

УДК 551.463.224:534.222

© И. И. Микушин, Г. Н. Серавин

Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург
namik0875@mail.ru**ДИСТАНЦИОННЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ФАЗОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В МОРЕ**

Статья поступила в редакцию 06.11.2016, после доработки 16.01.2017.

Задача определения гидрофизических характеристик морской среды по зафиксированным значениям известных излученных и принятых отражённых акустических сигналов от естественных рассеивателей без непосредственного измерения самих характеристик корабельными погружающимися зондами является в настоящее время актуальной. Оценка влияния вертикального распределения скорости звука от поверхности до дна в морском волноводе производится непосредственно перед использованием различной корабельной гидроакустической аппаратуры. Возможность использования информации о гидрофизических характеристиках волновода распространения гидроакустических сигналов при обнаружении подводной цели может значительно повысить эффективность использования судовой гидроакустической аппаратуры. Рассматривается алгоритм решения обратной задачи восстановления вертикального распределения скорости звука при зондировании с судна акустических рассеивателей звука в водной среде естественного происхождения, находящихся в объёме, ограниченном характеристиками направленности судовых антенн, поверхностью моря и дном. Скорость звука на различных горизонтах определяется разностью времён распространения излученных акустических сигналов, ее значения находят по разнице фаз принятых сигналов с различными частотами. Проведенные морские испытания разработанной экспериментальной аппаратуры позволили сделать вывод о возможности построения вертикального распределения скорости звука с судна при скорости его движения до пяти узлов.

Ключевые слова: скорость звука, дистанционный акустический фазовый метод, обратная задача.*I. I. Mikushin, G. N. Seravin*

Military Training and Research Center of the Navy «Naval Academy», Saint-Petersburg, Russia

**REMOTE ACOUSTIC PHASE METHOD
FOR DETERMINING VERTICAL SOUND SPEED PROPAGATION IN THE SEA**

Received: 06.11.2016, in final form: 16.01.2017.

The problem of determination of hydro-physical marine environment characteristics by fixed values of known emitted and received reflected acoustic signals from the natural scatters without direct characteristics modification by the ship dipping probes is actual. Impact assessment of the vertical sound speed distribution from the surface to the bottom in the sea waveguide is made immediately before the use of various ship sonar equipment. The ability to use information about the hydro-physical waveguide propagation characteristics of acoustic signals when underwater target detecting can significantly improve the efficiency of the ship sonar equipment. We consider an algorithm for solving inverse problems of restoring the vertical sound speed distribution from ship probing acoustic sound diffusers in natural water environment in the volume limited by directional characteristics of ship antennas, sea surface and the bottom. The sound speed at different horizons is determined by propagation time difference of (between) the emitted acoustic signals and is found by phase difference of the received signals with different frequencies. Sea trials of designed experimental equipment led to the conclusion about the possibility of the construction of the vertical sound speed distribution from the ship at its speed up to 5 knots.

Key words: sound speed, remote acoustic phase method, inverse problems.

Ссылка для цитирования: Микушин И. И., Серавин Г. Н. Дистанционный акустический фазовый метод определения вертикального распределения скорости звука в море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 1. С. 49—60.

For citation: Mikushin I. I., Seravin G. N. Remote acoustic phase method for determining vertical sound speed propagation in the sea. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 1, 49—60.

DOI: 10.7868/S2073667317010063.

В практической акустике для обеспечения эффективной работы гидроакустической аппаратуры учитывается состояние волновода распространения излучаемой энергии путем измерения скорости звука на различных горизонтах и построения ее вертикального распределения от поверхности моря до дна.

Известно значительное количество разработанных и реализованных в судовой аппаратуре прямых методов определения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). В настоящей работе рассматривается дистанционный акустический фазовый метод решения обратных задач восстановления ВРСЗ при зондировании с судна в море естественных акустических рассеивателей звука, находящихся в объеме, ограниченном характеристиками направленности антенн.

Аппаратура «Эхомер». В работах [1, 2] приведено описание функционирующего на объемном рассеивании ультразвука (УЗ) экспериментального образца фазового дистанционного измерителя ВРСЗ в море, который авторы назвали «Эхомер». Согласно этим работам структурная схема аппаратуры должна соответствовать рис. 1.

