

Тарыгин Илья Евгеньевич – e-mail: i.tarygin@gmail.com; тел.: +74959393383; Механико-математический факультет, кафедра Прикладной механики и управления; аспирант.

Голован Андрей Андреевич – e-mail: aagolovan@yandex.ru; тел.: +74959395933; Механико-математический факультет; Лаборатория управления и навигации; д.ф.-м.н.; зав. лабораторией.

Kozlov Alexander Vladimirovich – Lomonosov Moscow State University; e-mail: a.kozlov@navlab.ru; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia; phone: +74959395933; Faculty of Mechanics and Mathematics; cand. of phys. and math. sc.; senior researcher.

Parusnikov Nikolay Alekseevich – phone: +74959393383; Faculty of Mechanics and Mathematics; dr. of phys. and math. sc., professor.

Vavilova Nina Borisovna – e-mail: nb-vavilova@yandex.ru; phone: +74959395933; Faculty of Mechanics and Mathematics; cand. of phys. and math. sc.; lead researcher.

Tarygin Илья Evgenyevich – e-mail: i.tarygin@gmail.com; phone: +74959393383; Faculty of Mechanics and Mathematics,; post graduate student.

Golovan Andrey Andreevich –e-mail: aagolovan@yandex.ru; phone: +74959395933; Faculty of Mechanics and Mathematics; dr. of phys. and math. sc.; head of the laboratory.

УДК 551.463.224: 534.222

Г.Н. Серавин, И.И. Микушин, С.П. Тарасов

**ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ СРЕДЫ
МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ**

Задача определения гидрофизических характеристик морской среды по зафиксированным значениям излученных и принятых отражённых акустических сигналов от естественных рассеивателей в морской среде, без непосредственного измерения самих характеристик с помощью корабельных погружающихся зондов, является в настоящее время особенно актуальной. Оценка влияния вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) от поверхности до дна в морском волноводе производится непосредственно перед использованием различной гидроакустической аппаратуры, установленной на судне либо на автономном необитаемом подводном аппарате. Возможность использования информации о гидрофизических характеристиках волновода распространения гидроакустических сигналов при обнаружении подводной цели может значительно повысить эффективность использования судовой гидроакустической аппаратуры. Проводились исследования и разработки дистанционных методов измерения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) с помощью так называемых параметрических антенн, принцип действия которых основан на нелинейном взаимодействии акустических волн в морской среде. Рассмотрены возможности использования двух нелинейных эффектов для измерения дистанционным методом вертикального распределения скорости звука. Проведен анализ возможности использования рассеяния звука на звуке для дистанционного определения вертикального распределения скорости звука. Энергетические соотношения показали, что рассеянный из области пересечения акустических пучков сигнал разностной частоты, в принципе, может быть достоверно принят. Для решения обратной задачи используется алгоритм восстановления искомого ВРСЗ способом дискретизации. Производится аппроксимация искомой функции отрезками в водной среде, представленной в виде слоев с постоянными вертикальными градиентами скорости звука. Проанализирована возможность определения ВРСЗ на основе вторичного эффекта фазовой модуляции волн накачки волной разностной частоты. Для выделения фазы необходимо на выходе антенны из суммарного высокочастотного электрического сигнала отфильтровать сигнал с комбинационной частотой и сформировать опорный электрический сигнал с такой же частотой. Сигналы подаются на соответствующие входы фазометра, на выходе которого и будет иметь место электрический сигнал фазы, который преобразуется в

цифровую форму и поступает в вычислительный блок. Рассмотрены погрешности метода. Отмечается, что довольно значительная величина погрешности не позволяет рассматривать метод определения ВРСЗ на основе вторичного эффекта фазовой модуляции волн накачки волновой разностной частоты, в качестве перспективного для внедрения в практику измерений. Рассмотрена возможность практической реализации предлагаемых методов.

Скорость звука; дистанционный метод; нелинейное взаимодействие; акустические волны; вертикальное распределение скорости звука.

G.N. Seravin, I.I. Mikushin, S.P. Tarasov

THE PROBLEMS OF REMOTE DETERMINATION OF HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MARINE ENVIRONMENT BY METHODS OF NONLINEAR ACOUSTICS

The problem of determining the hydrophysical characteristics of the marine environment from the recorded values of known emitted and received reflected acoustic signals from natural lenses in the marine environment, without directly measuring the characteristics themselves by means of ship-based submersible probes, is currently particularly relevant. The impact of the vertical sound velocity distribution (VSVD) from the surface to the bottom in a sea waveguide is assessed immediately prior to the use of various hydroacoustic equipment installed on a vessel, or on autonomous uninhabited underwater apparatus. The possibility of using the information on hydrophysical characteristics of waveguide propagation of hydroacoustic signals, when detected are the underwater targets, can significantly improve the efficiency of use of shipboard sonar equipment. Research and development of remote methods for measuring the vertical sound velocity distribution (VSVD) with the help of so-called parametric arrays, which principle of operation is based on the nonlinear interaction of acoustic waves in the marine environment. The possibilities of using two nonlinear effects for measuring the vertical velocity distribution of sound by a remote method are considered. The analysis of the possibility of using sound scattering on sound for remote determination of the vertical velocity distribution of sound is analyzed. The energy relationships have shown that the signal of the difference frequency, scattered from the region of intersection of acoustic beams, can in principle be reliably accepted. To solve the inverse problem, the algorithm of the reconstruction of the desired VSVD is used by the method of discretization. The approximation of the required function by segments in an aqueous medium is presented, represented in the form of layers with constant vertical gradients of the sound velocity. The possibility of determining the VSVD on the basis of the secondary effect of phase modulation of pump waves by a difference-frequency wave is analyzed. To isolate the phase, it is necessary to filter out the signal with the combinational frequency at the output of the antenna from the total high-frequency electrical signal and to generate a reference electric signal with the same frequency. The signals are fed to the corresponding inputs of the phase meter, at the output of which there will be an electrical phase signal, which is digitized and enters the computational block. The errors of the method are considered. It is noted that a rather significant amount of error does not allow us to consider the method of determining the VSVD based on the secondary effect of phase modulation of pump waves by a wave of difference frequency, as a promising tool for the introduction of measurements into practice. The possibility of practical implementation of the proposed methods is considered.

