

УДК 621.371.165+537.87

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ: ОБСУЖДЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ПРИБОРА

В. Ю. Караев, М. Б. Каневский, Е. М. Мешков

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В настоящей работе рассматривается концепция подводного акустического волнографа, предназначенного для измерения статистических характеристик поверхностного волнения. В качестве его основы предлагается использовать гидролокатор сантиметрового диапазона длин волн, размещённый под водой и выполняющий зондирование в вертикальном направлении вверх. Показано, что применение в такой системе трёх антенн достаточно для измерения всех статистических моментов второго порядка крупномасштабного по сравнению с длиной волны акустического излучения волнения. Данным способом впервые могут быть измерены именно те параметры волнения, которые определяют характеристики отражённого радиолокационного излучения. Предлагаемый акустический волнограф может использоваться как самостоятельный измерительный прибор, а также в качестве дополнительного подводного блока обычного морского буя. Это позволит с минимальными затратами существенно расширить объём получаемой от последнего информации о поверхностном волнении и сделает возможным проведение калибровки новых систем дистанционного зондирования, способных измерять дисперсию наклонов морской поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Важность задачи оперативного мониторинга состояния приповерхностного слоя Мирового океана обусловлена его ролью в формировании климата Земли. Мировой океан является гигантским аккумулятором тепловой энергии, а интенсивность процесса теплообмена между ним и атмосферой определяется скоростью приповерхностного ветра и параметрами морского волнения. Поэтому для получения количественных оценок процесса теплообмена необходима достоверная информация о волнении.

Для измерения его параметров разработаны разнообразные виды волнографов (см., например, [1]). Наиболее точными являются струнные и лазерные волнографы. Однако существенным недостатком этих приборов является необходимость их неподвижного крепления, что резко ограничивает возможность их применения в открытом море в автономном режиме.

Достоверными источниками данных о поверхностном волнении являются морские буи, расположенные в различных акваториях Мирового океана. Помимо спектра крупномасштабного волнения буи измеряют следующие важные характеристики приповерхностного слоя: скорость и направление ветра, температуру воды и воздуха.

Поскольку количество буёв ограничено и они расположены в основном в прибрежной зоне, то в настоящее время основной объём информации о параметрах приповерхностного слоя Мирового океана получают со спутников: скаттерометры, например, восстанавливают поле приповерхностного ветра, а радиоальтиметры измеряют высоту волнения. Сведения же, поступающие от буёв, используются для создания алгоритмов обработки радиолокационных данных.

Пример дискового буя в морских условиях и на суше перед установкой показан на рис. 1а и б соответственно. Подробную информацию о них можно найти в интернете, например на сайте [2]. Основой данного устройства является трёхметровый алюминиевый диск, служащий платформой для установки разнообразной измерительной аппаратуры, а также источника питания и



Рис. 1. Пример трёхметрового дискового буя: (а) в морских условиях и (б) на суше перед установкой

передатчика. Буй движется вместе с волной, что фиксируется специальной системой датчиков. Параллельно записывается информация о скорости и направлении ветра, температуре воды и воздуха.

Дальнейшее развитие дистанционных методов диагностики приповерхностного слоя океана связано с расширением числа измеряемых параметров волнения. Например, актуальным является получение информации о дисперсии его наклонов, которая крайне необходима для совершенствования региональных и глобальных численных моделей волнения. Спутниковые данные о высоте волнения и скорости ветра включаются в численные модели, позволяя существенно повысить их точность. Измерение наклонов поверхности делает описание волнения ещё более точным, что способствует улучшению качества прогнозов интенсивности волнения и погоды. Кроме того, для вычисления высотного профиля скорости ветра над морской поверхностью необходима информация не только о высоте волнения, но и о дисперсии наклонов. Отсутствие последней приводит к значительным ошибкам в оценке интенсивности процесса теплообмена между океаном и атмосферой.

Создание радиолокаторов, способных проводить измерения дисперсии наклонов из космоса, делает актуальным решение проблемы настройки новых алгоритмов обработки данных путём использования результатов контактных измерений. К сожалению, существующие морские буи не способны обеспечить измерение дисперсии наклонов с необходимой точностью. Это объясняется тем, что стационарные морские буи имеют большие геометрические размеры и поэтому могут осуществлять спектральные измерения только в длинноволновой области.

Типичный спектр волнения, измеренного морским буюм, изображён на рис. 2. Он является дискретным вследствие конечной разрешающей способности измерительной аппаратуры, и звёздочками показана его спектральная плотность мощности. Пунктиром нанесён спектр высот, вычисленный по модели [3, 4] с параметрами, соответствующими условиям проведения измерений.

Указанное выше спектральное ограничение чувствительности буюв не сказывается на точности измерения высоты значительного волнения, которая определяется только крупномасштабными возмущениями, однако дисперсия наклонов, определяемая в основном более короткими волнами, не восстанавливается.

