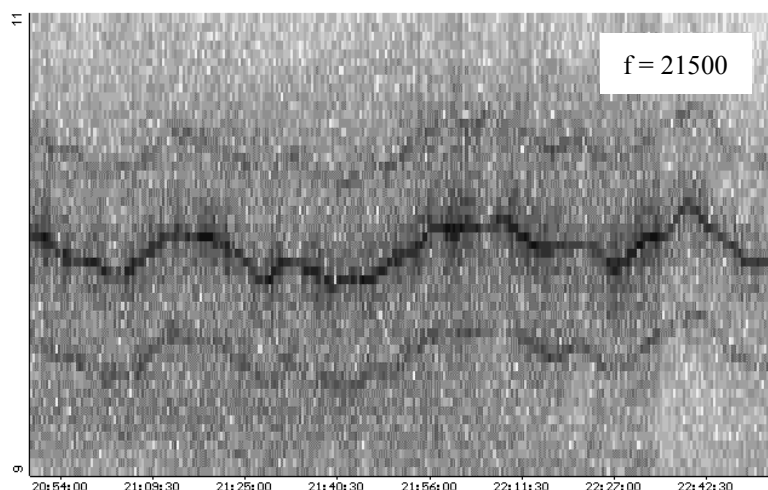


Рис. 2. Динамический спектр принятого сигнала.

Для компенсации сравнительно медленного частотного дрейфа ионосферного сигнала был разработан специальный алгоритм обработки. Суть его состояла в том, что усреднение спектральной плотности принятого сигнала проводилось при фиксированных расстройках относительно текущего максимума спектра ионосферного сигнала.

Вообще говоря, этот прием не является строго обоснованным, так как ионосферный сигнал в точке расположения приемной антенны может несколько отличаться от сигнала на морской поверхности, формирующей резонансное рассеяние. Но если учесть, что радиус пространственной корреляции ионосферного сигнала при наличии крупномасштабных ПИВ может достигать десятков километров (Beley et al., 1995), а величина эффективно рассеивающей морской поверхности не превосходит 20 километров (Кашеев и др., 2000), применение такого способа усреднения можно считать оправданным.

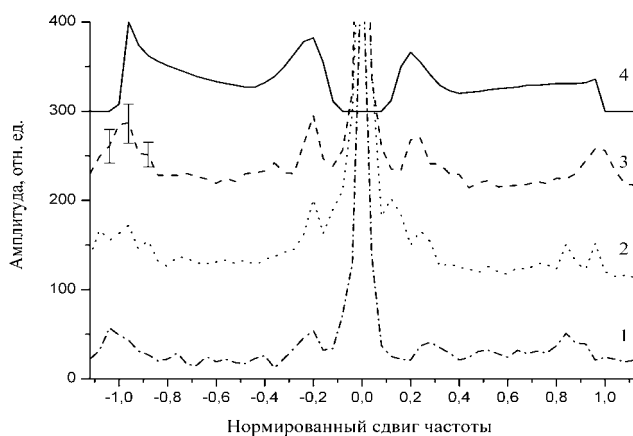


Рис. 3. Усреднённые спектры принятого сигнала.

Результаты обработки принятого сигнала иллюстрируются рис. 3. Измерения были проведены во время стоянки в Атлантическом океане 24 января 2002 г. Скорость ветра в начале измерений была около 10 м/с. Направление ветра варьировалось вблизи угла 60° к линии визирования (линии, соединяющей передатчик и приёмник). Волнение моря составляло 4 балла. Частота вещательной станции SGO (Сантьяго) составляла 21,5 МГц; ей соответствует брэгговская частота $F_B = 0,4728$ Гц.