Sound velocity; remote method; nonlinear interaction; acoustic waves; vertical sound velocity distribution.

Введение. Нелинейная акустика изучает мощные звуковые и ультразвуковые возмущения, различные связанные с ними эффекты и процессы, описываемые с помощью нелинейных дифференциальных гидродинамических уравнений. Принцип суперпозиции нарушается, волн начинают влиять друг на друга или взаимодействовать. При излучении двух волны с разными частотами, вторая волна распространяется в среде с изменяющимися параметрами, и она, в свою очередь, меняет параметры среды для первой волны. Так возникает взаимное воздействие в пространстве и во времени одной волны на другую [1].

В качестве характеристики отклонения среды от линейности вводят нелинейный акустический параметр ε , равный

$$\varepsilon = 1 + \frac{\rho_0}{2} \left(\frac{\partial C^2}{\partial P} \right)_S,$$

где P – давление; ρ_0 – плотность невозмущённой среды; C – скорость звука; S – энтропия, производные берутся при постоянной энтропии S .

В воде при температуре 20 °С значение $\varepsilon \approx 3,7$, которое уменьшается при уменьшении температуры. В морской воде нелинейный акустический параметр ε может значительно возрасти из-за наличия в ней микронеоднородностей типа газовых пузырьков, планктона, взвесей и других включений. Кроме того, для таких жидкостей, как морская вода, характерно изменение нелинейных свойств по пространству, связанное с её вертикальной слоистостью.

При распространении волн возможны различные нелинейные эффекты:

- ◆ накопление нелинейных искажений;
- ◆ нелинейное взаимодействие и появление вторичных волн, самовоздействие и самодетектирование;
- ◆ нелинейное затухание и эффект насыщения;
- ◆ взаимодействие с неоднородностями, вихрями, струями;
- ◆ рассеяние звука на звуке;
- ◆ фазовая модуляция взаимодействующих волн.

Ниже будут рассмотрены возможности использования двух (последних из перечисленных) нелинейных эффектов для измерения дистанционным методом вертикального распределения скорости звука.

1. Возможности использования рассеяния звука на звуке для дистанционного определения вертикального распределения скорости звука. Если источник звука излучает в среду две волны с частотами f_1 и f_2 , то на некотором расстоянии от него в среде появятся, помимо кратных гармоник волн ω_1 , ω_2 , еще и комбинационные частоты $nf_1 \pm mf_2$ (где n , m – натуральные числа). При нелинейном взаимодействии двух близких по частоте плоских волн ($f_1 \approx f_2$, $f_1 > f_2$) комбинационный тон, соответствующий разностной частоте $F = f_1 - f_2$, в среде с поглощением затухает гораздо медленнее взаимодействующих волн. Это может привести к тому, что на некотором расстоянии от излучателя интенсивность комбинационного тона разностной частоты F превысит интенсивности исходных волн [2].

При взаимодействии двух волн, распространяющихся от общего излучателя в одном направлении, а также при пересечении характеристик направленности двух отдельных излучателей волн накачки с частотами f_1 и f_2 колебания комбинационных частот $nf_1 \pm mf_2$ существуют не только внутри, но и вне области взаимодействия, т.е. имеет место рассеяние звука на звуке [3, 4].

В начале 70-х гг. преподаватель кафедры гидроакустики Военно-морской академии Э.С. Таранов на уровне идеи предлагал использовать рассеяния звука на звуке для оценки вертикального градиента скорости звука в море.

В 1994 г. в патенте США [5] был разработан способ для определения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) на основе эффекта рассеяния звука из области пересечения двух характеристик направленности излучателей звука

близких частот. В водной среде (рис. 1) на одном горизонте располагают два акустических излучателя 1 и 2 волн накачки. Между ними устанавливают акустический приёмник 3 от излучателя 1 на расстоянии D_1 и от излучателя 2 на расстоянии D_2 . Излучатели 1 и 2 с характеристиками направленности $2\theta_1 = 2\theta_2 = 2-3^\circ$ расположены под углами α_{1i} и α_{2i} соответственно (рис. 1).

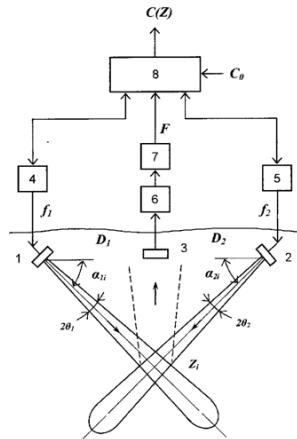


Рис. 1. Структурная схема дистанционной аппаратуры определения

ВРСЗ на основе эффекта рассеяния звука на звуке. По команде вычислительного устройства 8 импульсные передатчики 4 и 5 возбуждают первый и второй акустические излучатели на частоте f_1 и f_2 соответственно. На горизонте Z_i характеристики направленности излучателей пересекаются, образуя область нелинейного взаимодействия акустических волн с частотами $f_1 = 137$ кГц и $f_2 = 117$ кГц. Рассеянный из этой области акустический сигнал разностной частоты $F = f_1 - f_2 = 20$ кГц распространяется к акустическому приёмнику 3. С его выхода электрический сигнал через усилитель 6 и настроенный на частоту F фильтр 7 поступает в вычислительное устройство 8.

