

## **Особенности работы акустического высотомера при наклонном зондировании водной поверхности**

В.Ю. Караев, Ю.А. Титченко, Е.М. Мешков, М.А. Панфилова, Д.А. Ковалдов

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

*Для измерения высоты значительного волнения применяются высотомеры в микроволновом или акустическом диапазонах. Измерения выполняются при вертикальном зондировании и в алгоритмах ретрекинга анализируется форма отраженного импульса. Впервые была разработана теоретическая модель для формы отраженного импульса при малых углах падения ( $< 12^\circ$ ). В данном исследовании моделируется форма отраженного импульса для наклонного акустического высотомера и анализируется изменение формы отраженного импульса в зависимости от угла падения, ширины диаграммы направленности антенны, глубины установки высотомера и высоты значительного волнения. Численные оценки показали, что при высоте значительного волнения более 0,5 м ширина отраженного импульса оказывается слабо зависящей от параметров схемы измерения (угла падения, глубины погружения и ширины диаграммы направленности антенны).*

*Ключевые слова: высотомер, форма отраженного импульса, высота волнения, моделирование*

## **Features of the operation of an acoustic altimeter during oblique sounding of the water surface**

V.Yu. Karaev, Yu.A. Titchenko, Eu.M. Meshkov, M.A. Panfilova, D.A. Kovaldov

*Institute of Applied Physics RAS*

*To measure the significant wave height, altimeters in the microwave or acoustic bands are used. Measurements are performed during vertical probing and the waveform of the reflected impulse is analyzed in the retracking algorithms. For the first time, a theoretical model was developed for the waveform of the reflected impulse at small incidence angles ( $< 12^\circ$ ). This study models the waveform of the reflected impulse for an oblique acoustic altimeter and analyzes the variation of the waveform of the reflected impulse as a function of the incidence angle, antenna beamwidth, altimeter installation depth, and significant wave height. Numerical estimates have shown that when the significant wave height is more than 0.5 m, the width of the reflected impulse turns out to be weakly dependent on the parameters of the measurement scheme (incidence angle, depth and width of antenna beam). The results of studies of the influence of the contact potential difference due to the structural features of field mills on the accuracy of estimates of the measurement of the gradient of the electric field are presented. A variant of the device design allowing to determine the value in the operating mode and to quickly compensate the contact potential difference is proposed.*

*Keywords: altimeter, waveform of the reflected impulse, wave height, simulation*

### **Введение**

При малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркадным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Для описания отраженного поля используется метод Кирхгофа [1-4].

Достаточно простая модель рассеяния при малых углах падения позволила получить аналитическую формулу для формы отраженного импульса (модель Brown) при

надирном зондировании [5]. Передний фронт отраженного импульса содержит информацию о высоте значительного волнения и разработанные алгоритмы позволяют ее определять.

Недостатком радиовысотомера является то, что измерения должны выполняться при надирном зондировании и отклонение от вертикали ведет к быстрому ухудшению точности. Эта проблема впервые проявилась на спутниках серии Jason, где наблюдались отклонения от вертикали более 0,5 градусов. Это потребовало улучшения модели Брауна, что было сделано за счет учета следующих членов разложения в модели Amaroche [6].

Однако модель Amaroche справедлива только при небольших отклонениях от вертикали ( $< 1^\circ$ ). Преимуществом измерений при малых углах падения является то, что измерения высоты волнения можно выполнять не только вдоль траектории движения, но и в полосе, ширина которой определяется выбранным интервалом углов падения.

В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности и метода Кирхгофа впервые была получена формула для формы отраженного импульса для радиолокатора (гидролокатора) с узкой диаграммой направленности антенны при наклонном зондировании [7, 8]. Отражение электромагнитных и акустических волн водной поверхностью описывается одинаковыми моделями рассеяния, поэтому разработанная модель для формы отраженного импульса справедлива для электромагнитных и акустических волн.

Проведение радиолокационных измерений является более сложной задачей, чем измерения акустическим высотомером, поэтому в данной работе рассмотрим факторы, влияющие на форму импульса акустического высотомера. Обсудим особенности, обусловленные «медленной» скоростью звука.

Для измерения параметров волнения в ходе экспериментов использовался подводный акустический высотомер, разработанный в ИПФ РАН. В данной работе обсуждаются возможности наклонного акустического высотомера для измерения параметров волнения и для получения численных оценок используется новая модель формы отраженного импульса.