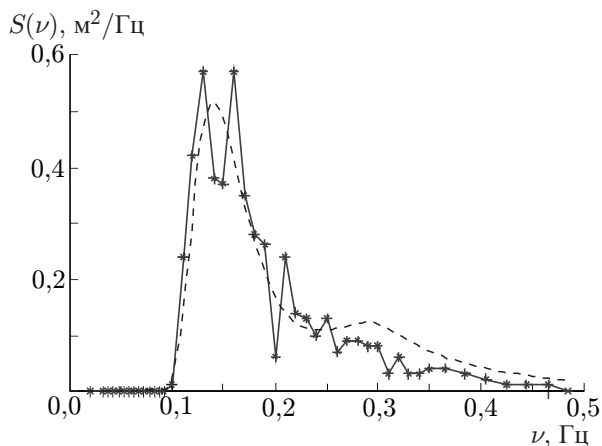


Рис. 2. Пример спектра высот $S(\nu)$, измеренных бум (линия со звёздочками). Пунктиром показан модельный спектр [3, 4], соответствующий условиям измерения: скорость ветра $U_{10} = 6$ м/с, безразмерная длина разгона 8 000 [3, 4], высота значительного ветрового волнения 0,49 м, длина волны зыби 80 м, высота зыби 0,8 м

Из приведённого примера видно, что радиолокационные измерения и оптические данные [5] существенно отличаются от данных бум, что не позволит использовать последние для проверки работоспособности новых алгоритмов восстановления дисперсии наклонов по результатам радиолокационных измерений. Поэтому разработка новой измерительной аппаратуры для проведения контактных измерений морского волнения является важной задачей и должна вестись параллельно с разработкой радиолокационной аппаратуры. В данной работе рассматривается один из вариантов её решения.

1. РАССЕЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассмотрим обратное рассеяние акустических волн морской поверхностью при малых углах их падения. Поскольку в такой постановке задача хорошо исследована (см. например, [6–8]), то ограничимся здесь её формулировкой с учётом особенностей рассматриваемого случая и цитированием конечных формул для сечения обратного рассеяния и ширины и смещения доплеровского спектра. Для сохранения единства обозначений в радиолокационной и акустической задачах воспользуемся обозначениями, которые использовались в работах [9, 10]. Поскольку предлагаемая акустическая система является аналогом радиолокационной, то такой выбор вполне обоснован.

На рис. 3 приведена схема измерений. Акустический источник расположен под водой на глубине H_0 и излучает сигнал в направлении, соответствующем углу падения θ_0 . Последний предполагается достаточно малым, так что механизм обратного рассеяния остаётся квазизеркальным и не надо учитывать брэгговскую компоненту отражённого сигнала. Направление распространения волнения определяется углом ψ_0 , отсчитываемым от оси x , как и угол поворота антенны φ_0 .

Диаграмма направленности антенны $G(\mathbf{r})$ предполагается гауссовской (см. ниже) и имеет ши-

Покажем это на модельном примере. Пусть мы имеем полностью развитое ветровое волнение при скорости ветра $U_{10} = 6$ м/с. При условии 10-метровой отсечки в спектральной чувствительности бум дисперсия наклонов, $\sigma_{\text{наклон}}^2$, вычисленная по измеренному им спектру волнения, будет равна 0,0032. В рамках двухмасштабной модели поверхности дисперсия наклонов, измеренная радиолокатором с рабочей длиной волны $\lambda = 0,03$ м, будет равна 0,0214, а для длины волны 0,008 м — 0,0266. Увеличение дисперсии наклонов с уменьшением рабочей длины волны радиолокатора обусловлено ростом граничного волнового числа, разделяющего спектр волнения на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие. Формулы, которые применялись для вычисления дисперсии наклонов, приведены в следующем разделе. В оптическом диапазоне интегрирование проводится по всему спектру волнения.

Дисперсия наклонов, вычисленная по извест-

рины δ_x и δ_y по уровню половинной мощности. Наклонная дальность до центра рассеивающей площадки $R_0 = H_0 / \cos \theta_0$. Текущая точка отражения на рассеивающей площадке имеет координаты x_1, y_1, z_1 , где $z_1(\mathbf{r}, t)$ — случайная функция, описывающая крупномасштабное волнение, $R_1 = H_0 / \cos \theta_1$ — наклонная дальность до точки отражения, θ_1 — соответствующий угол падения, \mathbf{r}_0 с координатами x_0, y_0 — радиус-вектор до центра рассеивающей площадки.

В приближении Кирхгофа комплексная амплитуда рассеянного поля квазизеркальной компоненты имеет следующий вид [6]:

$$U(t) = \frac{V_{\text{эфф}} U_0 k}{2\pi i R_0 \cos \theta_0} \int_S \exp(-2ikR) G(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где U_0 — амплитуда падающего поля вблизи рассеивающей поверхности, $V_{\text{эфф}}$ — эффективный коэффициент отражения, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число падающего излучения.