Вычисляются времена t_{1i} и t_{2i} распространения акустических сигналов к приёмнику 3 через рассеивающий объём соответственно от излучателей 1 и 2, по расстояниям D_1 и D_2 , по углам наклона α_{1i} и α_{2i} их характеристик направленности, и по известному значению скорости звука C_0 на горизонте акустических излучателей вычисляется значение скорости звука C_i на горизонте Z_i .

Изменяя углы наклона характеристик **направленности** излучателей от α_{11} , α_{21} до α_{1n} , α_{2n} , получают значения времён распространения сигналов от t_{11} , t_{21} до t_{1n} , t_{2n} и вычисляют соответствующие им значения скорости звука $C_1 \dots C_n$ на горизонтах $Z_1 \dots Z_n$, т.е. определяют ВРСЗ – $C(Z)$. Алгоритмы расчётов в описании изобретения не приводятся.

Прежде чем заниматься решением обратной задачи определения ВРСЗ, для выявления возможности реализации изобретения необходимо рассмотреть, вопросы энергетических соотношений эффекта рассеяния звука на звуке, т.е. возможности приёма сигнала разностной частоты на фоне помех.

Уровень сигнала разностной частоты, рассеянного из области пересечения звуковых пучков излучающих антенн квадратной формы, можно оценить по соотношению, полученному в работе [6].

Далее будем полагать, что в рассматриваемом по изобретению устройстве $D_1 = D_2 = D = 25$ м, $2\theta_1 = 2\theta_2 = 2\theta = 2^\circ$, $\alpha_{1i} = \alpha_{2i} = \alpha_i = 80^\circ$, при этом $t_{1i} = t_{2i} = t_i$. Для средней частоты излучения $f = 0,5 \cdot (f_1 + f_2) = 127$ кГц при угловом растворе главного лепестка ХН $2\theta \approx 2^\circ$ на уровне 0,707 сторона плоской квадратной антенны $a \approx 0,3$ м. Мощность излучаемых акустических сигналов $P_1 = P_2 = P = 1$ кВт. Приёмная антенна квадратная с размерами $a \approx 0,3$ м.

Соотношение из работы [6] с учётом затухания в морской воде излучаемых акустических сигналов принимает следующий вид:

$$P_S \approx \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot p_0^2 \cdot 10^{-0,05 \cdot \beta \cdot r} \cdot a \cdot L \cdot F}{\rho \cdot C^3 \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{F}{f_2}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon \approx 3,7$ – параметр нелинейности для чистой воды;

$p_0 = \sqrt{P \cdot \gamma / 8,4 \cdot 10^{-5}} \approx 3 \cdot 10^5$ Па – приведённое к одному метру акустическое давление, создаваемое 1-м и 2-м излучателями;

$\gamma = 4 \cdot \pi \cdot (a \cdot f / C)^2 \approx 8 \cdot 10^3$ – коэффициент концентрации излучателя f ;

$C \approx 1500$ м/с – скорость звука в воде; $\rho \approx 10^3$ кг/м³ – плотность воды;

$L \approx 0,5 \cdot D \cdot [\operatorname{tg}(\alpha + \theta) - \operatorname{tg}(\alpha - \theta)] \approx 14,6$ м – характерный размер области, ограниченной пересекающимися звуковыми пучками;

$r \approx D / \cos \alpha \approx 144$ м – расстояние до центра рассеивающего объёма;

$\beta = 7,7 \cdot 10^{-4} f_{\text{кГц}}^{0,79} \approx 0,035$ дБ/м – коэффициент затухания звука на частоте f .

Подставляя в (1) исходные данные, получим для сигнала разностной частоты F у рассеивающей области акустическое давление $P_S \approx 28$ Па.

Уровень рассеянного сигнала на частоте F у акустического приёмника

$$p_{\bar{r}} \approx p_S \cdot 10^{-0,05 \cdot \beta_{1z}} / Z \approx 0,1 \text{ Па.}$$

Здесь $\beta = 7,7 \cdot 10^{-4} F_{\text{кГц}}^{0,79} \approx 0,008$ дБ/м – коэффициент затухания звука разностной частоты F ; $Z \approx 0,5 \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha \approx 143$ м – горизонт центра рассеивающей области.

Для судна оценку уровня шумовой помехи на приемной антенне производят по выражению

$$p_{\text{ПК}}(F, \Delta F) = \frac{p_{\text{ПК}}(1,1) \cdot \sqrt{\Delta F}_{\text{Гц}}}{F_{\text{кГц}} \cdot \sqrt{\gamma_F}}, \quad (2)$$

где $\Delta F \approx 100$ Гц – полоса частот акустического импульса длительностью 10 мс; $p_{\text{ПК}}(1,1)$ – давление акустической помехи на антенне, приведенное к частоте $f = 1$ кГц, в полосе $\Delta f = 1$ Гц при ненаправленном приеме $\gamma_2 = 1$.

Например, уровень шума на гидрофоне от НИС «Академик Курчатов», находившегося в дрейфе в океане, равен $p_{II}(1,1)=7,5 \cdot 10^{-3}$ Па·Гц^{-0,5} [7]. Расчёт по (2)

даёт для шумовой помехи НИС $p_{IIK}(F, \Delta F) \approx 1,6 \cdot 10^{-3}$ Па, $p_{II} \approx 0,1$ Па.