### **Форма отраженного импульса при наклонном зондировании**

Подводный акустический высотомер применялся в экспериментах для измерения параметров волнения и обработка данных подтвердила его эффективность [9, 10]. Для описания формы отраженного импульса использовалась теоретическая модель, разработанная для случая вертикального зондирования. Разработанные алгоритмы ретрекинга по форме отраженного импульса позволяют определять высоту значительного волнения, дисперсию уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны зондирующего излучения, волнения и измерять средний уровень водной поверхности.

Однако не всегда есть возможность проведения измерений при вертикальном зондировании, например, при измерении с судна. В таких случаях решением может стать наклонное зондирование.

Рассматриваемая схема зондирования показана на Рис. 1. Подводный акустический высотомер расположен на глубине  $H_0$ . Измерения выполняются под углом падения  $\theta_0$ , расстояние до точки отражения  $R_1$  и расстояние до плоскости  $XY$  равно  $R_0$ . Рассеивающая поверхность описывается случайной функцией  $\zeta(\vec{r}, t)$  с гауссовой функцией распределения высот.

В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности спектр волнение делится на крупномасштабное, по сравнению с длиной волны излучения, волнение и мелкую рябь. Предполагается, что при малых углах падения ( $< 12^\circ$ ), обратное рассеяние

является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Статистика «зеркальных» точек определяется дисперсией уклонов крупномасштабного волнения.

Приведем несколько формул, в которых определены переменные, входящие в модель для формы отраженного импульса.

Амплитуда отраженного поля вблизи приемной антенны задается следующей формулой [2, 11]:

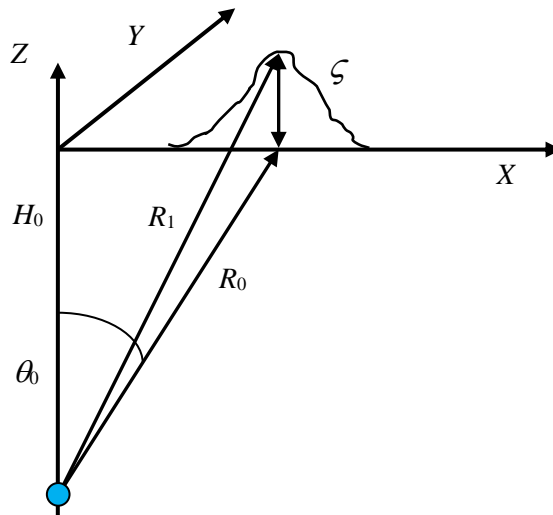
$$U_{scat} = \frac{V_{eff} \cdot U_i k}{2\pi R_0 \cos \theta_0} \int_S \exp[-2kR \cdot i] \cdot G^2(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (1)$$

где  $V_{eff}$  – эффективный коэффициент отражения, который учитывает влияние мелкой ряби на амплитуду отраженной волны;

$U_i$  амплитуда падающего поля вблизи отражающей поверхности связана с амплитудой излученного поля  $U_0$  следующей формулой:

$$U_i = U_0/R_0;$$

$S$  – площадь отражающей поверхности.



**Рис. 1. Схема зондирования:  $H_0$  – глубина погружения радиовысотомера  $\theta_0$  – угол падения,  $R_0$  – расстояния до плоскости  $XY$ ,  $R_1$  – расстояние до точки отражения и  $\zeta(\vec{r}, t)$  – высота поверхности в точке отражения**

Для упрощения последующих математических преобразований считали, что зондирование выполняется вдоль оси  $X$  axis ( $\phi_{rad} = 0^\circ$ ) диаграмма направленности антенны предполагается гауссовой и в декартовой системе координат задается следующей формулой:

$$G(\vec{r}) = \exp \left[ -1.38 \left( \frac{\cos^4 \theta_0}{H_0^2 \delta_x^2} (x - x_0)^2 + \frac{y^2 \cos^2 \theta_0}{H_0^2 \delta_y^2} \right) \right], \quad (2)$$

где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0.5 по мощности по углу падения и по азимутальному углу соответственно.

