

УДК 528.8+551.46.086

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОГРАФА

Ю. А. Титченко, В. Ю. Кареев

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Задача увеличения числа параметров морского волнения, измеряемых радиолокационными методами, ставит вопрос калибровки новых алгоритмов обработки по данным контактных измерений. Для проведения спутниковых экспериментов предлагается использовать новый измерительный прибор — подводный акустический волнограф. Особенностью волнографа является возможность измерения именно тех характеристик волнения, которые влияют на отражение электромагнитных волн. В ходе теоретического анализа получены формулы для доплеровского спектра отражённого акустического сигнала в приближении метода Кирхгофа с учётом применения в приборе разных диаграмм направленности для приёмной и излучающей антенн. В результате был разработан алгоритм измерения всех статистических моментов волнения второго порядка модифицированным акустическим волнографом. С помощью нового алгоритма были обработаны данные, полученные в ходе численного эксперимента. Результаты обработки подтвердили работоспособность предлагаемого алгоритма, а также показали неэффективность ранее разработанного алгоритма при использовании новой конфигурации акустического волнографа.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие радиолокационных методов направлено на увеличение числа измеряемых параметров морского волнения; например, актуальным является измерение дисперсии наклонов. Новая информация о волнении необходима для развития новых алгоритмов восстановления поля приповерхностного ветра, а также для совершенствования региональных и глобальных численных моделей волнения за счёт более точного описания поверхностного волнения.

Традиционно для оценки точности алгоритмов восстановления параметров волнения и скорости ветра по радиолокационным данным используют данные спутниковых экспериментов. К сожалению, существующие морские буи не способны обеспечить измерение дисперсии наклонов с необходимой точностью вследствие крупных габаритов; в частности, отсечка по длине волнения для NDBC-буйев равна 6 м. Поскольку основной вклад в наклоны дают короткие волны, то дисперсия наклонов, вычисленная по данным морских буйев, получается сильно заниженной. Поэтому для проведения спутниковых измерений предлагается использовать подводный акустический волнограф.

На стадии разработки концепции прибора предлагалось использовать акустический волнограф с тремя приёмными и тремя излучающими антеннами [1], но в процессе технической реализации было принято решение использовать одну излучающую антенну и три приёмных антенны с различными диаграммами направленности. В связи с этим возникла необходимость рассмотреть задачу обратного рассеяния акустического сигнала для новой конфигурации измерительной системы и разработать новый алгоритм измерения параметров волнения.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ ВОЛНОГРАФОМ

Задача обратного рассеяния акустических волн морской поверхностью при малых углах падения хорошо исследована [2], поэтому просто уточним постановку задачи с учётом особенностей рассматриваемого случая. Для определения статистических характеристик взволнованной водной поверхности предлагается использовать гидролокатор с одной излучающей антенной и несколькими приёмными антеннами с различными диаграммами направленности. Подобная схема позволяет проводить измерения одновременно несколькими антеннами без применения сложных радиотехнических схем, которые было бы необходимо использовать при одновременной работе в одном месте нескольких излучателей на одной частоте.

Схема измерений для одной принимающей антенны показана на рис. 1.

Акустический излучатель и приёмник расположены под водой на глубине H_0 и направлены вверх под углом падения $\theta_0 = 0$. В ходе натурального эксперимента сложно с высокой точностью контролировать малые углы падения, поэтому рациональнее организовать измерения в надир, чтобы механизм обратного рассеяния оставался квазизеркальным, и не надо было учитывать брэгговскую компоненту. Направление распространения волнения ψ_0 отсчитывается от оси x .

Диаграмма направленности излучающей антенны предполагается гауссовой и имеет ширины δ_{ux} и δ_{uy} по уровню половинной мощности. Диаграмма направленности приёмной антенны также предполагается гауссовой и имеет ширины δ_{px} и δ_{py} по уровню половинной мощности. Для описания диаграммы направленности будем использовать функцию Гаусса, достаточно хорошо аппроксимирующую главный лепесток диаграммы [3]:

$$G(\mathbf{r}) = \exp \left[-1,38 \left(\frac{x^2}{R_0^2 \delta_x^2} + \frac{y^2}{R_0^2 \delta_y^2} \right) \right], \quad (1)$$

где δ_x и δ_y — ширины диаграммы направленности антенны (приёмной или излучающей) на уровне 0,5 по мощности, что соответствует множителю 1,38 в показателе экспоненты формулы (1).

Расстояние до центра рассеивающей площадки обозначим R_0 ; R_1 — соответствующая наклонная дальность до точки отражения. Текущая точка на рассеивающей площадке имеет координаты x_1, y_1, ζ_1 , где $\zeta_1(\mathbf{r}, t)$ — случайная функция, описывающая высоты крупномасштабного волнения. Функция распределения высот предполагается гауссовой.