На рис. 3 приведены три усреднённых с интервалом в один час спектра (кривые 1-3). Каждая кривая является результатом усреднения шести мгновенных спектров. Временной интервал между вычислением усреднённых спектров составлял один час. По горизонтальной оси отложен сдвиг частоты F относительно максимума ионосферного сигнала,

нормированный на брэгговскую частоту. Разрешение по частоте составляло 0,0224 Гц (время когерентного интегрирования 51,2 с). По вертикальной оси отложена амплитуда спектральных составляющих в относительных единицах. Чтобы избежать слияния линий, “нули” отдельных кривых разнесены друг от друга на 100 единиц. Максимальные значения спектра при $F=0$, обусловленные вкладом сигнала подсветки, из-за большого динамического диапазона не показаны.

4. Постановка и методы решения задачи рассеяния

Для интерпретации экспериментальных данных в этом разделе рассмотрено рассеяние радиоволн (в первом порядке теории возмущений) в ближней зоне приемной антенны. Учтены следующие особенности процесса рассеяния: конечная проводимость поверхности; скользящее распространение рассеянных волн; расположение приемной антенны в пределах освещенной площадки морской поверхности; регистрация рассеянного излучения в диапазоне азимутальных углов $0 \div 2\pi$.

Основными уравнениями в теории рассеяния электромагнитных волн являются уравнения Максвелла для напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} поля. В качестве граничных условий для высокопроводящей границы раздела можно взять упрощенные условия импедансного типа (условия Леонтовича):

$$[\vec{N}, \vec{E}] - \eta_0 [\vec{N} [\vec{N}, \vec{H}]] \Big|_{z=\zeta(\vec{r}, t)} = 0,$$

где η_0 - поверхностный импеданс, $|\eta_0| \ll 1$, что оправдано при высокой проводимости σ случайной поверхности $z = \zeta(\vec{r}, t)$;

$$\vec{N} = (\vec{i}_z - \vec{\gamma}) / \sqrt{1 + \gamma^2} \text{ - внешняя нормаль к морской поверхности;}$$

$$\vec{\gamma} = \nabla \zeta(\vec{r}, t); \quad \vec{i}_z \text{ - орт вдоль оси } z.$$

Характерные частоты изменения формы поверхности и других параметров задачи считаем малыми по сравнению с частотой ω_0 электромагнитного поля, что позволяет использовать квазистационарное приближение для её решения. Источник в точке O_1 (вектор к площадке рассеяния \vec{R}_1) приподнят высоко над “средней” поверхностью $z = \langle \zeta(\vec{r}, t) \rangle = 0$ и находится в зоне разделения спектров (Басс и др., 1972), так что $klL / R_1 \ll 1$. Для точки наблюдения O_2 (вектор к площадке рассеяния \vec{R}_2) равенство обратное $klL / R_2 \gg 1$. Здесь l - радиус корреляции неровностей, L - размер освещаемой площадки, $k = \omega_0 / c$ - электромагнитное волновое число.

Среднее поле $\vec{E} = \langle \vec{E} \rangle$, $\vec{H} = \langle \vec{H} \rangle$ определим в борновском приближении (пренебрегая членами порядка $O(\zeta^2)$ в граничном условии).

В первом приближении теории возмущений для флуктуаций электрического $\vec{e} = \vec{e}_\perp + \vec{i}_z e_z$ и магнитного \vec{h} поля, получим граничное условие

$$\vec{e}_\perp - \eta_0 [\vec{i}_z \vec{h}] \Big|_{z=0} = -\vec{B}_1 - \vec{B}_2 \equiv -\vec{B}, \quad (1)$$

$$\text{где} \quad \vec{B}_1 = [\vec{i}_z [\nabla \zeta, \vec{E}]] \Big|_{z=0},$$

$$\vec{B}_2 = -\zeta \left[\vec{i}_z \left[\vec{i}_z \frac{\partial}{\partial z} \vec{E} \right] \right] \Big|_{z=0}.$$

Индекс \perp означает составляющую перпендикулярную к \vec{i}_z .