Для вычисления зависимости принимаемой мощности от времени (формы отраженного импульса) использовалась следующая формула:

$$P(t) = \langle U_{scat}(t) U_{scat}^*(t) \rangle, \quad (3)$$

где скобки обозначают усреднение по статистическому ансамблю.

При вертикальном зондировании излученный импульс «касается» поверхности в точке  $(0, 0)$ , расположенной над излучателем, При наклонном зондировании центр диаграммы направленности смещается в точку  $(H_0 \tan \theta_0, 0)$ .

Однако при наклонном зондировании первое «касание» излученного импульса происходит в той же точке (0, 0). На поверхности формируется пятно «засветки», размер которого определяется длительностью излученного импульса. После достижения задним фронтом отраженного импульса поверхности, круг превращается в кольцо, которое расширяется со временем. Схема показана на рис. 2.

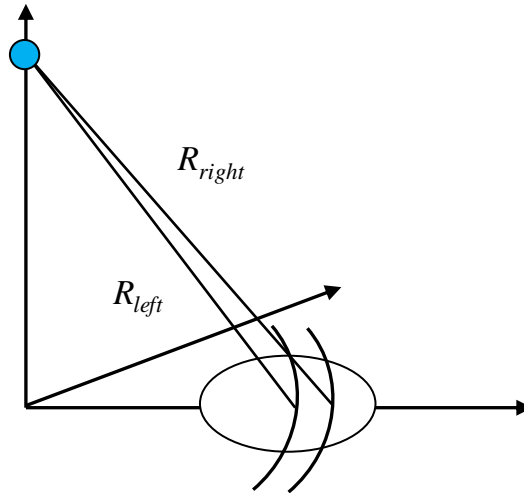


Рис. 2. Схема измерений.

Ширина кольца зависит от длительности импульса и скорости распространения звука. Эти параметры можно менять в широких пределах и, таким образом, задавать необходимую ширину в экспериментах.

Предположение, что ширина кольца много меньше размера пятна засветки, упростило дальнейшие преобразования и позволило получить аналитические формулы для формы отраженного импульса от «плоской» поверхности [7, 8]:

$$P(t) \sim \exp[-(x - x_0)^2 A_x] \exp[-A_{xx}(x - x_0)], \quad (4)$$

где

$$A_x = 5.52 \frac{\cos^4 \theta_0}{H_0^2 \delta_x^2} + \frac{\cos^6 \theta_0}{2H_0^2 mss_{xx}}, \quad (5)$$

$$A_{xx} = \frac{\sin \theta_0 \cos^3 \theta_0}{mss_{xx} H_0}, \quad (6)$$

и  $mss_{xx}$  – дисперсия уклонов крупномасштабного волнения вдоль оси X.

На рис. 3 показана форма импульса для глубины 100 м, длительности импульса 50 мкс, ширины диаграммы направленности  $0,5^\circ$ , угла падения  $8^\circ$ , дисперсии уклонов 0,015 и скорости звука  $c = 1500$  м/с. Для удобства дальнейших построений и сравнения время отсчитывается от центра диаграммы направленности антенны, т.е. вычитается величина:

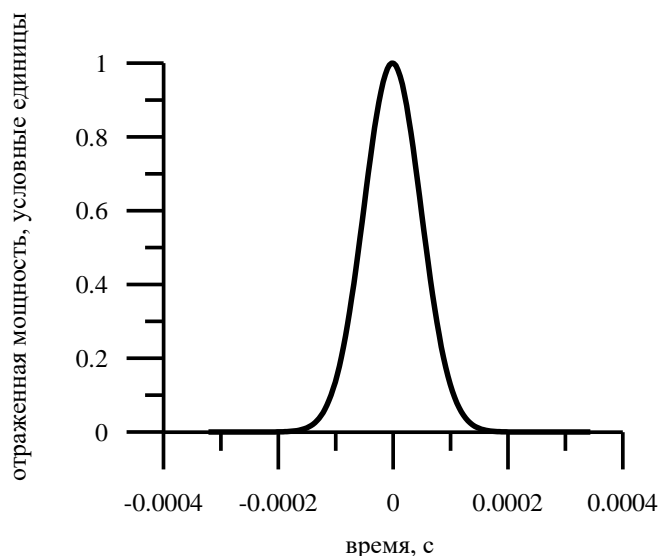
$$t_0 = \frac{2R_0}{c}$$

и по оси X отложено время, вычисленное таким образом.