От синтезатора гармонических колебаний 1 со стабилизированным опорным генератором на 40 МГц сигналы близких частот $f_1 = 212.77$ кГц и $f_2 = 215.05$ кГц поступают на УЗ магнитофон 6 и импульсно-модулированный генератор 2. Он радиоимпульсами длительностью 2 мс, возбуждает излучающую антенну 3. Она выполнена в виде линейки из 6-ти шестигранных акустических преобразователей, слабонаправленных в вертикальной плоскости, которые установлены на одинаковых расстояниях $d = 0.1$ м друг от друга. Между соседними преобразователями укладывается около 14-ти длин волн излучаемых в воду акустических колебаний с частотами 213—215 кГц.

При этом в вертикальной плоскости от центра излучающей антенны образуются два веера из 15-и лепестков ее характеристики направленности (ХН) с углами $\beta_{1,2i}$ относительно вертикали

$$\beta_{1,2i} = \arcsin(m \cdot \lambda_{1,2} / d), \quad (1)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots, i, \dots, \lambda_{1,2}/d$; $\lambda_1 = C_0/f_1$; $\lambda_2 = C_0/f_2$; C_0 — скорость звука на горизонте излучающей антенны;

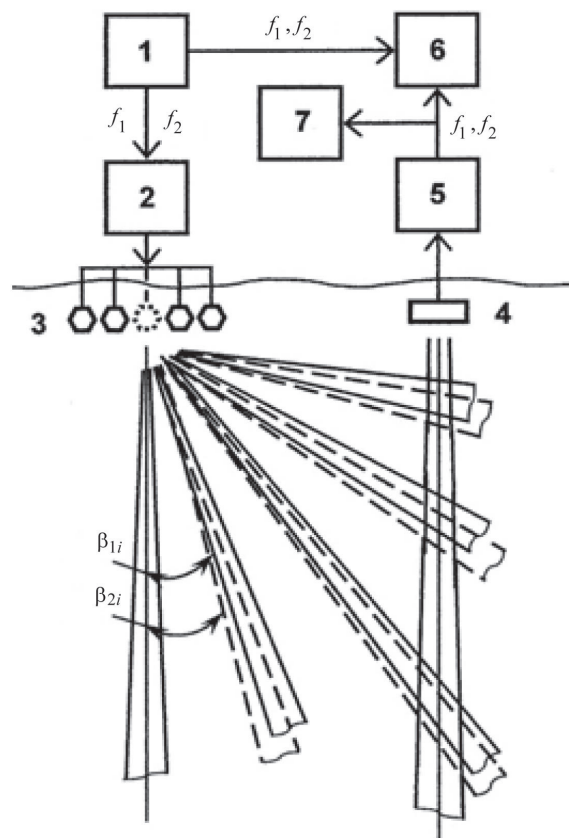


Рис. 1. Фазовая дистанционная аппаратура «Эхомер» [1].

$$\Delta\beta_i = \beta_{2i} - \beta_{1i} \approx -\frac{F}{f_1} \operatorname{tg}\beta_{1i},$$

здесь $F = f_2 - f_1 = 2.28$ кГц.

Один веер соответствует излучаемой частоте f_1 , другой — частоте f_2 . Так как $f_2 > f_1$, то лепестки веера ХН, соответствующие акустическому сигналу с частотой f_2 имеют немного большие углы наклона в сторону дна, чем у сигнала с частотой f_1 , за исключением вертикальных лепестков, которые совпадают (1).

На расстоянии $D = 10.2$ м от центра излучающей антенны 3 установлен остронаправленный акустический приемник 4, в виде круглой антенной решетки диаметром 0.75 м с раствором ХН $2\theta_2 \approx 1^\circ$, пересекающей лепестки вееров ХН излучателя.

Излучающая и приемная антенны были расположены соответственно на горизонтах 0.8 и 3.0 м. Из рассеивающих объемов водной среды, ограниченных пересекающимися ХНХН антенн, рассеянные акустические сигналы обеих частот f_1 и f_2 по приемной ХН распространяются к акустическому приемнику 4. С его выхода соответствующие электрические сигналы этих же частот через усилитель 5 подаются на УЗ магнитофон 6 с частотной полосой 300 кГц. На фототелеграфном аппарате 7 регистрируется огибающая принятого сигнала.