Ограничимся наиболее интересным для практики случаем вертикальной поляризации. Условие $kL/R_1 \ll 1$ позволяет заменить задание источника поля заданием падающей волны

$$\vec{E}^{(i)} = -G \vec{g}_0 e^{i[\vec{k}_\perp \vec{r} + k_z z - \omega_0 t]}, \quad \vec{H}^{(i)} = G \vec{p}_0 e^{i[\vec{k}_\perp \vec{r} + k_z z - \omega_0 t]}.$$

Здесь $G = (A/R_1) e^{ikR_1}$, $A = const$,

$$\begin{cases} k = \vec{k}_\perp + \vec{i}_z k_z, & \vec{k}_\perp = k \vec{\alpha}_\perp, & k_z = k \alpha_z, & \vec{\alpha} = -\vec{R}_1 / R_1, \\ \vec{p}_0 = [\vec{i}_z, \vec{\alpha}] / |[\vec{i}_z, \vec{\alpha}]|, & \vec{g}_0 = [\vec{\alpha}, \vec{p}_0], & \vec{g} = [\vec{\beta}_0, \vec{p}_0], & \vec{\beta}_0 = \vec{\alpha} - 2\vec{i}_z \alpha_z. \end{cases}$$

Если в эти формулы ввести угол падения θ_0 , то $k_\perp = k \sin \theta_0$, $k_z = -k \cos \theta_0$.

Выберем плоскость падения в качестве плоскости $y = 0$. Тогда

$$\begin{cases} \vec{p}_0 = (0, 1, 0), & \vec{\beta}_0 = (\sin \theta_0, 0, \cos \theta_0), & \vec{\alpha} = (\sin \theta_0, 0, -\cos \theta_0), \\ \vec{g}_0 = (\cos \theta_0, 0, \sin \theta_0), & \vec{g} = (-\cos \theta_0, 0, \sin \theta_0). \end{cases}$$

Среднее рассеянное поле ищем в виде $\begin{cases} \vec{E}^{(s)} \\ \vec{H}^{(s)} \end{cases} = \begin{cases} -\vec{g} \\ \vec{p}_0 \end{cases} \left\{ GR_{\parallel} e^{i(\vec{k}_\perp \vec{r} - k_z z - \omega_0 t)} \right\}$,

где R_{\parallel} - коэффициент отражения, определяемый при подстановке среднего поля, равного сумме падающего и среднего рассеянного в граничное условие:

$$R_{\parallel} = (\cos \theta_0 - \eta_0) / (\cos \theta_0 + \eta_0).$$

Представим флуктуации поля \vec{e} и \vec{h} Фурье - разложениями с амплитудами $\tilde{e}(\vec{\chi}, \omega)$, $\tilde{h}(\vec{\chi}, \omega)$ соответственно

$$\left\{ \vec{e}(\vec{r}, z, t), \vec{h}(\vec{r}, z, t) \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \vec{\chi} \left\{ \tilde{e}(\vec{\chi}, \omega), \tilde{h}(\vec{\chi}, \omega) \right\} e^{i(\vec{\chi} \vec{r} + \chi_z z - \omega t)},$$

где $\chi_z = \sqrt{k^2 - \chi^2}$, $\text{Im} \chi_z \geq 0$.

Для линейной антенны, ориентированной вдоль направления $\vec{p} = \vec{i}_z$, $e_p = (\vec{e} \cdot \vec{p}) = e_z(\vec{r}, z, t)$. С помощью Фурье - разложения для возмущений поверхности:

$$\zeta(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \vec{\chi}' \sum_{s=\pm} \tilde{\zeta}_s(\vec{\chi}') e^{i(\vec{\chi}' \vec{r} - \omega' t)} \delta[\omega' - \tilde{\Omega}_s(\vec{\chi}')],$$

