

**Определение высоты значительного волнения с помощью подводного акустического волнографа по взаимной корреляционной функции двух отраженных сигналов, разнесенных по частоте.**

Ю.А. Титченко, В.Ю. Караев, Е.М. Мешков, Э.М. Зуйкова, Р.В. Беляев

*Институт прикладной физики РАН  
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46  
E-mail: yuriy@ipfran.ru*

*Целью данного исследования является оценка применимости подхода определения высоты волн на основе измерения взаимной корреляционной функции двух сигналов близких по частоте, отраженных морской поверхностью в задаче гидроакустического зондирования. Задача предполагает установку на глубине двух непрерывно излучающих и принимающих ультразвуковых гидролокаторов с близкими частотами. Причем антенны гидролокаторов ориентируются вертикально вверх (или близко к вертикали, отклонение не более 10 -12 градусов) на водную поверхность так чтобы отраженный сигнал оставался в квазизеркальной области отражения и его можно было описывать в приближении Кирхгофа. При реализации данного подхода в эксперименте будет измеряться модуль нормированной взаимной корреляционной функции (далее коэффициент корреляции сигналов) для нескольких пар сигналов с разными частотными базами (разностями частот двух излучаемых сигналов). В результате решения прямой задачи можно получить аналитическое выражение, связывающее измеряемый гидролокаторами коэффициент корреляции сигналов с параметрами волнения, такими как высота значительного волнения и дисперсии уклонов в перпендикулярных плоскостях. Данный подход позволяет непосредственно измерять высоту значительного волнения антенной с широкой диаграммой направленности антенны и при этом результат будет независим от глубины погружения.*

*Ключевые слова: Кросс-корреляция сигналов, взаимная корреляционная функция, гидроакустика, двухчастотная корреляционная функция, приближение Кирхгофа, дисперсия высот, дисперсия уклонов, диаграмма направленности антенны, моделирование*

**Determining the significant wave height using an underwater acoustic wave gauge from the cross-correlation function of two reflected signals spaced in frequency**

Yu.A. Titchenko, V.Yu. Karaev, E.M. Meshkov, E.M. Zuykova, R.V. Belyaev

*Institute of Applied Physics RAS*

*The purpose of this study is to evaluate the approach applicability for the wave height determination based on measuring the cross-correlation function of two signals of similar frequencies reflected by the sea surface in the problem of hydroacoustic sounding. The task involves the installation at a depth of two continuously emitting and receiving ultrasonic sonars with similar frequencies. Moreover, the sonar antennas are oriented vertically upwards (or close to the vertical, the deviation is not more than 10 -12 degrees) on the water surface so that the reflected signal remains in the quasi-specular reflection region and can be described in the Kirchhoff approximation. When implementing this approach, the modulus of the normalized cross-correlation function (hereinafter, the signal correlation coefficient) will be measured in the experiment for several pairs of signals with different frequency bases (frequency differences of two emitted signals). As a result of solving the direct problem, it is possible to obtain an analytical expression that relates the signal correlation coefficient measured by sonar with wave parameters, such as the significant wave height and slope variances in perpendicular planes. This approach allows you to directly measure the significant wave height with an antenna with a wide antenna pattern, and the result will be independent of the depth of immersion.*

*Keywords: Cross-correlation of signals, hydroacoustics, two-frequency correlation function, Kirchhoff approximation, significant wave height, slope variance, antenna pattern, simulation*

## **Введение**

Высота значительного волнения является важным параметром, характеризующим поверхностное волнение, так как энергия морских волн связана с этим параметром. Высота волнения на сегодняшний день является единственным параметром морских волн, который измеряется глобально на постоянной основе. Эта информация ассимилируется в моделях волнового климата и климата Земли. Начиная с 1993 года высота значительного волнения в Мировом океане измеряется в непрерывном режиме с помощью спутниковых радиоальтиметров [1].

Обычно высота значительного волнения в подводных акустических приборах измеряется по временной реализации времени задержки импульса с помощью узкой антенны, установленной на небольшой глубине [2, 3]. Ранее для измерений подводными акустическими приборами был предложен метод анализа формы отраженного импульса, заимствованный из радиолокации [4]. По времени задержки импульса можно определить дальность до среднего уровня водной поверхности, по наклону переднего фронта импульса измерить высоту значительного волнения, а по заднему склону отраженного импульса можно измерить дисперсию уклонов волн [5].