Обработка сигналов с УЗ магнитофона выполнялась в лаборатории. С его выходов сигналы, соответствующие излучаемым и принятым с частотами f_2 и f_1 , оцифровывались и далее поступали в вычислительное устройство 6. Оно определяет разности путей ΔL_i акустических сигналов с частотами f_2 и f_1 и соответствующие им разности времён Δt_i их распространения по парам лепестков ХН излучающей антенны до i -х рассеивающих объемов к акустическому приемнику. По полученным исходным данным вычисляются искомые значения скорости звука C_i на Z_i -х горизонтах пересечения характеристик направленности антенн.

$$C_i = \Delta L_i / \Delta t_i. \quad (2)$$

Горизонты Z_i пересечения характеристик направленности источника с ХН приёмника определяются выражением

$$Z_{1,2i} = \frac{D}{\operatorname{tg}\beta_{1,2i}}. \quad (3)$$

Общая длина пути распространения сигнала от источника до рассеивающего объёма, а затем к приёмнику равна

$$L_{1,2i} = l_{1,2i} + Z_{1,2i} = \frac{D}{\sin\beta_{1,2i}} + \frac{D}{\operatorname{tg}\beta_{1,2i}} = \frac{D}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta_{1,2i}}{2}\right)}.$$

Общее время распространения сигнала при постоянной по глубине скорости звука составляет

$$t_{1,2i} = \frac{C^{-1} \cdot D}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta_{1,2i}}{2}\right)}. \quad (4)$$

Излучаемые УЗ импульсы с частотами f_1 и f_2 распространяются по одним и тем же траекториям за исключением увеличения пути распространения для импульсов более высокой частоты f_2 . Дополнительная длина пути ΔL_i в виде «угольника» показана на рис. 2.

Для каждой пары i -х лепестков ХН излучателя разницу путей ΔL_i распространения по ним сигналов находят из соотношения

$$\Delta L_i = L_{2i} - L_{1i} \approx \frac{L_{1i} \cdot F}{f_1 \cdot \cos\beta_{1i}}. \quad (5)$$

Эта увеличенная длина пути для ХН более высокой частоты приводит к увеличению времени распространения на τ_i сигнала частоты f_2 относительно сигнала частоты f_1

$$\Delta t_i \approx \frac{t_{1i} \cdot F}{f_1 \cdot \cos\beta_{1i}}. \quad (6)$$

Соотношения (2)—(6) получены для однородной водной среды с постоянным значением скорости звука по глубине $C(Z) = C = \text{const}$. Для уменьшения погрешности определения C_i разность времён

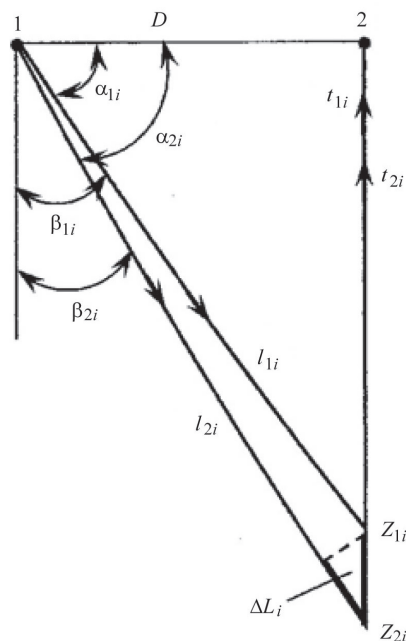


Рис. 2. Схема зондирования для пары лепестков ХН излучателя

распространения сигналов Δt_i находят по разнице фаз φ_i принятых сигналов с частотами f_1 и f_2 , которая определяется арктангенсом отношения отфильтрованных ФНЧ прямой и квадратурной составляющих сигналов, являющихся функциями разности частот $F = f_2 - f_1$.

В работах [1, 2] рассмотрена общая схема алгоритма определения разности фаз φ_i . Процедуры вычисления по φ_i разницы времён Δt_i распространения сигналов не приводятся. Поэтому по материалам статей невозможно составить для ЭВМ конкретные алгоритмы и программное обеспечение проверки корректности математической части описания фазового дистанционного измерителя «Эхомер».