где $\tilde{\Omega}_s(\vec{\chi} - \vec{k}_\perp)$ - закон дисперсии колебаний поверхности с учетом поверхностного течения (Монин и др., 1985), из граничных условий (1) определим

$$\tilde{e}_z(\vec{\chi}, \omega) = D(\vec{\chi}) \sum_{s=\pm} \tilde{\zeta}_s(\vec{\chi} - \vec{k}_\perp) \cdot \delta[\omega - \omega_0 - \tilde{\Omega}_s(\vec{\chi} - \vec{k}_\perp)],$$

где

$$D(\vec{\chi}) = -[iG / (\chi_z + k\eta)] \left\{ \vec{\chi}(\vec{\chi} - \vec{k}) [\vec{g}_{0z} + R_{\parallel} \vec{g}_z] + k_z (\vec{\chi} \cdot [\vec{g}_0 - R_{\parallel} \vec{g}]) \right\}.$$

Образовав временную корреляционную функцию $B(\tau)$ сигнала $e_z(\vec{r}, z, t)$, можно вычислить энергетический спектр временных флуктуаций сигнала

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau e^{i\omega\tau} \int \int d^2 \vec{\chi}' \frac{1}{2} |D(\vec{\chi}')|^2 \sum_{s'=\pm} \tilde{W}_{s'}(\vec{\chi}' - \vec{k}_{\perp}) \cdot e^{i(\vec{\chi}'\vec{u}\tau - \omega'\tau)} e^{-2\text{Im} \chi'_z z}. \quad (2)$$

При вычислении $S(\omega)$ использована дельта-коррелированность спектральных амплитуд

$$\langle \tilde{\zeta}_{s'}(\vec{\chi}' - \vec{k}_{\perp}) \cdot \tilde{\zeta}_{s''}^*(\vec{\chi}'' - \vec{k}_{\perp}) \rangle = \frac{1}{2} \tilde{W}_{s'}(\vec{\chi}' - \vec{k}_{\perp}) \cdot \delta_{s's''} \delta(\vec{\chi}' - \vec{\chi}'').$$

где $\delta_{s's''}$ - символ Кронекера, $\tilde{W}_{s'}(\vec{\chi}' - \vec{k}_{\perp})$ - несимметричный спектр волновых чисел (Монин и др., 1985), причём $\omega' = \omega_0 + \tilde{\Omega}_s(\vec{\chi}' - \vec{k}_{\perp})$, а $-2\text{Im} \chi'_z z \leq 0$, т.к. $\text{Im} \chi'_z \geq 0$ и $z \geq 0$. Рассмотрим малую антенну в точке $z = 0$. Выполним интегрирование в (2) по τ :

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{s=\pm} \int \int d^2 \vec{\chi} |D(\vec{\chi})|^2 \tilde{W}_s(\vec{\chi} - \vec{k}_{\perp}) \cdot \delta[\omega - \omega_0 + \vec{\chi}\vec{u} - (\vec{\chi} - \vec{k}_{\perp})\vec{v} - s\Omega(|\vec{\chi} - \vec{k}_{\perp}|)]. \quad (3)$$

Формула (3) неудобна для расчетов, поскольку на практике задается не $\tilde{W}_s(\vec{\chi} - \vec{k}_{\perp})$, а пространственно-угловой спектр, выраженный в терминах $\vec{q} = \vec{\chi} - \vec{k}_{\perp}$. Перейдя от $\vec{\chi}$ к \vec{q} и при отсутствии поверхностного течения и движения наблюдателя получим:

$$S(\omega_0 + \Delta\omega_s) = \frac{1}{2} \sum_{s=\pm} \int \int d^2 \vec{q} |D(\vec{q} + \vec{k}_{\perp})|^2 \tilde{W}_s(\vec{q}) \delta[\Delta\omega_s - s\Omega(q)]. \quad (4)$$

5. Интерпретация результатов моделирования и сравнение их с экспериментом

В соответствии с приведенными выше теоретическими выкладками было проведено численное моделирование. В качестве входных параметров задавались: рабочая частота f_p , волновой вектор \vec{k} , диэлектрическая проницаемость ε и проводимость σ морской воды, скорость ветра v , угол между направлением ветра и линией визирования φ_0 , длина радиотрассы R , спектральное разрешение $Step$.