В приближении метода Кирхгофа рассеянное на поверхности скалярное поле можно представить в виде [2]

$$U(t) = \frac{V_{\text{эфф}} U_0 k}{2\pi i R_0} \int_S \exp[-i\kappa \mathbf{R}_1 - i\kappa \mathbf{R}_2] G(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (2)$$

где U_0 — амплитуда падающего поля вблизи рассеивающей поверхности, $V_{\text{эфф}}$ — эффективный коэффициент отражения, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число падающего излучения, $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ — падающий и отражённый лучи соответственно.

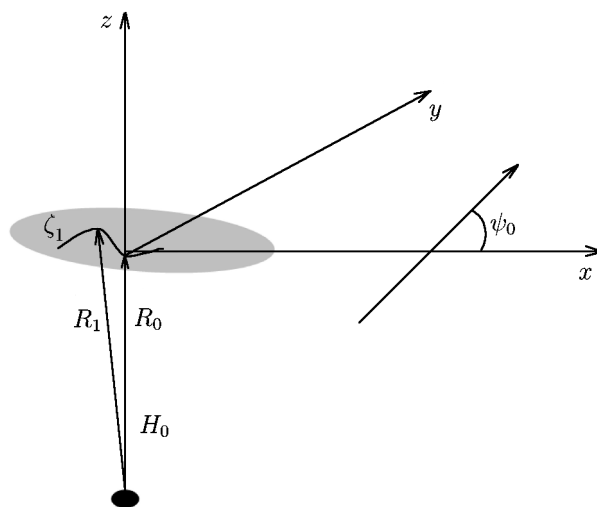


Рис. 1. Схема измерений

Введём понятие «эффективной» ширины диаграммы направленности антенны для того, чтобы перейти от системы с различными диаграммами приёмной и излучающей антенн к гидролокатору с одинаковыми эффективными диаграммами направленности приёмной и излучающей антенн:

$$G(\mathbf{r}) = \exp \left[-1,38 \left(\frac{x^2}{R_0^2 \delta_x^{*2}} + \frac{y^2}{R_0^2 \delta_y^{*2}} \right) \right], \quad (3)$$

где $\delta_x^{*2} = 2\delta_{nx}^2 \delta_{ux}^2 / (\delta_{nx}^2 + \delta_{ux}^2)$ и $\delta_y^{*2} = 2\delta_{ny}^2 \delta_{uy}^2 / (\delta_{ny}^2 + \delta_{uy}^2)$ — эффективные ширины диаграммы направленности для акустической системы, состоящей из приёмной и излучающей антенн с разными диаграммами направленности.

Корреляционная функция отражённого акустического сигнала находится по формуле $K(\tau) = \langle U(t+\tau)U^*(t) \rangle$, где звёздочка означает комплексно-сопряжённую величину, угловые скобки — статистическое усреднение по рассеивающей поверхности.

Сечение обратного рассеяния будет равно значению корреляционной функции при $\tau = 0$. Доплеровский спектр вычисляется как преобразование Фурье от корреляционной функции:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (4)$$

Последующие преобразования аналогичны тем, которые использовались, например в [4], и окончательная формула для ширины доплеровского спектра Δf_{10} на уровне -10 дБ по отношению к максимуму имеет следующий вид:

$$\Delta f_{10} = \frac{4 \sqrt{2 \ln 10}}{\lambda} \left[\sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2 + \delta_y^{*2}/5,52} - \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2 + \delta_x^{*2}/5,52} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{tt}^2 = \langle (\partial\zeta/\partial t)(\partial\zeta/\partial t) \rangle$ — дисперсия вертикальной составляющей орбитальных скоростей; $\sigma_{yy}^2 = \langle (\partial\zeta/\partial y)(\partial\zeta/\partial y) \rangle$, $\sigma_{xx}^2 = \langle (\partial\zeta/\partial x)(\partial\zeta/\partial x) \rangle$ — дисперсия наклонов вдоль и поперёк направления движения волнения соответственно; $K_{xt} = \langle (\partial\zeta/\partial x)(\partial\zeta/\partial t) \rangle$, $K_{yt} = \langle (\partial\zeta/\partial y)(\partial\zeta/\partial t) \rangle$ — корреляционные моменты наклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости. Угловые скобки в формулах обозначают процедуру усреднения по статистическому ансамблю.