При наклонном зондировании падающий импульс пробегает по «пятну» засветки узким кольцом и «прописывает» диаграмму направленности антенны в отраженном сигнале. Форма отраженного импульса зависит от ширины диаграммы направленности и расстояния до отражающей поверхности. Эти параметры входят в формулу в виде произведения, т.е. изменение одного из параметров, например, увеличение расстояния, можно «компенсировать» уменьшением ширины диаграммы направленности антенны.

Высота поверхностного волнения влияет на форму отраженного импульса, т.к. меняется расстояние от излучателя до точки отражения. Отражающая поверхность

представляется в виде набора «зеркальных» точек, расположенных на разных высотах, и для нахождения формы отраженного импульса такой поверхности необходимо выполнить усреднение по высотам.



**Рис. 3.** Форма отраженного импульса для плоской поверхности, формируемое диаграммой направленности антенны:  $H_0 = 100$  м, длительность импульса  $\tau_{imp} = 50$  мкс, ширина диаграммы направленности  $\delta_x = 0,5^\circ$ , угол падения  $\theta_0 = 8^\circ$ , дисперсии уклонов  $mss_{xx} = 0,015$  и скорости звука  $c = 1500$  м/с.

Как известно, функция распределения высот является гауссовой и во временной области ее можно представить в следующем виде:

$$W(\tau) = \frac{\exp\left[-\frac{\tau^2}{2\sigma_t^2}\right]}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2}}, \quad (5)$$

где  $t = \frac{2\zeta}{c}$ .

Тогда форма отраженного импульса является сверткой функции распределения высот и формы отраженного импульса для плоской поверхности:

$$F(t) = \int W(\tau) \times P(t - \tau) d\tau. \quad (6)$$

В результате была получена аналитическая формула для формы отраженного импульса [7, 8]:

$$F(\tau) \sim \exp\left[-\tau^2 \frac{A_x c^2}{4tg^2\theta_0} \left(1 - \frac{4A_x\sigma_\zeta^2}{C_x}\right)\right] \times \exp\left[-\tau \frac{A_{xx}}{2tg^2\theta_x} \left(1 - \frac{4A_x\sigma_\zeta^2}{C_x}\right)\right], \quad (7)$$

где  $C_x = 2tg^2\theta_0 + 4A_x\sigma_\zeta^2$ .

### Особенности наклонного зондирования

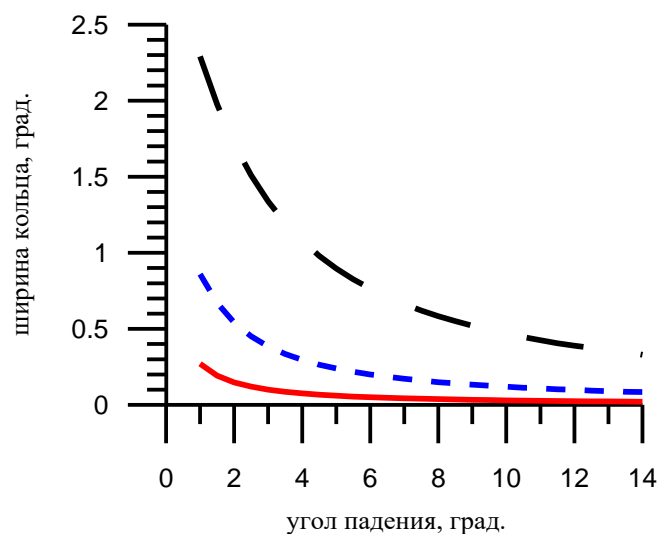
Как видно из формулы (7), форма отраженного импульса зависит от следующих параметров: ширины диаграммы направленности антенны, высоты значительного волнения, угла падения, дисперсии уклонов крупномасштабного волнения.

Дисперсия уклонов оказывает значительное влияние на форму отраженного импульса для широкой антенны [10, 11]. Для узкой антенны ( $< 1^\circ$ ) дисперсия уклонов

влияет только на величину сечения обратного рассеяния, т.к. определяет статистику зеркальных точек, формирующих отраженный сигнал. Форма отраженного импульса практически не зависит от дисперсии уклонов.