Выходными результатами расчёта являлись графическое изображение и цифровое представление спектра рассеянного морем сигнала. Программа расчета позволяла использовать разные модели спектра морского волнения: изотропного, полуизотропного и анизотропного.

Примеры численного моделирования амплитудного спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, приведены на рис. 4. Параметром для разных кривых является скорость ветра. Графики рассчитаны для рабочей частоты $f_p = 15$ МГц и угла падения зондирующего сигнала 75^0 . По горизонтальной оси отложен сдвиг частоты, нормированный на частоту Брэгга при скользящем рассеянии. Кривые вычислены с относительным спектральным разрешением 0,01. Расчёт проведен для изотропного спектра морского волнения Пирсона-Московитца, заданного формулой (Pierson et al., 1964):

$$W(\vec{q}) = \frac{\beta}{2\pi q^4} e^{-0,74g^2/v^4q^2},$$

где $\beta = 10^{-2}$, g - ускорение свободного падения, v - скорость ветра, q - волновое число морских волн. Соответствующий пространственно-угловой спектр имеет вид:

$$\Psi(q) = W(\vec{q})q = \frac{\beta}{2\pi q^3} e^{-0,74g^2/v^4q^2}.$$

Из анализа графиков хорошо видны отличия спектра “морского” сигнала при двухпозиционном эксперименте от известных спектров при однопозиционной локации:

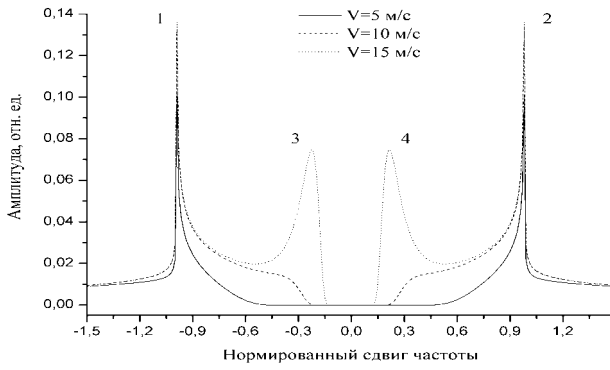


Рис. 4. Модельные спектры рассеянного сигнала

Спектр рассеяния не дискретный, а сплошной, причём его форма (кроме максимумов вблизи $F = \pm 1$) зависит от скорости ветра и от рабочей частоты. Спектр может содержать несколько максимумов, в нём присутствуют составляющие с частотами выше брэгговских.

На рис. 5 приведен спектр рассеянного сигнала для анизотропного морского волнения, заданного согласно (Филипп, 1980) в виде:

$$\Psi(q, \varphi) = \frac{\beta}{2\pi q^3} e^{-0,74g^2/v^4 q^2} K(\varphi, q), \quad (5)$$

где $K(\varphi, q) = \left[\frac{\pi \Gamma(n+1)}{2^n \Gamma^2\left(\frac{n+1}{2}\right)} \right]^{-1} \left[\cos(\varphi - \varphi_0) / 2 \right]^n$, здесь Γ - гамма-функция,

$$n = 0,4(\mu - 1)^{-1}, \text{ если } \mu > 0,1; \quad n = 4, \text{ если } \mu < 0,1. \quad \mu = \sqrt{C_D} \frac{v}{KU_\phi}, \text{ где } U_\phi = \sqrt{\frac{g}{q}},$$

$K = 0,4$ - постоянная Кармана, $C_D = 5 \cdot 10^{-4} v^{0,5}$ для $v < 15 \text{ м/с}$, и $C_D = 2,6 \cdot 10^{-3}$ для $v > 15 \text{ м/с}$, где v и φ_0 - скорость ветра и угол между направлением ветра и линией визирования. Спектр рассчитанный для трёх скоростей ветра при $f_p = 15 \text{ МГц}$, $\varphi_0 = 60^\circ$.