Формула для сечения обратного рассеяния σ_0 выглядит следующим образом:

$$\sigma_0 = \frac{|V_{\text{эфф}}|^2}{2 [\sigma_{xx}^2 + \delta_y^{*2}/5,52]^{1/2} [\sigma_{yy}^2 + \delta_x^{*2}/5,52]^{1/2}}. \quad (6)$$

В результате в нашем распоряжении имеются теоретические зависимости спектральных и энергетических характеристик отражённого акустического сигнала от статистических характеристик волнения с учётом диаграммы направленности.

Похожие формулы были получены при анализе отражения электромагнитных волн морской поверхностью для приёмопередающей антенны (см. например, [4]).

Входными параметрами для алгоритма восстановления параметров волнения могут выступать ширина доплеровского спектра и сечение обратного рассеяния.

Задавая конфигурацию акустической системы, можно обеспечить измерение всех статистических параметров волнения второго порядка. Это может быть, например, система из трёх антенн: одна с широкой диаграммой направленности и две с ножевыми диаграммами, ориентированными перпендикулярно друг другу [1].

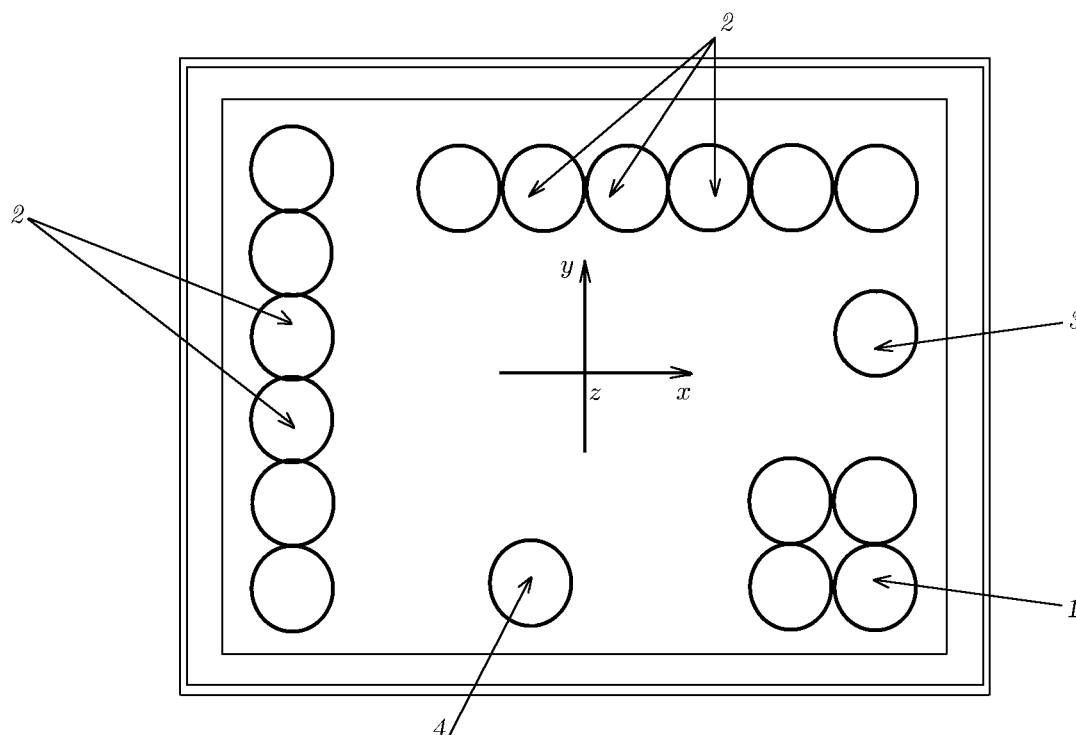


Рис. 2. Панель гидролокатора, вид сверху: 1 — приёмная антенна с диаграммой направленности, симметричной относительно оси z ; 2 — приёмные антенны с асимметричной (ножевой) диаграммой направленности; 3 — излучатель; 4 — приёмопередатчик эхолота

В новом акустическом волнографе будет применяться одна излучающая антенна с широкой симметричной диаграммой направленности и три приёмных антенны: одна с симметричной диаграммой направленности и две с ножевыми диаграммами, ориентированными перпендикулярно друг другу. Эскиз панели гидролокатора изображён на рис. 2.

Для независимого измерения высоты значительного волнения будет применяться гидролокатор с узкой приёмопередающей антенной, работающий в импульсном режиме. Ножевые диаграммы направленности антенн формируются за счёт линеек, сформированных излучателями с симметричной диаграммой направленности.

В результате в задаче есть шесть неизвестных величин: пять статистических моментов и эффективный коэффициент отражения. Для определения всех неизвестных достаточно трёх измерений (двумя взаимно перпендикулярными ножевыми антеннами и антенной с симметричной диаграммой направленности), в результате которых будут получены шесть уравнений для ширины доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния.

2. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОГРАФА

Считаем, что диаграмма направленности излучающей антенны симметрична $\delta_{ux} = \delta_{uy} = \delta_x$. Предположим, что первые измерения сделаны антенной с ножевой диаграммой направленности: $\delta_{nx} = \delta_x \gg \delta_{ny}$, $\delta_y^{*2} = 2\delta_{ny}^2\delta_{uy}^2/(\delta_{uy}^2 + \delta_{ny}^2)$; вторые данные получены для случая $\delta_{nx} \ll \delta_{ny} = \delta_x$, $\delta_x^{*2} = 2\delta_{nx}^2\delta_{ux}^2/(\delta_{ux}^2 + \delta_{nx}^2)$. Эти измерения аналогичны измерениям, выполненным предыдущей антенной, повернутой на 90° , следовательно, эффективные ширины диаграмм направленности приёмных антенн будут равны: $\delta_x^* = \delta_y^*$. Третьи измерения выполнены акустической системой с

симметричной антенной: $\delta_{nx} = \delta_{uy} = \delta_x$.

В результате преобразований получим шесть уравнений для сечений обратного рассеяния и ширин доплеровских спектров. Решая систему уравнений аналитически, мы получим формулы для дисперсий наклонов, дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости и корреляционных моментов крупномасштабного волнения, а также для эффективного коэффициента отражения:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{\delta_x^2 \sigma_0^2(3) - \delta_y^{*2} \sigma_0^2(1)}{5,52 [\sigma_0^2(1) - \sigma_0^2(3)]}; \quad (7)$$

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_x^2 \sigma_0^2(3) - \delta_y^{*2} \sigma_0^2(2)}{5,52 [\sigma_0^2(2) - \sigma_0^2(3)]}; \quad (8)$$

$$K_{xt} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{2 \ln 10}} \sqrt{\frac{[\Delta f_{10}(1)]^2 - [\Delta f_{10}(3)]^2}{5,52 (\delta_y^{*2} - \delta_x^2)}} \sqrt{(5,52 \sigma_{xx}^2 + \delta_x^2) (5,52 \sigma_{xx}^2 + \delta_y^{*2})}; \quad (9)$$

$$K_{yt} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{2 \ln 10}} \sqrt{\frac{[\Delta f_{10}(2)]^2 - [\Delta f_{10}(3)]^2}{5,52 (\delta_y^{*2} - \delta_x^2)}} \sqrt{(5,52 \sigma_{yy}^2 + \delta_x^2) (5,52 \sigma_{yy}^2 + \delta_y^{*2})}; \quad (10)$$

$$\sigma_{tt}^2 = \frac{\lambda^2}{32 \ln 10} \left[\frac{[\Delta f_{10}(1)]^2 (5,52 \sigma_{xx}^2 + \delta_y^{*2}) - [\Delta f_{10}(2)]^2 (5,52 \sigma_{yy}^2 + \delta_y^{*2})}{\delta_y^{*2} - \delta_x^2} - \frac{[\Delta f_{10}(3)]^2 [5,52 (\sigma_{xx}^2 - \sigma_{yy}^2) + \delta_x^2 - \delta_y^{*2}]}{\delta_y^{*2} - \delta_x^2} \right]; \quad (11)$$

$$|V_{\text{эфф}}|^2 = \frac{2 \sigma_0(1) \sigma_0(2) \sigma_0(3) (\delta_x^2 - \delta_y^{*2})}{5,52 \sqrt{[\sigma_0^2(1) - \sigma_0^2(3)] [\sigma_0^2(2) - \sigma_0^2(3)]}}. \quad (12)$$

Таким образом, измерив ширину доплеровского спектра и сечение обратного рассеяния тремя разными антеннами, можно восстановить основные статистические моменты второго порядка и эффективный коэффициент отражения.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА

Прежде, чем переходить к обработке экспериментальных данных, необходимо проверить работоспособность алгоритмов обработки на тестовых массивах, когда известна восстанавливаемая величина.

Сформируем исходный массив с помощью численного моделирования. С помощью специально разработанного комплекса программ выполняется численное моделирование морской поверхности по спектру волнения [5] и имитируется эксперимент. Для каждой реализации поверхности вычисляется доплеровский спектр, поэтому для получения достоверных результатов необходимо накопление реализаций отражённого сигнала и вычисление среднего доплеровского спектра, как это происходит в эксперименте.