Угол падения является важной характеристикой, т.к. влияет на ширину «бегущего» кольца. На рис 4 показано изменение ширины кольца в градусах для длительности импульса 50 мкс и скорости звука 1500 м/с в зависимости от угла падения для центра кольца: черная кривая – 25 м, синяя кривая – 100 м и красная кривая – 400 м.

Из рисунка видно, что увеличение угла падения ведет к уменьшению ширины кольца в градусах. Также ширина кольца зависит от длительности импульса, поэтому за счет уменьшения длительности импульса можно добиться значительного уменьшения ширины. В частности, для частоты 200 кГц минимальная длительность импульса равна 5 мкс, т.е. кольцо «заузится» в 10 раз по сравнению с рисунком.



**Рис. 4. Зависимость ширины кольца, формируемого падающим импульсом, от его положения (угла падения) для длительности импульса 50 мкс, скорости звука 1500 м/с: черная кривая – 25 м, синяя кривая – 100 м и красная кривая – 400 м.**

Высотомер предназначен для измерения высоты волнения, поэтому рассмотрим влияние этого параметра на форму отраженного импульса.

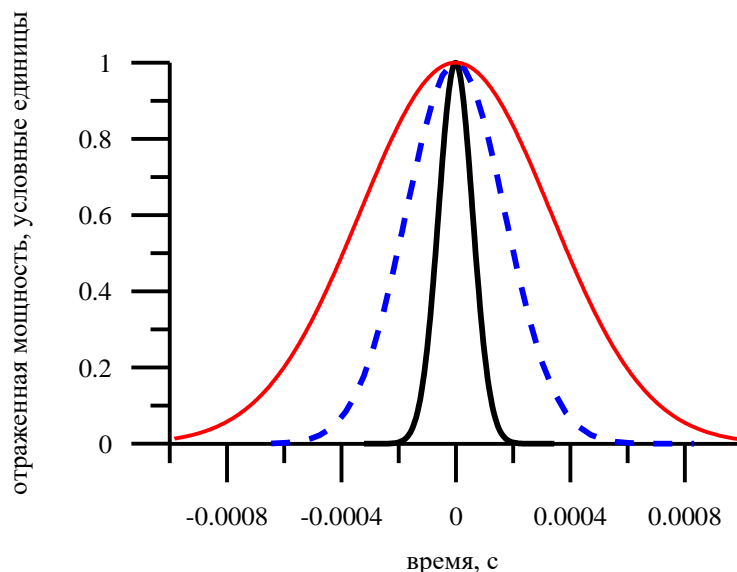
На рис. 5 приведены форма импульсов для трех значений высоты значительного волнения: 0,1 м/с (черная кривая), 0,5 м/с (синяя кривая) и 1 м/с (красная кривая). Вычисления сделаны для  $H_0 = 100$  м, длительности импульса  $\tau_{imp} = 50$  мкс, ширины диаграммы направленности  $\delta_x = 0,5^\circ$ , угла падения  $\theta_0 = 8^\circ$ , дисперсии уклонов  $m_{SS_{xx}} = 0,015$  и скорости звука  $c = 1500$  м/с.

Как видно из рисунка, ширина отраженного импульса чувствительна к высоте волнения и можно разработать алгоритм ретрекинга для ее определения.

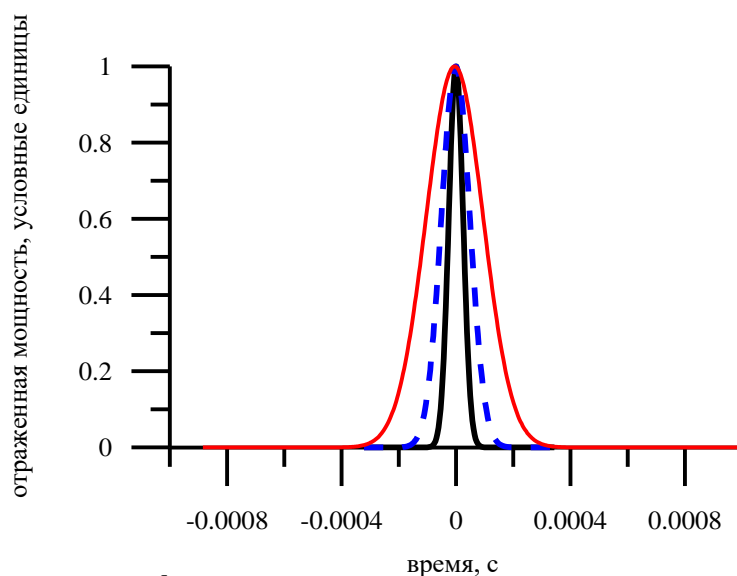
В формулу для формы отраженного импульса входит ширина диаграммы направленности антенны, глубина погружения высотомера и угол падения. Увеличение угла падения приводит к «заужению» кольца, что снижает требования к другим параметрам и это можно использовать для формирования оптимальной конфигурации волнографа.