Функция $G(\mathbf{r})$ задаёт распределение амплитуды падающего поля на рассеивающей площадке S и при $y_0 = 0$ имеет следующий вид [11]:

$$G(\mathbf{r}) = \exp \left[-1,38 \left(\frac{(x - x_0)^2 \cos^2 \theta_0}{R_0 \delta_x^2} + \frac{y^2}{R_0 \delta_y^2} \right) \right]. \quad (2)$$

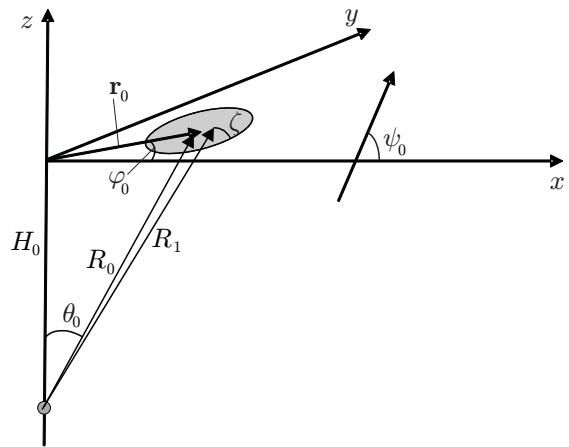


Рис. 3. Схема измерений

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

В соответствии с двухмасштабной моделью поверхности вводится граничное волновое число $\kappa_{\text{гр}}$, которое делит спектр волнения на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие [6–8]. В приближении Кирхгофа спектральные характеристики отражённого радиолокационного сигнала зависят только от параметров крупномасштабного волнения. Его статистические моменты второго порядка вычисляются по следующим формулам:

$$\sigma_{xx}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_{\text{гр}}} \kappa_x^2 S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi, \quad \sigma_{yy}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_{\text{гр}}} \kappa_y^2 S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi, \quad \sigma_{tt}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_{\text{гр}}} \omega^2 S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi,$$

$$K_{xt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_{\text{гр}}} \kappa_x \omega S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi, \quad K_{yt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_{\text{гр}}} \kappa_y \omega S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi, \quad K_{xy} = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_{\text{гр}}} \kappa_x \kappa_y S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi,$$

где $S(\kappa, \varphi)$ — спектр волнения, φ — азимутальный угол.

Значение граничного волнового числа $\kappa_{\text{гр}}$ зависит от скорости ветра и длины волны электромагнитного излучения. В данной работе используются зависимости, полученные в [3].

Последующие преобразования аналогичны тем, которые использовались, например, в [12], и окончательные формулы для ширины доплеровского спектра Δf_{10} на уровне -10 дБ по отношению к максимуму и для смещения доплеровского спектра $f_{\text{см}}$ относительно несущей частоты

имеют следующий вид:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2\ln 10}}{\lambda} \cos \theta_0 \left[\sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2} - \frac{(K_{yt}\sigma_{xx}^2 + K_{xy}K_{xt})^2}{\sigma_{xx}^2(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)} + \right. \\ \left. + \frac{\delta_y^2(K_{xt}\sigma_{yy}^2 + K_{yt}K_{xy})^2}{5,52(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)[\sigma_{yy}^2(\sigma_{xx}^2\cos^2\theta_0 + \delta_y^2/5,52) - K_{xy}^2\cos^2\theta_0]} + \right. \\ \left. + \frac{\delta_x^2(K_{yt}\sigma_{xx}^2 + K_{xy}K_{xt})^2}{5,52(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)[\sigma_{xx}^2(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52) - K_{xy}^2]} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$f_{cm} = -\frac{2\sin\theta_0}{\lambda(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)} \left[K_{yt}\sigma_{xx}^2 + K_{xy}K_{xt} - \right. \\ \left. - \frac{\delta_y^2(K_{xt}\sigma_{yy}^2 + K_{yt}K_{xy})K_{xy}}{5,52[\sigma_{yy}^2(\sigma_{xx}^2\cos^2\theta_0 + \delta_y^2/5,52) - K_{xy}^2\cos^2\theta_0]} - \right. \\ \left. - \frac{\delta_x^2(K_{yt}\sigma_{xx}^2 + K_{xy}K_{xt})\sigma_{xx}^2}{5,52[\sigma_{xx}^2(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52) - K_{xy}^2]} \right]. \quad (4)$$