Моделирование проводилось для условий, наблюдаемых в эксперименте: скорость ветра U_{10} на высоте 10 м равна 7 м/с и безразмерная длина ветрового разгона — 5000. Формула для безразмерного ветрового разгона имеет следующий вид [6]:

$$\tilde{x} = xg/U_{10}^2, \quad (13)$$

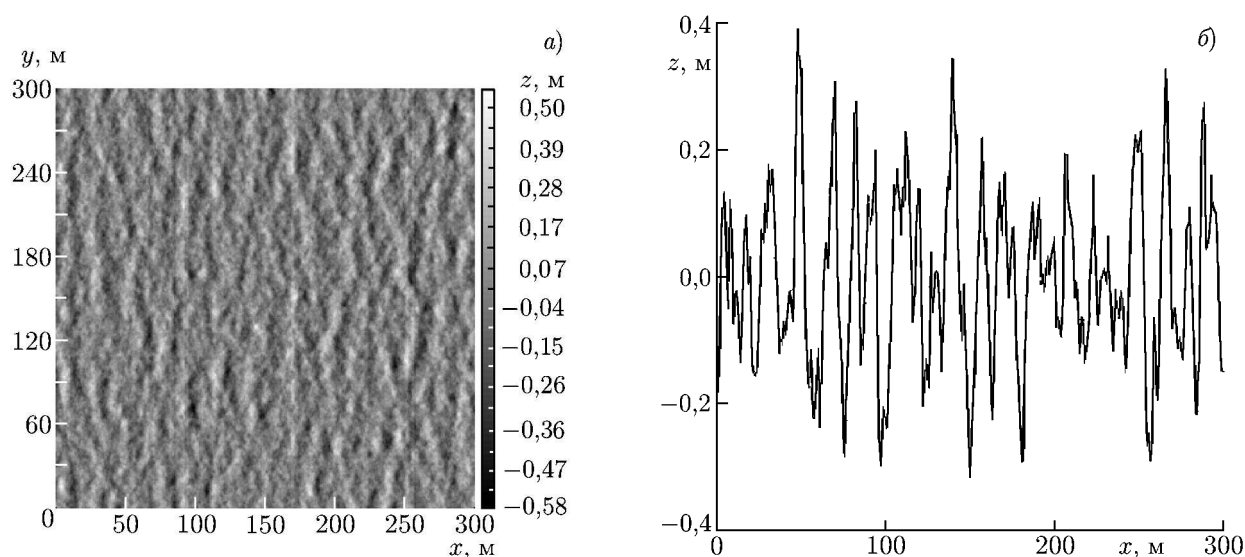


Рис. 3. Модельное полутоновое изображение высот морской поверхности на плоскости xy (а) и одно из сечений ($y = 60$ м) для случая ветрового волнения с безразмерным разгоном 5 000, распространяющегося по оси x (б). Скорость ветра 7 м/с

где x — длина ветрового разгона, g — ускорение свободного падения.

На рис. 3а представлено модельное полутоновое изображение высот морской поверхности для случая ветрового волнения с безразмерным разгоном 5 000, распространяющегося по оси x , и скорости ветра 7 м/с. Одно из сечений этого изображения представлено на рис. 3б. По этим изображениям видно, что для получения достоверных результатов необходимо большое время накопления данных.

Длина поверхностной волны для заданных условий по максимуму спектра волнения равна 18 м. Глубина погружения гидролокатора была выбрана 10 м. Ширина диаграммы направленности излучающей антенны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях равна $30^\circ \times 30^\circ$. Ширины приёмных антенн $30^\circ \times 30^\circ$, $30^\circ \times 4^\circ$ и $4^\circ \times 30^\circ$. Эффективные ширины диаграмм направленности $30^\circ \times 30^\circ$, $30^\circ \times 5,6^\circ$ и $5,6^\circ \times 30^\circ$ соответственно. В первом случае рассеивающая площадка будет представлять собой круг с диаметром 5,3 м, в двух других случаях эллипсы с осями равными 5,3 и 1 м соответственно.

Усреднение результатов численного моделирования эксперимента выполнено по 80 реализациям доплеровского спектра, что соответствует 80 с записи.

Доплеровский спектр отражённого сигнала описывается гауссовой функцией, и его ширина на уровне -10 дБ может быть найдена из первого и второго статистических моментов. Для используемой схемы эксперимента форма доплеровского спектра является гауссовой, и её можно представить следующим образом:

$$S(\omega) = A_0 \exp\left(-\frac{\omega^2}{4k^2\omega_S}\right), \quad (14)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число падающего излучения, λ — длина волны излучения, A_0 — амплитуда спектра (зависит от многих параметров, но не используется в дальнейшей обработке), $\omega_S = \pi^2 (\Delta f_{10})^2 / (4k^2 \ln 10)$ — коэффициент, зависящий от параметров волнения и диаграммы направленности.