Испытания экспериментальной аппаратуры «Эхомер» проводились американскими исследователями в апреле 1982 г. на борту научно-исследовательского судна «Пионер», находившегося на стопе вблизи острова Ванкувер, в бухте с глубиной места 230 м. Погрешность полученных значений скорости звука при восстановлении искомого ВРСЗ в пределах глубин 0—150 м не превышала ± 2.5 м/с.

Основным недостатком фазового дистанционного измерителя ВРСЗ в море авторы работ [1, 2] считают возможную неоднозначность показаний при значительных вертикальных градиентах скорости звука, из-за которой погрешность определения скорости звука у экспериментального образца аппаратуры может превысить ± 7 м/с. Возможно также негативное влияние боковых лепестков характеристик направленности антенн. При дальнейшем усовершенствовании аппаратуры предполагалось устранение отмеченных недостатков. Однако какая-либо информация о продолжении работ по усовершенствованию дистанционного фазового измерителя ВРСЗ (после публикаций [1, 2] в 1983-84 гг.) до настоящего времени в открытых научных изданиях отсутствует.

Последующие отечественные исследования дистанционного акустического фазового метода определения ВРСЗ в море. Дистанционный фазовый метод определения ВРСЗ в море является единственным из известных до 1984 г. дистанционных акустических методов, функционирование которых основано на рассеянии звука от естественных акустических неоднородностей морской среды, проверенным в натурных условиях (с достижением положительных результатов). То есть этот метод можно реализовать в судовой аппаратуре. Чтобы это подтвердить или опровергнуть, нам необходимо было создать, изготовить и проверить в море аналогичную работам [1, 2] экспериментальную дистанционную фазовую аппаратуру, а также разработать и реализовать на ЭВМ необходимые для обработки полученных данных соответствующие алгоритмы и программное обеспечение.

Экспериментальная аппаратура. Экспериментальная аппаратура состояла из подводной измерительной базы, бортовой приемно-излучающей, регистрирующей аппаратуры и блоков электропитания.

Структурная схема экспериментальной фазовой аппаратуры изображена на рис. 3. Принцип ее функционирования в основном аналогичен принципу функционирования фазовой аппаратуры, описанной в работах [1, 2].

На одном конце базы устанавливались рупорная приемная антенна 5 с предварительным усилителем 6. Рупор изготовлялся из пенопласта. Угол его раскрытия 90° , наибольший внутренний диаметр 660 мм. Внутри рупора по его оси устанавливался цилиндрический вибратор из 20-ти цилиндрических пьезоэлектрических преобразователей диаметром 18 мм и высотой 13 мм, соединенных электрически параллельно. Раствор ХН излучающей антенны на резонансной частоте $f_p \approx 50$ кГц равен около 4° .

Выход предварительного усилителя 6 электрическим кабелем подключался к усилителю 8 приёмника 7 бортовой аппаратуры. На другом конце базы устанавливалась линейная излучающая антенна 4, с 6-ю цилиндрическими $\varnothing 20 \times 300$ мм излучателями и с индивидуальными усилителями мощности 3. Излучатели расположены на расстоянии $d = 210$ мм друг от друга. Расстояние от центра излучающей антенны до рупорной приемной антенны равно $D = 10.4$ м. Входы усилителей мощности 3 электрическим кабелем подключены к выходу генератора 2 передатчика 1 бортовой аппаратуры. Суммарная акустическая мощность шести излучателей 2 около 120 Вт.

На усилители мощности 3 с генератора 2 подаются импульсы длительностью 4 мс сигналов двух частот: $f_1 = 50$ кГц и $f_2 = 50.5$ кГц. Между соседними излучателями укладывается около 7-и длин волн излучаемых в воду акустических колебаний с частотами $f_1 \approx f_2$. При этом в вертикальной плоскости излучающей антенны образуются два веера из 7-и лепестков ее ХН.

Один веер соответствует излучаемой частоте f_1 , другой — частоте f_2 . Лепестки веера ХН, соответствующие сигналу с частотой f_2 имеют немного большие углы наклона в сторону дна, за исключением вертикальных лепестков, которые совпадают.