Таким образом, энергетические соотношения показывают, что на стопе судна рассеянный из области пересечения акустических пучков сигнал разностной частоты, в принципе, может быть достоверно принят.

Для решения обратной задачи по используемой схеме зондирования морской среды наиболее приемлемым является алгоритм восстановления искомого ВРСЗ способом дискретизации [8]. В этом способе производят аппроксимацию искомой функции $C(Z)$ отрезками в водной среде, представленной в виде слоев $1, \dots, i, \dots, n$ с постоянными вертикальными градиентами скорости звука. Затем последовательно решают обратную задачу по слоям от горизонта источник – приемник с использованием результатов решений для предыдущих слоёв.

В работе [8] получено решение обратной задачи для слоя в виде алгебраического уравнения (3) при прямоугольной схеме зондирования водной среды. В этой схеме акустические сигналы распространяются от горизонта источник – приемник по вертикали и после рассеяния от неоднородности водной среды, возвращаются на этот горизонт по наклонной траектории или наоборот: распространяются от горизонта источник – приемник по наклонным траекториям, а возвращаются по вертикали. Акустические рассеиватели находятся на границах горизонтальных слоёв относительно вертикали от источника или приёмника:

$$\frac{Z_i}{2 \cdot C_{i-1} (X_i - 1)} \cdot \ln \left(X_i^2 \frac{1 - \sqrt{1 - (X_i \cos \alpha_j)^2}}{1 + \sqrt{1 - (X_i \cos \alpha_j)^2}} \cdot \frac{1 + \sin \alpha_j}{1 - \sin \alpha_j} \right) = t_i, \quad (3)$$

где Z_i – толщина слоя, м; $X_i = C_i / C_{i-1}$, для морской среды $0,95 \leq X_i \leq 1,05$; C_i и C_{i-1} – скорость звука на нижней и верхней границах слоя, соответственно в первом слое $C_{i-1} = C_0$, м/с.

Расстояние D_i , пройденное лучом в каждом слое по оси абсцисс, равно

$$D_i = Z_i \cdot \text{ctg} \left\{ \left[\alpha_i + \arccos(X_i \cdot \cos \alpha_i) \right] / 2 \right\}.$$

Уравнение (3) решается относительно X_i численными методами. Далее находится скорость звука C_i на нижней границе слоя $C_i = X_i \cdot C_{i-1}$.

Удовлетворительные для гидроакустики результаты решения задачи восстановления искомого ВРСЗ способом дискретизации получены до глубины 200 м при случайной погрешности в определении времени распространения $\Delta t_i \leq 10^{-4}$ с, когда горизонты слоёв были близки к горизонтам искомого ВРСЗ, что предполагает наличие априорной информации об определяемом ВРСЗ в море.

В нашем случае взаимодействие одновременно излученных двух импульсных акустических сигналов и определение времени t_i прихода к приёмнику сигнала разностной частоты возможно только по его переднему фронту. Если фронты импульсов излучаемых сигналов приходят к области пересечения характеристик на-

правленности одновременно, а определение времени t_i производится по уровню половины длительности переднего фронта импульсов, то значение случайной погрешности Δt_i можно оценить по соотношению

$$\Delta t_i \approx 0.25 \cdot D \cdot [tg(\alpha + \theta) - tg(\alpha - \theta)] / C.$$

Результаты оценок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности времён прихода сигналов

α , град	30	45	60	75	80
Z, м	14,4	25	43,3	93,3	141,8
$\Delta t \cdot 10^{-4}$, с	1,9	2,9	5,8	21,8	48,7

Точность определения времени t_i , в принципе, можно увеличить, если один из импульсных акустических сигналов накачки выполнить сложным, широкополосным, например ЛЧМ [9, 10], а в бортовой аппаратуре значение времени t_i находить по максимальному значению функции (коэффициента) взаимной корреляции принятого сигнала ЛЧМ, гетеродированного вторым электрическим сигналом. Однако пока нет ни теоретических, ни экспериментальных данных о наличии в этой ситуации эффекта рассеяния звука на звуке.

Аппаратура, которая может быть создана на основе этого метода, единственная из дистанционных акустических, которая может функционировать при полном отсутствии в воде естественных акустических рассеивателей – неоднородностей скорости звука (температуры), планктона, ракообразных и рыб. К недостаткам относится сложная и громоздкая антенная система, состоящая из двух излучающих и одной приёмной антенн, и небольшие глубины определения ВРСЗ.

2. Анализ возможности определения ВРСЗ на основе вторичного эффекта фазовой модуляции волн накачки волной разностной частоты. В дистанционном акустическом методе определения ВРСЗ на основе вторичного эффекта фазовой модуляции волн накачки [11–13], в морскую среду, вертикально ко дну, излучают мощную бигармоническую акустическую волну накачки, которая у поверхности антенны имеет вид

$$p(t) = p_1 \cos \omega_1 t + p_2 \cos \omega_2 t,$$

где p_1 и p_2 – амплитуды волн; $\omega_{1,2} = 2\pi f_{1,2}$ – круговые частоты волн f_1 и f_2

В морской среде за счет нелинейного взаимодействия исходных волн накачки частотой f_1 и f_2 образуются волны суммарных и разностных частот – это так называемое первичное нелинейное взаимодействие волн [2]. Образующаяся волна разностной частоты $F = f_1 - f_2$ будет взаимодействовать с интенсивной бигармонической волной [14, 15], образуя в результате этого вторичного взаимодействия волны комбинационных частот $f_1 \pm F$ и $f_2 \pm F$.