Ширину доплеровского спектра можно выразить из первого $M(\omega)$ и второго $M(\omega^2)$ статистических моментов:

$$\Delta f_{10} = 2 \sqrt{2 \ln 10 [M(\omega^2) - M^2(\omega)]}. \quad (15)$$

Из формулы (5) видно, что уширение доплеровского спектра определяется в основном дисперсией вертикальной составляющей орбитальной скорости взволнованной водной поверхности σ_{tt}^2 . Обратное рассеяние происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению, поэтому увеличение корреляции наклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости K_{xt} (и K_{yt}) приводит к уменьшению ширины доплеровского спектра отражённого сигнала.

Учёт ширины диаграммы направленности антенны в модели обратного рассеяния приводит к тому, что в отражённый сигнал начинают вносить вклад участки поверхности с различными наклонами. Это аналогично уменьшению корреляции наклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости. Следовательно, ширина доплеровского спектра, измеренная гидролокатором с широкой симметричной диаграммой направленности, будет больше, чем измеренная гидролокатором с узкой симметричной диаграммой направленности. При использовании ножевой диаграммы направленности максимальная ширина доплеровского спектра соответствует ориентации антенны вдоль направления распространения волнения, т. е. когда характерный наклон σ_{xx}^2 совпадает с «максимальной» шириной диаграммы направленности δ_x^2 , что видно из формулы (5).

Совместное действие этих факторов показано на рис. 4а, где представлены результаты моделирования доплеровских спектров, усреднённых по 80 реализациям поверхности, для трёх приёмных антенн с различными диаграммами направленности. Из рис. 4а видно, что доплеровский спектр для приёмной антенны с эффективной шириной диаграммы направленности $5,6^\circ \times 30^\circ$ (диаграмма ориентирована поперёк направления распространения волнения) имеет меньшую ширину на уровне -10 дБ от максимума, чем доплеровский спектр для приёмной антенны с эффективной шириной $30^\circ \times 5,6^\circ$ (диаграмма ориентирована вдоль направления распространения волнения). Доплеровский спектр для приёмной антенны с шириной диаграммы направленности $30^\circ \times 30^\circ$ будет обладать шириной на уровне -10 дБ; близкой к ширине доплеровского спектра на уровне -10 дБ от максимума для приёмной антенны с эффективной шириной диаграммы направленности $30^\circ \times 5,6^\circ$. Различие амплитуд доплеровских спектров объясняется нормировкой на площадь рассеивающей площадки, определяемой диаграммой направленности.

На рис. 4б приведены доплеровские спектры для тех же антенн, вычисленные по формуле (14). Для удобства сравнения доплеровские спектры на рис. 4а нормированы по площади к соответствующим спектрам, изображённым на рис. 4б.

Статистические характеристики поверхностного волнения для расчёта доплеровских спектров по формуле (14) вычисляются по модели спектра волнения для заданных условий. Из графиков на рис. 4 видно, что доплеровские спектры, полученные в результате численного моделирования, соответствуют спектрам, полученным по теоретической формуле, что подтверждает качество моделирования.

Количественные оценки результатов моделирования приведены в табл. 1. В первой колонке содержится информация о диаграмме направленности антенны.

Для заданных скорости ветра и длины ветрового разгона по модели спектра волнения можно вычислить статистические характеристики и по формуле (5) вычислить ширину доплеровского спектра. Результаты расчётов приведены во втором столбце. Надо отметить, что параметры волнения, вычисленные по модели спектра волнения, характеризуют свойства генеральной совокупности моделируемой поверхности. Сами доплеровские спектры приведены на рис. 4б.