От генератора 2 сигналы частот f_1 и f_2 поступают также на амплитудный детектор 10, с выхода которого на первый канал измерительного магнитофона R-400 11 подается опорный сигнал $U_{\text{оп}}(t)$ разностной частоты $F = f_2 - f_1 = 500$ Гц. Принятые сигналы в усилителе 8 проходят через полосовой фильтр (49...51.5 кГц), усиливаются и поступают на амплитудный детектор 9, с выхода которого сигнал $U_c(t)$ разностной частоты $F = f_2 - f_1 = 500$ Гц подаётся на второй канал измерительного магнитофона R-400.

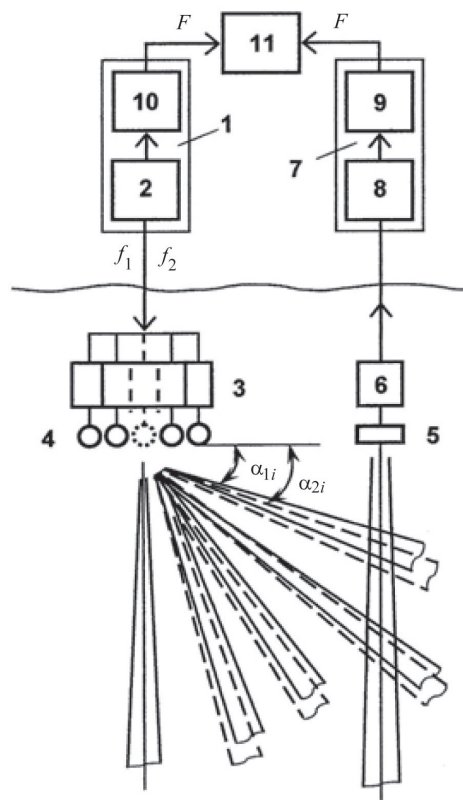


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной фазовой дистанционной аппаратуры определения ВРСЗ.

Эксперимент и обработка его результатов

- Эксперимент

Эксперимент по изучению физических принципов работы фазового дистанционного измерителя ВРСЗ проводился под руководством Ю. А. Милешкина на борту океанографического исследовательского судна (ОИС) «Михаил Крупский» 24 апреля 1985 г. в южной части Саргассова моря.

В условиях дрейфа судна подводная измерительная база с помощью специальной стрелы погружалась в воду на горизонт ~15 м. Эталонное ВРСЗ в районе проведения эксперимента определялось с помощью судовой аппаратуры «Исток» по результатам измерений значений температуры, солености и гидростатического давления.

- Обработка результатов

Обработка записанных на магнитофон излучаемых (опорных) и принятых сигналов разностной частоты $F = 500$ Гц фазовой дистанционной аппаратуры проводилась Ю. А. Милешкиным на ЭВМ М-6000 и СМ-4 в лаборатории.

Первый этап обработки осуществлялся на ЭВМ М-6000. Его целью являлось определение значений t_i -времен прихода принятых сигналов для i -х пар лепестков ХНХН излучателя и соответствующих им φ_i -разностей фаз принятых сигналов, которые распространялись по i -й паре лепестков. Вторым, конечным, этап обработки выполнялся на ЭВМ СМ-4 с целью определения по t_i и φ_i разностей времён Δt_i распространения по i -м парам лепестков ХН излучающей антенны и восстановления по найденным исходным данным искомого ВРСЗ. При разработке алгоритмов обработки было удобнее иметь дело с углами наклона $\alpha_{1,2i}$ (7) лепестков характеристик направленности излучающей антенны (рис. 2 и 3).

$$\alpha_{1,2i} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[(m-i) \cdot \frac{C_0}{d \cdot f_{1,2i}} \right]. \quad (7)$$

- Определение разности фаз принятых сигналов

Структурная схема первого этапа обработки на ЭВМ М-6000 сигналов магнитофона $U_c(t)$ и $U_{оп}(t)$ представлена на рис. 4.

При разработке алгоритма обработки использовался известный метод «комплексной демодуляции» [3]. С соответствующих выходов магнитофона через аналого-цифровые преобразователи (АЦП) 1 и 2 осуществлялся ввод экспериментальных данных на магнитный диск ЭВМ. Каждая реализация принятых и опорных сигналов преобразовывалась в 512 дискретных значений с частотой дискретизации 4 кГц.

Выходные сигналы АЦП 1 и 2 поступали в перемножитель 3. На второй перемножитель 6 подавался сигнал с АЦП 1 и сигнал с АЦП 2, сдвинутый в блоке 5 по фазе на $\pi/2$.