Однако в радиолокации известен принципиально другой подход, в котором для измерения высоты волнения используют двухчастотную взаимную корреляционную функцию отраженных сигналов [6-8]. Этот подход по сравнению с традиционным для радиоальтиметров потенциально позволяет добиться более высокой точности измерений при слабом волнении. Важным преимуществом подхода является возможность получить явную связь измеряемого параметра с параметрами волнения и геометрией задачи. Этот эффект достигается за счет использования разных частотных баз для измерения разных диапазонов высот волн. Эффективность этого подхода подтверждена в самолетных экспериментах [9, 10].

В данной работе предлагается этот известный подход адаптировать к задаче гидроакустического зондирования водной поверхности. Целью работы является проверка работоспособности подхода измерения высоты значительного волнения по коэффициенту корреляции сигналов в гидроакустической задаче.

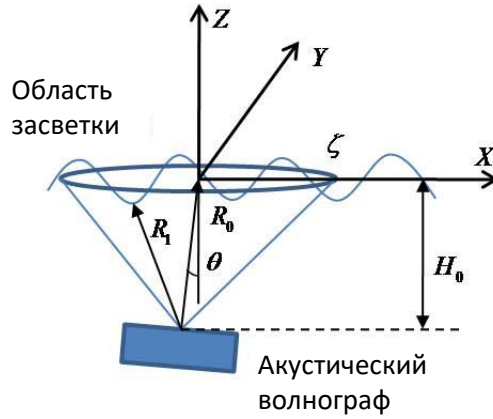
## **Постановка задачи**

Рассмотрим схему квазизеркального отражения волн на рисунке 1.

Акустический волнограф располагается на глубине  $H_0$ . Антенны акустического волнографа все лежат в одной плоскости и ориентированы под углом  $\theta$  к вертикали. Невозмущенная водная поверхность совпадает с плоскостью XY. Ординаты крупномасштабной [11, 12] водной поверхности описываются случайной функцией  $z = \xi(x, y)$  с гауссовой функцией распределения высот. Будем рассматривать частный случай распространения волнения вдоль оси X или Y. Передатчики акустического волнографа одновременно излучают сферические волны с волновыми числами  $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ , и  $k_2 = 2\pi/\lambda_2$ , где  $\lambda$  - длина волны.

Будем считать, что волновые числа незначительно отличаются друг от друга:

$$\frac{\Delta k}{k_1} = \frac{k_2 - k_1}{k_1} \ll 1. \quad (1)$$



**Рис.1** Схема измерений.

Расстояние от акустического волнографа до текущих точек  $(x, y, \xi(x, y))$  и  $(x', y', \xi(x', y'))$  на плоскости XY равно  $R_1$  и  $R'_1$  соответственно.

Будем считать, что излучатели и приемники имеют одинаковую антенну. Диаграмма направленности антенны описываются Гауссовой формой:

$$G(x, y) = e^{\left( -1,38 \frac{\cos^2 \theta}{R_0^2 \delta_x^2} x^2 - 1,38 \frac{y^2}{R_0^2 \delta_y^2} \right)}, \quad (2)$$

где  $R_0$  - расстояние от центра рассеивающей площадки до акустического волнографа,  $\delta_x, \delta_y$  - ширины диаграмм направленности по уровню половинной мощности по углу падения и азимуту.

При небольшом отклонении приемника от вертикали ( $<10-12^\circ$ ) можно записать напряжения на выходе приемной антенны для каждой частоты используя приближение Кирхгофа:

$$U_1 = \frac{U_0 q(k_1)^2 V_{eff}}{4\pi i R_0^2 q_z(k_1)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G^2(x, y) e^{2ik_1 R_1} dx dy, \quad (3)$$

$$U_2 = \frac{U_{02} q(k_2)^2 V_{eff}}{4\pi i R_0^2 q_z(k_2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G^2(x, y) e^{2ik_2 R'_1} dx dy,$$

где  $\vec{q}(k_i) = (q_x, q_y, q_z) = -2k_i \nabla R_0$  - вектор рассеяния,  $U_{01}, U_{02}$  - амплитуды излученных полей на двух частотах,  $V_{eff}$  - эффективный коэффициент отражения, учитывающий ослабление сигнала за счет рассеяния на мелкомасштабных неровностях поверхности.