Увеличение ширины диаграммы направленности антенны «уширяет» кольцо и должно приводить к увеличению ширины отраженного импульса. Это видно на рис. 6, где показана форма отраженного импульса для плоской поверхности: черная кривая  $0,25^\circ$ , синяя кривая  $0,5^\circ$  и красная кривая  $1^\circ$ . Вычисления сделаны для  $H_0 = 100$  м,

длительности импульса  $\tau_{imp} = 50$  мкс, угла падения  $\theta_0 = 8^\circ$ , дисперсии уклонов  $mss_{xx} = 0,015$  и скорости звука  $c = 1500$  м/с.



**Рис. 5. Форма отраженного импульса для трех значений высоты значительного волнения: черная кривая – 0,1 м, синяя кривая – 0,5 м и красная кривая 1 м. Вычисления сделаны для  $H_0 = 100$  м, длительности импульса  $\tau_{imp} = 50$  мкс, ширины диаграммы направленности  $\delta_x = 0,5^\circ$ , угла падения  $\theta_0 = 8^\circ$ , дисперсии уклонов  $mss_{xx} = 0,015$  и скорости звука  $c = 1500$  м/с.**

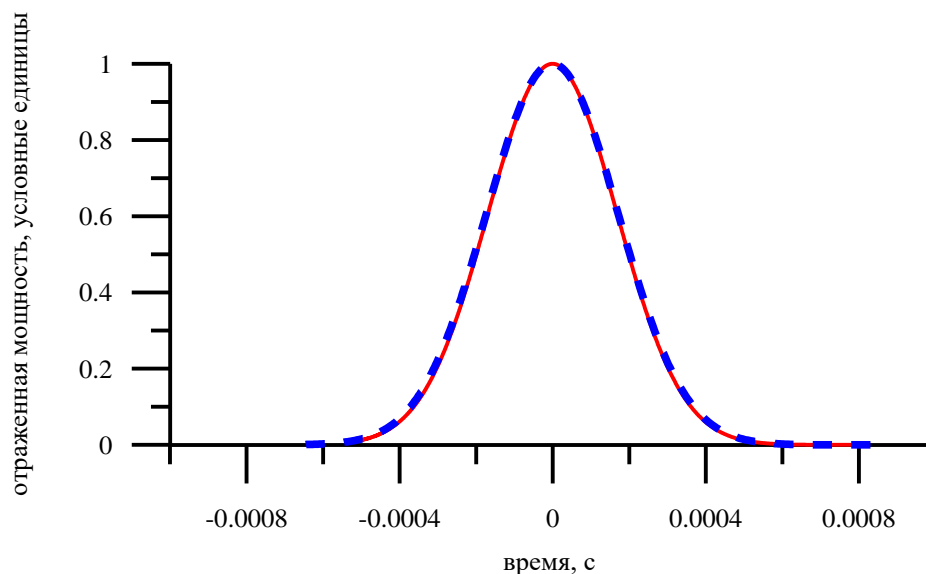


**Рис. 6. Зависимость формы отраженного импульса от ширины диаграммы направленности антенны для «плоской» поверхности: черная кривая 0,25 градуса, синяя кривая 0,5° и красная кривая 1°. Вычисления сделаны для  $H_0 = 100$  м, длительности импульса  $\tau_{imp} = 50$  мкс, угла падения  $\theta_0 = 8^\circ$ , дисперсии уклонов  $mss_{xx} = 0,015$  и скорости звука  $c = 1500$  м/с.**

Из сравнения Рис. 5 и 6 видно, что изменение высоты значительного волнения влияет на ширину отраженного импульса намного сильнее, чем изменение ширины диаграммы направленности антенны. Следовательно, неточное знание ширины диаграммы направленности антенны практически не повлияет на точность измерения высоты значительного волнения даже в случае слабого волнения.