Спектральное разрешение составляет 0,01. Сравнение спектров с приведенными на рис. 4 показывает, что при учёте углового распределения волнения, как и следовало ожидать, изменились соотношения между спектральными максимумами рассеянного сигнала.

При сопоставлении результатов моделирования с экспериментом необходимо учесть вертикальный размер приёмной антенны Δz и приподнятость её основания над средней поверхностью $z = 0$ на высоту z_0 . Для этого следует оценить уровень сигнала в антенне как интеграл от $e_p(\vec{r}, z, t)$ по z в пределах от $z = z_0$ до $z = z_0 + \Delta z$. Дальнейшее вычисление спектра такого сигнала полностью повторяет вывод формул (3), (4) и лишь приводит к появлению в них дополнительного множителя в подынтегральных выражениях:

$$\left| f(\chi_z) \right|^2 = \left| \int_{z_0}^{z_0 + \Delta z} e^{i\chi_z z} dz \right|^2 = \left| \Delta z e^{i\chi_z(z_0 + \Delta z/2)} \left[\frac{\sin(\chi_z \Delta z / 2)}{\chi_z \Delta z / 2} \right] \right|^2. \quad (6)$$

Ещё раз сравним рис. 4 и рис. 5. Приведенные на последнем рисунке спектры рассчитаны с учётом коэффициента (6). Обратим внимание на спектральные составляющие на частотах $|F| > 1$, присутствующие на рис. 4 и отсутствующие на рис. 5. Они обусловлены неоднородными радиоволнами и практически не принимаются реальной антенной.

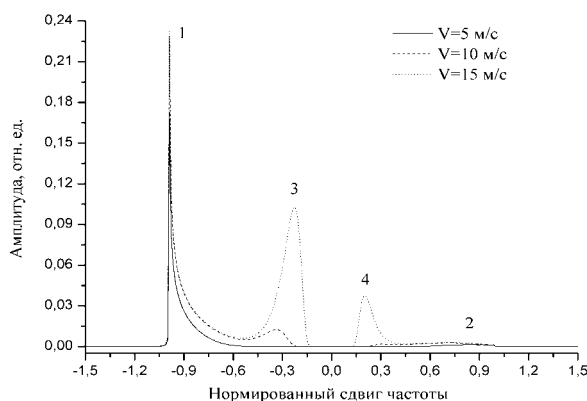


Рис. 5. Модельные спектры рассеянного сигнала.

Спектр рассчитан с разрешением по частоте $0.01 F_B$ ($\sim 0,005$ Гц), затем для согласования с условиями эксперимента (разрешение при измерениях составляло $\sim 0,02$ Гц) применено сглаживание по четырём точкам.

Из сравнения кривых 3 и 4 рис. 3 видно хорошее качественное совпадение расчётного и экспериментального спектров. В обоих случаях присутствуют четыре максимума, совпадают их местоположение на оси частот (соответствует скорости ветра, высоте волн и углу падения зондирующего сигнала), по амплитуде преобладают максимумы на отрицательных частотах (соответствует направлению ветра относительно линии визирования).