Формула для сечения обратного рассеяния σ_0 имеет следующий вид:

$$\sigma_0 = \frac{|V_{\text{эфф}}|^2 (\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)^{1/2} \exp\left[-\frac{\sigma_{xx}^2 \operatorname{tg}^2 \theta_0}{2(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)}\right]}{2\cos^4\theta_0 [\sigma_{yy}^2(\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2/(5,52\cos^2\theta_0)) - K_{xy}^2]^{1/2} [\sigma_{xx}^2(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52) - K_{xy}^2]^{1/2}} \times \\ \times \exp\left[\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_0}{2} \frac{K_{xy}^2\delta_y^2}{5,52(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)[\sigma_{yy}^2(\sigma_{xx}^2\cos^2\theta_0 + \delta_y^2/5,52) - K_{xy}^2\cos^2\theta_0]}\right] \times \\ \times \exp\left[\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_0}{2} \frac{\sigma_{xx}^4\delta_x^2}{5,52(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)[\sigma_{xx}^2(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52) - K_{xy}^2]}\right]. \quad (5)$$

При выполнении преобразований считалось, что угол поворота антенны $\varphi_0 = 90^\circ$. Такое предположение позволяет получить более простые выражения, не нарушая общность постановки задачи.

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

2. ПОДВОДНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ВОЛНОГРАФ

При исследовании обратного рассеяния электромагнитных волн морской поверхностью область малых углов падения экспериментально изучена намного хуже, чем область средних и скользких углов вследствие сложности организации соответствующих измерений.

В наших экспериментах по исследованию обратного рассеяния при зондировании под малыми углами падения в качестве носителя применялся вертолёт [13]. Однако высокая стоимость полётов не позволяет провести полноценное исследование зависимости доплеровского спектра от условий проведения измерений и погоды. Кроме того, движение вертолёта существенно влияет на точность восстановления статистических моментов, связанных с собственным движением поверхности. В связи с этим представляется целесообразным заменить радиолокатор акустическим

локатором и использовать неподвижную подводную акустическую систему с ножевой диаграммой направленности антенны для проведения измерения спектральных и энергетических характеристик отражённого сигнала.

При обработке отражённого акустического сигнала будут определяться сечение обратного рассеяния, ширина и смещение доплеровского спектра. Как видно из (4), последнее пропорционально синусу угла падения. В ходе планируемого натурного эксперимента достаточно сложно контролировать малые углы падения с точностью, необходимой для использования смещения максимума доплеровского спектра в алгоритмах обработки. Поэтому проще организовать измерения в вертикальном направлении, т. е. считать, что $\theta_0 = 0^\circ$ и не учитывать при обработке доплеровское смещение. Отметим, что зависимости ширины доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния от угла падения слабые и небольшие отклонения от вертикали не окажут влияния на результат. Таким образом, обрабатываться будут лишь данные о сечении обратного рассеяния и ширине доплеровского спектра.

Задача восстановления статистических моментов по ширине доплеровского спектра и сечению обратного рассеяния может быть решена в общем случае численно, см. формулы (3), (5). Однако можно легко получить аналитическое решение, если, например, предположить, что $K_{xy} = 0$, что соответствует ориентации антенны вдоль или поперёк направления распространения волнения.

Выбор ориентации антенны вдоль направления распространения волнения при организации натуральных измерений является вполне решаемой задачей. Следовательно, данное предположение может быть реализовано на практике за счёт выбора ориентации антенны. Поэтому дальше считаем, что коэффициент корреляции $K_{xy} = 0$.

В результате формулы (3) и (5) значительно упростятся и примут следующий вид:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2\ln 10}}{\lambda} \left[\sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2/5,52} - \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$\sigma_0 = \frac{|V_{\text{эфф}}|^2}{2(\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2/5,52)^{1/2}(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52)^{1/2}}. \quad (7)$$

Таким образом, остаются неизвестными пять статистических моментов и эффективный коэффициент отражения. Для их восстановления достаточно шести уравнений.

Считаем, что антенна имеет ножевую диаграмму направленности с $\delta_x \gg \delta_y$ и волнение распространяется вдоль оси y . Угол поворота антенны $\varphi_0 = 90^\circ$. Для определения всех неизвестных достаточно провести три измерения: ножевой антенной для двух азимутальных ориентаций её диаграммы направленности (0° и 90°) и антенной с симметричной диаграммой направленности. Чтобы не вращать ножевую антенну в ходе измерений, предполагается использовать две приёмные ножевые антенны, ориентированные перпендикулярно друг другу.

3. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Предлагаемая схема измерений показана на рис. 4. Для выполнения измерений предлагается применить две ножевые антенны, ориентированные перпендикулярно друг другу, и одну симметричную антенну. На рис. 4а показаны отражающие площадки в плоскости xu для трёх антенн.

Акустический блок, т. е. излучатель и система антенн, расположен под водой и излучает в вертикальном направлении вверх (см. рис. 4б). На поверхности расположен буй, который закреплён на дне и соединён кабелем с акустическим блоком и служит для последнего источником питания, а также накопителем и передатчиком информации. Данные о скорости и направлении ветра могут быть получены путём установки соответствующих датчиков.