Еще один параметр, который может определяться неточно в эксперименте, это угол падения. Сравним отраженные импульсы для разных углов падения и слабого волнения (0,5 м). На рис. 7 приведены результаты вычислений для двух углов падения:  $5^\circ$  (красная кривая) и  $8^\circ$  (синяя кривая). Вычисления сделаны для  $H_0 = 100$  м, длительности импульса  $\tau_{imp} = 50$  мкс, дисперсии уклонов  $m_{SS_{xx}} = 0,015$  и скорости звука  $c = 1500$  м/с, ширины диаграммы направленности  $\delta_x = 0,5^\circ$ .

Видно, что как и случае с шириной диаграммы направленности антенны, угол падения оказывает незначительное влияние на ширину отраженного импульса в условиях слабого волнения.



**Рис. 7. Форма импульса отраженного сигнала для двух углов падения:  $5^\circ$  (красная кривая) и  $8^\circ$  (синяя кривая).**

Следовательно, небольшие ошибки в определении угла падения и ширины диаграммы направленности антенны окажут минимальное влияние на точность оценки высоты значительного волнения даже в условиях слабого волнения ( $> 0,5$  м).

### **Заключение.**

Задача измерения параметров волнения является актуальной и подводный акустический высотомер является перспективным инструментом. Измерения на морском полигоне ЮО ИО РАН в Геленджике подтвердили его эффективность [9, 10]. Однако измерения выполнялись при вертикальном зондировании.

В данной работе впервые рассматривается случай наклонного зондирования для акустического высотомера. Показано, что форма отраженного импульса зависит от угла падения, ширины диаграммы направленности антенны, глубины расположения волнографа.

Численные оценки показали, что при высоте значительного волнения более 0,5 м ширина отраженного импульса оказывается слабо зависящей от параметров схемы измерения (угла падения, глубины погружения и ширины диаграммы направленности антенны). Таким образом, параметры, которые могут быть измерены неточно не окажут существенного влияния на точность оценки высоты значительного волнения.

Планируется проведение натурных экспериментов на полигоне и сравнение вертикального и наклонного акустических высотомеров.



*Работа была выполнена в рамках госзадания FFUF-2024-0033.*

### **Литература**

1. Исакович М. Рассеяние волн статистически неровной поверхностью // ЖЭТФ, 1952, Т. 23, № 3(9), С. 305–314.
2. Басс Ф., Фукс И. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности – М. Наука, Москва, 1972, 424 с.
3. Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review // *Boundary Layer Meteorology*, 1978, vol. 13, pp. 61–86.
4. Wright J. A New Model for Sea Clutter // *IEEE Transactions AP-16*, 1968, pp. 217-223.
5. Brown G. The average impulse response of a rough surface and its application // *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1977, vol. 25, No. 1, pp. 67–74.
6. Amarouche L., Thibaut P., Zanife O.Z., Anife J.-P., Dumont P., Vincent P., Steunou N. Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects // *Marine Geodesy*, 2004, vol. 27, No. 1-2, pp. 171–197.
7. Karaev V., Titchenko Yu., Panfilova M., Meshkov Eu., Kovaldov D. Waveform of the reflected impulse at the oblique sounding of the sea surface // *Russian Journal of Earth Sciences*, на рецензировании
8. Караев В., Титченко Ю., Панфилова М., Мешков Е. Теоретическая модель для формы отраженного импульса наклонного радиовысотомера // XXI Международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2023, Тезисы докладов, с. 210
9. Titchenko Yu., Karaev V., Ryabkova M., Kuznetsova A., Meshkov Eu. 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" // *Proceedings of OCEANS 2019, Marseille, France*, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867467.
10. Titchenko Yu., Gou J., Karaev V., Ponur K., Ryabkova M., Baranov V., Ocherednik V., He Y. Preliminary, Performance Assessment of the Wave Parameter Retrieval Algorithm from the Average Reflected Pulse // *Remote Sensing*, 2024, vol. 16, No. 418, doi.org/10.3390/rs16020418.
11. Karaev V., Meshkov Eu., Titchenko Yu. Underwater acoustic altimeter // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, Vol. 57, No 7, pp. 488-497.