Массивы данных с выходов умножителей 3 и 6 пропускались через одинаковые цифровые фильтры низких частот (ФНЧ). С выхода ФНЧ 4 получают прямую составляющую $C_c(t) = 0.5A(t)\cos\varphi(t)$, а с выхода ФНЧ 7 — квадратурную составляющую $C_s(t) = 0.5A(t)\sin\varphi(t)$ исследуемых сигналов, с текущим уровнем амплитуды огибающей. Далее по ним в блоках 8 и 9 определялись зависящие от текущего времени прихода принятых сигналов огибающая

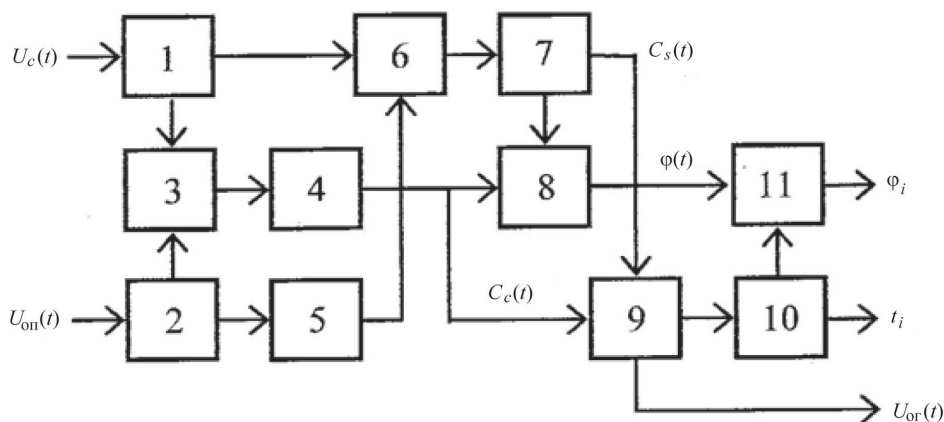


Рис. 4. Структурная схема первичной обработки принятых сигналов фазовой дистанционной аппаратуры.

$$U_{\text{ор}} = \left[C_c(t)^2 + C_s(t)^2 \right]^{0.5}$$

и разность фаз φ_i сигналов

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{C_s(t)}{C_c(t)} \right] = \arctg \left[\frac{\sin \varphi(t)}{\cos \varphi(t)} \right].$$

В блоке 10 по i -м максимумам значений $U_{\text{ор}}(t)$ находились соответствующие им времена $t_i \approx t_{li}$ прихода принятых сигналов, распространяющихся от i -х рассеивающих объёмов пересечения характеристик направленности. В блоке 11 определялись соответствующие временам t_i разности фаз φ_i принятых сигналов, распространяющихся по i -й паре лепестков ХН излучателя.

На рис. 5 в относительном масштабе представлены зарегистрированные на графопостроителе ЭВМ М-6000 синхронные записи зависимостей от текущего времени прихода t : принятого сигнала уровня $U_c(t)$, огибающей принятого сигнала $U_{\text{ор}}(t)$ и разности фаз $\varphi(t)$, соответствующие одной из реализаций сигналов фазовой дистанционной аппаратуры, записанной на магнитофоне.

При последующей обработке данных на ЭВМ СМ-4 по специально разработанным алгоритмам и программам определялись значения ΔL_i и Δt_i — разности путей и времён распространения УЗ сигналов по i -м лепесткам ХН излучателя и C_i — скоростей распространения звука на горизонтах Z_i (относительно горизонта погружения подводной измерительной базы).

- Алгоритм определения разности времён распространения сигналов

Полный набег фаз Ψ_i между принятыми сигналами частот f_2 и f_1 равен

$$\Psi_i = 2\pi \cdot (F \cdot t_{li} + 2\pi \cdot f_2 \cdot \Delta t_i). \quad (8)$$

Расчёты показывают, что в экспериментальной фазовой аппаратуре в однослойной водной среде с вертикальным градиентом скорости звука $G = 0.02 \text{ с}^{-1}$ при $C_0 = 1500 \text{ м/с}$ полный набег фаз на горизонтах пересечения характеристик направленности $Z \approx 5.6 \text{ м}$ ($i = 1$) и $Z \approx 70.2 \text{ м}$ ($i = 6$) равен соответственно $\Psi_1 \approx 2\pi \cdot 17.6$ и $\Psi_6 \approx 2\pi \cdot 92.8$ рад.