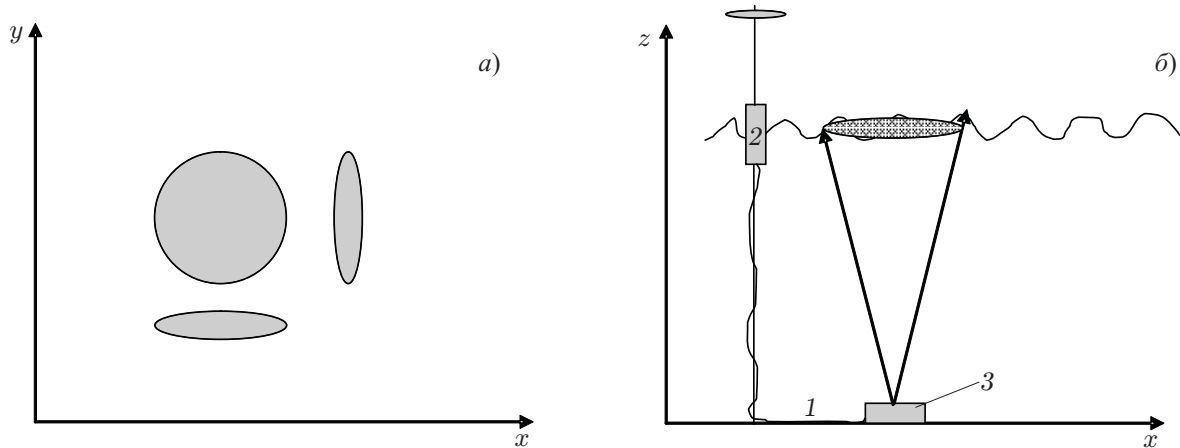


Рис. 4. Предлагаемая схема размещения антенн (а) и измерительной системы (б): 1 — кабель, 2 — буй, 3 — излучатель

Для расположения антенн, показанного на рис. 4а, был разработан алгоритм обработки, использующий сечение обратного рассеяния и ширину доплеровского спектра и позволяющий восстанавливать статистические моменты второго порядка и эффективный коэффициент отражения.

Пусть первый цикл измерения выполнен с помощью антенны с ножевой диаграммой направленности, для которой $\delta_x \gg \delta_y$, второй цикл — при $\delta_x \ll \delta_y$, и третий — акустической системой с симметричной антенной с $\delta_x = \delta_y = \delta$.

В результате получаем три уравнения для сечения обратного рассеяния:

$$\sigma_0(1) = \frac{|V_{\text{эфф}}|^2}{2(\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2/5,52)^{1/2}(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52)^{1/2}}, \tag{8}$$

$$\sigma_0(2) = \frac{|V_{\text{эфф}}|^2}{2(\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2/5,52)^{1/2}(\sigma_{yy}^2 + \delta_y^2/5,52)^{1/2}}, \tag{9}$$

$$\sigma_0(3) = \frac{|V_{\text{эфф}}|^2}{2(\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2/5,52)^{1/2}(\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52)^{1/2}}. \tag{10}$$

Данная система легко решается аналитически, и формулы для дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и эффективного коэффициента отражения имеют следующий вид:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{\delta_x^2 \sigma_0^2(3) - \delta_y^2 \sigma_0^2(1)}{5,52[\sigma_0^2(1) - \sigma_0^2(3)]}, \tag{11}$$

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_x^2 \sigma_0^2(3) - \delta_y^2 \sigma_0^2(2)}{5,52[\sigma_0^2(2) - \sigma_0^2(3)]}, \tag{12}$$

$$|V_{\text{эфф}}|^2 = \frac{2\sigma_0(1)\sigma_0(2)\sigma_0(3)(\delta_x^2 - \delta_y^2)}{5,52\sqrt{[\sigma_0^2(1) - \sigma_0^2(3)][\sigma_0^2(2) - \sigma_0^2(3)]}}. \tag{13}$$

Таким образом, используя сечение обратного рассеяния можно восстановить дисперсию наклонов и эффективный коэффициент отражения. Поскольку последний связан со скоростью приповерхностного ветра, это позволяет получить оценку его скорости. Таким образом, подводный акустический волнограф будет способен измерять не только параметры крупномасштабного волнения, но и скорость ветра.

