

Применение акустического волнографа для измерения статистических параметров волнения: теория и эксперимент.

Титченко Ю. А., Караев В.Ю., Мешков Е.М., Баландина Г.Н., Титов В. И.

*Институт прикладной физики РАН, г.Нижний Новгород, ул.Ульянова, 46
E-mail: gt-george@yandex.ru*

В докладе обсуждается задача применения подводного доплеровского акустического волнографа для дистанционного измерения статистических параметров крупномасштабного волнения. Существенным недостатком лазерных и струнных волнографов является необходимость крепления приборов во время сеанса измерений неподвижно, что ограничивает область их применения.

Для измерения статистических характеристик волнения предлагается использовать доплеровский гидролокатор сантиметрового диапазона, установленный под водой с вертикально ориентированной диаграммой направленности антенны (ДНА). Предлагаемый способ измерений предполагает крепление прибора ко дну или установку на подводной плавучей платформе и, следовательно, измерения могут проводиться практически в любом месте Мирового океана. Такой акустический волнограф может быть использован как самостоятельный измерительный прибор, так и в качестве дополнительного подводного блока существующего морского буя.

Для проведения первых экспериментов был изготовлен макет доплеровского гидролокатора с длиной волны 8 мм и широкой ДНА. Была выполнена обработка данных, полученных в ходе экспериментов на Горьковском водохранилище. Сравнение с результатами численного моделирования подтвердило работоспособность акустического волнографа.

The report deals with the problem of employing an underwater acoustical wave gauge for remote sensing of the 2nd statistical moments of large-scale sea waves by analyzing spectral characteristics of a reflected acoustic signal. However, the major shortcoming of laser and string wave gauges is the necessity of their fastening, which limits their application area in marine environment.

It is proposed to use the centimeter Doppler sonar with a vertically oriented antenna pattern (AP) mounted under water for measuring statistical characteristics of waves. The proposed method enables one either to fasten the measurement device to the bottom or install it on an underwater floating platform, thus measurements can be carried out almost anywhere. This acoustic wave gauge can be used as a standalone instrument or as an additional underwater unit of the existing sea buoy.

Doppler sonar with a wavelength of 8 mm and a wide AP was manufactured for the first experiments. Real data obtained in experiments carried out from board a ship in the Gorky water-storage basin were processed to validate the algorithms. The efficiency of the algorithms is confirmed by their comparison with results of numerical simulation.

Дальнейшее развитие дистанционных методов связано с расширением числа измеряемых параметров волнения, например, актуальным является измерение дисперсии наклонов волнения. Эта информация поможет усовершенствовать региональные и глобальные численные модели волнения, повысит качество моделей волнового климата и прогнозов погоды. Для калибровки новых алгоритмов восстановления дисперсии наклонов будет необходимо измерение наклонов в ходе подспутниковых экспериментов.

Существенным недостатком струнных и лазерных волнографов является необходимость крепления приборов неподвижно, что резко ограничивает возможность их применения в открытом море в автономном режиме.

Достоверными источниками данных о поверхностном волнении являются морские буи, расположенные в разных акваториях Мирового океана. К сожалению, существующие морские буи не способны обеспечить измерение дисперсии наклонов с

необходимой точностью, поэтому необходимо развитие новой измерительной аппаратуры. Подводный акустический волнограф способен решить задачу измерения основных статистических характеристик волнения.

Постановка задачи

Алгоритмы восстановления статистических характеристик волнения основаны на зависимости доплеровского спектра отраженного сигнала от них. Схема проведения измерений показана на рис. 1.

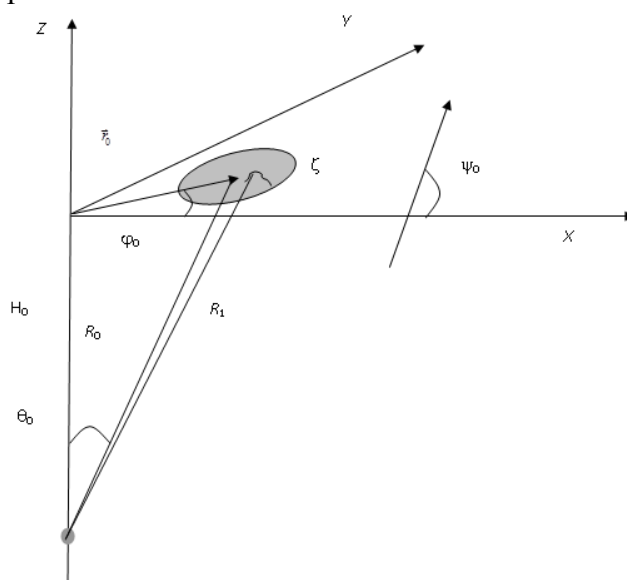


Рис. 1. Схема измерений.