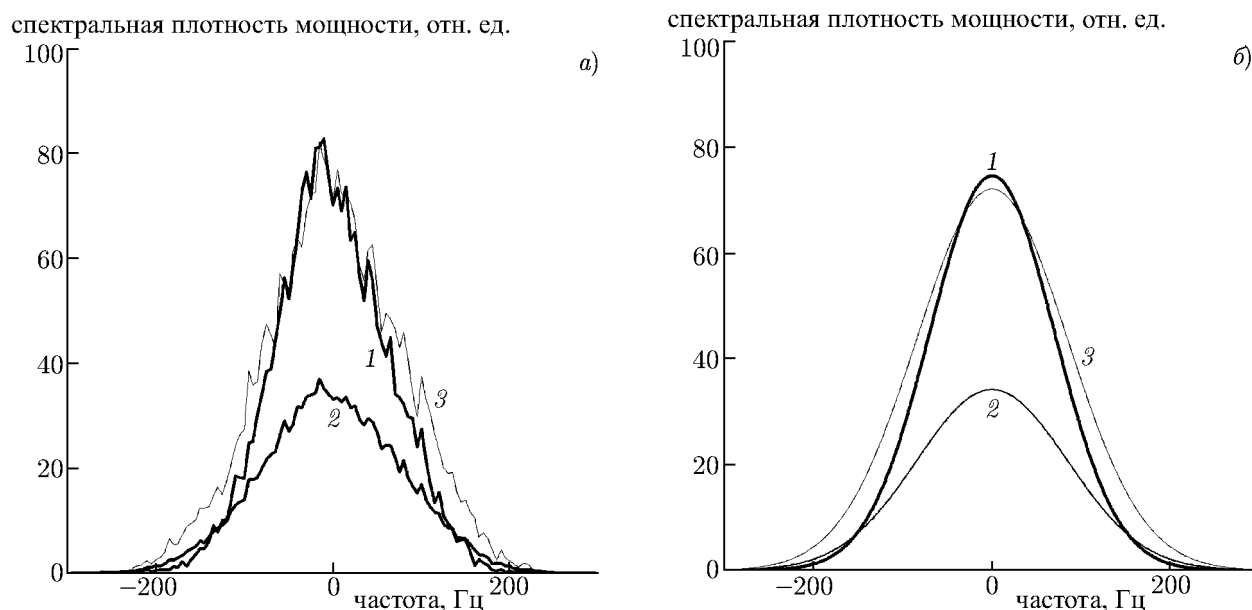


Рис. 4. Доплеровские спектры обратно рассеянного акустического сигнала для трёх приёмных антенн с различными диаграммами направленности, полученные в результате численного моделирования (а) и вычисленные по теоретической формуле для доплеровского спектра (б). Кривые 1 соответствуют доплеровским спектрам для приёмной антенны с шириной диаграммы направленности $5,6^\circ \times 30^\circ$, кривые 2 — доплеровским спектрам для приёмной антенны с шириной диаграммы направленности $30^\circ \times 30^\circ$, кривые 3 — доплеровским спектрам для приёмной антенны с шириной диаграммы направленности $30^\circ \times 5,6^\circ$

Таблица 1. Сравнение ширин доплеровских спектров, полученных различными способами

Эффективная ширина диаграммы направленности антенны, град	Доплеровский спектр по модели спектра волнения, Гц	Средний доплеровский спектр за 80 с, полученный в результате численного моделирования, Гц	Усреднённая ширина доплеровского спектра, полученная по реализациям поверхности, Гц
$30 \times 5,6$	363	347	349 ± 10
$5,6 \times 30$	298	277	279 ± 13
30×30	363	347	349 ± 10

В ходе численного моделирования удаётся получить только выборку из генеральной совокупности, и её качество зависит от размера выборки. В приведённом примере использовалось 80 реализаций морской поверхности и для каждой вычислялся доплеровский спектр. В результате такого моделирования находились средние доплеровские спектры, которые показаны на рис. 4а. Ширины доплеровских спектров для этого случая приведены в третьем столбце табл. 1.

При рассмотренном выше подходе в явном виде не использовались характеристики поверхности, т. е. можно сказать, что это был численный эксперимент, имитирующий натурный эксперимент.

Однако средний доплеровский спектр можно вычислить на основе формулы (5). Для каждой реализации поверхности вычисляются статистические характеристики, и они используются для вычисления ширины доплеровского спектра (мгновенного спектра) по модели (формула (5)).

Таблица 2. Статистические характеристики морской поверхности, полученные четырьмя различными способами

	Теоретические значения статистических характеристик по модели спектра волнения	По 80 реализациям поверхности, используемым в численном эксперименте	По новому алгоритму для результатов численного эксперимента	По алгоритму [1] без учёта диаграммы направленности для приёмной и излучающей антенн
σ_{xx}^2	0,023	0,022	0,022	0,009
σ_{yy}^2	0,014	0,014	0,013	0,006
$\sigma_{tt}^2, \text{ м}^2/\text{с}^2$	0,133	0,121	0,120	0,113
$K_{xt}, \text{ м/с}$	0,037	0,037	0,036	0,021

Получаем 80 доплеровских спектров и для каждого находим ширину. Результаты усреднения ширины таких мгновенных спектров приведены в последнем столбце табл. 1. Доверительный интервал выбран равным среднеквадратическому отклонению.

Из табл. 1 видно совпадение данных в третьей и четвёртой колонках, а отличие от второй колонки объясняется тем, что в данной выборке статистические моменты были ниже, чем в среднем по генеральной совокупности (см. табл. 2, третий столбец). Для другой выборки ситуация может быть противоположной.

Проинтегрировав доплеровский спектр, можно вычислить сечение обратного рассеяния. Преимуществом предлагаемых алгоритмов является нечувствительность к абсолютным величинам сечений обратного рассеяния. Поэтому нет необходимости в абсолютной калибровке данных акустического волнографа, т. к. в алгоритмах восстановления используются только отношения сечений обратного рассеяния.