Аналогичную систему уравнений можно записать для ширины доплеровского спектра и после её решения получить следующие значения для дисперсии наклонов и коэффициентов корреляции:

$$K_{xt} = \frac{\lambda}{4\sqrt{2\ln 10}} \sqrt{\frac{\Delta f_{10}^2(1) - \Delta f_{10}^2(3)}{5,52(\delta_y^2 - \delta_x^2)}} \sqrt{(5,52\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2)(5,52\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2)}, \quad (14)$$

$$K_{yt} = \frac{\lambda}{4\sqrt{2\ln 10}} \sqrt{\frac{\Delta f_{10}^2(2) - \Delta f_{10}^2(3)}{5,52(\delta_y^2 - \delta_x^2)}} \sqrt{(5,52\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2)(5,52\sigma_{yy}^2 + \delta_y^2)}, \quad (15)$$

$$\sigma_{tt}^2 = \frac{\lambda^2}{32\ln 10} \left[\frac{\Delta f_{10}^2(1)(5,52\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2) - \Delta f_{10}^2(2)(5,52\sigma_{yy}^2 + \delta_y^2)}{\delta_y^2 - \delta_x^2} - \frac{\Delta f_{10}^2(3)[5,52(\sigma_{xx}^2 - \sigma_{yy}^2) + \delta_x^2 - \delta_y^2]}{\delta_y^2 - \delta_x^2} \right]. \quad (16)$$

При вычислениях используется восстановленная ранее дисперсия наклонов. В результате, измерив ширину доплеровского спектра и сечение обратного рассеяния тремя разными антеннами, можно восстановить основные статистические моменты второго порядка и эффективный коэффициент отражения.

В качестве альтернативной схемы можно рассмотреть ситуацию, когда третья антенна имеет не широкую, а узкую диаграмму направленности. В этом случае формулы примут следующий вид:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{\delta_x^2\sigma_0^2(2) - \delta_y^2\sigma_0^2(3)}{5,52[\sigma_0^2(3) - \sigma_0^2(2)]}, \quad (17)$$

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_y^2\sigma_0^2(3) - \delta_x^2\sigma_0^2(1)}{5,52[\sigma_0^2(1) - \sigma_0^2(3)]}, \quad (18)$$

$$K_{xt} = \frac{\lambda}{4\sqrt{2\ln 10}} \sqrt{\frac{\Delta f_{10}^2(2) - \Delta f_{10}^2(3)}{5,52(\delta_x^2 - \delta_y^2)}} \sqrt{(5,52\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2)(5,52\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2)}, \quad (19)$$

$$K_{yt} = \frac{\lambda}{4\sqrt{2\ln 10}} \sqrt{\frac{\Delta f_{10}^2(1) - \Delta f_{10}^2(3)}{5,52(\delta_x^2 - \delta_y^2)}} \sqrt{(5,52\sigma_{yy}^2 + \delta_y^2)(5,52\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2)}, \quad (20)$$

$$\sigma_{tt}^2 = \left[\frac{\lambda \Delta f_{10}(1)}{4\sqrt{2\ln 10}} \right]^2 + \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2/5,52} + \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52}. \quad (21)$$

Подводные акустические волнографы с симметричной узкой диаграммой направленности антенны, предназначенные для измерения высоты значительного волнения, известны и применялись в экспериментах, см. например, [14, 15]. С их помощью измеряется расстояние до поверхности и прописывается профиль крупномасштабного волнения. Эти данные используются для вычисления его спектра. В такой схеме проведения измерений размер отражающей площадки на поверхности выступает ограничителем, т. е. определяет минимальную измеряемую длину волны. Предлагаемая подводная акустическая система способна измерить все ключевые характеристики крупномасштабного по сравнению с длиной волны излучения волнения. Кроме того, с помощью неё можно восстановить эффективный коэффициент отражения. По величине последнего можно определить скорость приповерхностного ветра с большей точностью, чем по сечению обратного

рассеяния, т. к. при этом устраняется влияние крупномасштабного волнения на мощность отражённого сигнала, обусловленное модуляцией последнего наклонами крупномасштабного волнения.

Разрабатываемый акустический волнограф сделает возможным проведение исследований, связанных с уточнением механизма обратного рассеяния. В частности, он позволит решить вопрос деления спектра волнения на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие в рамках двухмасштабной модели волнения, которая активно используется для решения теоретических задач радиолокационной океанографии. В настоящее время вопрос о граничном волновом числе остаётся открытым, так что обычно указывают лишь интервал его значений, например от 3 до 6 длин падающей волны.

Если провести синхронные измерения волнения струнным и акустическим волнографами, то с помощью первого будет получен частотный спектр волнения, а с помощью второго — восстановлена дисперсия наклонов крупномасштабного волнения. Поскольку дисперсии наклонов, вычисленные по спектру и измеренные акустической системой, должны совпадать, то при интегрировании необходимо подбирать граничное волновое число таким образом, чтобы вычисленная по спектру и измеренная дисперсии совпадали.