Слабые по уровню комбинационные волны с частотами $f_1 - F$ и $f_2 + F$ совпадают по частоте с мощными волнами накачки, соответственно, с частотами f_2 и f_1 , и их выделение невозможно. Таким образом, от излучателя будут распространяться волны высокой частоты f_1 и $f_1 - F$, f_2 и $f_2 + F$.

Суммарный высокочастотный сигнал рассеивается *на* акустических неоднородностях морской среды (температурных, пузырьках, планктоне, мелких ракообразных и рыбках), находящихся в объёме, ограниченном размерами излучаемого импульса в характеристике направленности антенны.

Принятый в точке $z = 0$ реверберационный суммарный высокочастотный акустический сигнал можно представить в виде [11, 12] двух рассеянных волн накачки и пары рассеянных комбинационных волн, являющихся результатом вторичного взаимодействия с волнами накачки:

$$p_{2s}(t_2) = p_{1s} \cos[\omega_{1s}(t) + \varphi_{1s}(t)] + p_{2s} \cos[\omega_{2s}(t) + \varphi_{2s}(t)] + \quad (4)$$

$$+ p_{s-} \cos[\omega_{s-}(t) + \varphi_{s-}(t) - \Phi_{1s}(t)] + p_{s+} \cos[\omega_{s+}(t) + \varphi_{s+}(t) + \Phi_{2s}(t)].$$

Здесь p_{1s} и p_{2s} – давления рассеянных волн накачки с частотами ω_1 и ω_2 ;

$\omega_{1,2} = 2\pi f_{1,2}$ – круговые частоты волн с циклическими частотами f_1 и f_2 ;

p_{s-} и p_{s+} – давления рассеянных комбинационных волн с частотами ω_{s-} и ω_{s+} ;

$\omega_{\pm} = 2\pi f_{\pm}$ – круговые частоты волн с частотами $f_+ = f_1 + F$ и $f_- = f_2 - F$;

t – время распространения сигнала от антенны до горизонта z и обратно;

$\varphi_{1,2s}(t)$ – геометрический набег фаз принятых рассеянных волн накачки;

$\varphi_{s\pm}(t)$ – геометрический набег фаз рассеянных комбинационных волн;

$\omega_{1,2s} = \omega_{1,2}$, $\omega_{s\pm} = \omega_{\pm}$ – круговые частоты принятых волн;

$\Phi_{1,2s}(t) = \Phi(t)$ – набег фазы в сигналах модулирующей частоты $\Omega = 2\pi F$;

z – текущий горизонт акустического импульса.

В “обычной” модулированной или немодулированной акустической волне фазовая модуляция, вызванная изменением акустического показателя преломления, имеет временные масштабы, пропорциональные несущей частоте, и обратно пропорциональна пространственным масштабам изменения показателя преломления. При этом в точке приема ($z = 0$) характеристики фазовой модуляции будут представлять собой усредненные по всей трассе распространения туда и обратно звукового импульса значения, т.е. в них будет отсутствовать информация о пространственном распределении изменения скорости звука.

В случае нелинейного взаимодействия волн, низкочастотная (сигнальная) волна оказывает модулирующее воздействие на высокочастотные волны накачки, т.е. сама среда распространения модулирует по фазе волны накачки. Поэтому в рассеянной высокочастотной волне имеет место еще и “медленная” фазовая модуляция за счет набег фазы низкочастотной модулирующей волны. Эта “медленная” составляющая фазовой модуляции несет текущую информацию об изменении скорости звука вдоль трассы распространения. Таким образом, в соотношении (4) информативными о среде являются последние два слагаемых с частотами ω_{s-} и ω_{s+} , с набегам фаз $\Phi_{1,2s}(t) = \Phi(t)$.

Чтобы выделить фазу $\Phi(t)$, необходимо на выходе антенны из суммарного высокочастотного электрического сигнала отфильтровать сигнал с частотой ω_{s-} или ω_{s+} , и сформировать опорный электрический сигнал с такой же частотой.

Сигналы подаются на соответствующие входы фазометра, на выходе которого и будет иметь место *электрический* сигнал фазы $\Phi(t)$. Далее он преобразуется в цифровую форму и поступает в вычислительный блок.

3. Результаты вычислительного эксперимента. Текущая фаза $\Phi(t)$ в рассеянных волнах комбинационных частот (4) пропорциональна частоте Ω и времени t_z распространения от антенны до рассеивающего объема и обратно:

$$\Phi(t) = \Omega \cdot t_z = 2\Omega \int_0^z \frac{dz}{C(z)}. \quad (5)$$

В работе [12] найдена зависимость скорости звука от времени прихода рассеянных сигналов $C(t)$ – временной профиль скорости звука в виде

$$C(t) = \Omega \cdot C_0 / \frac{d\Phi(t)}{dt} = \Omega \cdot C_0 / \Phi'(t), \quad (6)$$

где $C(t) = C_0[1 + \delta C(t)]$ – временной профиль скорости звука; C_0 – скорость звука в точке приема; $\delta C(t)$ – изменение относительно C_0 .

Расстояния $z(t)$, которые проходит звуковая волна за определенные промежутки времени, равны

$$z(t) = \int_0^{t/2} C(t) dt. \quad (7)$$

Ставя в соответствие расстояния $z(t)$ временному профилю скорости звука $C(t)$, получают зависимость скорости звука от координаты Z , т.е. ВРСЗ:

$$C(Z) = C[z(t)]. \quad (8)$$

Предложенный в работе [12] прямой алгоритм определения ВРСЗ вертикального распределения скорости звука на основе вторичного нелинейного взаимодействия является устойчивым, так как он не является результатом решения каким-либо способом обратной гидроакустической задачи.