Воспользовавшись описанным в пункте 2 алгоритмом, получим статистические характеристики волнения.

Оценка эффективности работы нового алгоритма и сравнение с результатами применения алгоритма [1] без учёта различных диаграмм направленности приёмной и излучающей антенн представлены в табл. 2. В первом столбце перечислены статистические характеристики взволнованной водной поверхности, значения которых приводятся в соответствующих строчках. Во втором столбце приведены значения статистических характеристик поверхности, полученные по модели спектра волнения. Эти значения используются для численного моделирования морской поверхности. Значения статистических характеристик, полученные при усреднении 80 реализаций поверхности, наблюдаемых в численном эксперименте, представлены в третьем столбце. В четвёртом столбце приведены значения статистических характеристик морской поверхности, восстановленные по новому алгоритму для численного эксперимента. В пятом столбце приведены значения статистических характеристик, вычисленные по алгоритму [1] без учёта различий в диаграммах направленности приёмной и излучающей антенн.

Из табл. 2 видно значительное отличие дисперсий наклонов, восстановленных предыдущей версией алгоритма, от используемых при вычислениях модельных оценок статистических моментов. Это показывает важность корректного учёта параметров диаграммы направленности антенн в алгоритме обработки. Видно также различие статистических характеристик поверхности, полученных по модели спектра волнения, и характеристик, полученных при численном моделировании рассеивающих площадок, усреднённых по 80 реализациям. Это объясняется изменчивостью волнения внутри рассеивающей площадки и недостаточным временем накопления реализаций.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания подводного акустического волнографа предлагается использовать акустическую систему с одной излучающей и тремя приёмными антеннами: две антенны с ножевыми диаграммами направленности и одна с симметричной диаграммой. Антенны с ножевыми диаграммами направленности ориентированы перпендикулярно друг другу. Антенный блок с излучателем размещается вблизи дна на плавучей платформе и ориентируется вертикально вверх. Схема измерений только с одной излучающей антенной позволит существенно упростить конструкцию, т. к. снимает проблему одновременной работы нескольких излучателей в одном месте.

В результате проведённого исследования построена теоретическая модель доплеровского спектра для отражённого акустического сигнала при использовании отдельных излучающей и приёмной антенн. Введение понятия «эффективной» ширины диаграммы направленности позволило сохранить вид формул для сечения обратного рассеяния и ширины доплеровского спектра.

Для предлагаемой схемы измерений были получены формулы для удельного эффективного поперечника рассеяния и ширины доплеровского спектра при малых углах падения. Предложен алгоритм восстановления параметров волнения.

Работоспособность нового алгоритма восстановления параметров волнения была протестирована в ходе численного эксперимента и подтвердила его эффективность. Обработка данных алгоритмом, не учитывающим особенности антенной системы, приводит к значительным ошибкам при восстановлении параметров волнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 10-05-00181-а и 11-05-97014-р-п-а), программы ОФН РАН «Радиофизика» и гранта Правительства Российской Федерации (договор 11.G34.31.0048).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караев В. Ю., Каневский М. Б., Мешков Е. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 634.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически шероховатой поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отражённых от земной поверхности. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
4. Мешков Е. М., Караев В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 3. С. 231.
5. Караев В. Ю., Баландина Г. Н. // Исследование Земли из космоса. 2000. № 5. С. 1.
6. Walsh E. J., Hancock III D. W., Donald E. H., et al. // J. Phys. Oceanogr. 1989. V. 19, No. 5. P. 670.

Поступила в редакцию 7 августа 2012 г.; принята в печать 30 августа 2012 г.

THE METHOD OF DETERMINING THE SEA WAVE PARAMETERS BY USING A MODIFIED ACOUSTIC WAVE GAUGE

Yu. A. Titchenko and V. Yu. Karaev

Increasing the number of sea wave parameters measured by radar methods raises the problem of calibration of new processing algorithms by using the contact measurement data. A new instrument named an underwater acoustic wave gauge is proposed for the satellite experiments. A feature of the

new instrument is the ability to measure exactly the sea wave characteristics that affect the reflection of electromagnetic waves. Formulas for the Doppler spectrum of the reflected acoustic signal in the approximation of the Kirchhoff method with allowance for the different beams of the receiving and emitting antennas are obtained. As a result, a new algorithm for measurement of all statistical second-order moments of sea waves by the modified acoustic wave gauge has been developed. The data obtained in the numerical experiment were processed by the new algorithm. The results confirmed the efficiency of the proposed algorithm and also demonstrated the inefficiency of the previous algorithm when a new configuration of the acoustic wave gauge was employed.