Измерения эффективного коэффициента отражения достаточно сложны и выполнялись лишь в единичных работах, см., например, [16, 17]. Предлагаемый акустический волнограф позволяет легко проводить такие измерения и исследовать зависимость $V_{\text{эфф}}$ от скорости приповерхностного ветра. Это позволит повысить точность восстановления последней радиолокационными системами. Кроме того, можно будет проверить теоретические модели (см., например, [6, 11, 18]), разработанные для оценки эффективного коэффициента отражения.

Применение акустического волнографа позволит перейти к предложенному в [4] упрощённому описанию поверхностного волнения с помощью моментов. В отличие от модельных спектров такое упрощение является универсальным и может применяться как для моря, так и для внутренних водоёмов. Новый акустический волнограф будет восстанавливать именно те статистические моменты, которые применяются при таком подходе к описанию волнения, и, следовательно, обеспечит возможность его дальнейшей доработки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен новый способ измерения статистических моментов волнения второго порядка с помощью доплеровской акустической системы — акустического волнографа. Предложено использовать систему с тремя приёмными антеннами: две антенны с ножевыми диаграммами направленности и одна с симметричной. Антенный блок с излучателем предполагается разместить на дне и ориентировать в вертикальном направлении вверх.

Теоретический анализ показал, что такая конфигурация измерительной системы позволяет разработать алгоритмы восстановления статистических моментов второго порядка и эффективного коэффициента отражения. В качестве переменных при этом выступают сечение обратного рассеяния и ширина доплеровского спектра. Использование в акустической системе антенны с узкой симметричной диаграммой направленности позволяет, кроме того, измерять высоту значительного волнения и вычислять спектр возвышений.

Акустический волнограф хорошо вписывается в новую концепцию упрощённого описания поверхностного волнения, т. к. измеряет именно те его характеристики, которые используются для такого описания.

Новая акустическая система будет превосходить существующие морские буи по объёму измеряемой информации о волнении, позволяя восстанавливать, в частности, дисперсию наклонов