Проверка предложенного алгоритма производилась компьютерным моделированием восстановления уже известного ВРСЗ в море по соотношению

$$C_{\hat{z}}(Z) = C_0 \left[1 - \frac{12}{C_0} \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot Z}{290} \right) \right], \quad (9)$$

где $C_0 = 1500$ м/с, максимальное значение глубины зондирования $Z_m = 200$ м. Расчеты производились по формулам (5)–(9) для разностной частоты $F = 100$ Гц.

Для решения обратной задачи наиболее приемлемым является алгоритм восстановления искомого ВРСЗ способом дискретизации [8]. В этом способе производят аппроксимацию искомой функции $C(Z)$ отрезками в водной среде, представленной в виде слоев $1, \dots, i, \dots, n$, с постоянными вертикальными градиентами скорости звука. Так как данные не имели погрешностей, обе кривые совпали. Для их различения восстановленный ВРСЗ сдвинут на $+3$ м/с.

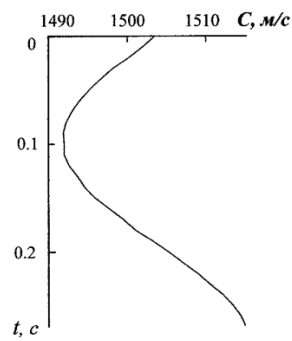


Рис. 2. Временной профиль

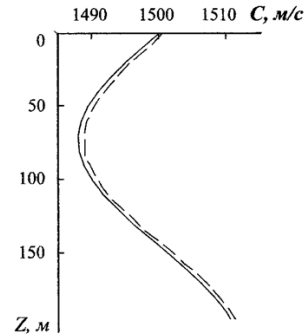


Рис. 3. Результат восстановления ВРСЗ

Заключение. Соотношение для погрешности измерения скорости звука:

$$\Delta C(t) = -\frac{\Omega \cdot \tilde{N}_0}{[\Phi'(t)]^2} \Delta \Phi'(t).$$

Погрешности определения скорости звука $C(t)$ и глубины $z(t)$ при прочих равных условиях будут зависеть от погрешности вычисления производной фазы по времени, которая будет определяться погрешностью измерения фазы. В работе [16] показано, что при численном нахождении производной относительно гладкой функции теряется один знак, т.е. погрешность результата вычислений увеличивается в несколько раз. Поэтому, прежде всего, необходимо оценить возможные погрешности определения фазы $\Phi(t)$.

Наиболее существенная составляющая погрешности определения фазы из-за случайного характера прихода реверберации. Известно [17], что для моментов прихода сигналов справедлив равномерный закон, откуда следует равномерное распределение текущей фазы сигналов реверберации несущей частоты.

Тогда для среднего квадратического отклонения текущих фаз реверберации высокочастотных колебаний $\varphi_{1,2s}(t)$ и $\varphi_{1,2s}(t)$ (4) будем иметь

$$\sigma_{1,2} = \sigma_{\pm} = \sigma_{\varphi} = 2\pi / (2\sqrt{3}) \approx 0,58\pi, \quad 0 \leq \varphi(t) \leq 2\pi.$$

На выходе фазометра кроме электрического сигнала фазы $\Phi(t)$ будет электрический сигнал текущей фазы реверберации $\varphi_{\pm}(t)$ высокочастотных колебаний, который будет вносить в определение фазы $\Phi(t)$ дополнительную случайную погрешность со средним квадратическим значением $\sigma_{\varphi} \approx 0,58\pi$. Эту высокочастотную составляющую электрического сигнала можно на выходе фазометра отфильтровать от низкочастотного электрического сигнала фазы $\Phi(t)$.

Текущая фаза $\Phi(t)$ модулирующей волны имеет две составляющие:

$$\Phi(t) = \Phi_{\Omega}(t) + \Phi_C(t),$$

где $\Phi_{\Omega}(t) = \Omega \cdot t$ – составляющая, зависящая от текущего времени;

$\Phi_C(t) = \Phi(t) - \Omega \cdot t$ – составляющая, зависящая от скорости звука по пути.

Реальный фазометр не различает фазовых сдвигов, отличающихся на целое число периодов. Поэтому при изменении текущей фазы $\Phi(t)$ на угол θ_ϕ ($0 < \theta_\phi < 2\pi$) и на угол $\theta_\phi + 2\pi \cdot m$ ($m = 1, 2, \dots, i, \dots, n$) показания фазометра будут одинаковыми. Сигнал на выходе фазометра в промежутки времени от $T_F = i/F$ до $T_F = (i+1)/F$ через 2π , каждый раз сбрасывается на нуль. Вместо непрерывно возрастающего сигнала будет иметь место пилообразный сигнал (рис. 4), который не пригоден для последующей обработки.

В настоящее время оцифрованный пилообразный сигнал можно преобразовать в непрерывный цифровой сигнал фазы $\Phi(t)$. Эта операция будет иметь смысл, если случайная погрешность фазы намного меньше значений составляющей фазы $\Phi_c(t)$, несущую информацию о скорости звука. В противном случае в местах стыковки будет невозможно продифференцировать полученную функцию $\Phi(t)$ для получения временного профиля скорости звука $C(t)$.