Разность фаз принятых сигналов на первом этапе их обработки может определяться в пределах $\varphi \leq (0 \dots 2)\pi$. Возникает проблема однозначности показаний, которая решена следующим образом.

Выражение (8) переписывается в следующем виде

$$\Psi_i = 2\pi \cdot (F \cdot t_{li} + f_2 \cdot \Delta L_i / C_{i-1} + f_2 \cdot \tau_i) = 2\pi \cdot n_i + \varphi_i, \quad (9)$$

где n_i — целое число, определяемое из выражений

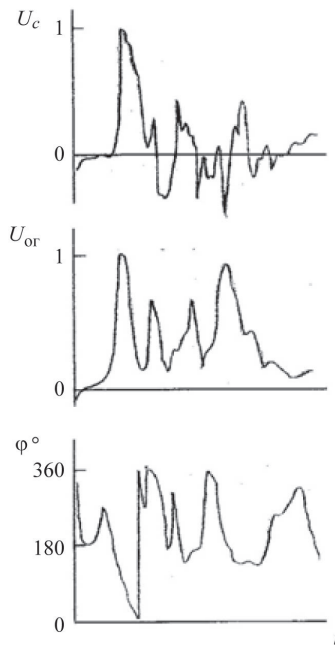


Рис. 5. Некоторые результаты обработки реализации сигналов, зарегистрированные на графопостроителе ЭВМ.

$$\begin{bmatrix} n_{1i} = (2\pi)^{-1} \cdot \left(2\pi \cdot F \cdot t_{1i} + \frac{2\pi \cdot f_2 \cdot \Delta L_i}{C_{i-1}} - \varphi_i \right) \\ n_{2i} = n_{1i} + 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

t_i и φ_i — находятся из результатов первого этапа обработки сигналов;

$$\Delta L_i \approx D \cdot \left(\frac{1 + \sin \alpha_{2i}}{\cos \alpha_{2i}} - \frac{1 + \sin \alpha_{1i}}{\cos \alpha_{1i}} \right), \quad (11)$$

C_{i-1} — скорость звука на $(i-1)$ -м горизонте рассеивания; $\tau_i = \Delta t_i - \Delta t_{i-1}$ — приращение разности времен распространения акустических сигналов по i -й паре лепестков относительно разности времен их распространения по $(i-1)$ -й паре лепестков.

Из выражений (8) и (9) следует, что $2\pi \cdot f_2 \cdot \Delta t_i = 2\pi \cdot \frac{f_2 \cdot \Delta L_i}{C_{i-1}} + 2\pi \cdot f_2 \cdot \tau_i$, откуда

$$\Delta t_i = \frac{\Delta L_i}{C_{i-1}} + \tau_i. \quad (12)$$

Слагаемое $2\pi f_2 \tau_i$ по сравнению с $2\pi f_2 \Delta t_i$ является величиной второго порядка малости и для реальных вертикальных океанических градиентов скорости звука заведомо меньше π , то есть $-\pi \ll 2\pi f_2 \tau_i \ll \pi$. По соотношению (9) с учётом (10) находят два значения τ_i , далее из выражения (12) — два значения Δt_i , а затем по соотношению (2) определяют два значения C_i . Используя условие обеспечения однозначности показаний $\frac{f_2 \cdot \Delta L_i \cdot C_{i-1}}{f_2 \cdot \Delta L_i - C_{i-1}} \geq C_i \geq \frac{f_2 \cdot \Delta L_i \cdot C_{i-1}}{f_2 \cdot \Delta L_i + C_{i-1}}$ окончательно выбирают одно правильное значение C_i .

Определение скорости звука начинается с первой относительно горизонта расположения подводной измерительной базы пары лепестков ХН излучателя, для которых $C_{i-1} = C_0$. Процедура повторяется для $i+1$ -го горизонта, используя уже известную скорость C_i .

В качестве примера в табл. 1 приведены некоторые промежуточные и окончательные результаты обработки сигналов экспериментальной дистанционной фазовой аппаратуры по рассмотренным выше алгоритмам для реализации, которой соответствуют записи на рис. 5.