Акустический излучатель расположен под водой на глубине H_0 и направлен вверх под углом падения θ_0 . В дальнейшем будем считать $\theta_0=0$, чтобы механизм обратного рассеяния оставался квазизеркальным и не надо было учитывать брэгговскую компоненту. Направление распространения волнения ψ_0 и угол поворота антенны φ_0 отсчитываются от оси X .

Диаграмма направленности антенны (ДНА) $G(\vec{r})$ предполагается гауссовой и имеет ширину δ_x и δ_y по уровню половинной мощности.

Выражение для ширины доплеровского спектра на уровне -10 дБ от максимума, получено в приближении метода Кирхгофа [1]:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2\ln 10}}{\lambda} \left[\sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2/5,52} - \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2/5,52} \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где σ_{tt}^2 - дисперсия вертикальной составляющей орбитальных скоростей; σ_{yy}^2 σ_{xx}^2 - дисперсия наклонов вдоль и поперек направления движения волнения соответственно; K_{xt} , K_{yt} - ненормированные коэффициенты корреляции наклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости при $\tau = 0$.

Формула для сечения обратного рассеяния σ_0 имеет следующий вид:

$$\sigma_0 = \frac{|V_{эфф}|^2}{2[\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2 / 5,52]^{0,5} [\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2 / 5,52]^{0,5}}, \quad (2)$$

где $V_{эфф}$ - эффективный коэффициент отражения.

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

Натурный эксперимент

Был изготовлен действующий макет доплеровского гидролокатора с длиной волны 8 мм и антенной с широкой ДНА $\delta_x^2 = \delta_y^2 = 30^\circ$. Фотографии акустического волнографа, сделанные во время экспедиции на Горьковское водохранилище, приведены на рис. 2.



Рис. 2. Фотографии акустического волнографа

Данный акустический волнограф состоит из трех частей. Гидролокатор (акустический излучатель и приемник) закреплен на плавучем диске из поливинил хлорида, обеспечивающего плавучесть и необходимую жесткость конструкции. К диску привязан груз, необходимый для погружения излучателя на дно.

Блок управления соединен с гидролокатором 20 метровым кабелем и находился на судне. Принятый сигнал передавался на судно и через АЦП записывался на ноутбук.

В ходе эксперимента измерения проводились при погружении гидролокатора на дно и ориентации антенны вертикально вверх.

На рис. 3 приведен пример доплеровского спектра, полученного в эксперименте. Он сравнивается со спектрами, вычисленными по модели доплеровского спектра отраженного сигнала [1] для нескольких скоростей ветра и со спектрами, полученным при численном моделировании эксперимента [2,3]. Видно хорошее совпадение модельных и измеренных спектров.

Доплеровский спектр, полученный при численном моделировании, усреднялся по 80 реализациям. Доплеровский спектр, измеренный в эксперименте на Горьковском водохранилище, усреднялся за 120 секунд. Безразмерный ветровой разгон во время измерений равнялся 1470, а скорость ветра в среднем 4,57 м/с со среднеквадратическим отклонением 0,32 м/с.