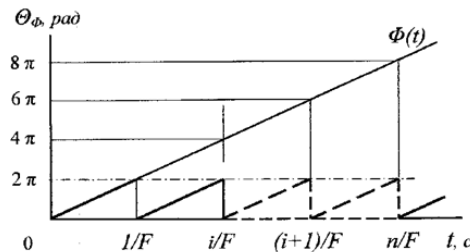


Рис. 4. К показаниям фазометра

Для текущей фазы $\Phi(t)$ низкочастотной частоты справедливо равномерное распределение со средним квадратическим отклонением фазы равным:

$$\sigma_\phi = \frac{2\pi \cdot F \cdot \tau_H}{2\sqrt{3}} \approx 1.8 \cdot F \cdot \tau_H \text{ рад}, \quad (10)$$

где $\tau_H \approx 1/\Delta f$ – длительность излучаемого импульса; Δf – частотная полоса.

Для того, чтобы можно было выделить фильтром сигнал частотой ω_{s-} или ω_{s+} от сигналов с частотой ω_{2s} или ω_{1s} , необходимо, чтобы $\Delta f < 2F$ или $\tau_H > 1/2F$. Пусть $\tau_H \approx 1/2F$, тогда для текущей фазы $\Phi(t)$ низкочастотной модулирующей частоты получим наименьшее из возможных среднеекватических значений погрешности фазы $\sigma_\phi \approx 0,9$ рад, величина которого больше значений $\Phi_c(t)$. По этой причине дистанционный акустический метод определения ВРСЗ на основе вторичного эффекта фазовой модуляции волн накачки волной разностной частоты [11–13] не может быть реализован на практике.

Единственным из дистанционных акустических методов измерения ВРСЗ, который может функционировать при отсутствии в воде естественных акустических рассеивателей, является метод использующий рассеяние звука на звуке. Однако, при всей сложности и громоздкости антенной системы, едва ли можно рассчитывать на большие глубины для определения ВРСЗ.

В то же время методы нелинейной акустики, использующие параметрические излучающие антенны [18–20], являются наиболее перспективными для оценки ВРСЗ и других дистанционных гидрофизических измерений в океане.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новиков В.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
2. *Руденко О.В., Солуян С.И.* Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
3. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение рассеяния звука звуком при наложении параллельных пучков // Акустический журнал. – 1968. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 214-220.
4. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Излучение звука из области пересечения звуковых пучков // Акустический журнал. – 1969. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 369-376.
5. Pat. 5402393 USA. Cl. G01S 15/58. Non-invasive acoustic velocimetric apparatus and method / Konrad W.L. Filed 14.03. 1994. Publ. 28.03. 1995.
6. *Донской Д.М., Сутин А.М.* Рассеяние звука, обусловленное нелинейностью среды // Акустический журнал. – 1980. – Т. 26. – Вып. 3. – С. 411-415.
7. *Дремучев С.А., Селиванов В.Г., Чепурин Ю.А.* Исследование акустического зонда в океанологических измерениях // Океанология. – 1989. – Т. 29. – Вып. 4. – С. 680-683.
8. *Бухгейм А.Л., Зенкова Н.П.* О решении одного интегрального уравнения первого рода // Вопросы корректности задач математической физики. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1977. – С. 23-31.
9. *Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
10. *Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П.* Построение широкополосных и сверхширокополосных антенн гидроакустических поисковых средств // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2011)». – Санкт-Петербург: Наука, 2012. – С. 108-111.
11. *Борисов С.А.* Дистанционное зондирование океана / под ред. проф. В.И. Тимошенко. – Таганрог: ТРТУ. – 2001. – 278 с.
12. *Борисов С.А.* Гидроакустические параметрические и электретные антенны в решении задач дистанционного зондирования поля скорости звука океана: Автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. – Таганрог: ТРТУ, 2001. – 28 с.
13. *Борисов С.А., Борисов А.С., Серавин Г.Н.* Способ измерения вертикального распределения скорости звука в водной среде / Заявка 2012134947 от 15.08.2012. Оpubл. 20.02.2014. Бюллетень изобретений № 5.
14. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Измерение взаимодействия звуковых волн в жидкости // Акустический журнал. – 1958. – Т. 4. – Вып. 4. – С. 321-324.
15. *Зверев В.А., Калачев А.И.* Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн // Акустический журнал. – 1970. – Т. 16. – Вып. 2. – С. 245-251.
16. *Румишинский Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
17. *Ольшевский В.В.* Статистические свойства морской реверберации. – М.: Наука, 1966. – 202 с.
18. *Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
19. *Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., and Tarasov S.P.* Dispersion of the signal of a parametric array in shallow water // Acoust. Phys. – 2009. – Vol. 55 (1). – P. 76-80.
20. *Кузнецов В.П.* Нелинейная акустика в океанологии. – М.: Физматлит, 2010. – 264 с.

REFERENCES

1. *Novikov V.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I.* Nelineynaya gidroakustika [Nonlinear hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 264 p.
2. *Rudenko O.V., Soluyan S.I.* Teoreticheskie osnovy nelineynoy akustiki [Soluyan theoretical bases of nonlinear acoustics]. Moscow: Nauka, 1975, 287 p.