Далее аналогично работам [13, 14] получим выражение модуля коэффициента взаимной корреляции, который далее называем коэффициентом корреляции сигналов:

$$|\rho(\Delta k)| = \frac{\exp \left\{ -2\sigma_{\xi}^2 \cos^2 \theta (k_1 - k_2)^2 - \frac{2 \left( \frac{11,04}{\delta_x^2} \right)^2 \tan^2 \theta (k_1 - k_2)^2}{\left( \frac{k_2}{k_1 \sigma_{xx}^2} + \frac{11,04}{\delta_x^2} \right)^3 \frac{1}{R_0^2} + 4(k_1 - k_2)^2 \left( \frac{k_2}{k_1 \sigma_{xx}^2} + \frac{11,04}{\delta_x^2} \right)} \right\}}{\sqrt[4]{1 + \frac{4(k_1 - k_2)^2 R_0^2}{\left( \frac{k_2}{\sigma_{yy}^2 k_1 \cos^2 \theta} + \frac{11,04}{\delta_y^2} \right)^2}} \sqrt[4]{1 + \frac{4(k_1 - k_2)^2 R_0^2}{\left( \frac{k_2}{k_1 \sigma_{xx}^2} + \frac{11,04}{\delta_x^2} \right)^2}}}. \quad (4)$$

где  $\sigma_{\xi}^2 = \langle \xi; \xi \rangle$  - дисперсия высот, высота значительного волнения вычисляется как четыре корня из дисперсии высот;  $\sigma_{xx}^2 = \left\langle \frac{\partial \xi}{\partial x}; \frac{\partial \xi}{\partial x} \right\rangle$ ,  $\sigma_{yy}^2 = \left\langle \frac{\partial \xi}{\partial y}; \frac{\partial \xi}{\partial y} \right\rangle$  - дисперсии уклонов в двух перпендикулярных плоскостях. Из полученного выражения видно, что коэффициент корреляции сигналов зависит от глубины погружения, высоты волн, дисперсий уклонов волн, ДН антенны и разницы волновых чисел излученных сигналов.

### Зависимость коэффициента взаимной корреляции для акустического волнографа

Построим зависимости коэффициента взаимной корреляции для ультразвукового подводного акустического волнографа. Частота одного из излучателей всегда 200 кГц (длина волны 8 мм). Сначала сравним зависимости от высоты значительного волнения для разных частотных баз (30 Гц, 60 Гц, 150 Гц) на рисунке 2. Дисперсии уклонов волн одинаковые во всех случаях и соответствуют полностью развитому волнению для скорости ветра 8 м/с. Ширины диаграммы направленности всех антенн равны  $\delta_x = \delta_y = 30^\circ \frac{\pi}{180^\circ}$ . Дальность от центра отражающей площадки до акустического волнографа равна 30 м. Угол падения  $\theta = 0^\circ$  от вертикали.

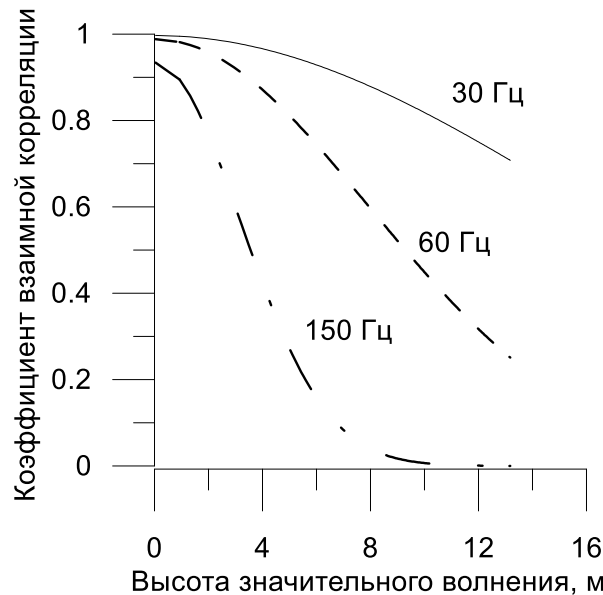


Рис. 2. Сравнение зависимостей коэффициента корреляции сигналов от высоты значительного волнения в бистатической и моностатической постановках задачи для трех вариантов разностей частот излученных волн  $\Delta f$ .

Полученные зависимости показывают чувствительность коэффициента корреляции сигналов к измеряемой высоте волнения для трех вариантов разностей частот излучаемых волн  $\Delta f$ . Видно, что максимальная чувствительность (производная) для разных высот волн достигается при разных  $\Delta f$ . Таким образом для обеспечения высокой точности измерений высот волн необходимо использовать несколько разностей частот. Таким образом получили что предлагаемый подход может быть применен в гидроакустике.