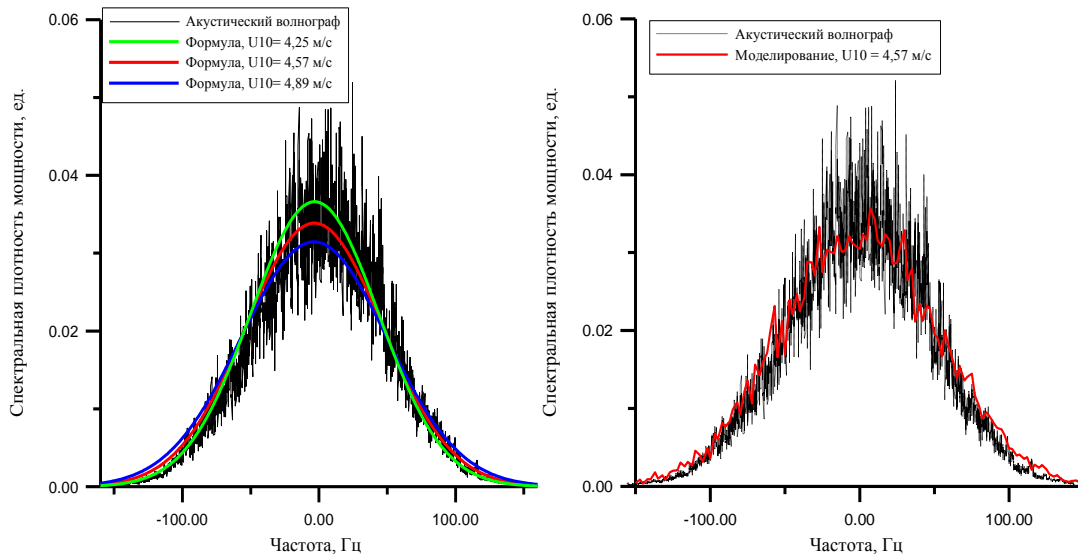


Рис. 3. Сравнение доплеровского спектра полученного в эксперименте со спектрами, вычисленными по теоретической модели и полученными при моделировании.

В изготовленном макете есть только одна приемно-передающая антенна с симметричной ДНА, что позволяет восстановить только одну статистическую характеристику волнения.

Численное моделирование показало, что для неподвижного гидролокатора основной вклад в ширину доплеровского спектра вносит дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости, которую можно оценить с приемлемой точностью, пренебрегая остальными статистическими характеристиками:

$$\sigma_{tt}^2 = \frac{(\Delta f_{10} \lambda)^2}{32 \ln 10} \quad (3)$$

На рис. 4 представлено сравнение дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости вычисленной тремя способами при измерении акустическим волнографом с данными полученными при моделировании для скоростей ветра отличающихся от средней скорости ветра за 120 секунд записи на стандартное отклонение. Средняя за 120 секунд скорость ветра изменялась от 5 м/с до 5,8 м/с, безразмерный разгон был выбран равным 1500.

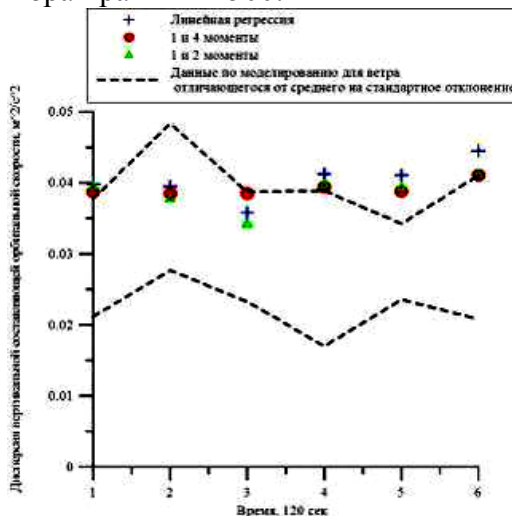


Рис. 4. Сравнение дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости, вычисленной тремя способами при измерении акустическим волнографом, с данными полученными при моделировании

Выводы

Был изготовлен действующий макет акустического волнографа с широкой симметричной ДНА и были разработаны алгоритмы обработки данных гидролокатора.

Проведена серия экспериментов на Горьковском водохранилище с макетом акустического волнографа. Разработан программный комплекс для обработки данных с акустического волнографа и определения дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости.

Для проверки работоспособности алгоритмов использовалось численное моделирование, которое подтвердило эффективность восстановления дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости.

В результате проведенного исследования была подтверждена возможность создания подводной акустической системы, способной измерять все основные статистические характеристики поверхностного волнения.

Литература

1. В.Ю.Караев, М.Б.Каневский, Е.М.Мешков, Измерение параметров поверхностного волнения подводными акустическими системами: обсуждение концепции прибора, Известия ВУЗов, сер. Радиофизика, 2010, т. 53, N 9-10, с. 634-645.
2. Караев В.Ю., Баландина Г.Н., Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование, Исследование Земли из космоса, 2000, № 5, с. 1-12
3. Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E. The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal, Sensors, 2008, 8, 3780-3801, DOI:10.3390/s8063780, <http://www.mdpi.org/sensors/papers/s8063780.pdf>