3. Zverev V.A., Kalachev A.I. Izmerenie rasseyaniya zvuka zvukom pri nalozhenii paralel'nykh puchkov [Measurement of sound scattering by sound under the exposure of parallel beams], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskio zhurnal], 1968, Vol. 14, Issue 2, pp. 214-220.
4. Zverev V.A., Kalachev A.I. Izluchenie zvuka iz oblasti peresecheniya zvukovykh puchkov [Radiation of sound from the region of intersection of sound beams], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskio zhurnal], 1969, Vol. 15, Issue 3, pp. 369-376.
5. Konrad W.L. Patent 5402393 USA. Cl. G01S 15/58. Non-invasive acoustic velocimetric apparatus and method. Filed 14.03. 1994. Publ. 28.03. 1995.
6. Zverev V.A., Kalachev A.I. Izluchenie zvuka iz oblasti peresecheniya zvukovykh puchkov [Scattering of sound due to nonlinearity of the environment] *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskio zhurnal], 1969, T. 15, Issue 3, pp. 369-376.
7. Dremuchev S.A., Selivanov V.G., Chepurin Yu.A. Issledovanie akusticheskogo zonda v okeanologicheskikh izmereniyakh [Research of an acoustic probe in oceanological measurements], *Okeanologiya* [Oceanology], 1989, Vol. 29, Issue 4, pp. 680-683.
8. Bukhgeym A.L., Zenkova N.P. O reshenii odnogo integral'nogo uravneniya pervogo roda [On the solution of a certain integral equation of the first kind], *Voprosy korrektnosti zadach matematicheskoy fiziki* [Questions of the correctness of problems of mathematical physics]. Novosibirsk: VTs SO AN SSSR, 1977, pp. 23-31.
9. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy [Hydroacoustic parametric systems]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2004, 400 p.
10. Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. Postroenie shirokopolosnykh i sverkhshirokopolosnykh antenn gidroakusticheskikh poiskovykh sredstv [Construction of broad-band and ultra-wideband antennas of hydroacoustic retrieval means], *Trudy KhI Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki (GA-2011)»* [Proceedings of the All-Russian Conference "Applied hydroacoustic and hydrophysical technologies (GA-2011)"]. Sankt-Peterburg: Nauka, 2012, pp. 108-111.
11. Borisov S.A. Distsionnoe zondirovanie okeana [Remote sensing of the ocean], ed. prof. V.I. Timoshenko. Taganrog: TRTU, 2001, 278 p.
12. Borisov S.A. Gidroakusticheskie parametricheskie i elektretnye anteny v reshenii zadach distantsionnogo zondirovaniya polya skorosti zvuka okeana: Avtoreferat diss. ... d-ra tekhn. nauk [Hydroacoustic parametric and electret antennas in solving problems of remote sensing of the ocean sound velocity field: autoabstract. Dr. of eng. sc. diss.]. Taganrog: TRTU, 2001, 28 p.
13. Borisov S.A., Borisov A.S., Seravin G.N. Sposob izmereniya vertikal'nogo raspredeleniya skorosti zvuka v vodnoy srede [Method for measuring the vertical distribution of sound velocity in an aquatic environment], *Zayavka 2012134947 ot 15.08.2012. Opubl. 20.02.2014. Byulleten' izobreteniy №5* [Application 2012134947 dated 08/15/2012. Opubl. 02/20/2014. Bulletin of Inventions No. 5].
14. Zverev V.A., Kalachev A.I. Izmerenie vzaimodeystviya zvukovykh voln v zhidkosti [Measurement of the interaction of sound waves in a liquid], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskio zhurnal], 1958, T. 4, Issue 4, pp. 321-324.
15. Zverev V.A., Kalachev A.I. Modulyatsiya zvuka zvukom pri peresechenii akusticheskikh voln [Modulation of sound by sound during the intersection of acoustic waves], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskio zhurnal], 1970, Vol. 16, Issue 2, pp. 245-251.
16. Rumshinskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical processing of experimental results]. Moscow: Nauka, 1971, 192 p.
17. Ol'shevskiy V.V. Statisticheskie svoystva morskoy reverberatsii [Statistical properties of marine reverberation]. Moscow: Nauka, 1966, 202 p.
18. Voronin V.A., Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Nelineynye i parametricheskie protsessy v akustike okeana [Nonlinear and parametric processes in ocean acoustics]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2007, 448 p.
19. Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., and Tarasov S.P. Dispersion of the signal of a parametric array in shallow water, *Acoust. Phys.*, 2009, Vol. 55 (1), pp. 76-80.
20. Kuznetsov V.P. Nelineynaya akustika v okeanologii [Nonlinear acoustics in oceanology]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 264 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

Микушин Игорь Иванович – Военно-морская академия, г. Санкт-Петербург; e-mail: namik0875@mail.ru; 196603, Санкт-Петербург, Пушкин, ул. Саперная, д. 38, корп.2, кв. 18; тел.: 89062439645; начальник научно-исследовательского центра Военного учебно-научного центра ВМФ; д.т.н.; доцент.

Серавин Георгий Николаевич – e-mail: srwn37@mail.ru; 196244, Санкт-Петербург, Витебский пр., 29, кв. 40; тел.: 89213733772; старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-морского флота; д.т.н.

Тарасов Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: tsp-47@mail.ru; 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89034007904, 88634371795; зав. кафедрой электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Mikushin Igor Ivanovich – The Naval Academy, St. Petersburg; e-mail: namik0875@mail.ru; 196603, St. Petersburg, Pushkin, Sapernaya street, 38, building 2, apt. 18; phone: +79062439645; head of the Research Center of the Military Training and Scientific Center of the Navy; dr. of eng. sc.; associate professor/

Seravin Georgiy Nikolaevich – e-mail: srwn37@mail.ru; 196244, St.-Petersburg, Vitebsky prospect, 29, apt. 40; phone: +79213733772; senior researcher of the Military Educational and Scientific Center of the Navy; dr. of eng. sc.; senior researcher.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp-47@mail.ru; 347922, Taganrog, Nekrasovsky, 44; phone: +79034007904, +78634371795; head of the department of electro-hydroacoustic and medical equipment of the Institute of Nanotechnologies; dr. of eng. sc. professor.