Интересно провести сравнение трёх экспериментальных спектров, снятых с разномом во времени при фиксированной протяженности радиотрассы и рабочей частоте ρ (кривые 1 – 3 на рис. 3). Первым по времени получен спектр 1. Перед этим скорость и направление ветра в районе измерений были примерно постоянны не менее четырёх часов. В спектре хорошо просматривается сдвиг брэгговских максимумов в сторону отрицательных частот на величину порядка $0,05$ Гц, что соответствует радиальной составляющей скорости поверхностного течения, обусловленного ветровым сносом, порядка $0,34$ м/с. Затем скорость ветра стала уменьшаться. Соответствующий по времени экспериментальный график представлен кривой 2. Из его рассмотрения видно, что максимумы стали многомодовыми. В нём имеются пики на рассчитанных без учёта поверхностного течения и симметричных относительно нуля частотах (сравни с кривой 4). Также присутствуют и максимумы, сдвинутые в отрицательную сторону, как на кривой 1. Наконец, при измерении спектра 3 скорость ветра уменьшилась до $2-4$ м/с (при этом высота волн визуально измениться не успела). Максимумы в спектре сигнала снова стали одномодовыми, как и в случае 1, но уже без отрицательного сдвига относительно нуля. Кроме того, они несколько выросли по амплитуде по отношению к зондирующему сигналу. Последний эффект может быть объяснён тем, что при наличии поверхностного течения, не совпадающего с линией визирования, поверхность моря, находящаяся в непосредственной близости к приёмной антенне, перестаёт давать когерентный вклад в рассеянный сигнал.

6. Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В ходе 5-ой и 7-ой морских Украинских антарктических экспедиций в акватории Атлантического океана проведены измерения рассеянных взволнованной морской поверхностью коротковолновых радиосигналов. Проанализировано поведение спектров зондирующих сигналов вещательных радиостанций в зависимости от разнообразных ионосферных условий.

2. Впервые построена строгая математическая модель двухпозиционного рассеяния коротковолновых радиосигналов взволнованной морской поверхностью. Рассмотрен случай неподвижного наблюдателя, линейной всенаправленной антенны, расположенной вблизи освещаемой падающим полем морской поверхности. Учтена конечная проводимость морской воды, скользящее распространение рассеянных волн, угол падения ионосферного сигнала, конечные размеры приёмной антенны. Численно проанализированы спектральные особенности рассеянного сигнала в зависимости от метеоусловий для различных моделей пространственно-углового спектра морского волнения.

3. Сопоставление измеренных спектров рассеянного сигнала с результатами численного моделирования показало качественное соответствие разработанной теории и натуральных экспериментов. При одномодовом зондирующем ионосферном сигнале и достаточном превышении его над внешними шумами анализ спектральных особенностей рассеянных сигналов позволяет в двухпозиционном варианте решать некоторые океанографические задачи – оценивать интенсивность волнения, направление ветра и радиальную составляющую скорости поверхностного течения. Отличительной особенностью предложенного метода является использование в качестве зондирующих сигналов неспециального излучения многочисленных широковещательных радиостанций коротковолнового диапазона.

Благодарность. В заключение авторы благодарят Украинский антарктический центр и персонально В.А. Литвинова и Г.П. Милиневского за предоставленную возможность участвовать в морских рейсах 5-ой и 7-ой Украинских антарктических экспедиций, а также за всестороннюю поддержку в проведении исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке НТЦУ в рамках партнёрского проекта P-072.

Литература

Басс Ф. Г., Фукс, И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. - М.: Наука, 1972. - 424 с.

Галушко В.Г. Определение величины горизонтальных градиентов в ионосфере по измерениям параметров КВ в окрестностях мёртвой зоны // Изв. Вузов. - Радиофизика. - 1984. - Т. 27, № 12. - С. 1491-1496.

Кашеев С.Б., Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В. Двухпозиционное зондирование морской поверхности сигналами коротковолновых радиовещательных станций // Радиофизика и радиоастрономия. -2000. - Т. 6, № 1. - С. 79-88.

Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 373 с.

Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. - М.: Гидрометеиздат, 1980. - 319 с.

Beley V.S., Galushko V.G., Yampolski Y.M. Traveling ionosphere disturbances diagnostics using HF signal trajectory parameter variations. // Radio Sci. - 1995. - Vol. 30, № 6. - P. 1739-1752.

Pierson W.I., Moskovitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity method of S.A. Kitaigorodskii // J. Geophysics Res. -1964. - Vol. 69, № 24. - P. 5181-5190.

Wu J. Wind stress and surface roughness at air-sea interface. // J. Geophysics Res. - 1969. - Vol. 74, № 2. - P. 444-455.