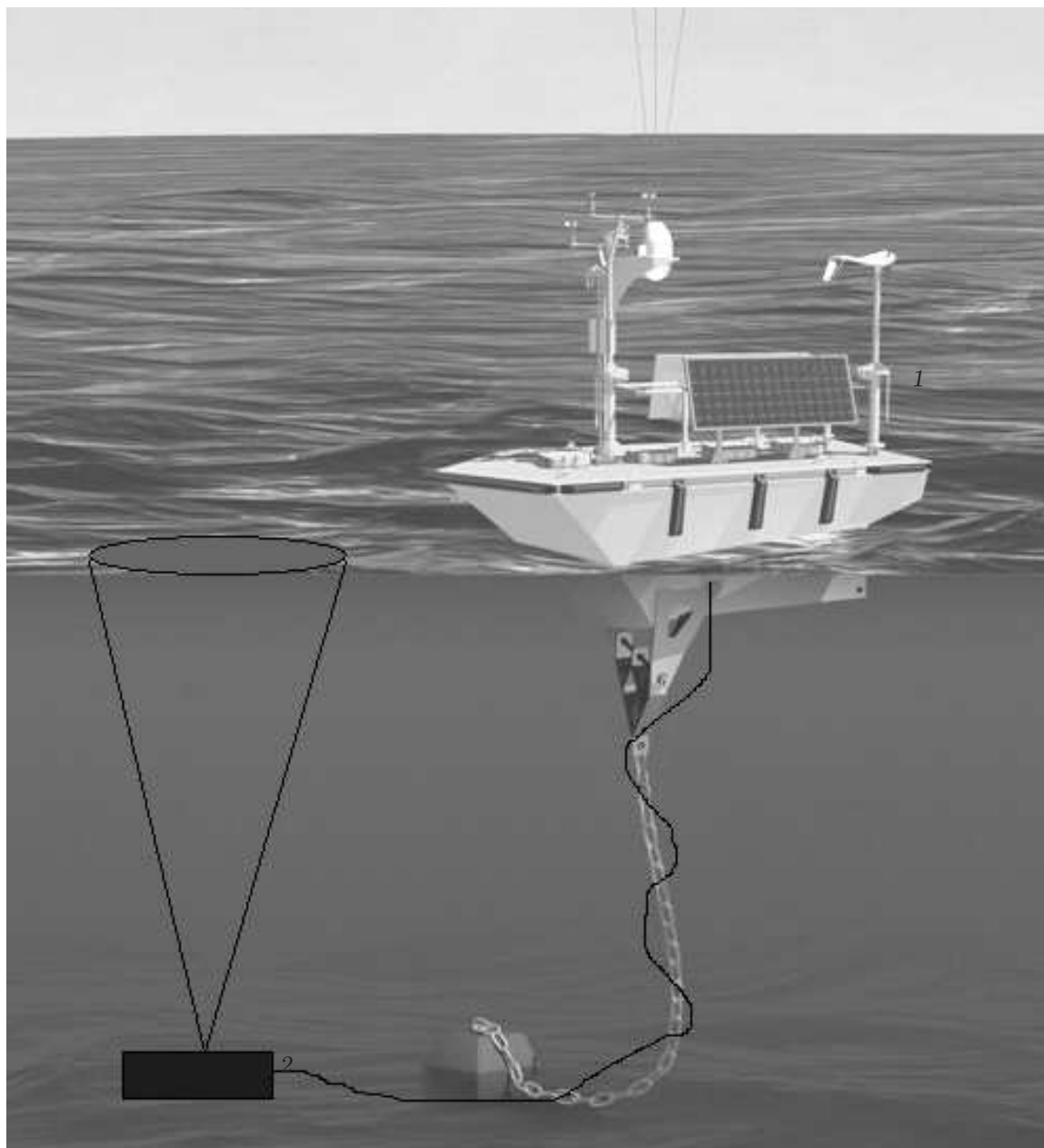


Рис. 5. Пример реализации измерительного комплекса, где 1 — надводная измерительная система, 2 — подводная акустическая система

крупномасштабного по сравнению с длиной волны падающего излучения волнения.

Учитывая существование сети морских буёв, предлагаемая подводная акустическая система может быть реализована в виде отдельного блока и устанавливаться рядом с бумом. На рис. 5 показан пример реализации такой схемы. Подводный кабель соединит акустический блок с морским бумом, что позволит осуществлять управление, передавать информацию и осуществлять питание нового прибора. Таким образом, использование существующих буёв позволит минимизировать затраты на внедрение новой измерительной аппаратуры. Авторами настоящей статьи планируется изготовить действующий макет предлагаемого прибора и провести с помощью него обсуждённые измерения.

Работа поддержана РФФИ (гранты 09–05–97016–р–п–а и 10–05–00181–а), программой ОФН РАН «Радиофизика» и госконтрактом 02.740.11.0566.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровин В. П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне: Учебное пособие. СПб: РГГМУ, 2007. 434 с.
2. <http://www.ndbc.noaa.gov>
3. Караев В. Ю., Баландина Г. // Исследование Земли из космоса. 2000. № 5. С. 1.
4. Караев В. Ю., Каневский М. Б., Мешков Е. М. Упрощённый подход к описанию поверхностного волнения в задачах радиолокационного зондирования: Препринт № 788 ИПФ РАН. Нижний Новгород, 2009. 24 с.
5. Cox С., Munk W. // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V. 44, No. 11. P. 838.
6. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически шероховатой поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
7. Исакович М. А. // ЖЭТФ. 1952. Т. 23, № 3 (9). С. 305.
8. Кравцов Ю. А., Фукс И. М., Шмелёв А. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. С. 854.
9. Караев В. Ю., Каневский М. Б., Баландина Г. Н. и др. // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. С. 51.
10. Караев В., Каневский М., Баландина М. Г. и др. // Исследование Земли из космоса. 2004. № 2. С. 41.
11. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отражённых от земной поверхности. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
12. Мешков Е., Караев В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 3. С. 231.
13. Караев В., Каневский М., Мешков Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 41, № 5. С. 398.
14. Strong B., Brumley B., Terray E., Stone G. // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, 11–14 September 2000, Proc. 2000. P. 1 195.
15. Terray E., Brumley B., Strong B. // Proc. Oceanology International'98. 1998. V. 2. P. 261.
16. Masuko H., Okamoto K., Shimada M., Niva S. // J. Geophys. Res. C. 1986. V. 91, No. 11. P. 13 065.
17. Freilich M., Vanhoff B. // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 20, No. 4. P. 549.
18. Elfouhaily T., Vandemark D., Gourrion J., Chapron B. // J. Geophys. Res. C. 1998. V. 103, No. 11. P. 25 101.

Поступила в редакцию 29 июня 2010 г.; принята в печать 25 октября 2010 г.

MEASUREMENT OF SEA WAVE PARAMETERS BY UNDERWATER ACOUSTIC SYSTEMS: DISCUSSION OF THE DEVICE CONCEPT

V. Yu. Karaev, M. B. Kanevskiy, and E. M. Meshkov

We consider the concept of an underwater acoustic wave recorder designed to measure statistic characteristics of sea surface roughness. It is proposed to be based on a centimeter-wave sonar placed underwater and sending probing signals vertically upwards. It is shown that the use of three antennas in such a system is sufficient to measure all statistic second moments of acoustic radiation of the waves which are large-scale compared with the wave length. This method can be used for the first time to measure those wave parameters which determine the characteristics of the reflected radar signals. The proposed wave recorder can be used as a stand-alone measuring device, as well as an additional

underwater unit of a conventional sea buoy. This will allow one to expand the volume of the information about surface waves, which is received from the buoy, at a minimal cost and will make it possible to calibrate new remote sounding systems capable of measuring the dispersion of sea surface inclinations.