### **Выводы**

В данном исследовании впервые получена формула в явном виде выражающая связь коэффициента корреляции двух сигналов, разнесенных по частоте, отраженных водной поверхностью от параметров волн для акустического волнографа. При выводе учитываются 3 параметра отражающей поверхности: дисперсия высот волн, дисперсии уклонов в двух перпендикулярных плоскостях. Впервые для моностатической задачи в формуле для коэффициента корреляции сигналов сохранена зависимость от угла падения.

Из приведенных выше выражения и графика следует, что по кросс корреляционной функции двух сигналов, разнесенных по частоте в гидроакустической задаче, может быть определена дисперсия высот волн с высокой точностью во всем интервале высот волн. Важной особенностью рассмотренного случая является возможность использования широкой диаграммы направленности антенны. Это достигается за счет размещения волнографа на малой глубине. В радиолокации, например у этого подхода возникают проблемы при работе на спутниковых высотах даже при использовании очень узких антенн и для работы требуется проводить синтезирование апертуры антенны [15].

В дальнейшем будет решаться вопрос могут ли в рамках данного подхода быть восстановлены дисперсии уклонов в двух перпендикулярных плоскостях, например при использовании нескольких, возможно асимметричных диаграмм направленности антенны.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-77-10089).*

### **Литература**

1. Fu L.-L., Christensen E. J., Yamarone Jr. C. A., Lefebvre M., Ménard Y., Dorrer M., Escudier P. TOPEX/POSEIDON mission overview // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1994. – Т. 99, № C12. – С. 24369-24381.
2. Terray E., Brumley B., Strong B. Measuring waves and currents with an upward-looking ADCP // Oceanology International'98. – Т. 2 –, 1998. – С. 261-269.
3. Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Беляев Р. В., Яблоков А. А., Баранов В. И., Очередник В. В. Измерение статистических характеристик морской поверхности с помощью подводного акустического волнографа в Чёрном море и сравнение с ADCP // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 189-204.
4. Караев В. Ю., Мешков Е. М., Титченко Ю. А. Подводный акустический высотомер // Известия ВУЗов, сер. Радиофизика. – 2014. – Т. 57. – С. 543-554.

5. Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Kuznetsova A., Meshkov E. Peculiarities of the Acoustic Pulse Formation Reflected by the Water Surface: a Numerical Experiments and the Results of Long-term Measurements Using the "Kalmar" Sonar // OCEANS 2019 - Marseille 10.1109/oceanse.2019.8867467 –, 2019. – С. 1-7.
6. Радиолокация морской поверхности. / Гарнакерьян А. А., Сосунов А. С. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1978. – 144 с.
7. Ка М.-Н., Baskakov A. I., Jeon S.-Y., Paek I., Jang J. Multi-frequency precision radar altimetry from space for estimation of sea surface state // Electronics Letters. – 2016. – Т. 52, № 21. – С. 1804-1805.
8. Weissman D. Two frequency radar interferometry applied to the measurement of ocean wave height // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1973. – Т. 21, № 5. – С. 649-656.
9. Weissman D., Johnson J. Dual frequency correlation radar measurements of the height statistics of ocean waves // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1977. – Т. 25, № 1. – С. 74-83.
10. Лобач В. Т., Потипак М. В., Бахчевников В. В., Дулин М. И., Шеверда А. В. Измерение высоты морских волн по взаимной корреляционной функции разнесенных по частоте радиосигналов // Радиотехника. – 2018. № 11. – С. 134-138.
11. Elfouhaily T., Guérin C. A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces // Waves in Random Media. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 1-40.
12. Рассеяние волн на статистически шероховатой поверхности. / Басс Ф. Г., Фукс И. М. – Москва: Наука, 1972.
13. Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Ковалдов Д. А. Бистатистическая взаимная корреляционная функция двух сигналов разнесенных по частоте отраженных водной поверхностью // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 10.21046/20DZZconf-2022a – Москва: ИКИ РАН, 2022. – С. 219.
14. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Связь взаимной корреляционной функции бистатистически отраженных радиосигналов, разнесенных по частоте, с параметрами волнения // VII Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – Санкт-Петербург: Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2022. – С. 5.
15. Ка М.-Н., Baskakov A. I. Limiting accuracy of the dual-frequency microwave interferometry measurement for sea surface monitoring from space // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2015. – Т. 29, № 16. – С. 2199-2206.