В таблице приняты следующие обозначения: № — номер от горизонта базы пары лепестков ХН излучателя; α_{1i} — угол наклона в i -й паре лепестков лепестка сигнала частоты f_1 ; $\Delta \alpha = \alpha_{2i} - \alpha_{1i}$ — разница в угле наклона в i -й паре лепестков угла наклона лепестка сигнала частоты f_2 относительно угла наклона лепестка сигнала частоты f_1 ;

$Z_i = (Z_1 + Z_2)/2$ — горизонт пересечения i -й пары лепестков ХН излучателя с ХН приемной антенны; C_i — значение скорости звука на горизонте Z_i , определяемое экспериментальной аппаратурой; C_{iu} — истинное значение скорости звука на горизонте Z_i .

Таким образом, анализ полученных результатов (табл. 1) позволяет сделать вывод о том, что натурные эксперименты, проведенные в Атлантике 1985 г. на ОИС «Михаил Крупский», подтвердили принципиальную возможность определения скорости звука в море дистанционным акустическим фазовым методом (с приемлемой точностью).

Влияние хода носителя дистанционной фазовой аппаратуры. Все рассмотренные соотношения для дистанционного акустического фазового метода определения ВРСЗ в море справедливы

Таблица 1

Расчеты для $D = 10.4$ м, $C_0 = 1537.1$ м/с

$\alpha_p, ^\circ$	$\Delta \alpha_p, ^\circ$	$Z_p, \text{м}$	$\varphi_p, ^\circ$	$\Delta t_i \cdot 10^{-4}, \text{с}$	$\Delta L_p, \text{м}$	$C_p, \text{м/с}$	$C_{iu}, \text{м/с}$
28.555	1.02761	5.7	214.9	2.3554	0.3628	1540.3	1537.4
42.949	0.60719	9.7	110.0	2.2849	0.3501	1532.2	1532.5
54.167	0.40955	14.4	323.0	2.5838	0.3969	1536.1	1537.3
63.949	0.27754	21.3	313.2	3.2618	0.5011	1536.3	1536.6
72.975	0.17397	34.0	306.4	4.73607	0.7279	1536.9	1535.9

для неподвижной относительно водной среды антенной системы, то есть для измерений в дрейфе или стоящего на якоре судна — носителя аппаратуры, что значительно снижает их практическую ценность.

На ходу судна будет иметь место изменение расстояния между точками излучения и приёма акустических сигналов, значений углов и времён их распространения, а влияние эффекта Доплера (обусловленное движением излучателей и приемников относительно неподвижных отражающих рассеивателей) приведет к искажению несущих частот в принимаемом сигнале [4—6].

Оценим влияние хода судна-носителя дистанционной фазовой аппаратуры на её показания при постоянном значении скорости звука в водной среде $C(Z) = C = C_0 = \text{const}$. На рис. 6 представлена геометрия акустического зондирования водной среды дистанционной фазовой аппаратурой для пары лепестков ХН излучающей антенны с судна, движущегося со скоростью V .

Акустические антенны излучающая 1 и приёмная 2 установлены на расстоянии D друг от друга по диаметральной плоскости судна, причём антенна 2 расположена ближе к его носу.

При работе аппаратуры в вертикальной плоскости от центра излучающей антенны образуются два веера из m лепестков ее ХН с углами $\alpha_{1,2i}$ относительно горизонтали. Водный поток, имеющий скорость V , отклоняет ко дну траектории распространения УЗ, при этом увеличиваются углы их наклона до значений

$$\alpha_{1,2iv} = \arctg \left(\frac{C_0 \cdot \sin \alpha_{1,2i}}{C_0 \cdot \cos \alpha_{1,2i} - V} \right), \quad (13)$$

$$\Delta \alpha_{iv} = \alpha_{2iv} - \alpha_{1iv}. \quad (14)$$

По мере распространения УЗ изменяется относительно точки излучения 1 положение приёмной антенны по горизонтали. Через время t_{1iv} и t_{2iv} оси 1i и 2i-го лепестков ХН излучателя пересекутся на горизонтах Z_{1iv} и Z_{2iv} с осью ХН приёмной антенны, которая будет располагаться от точки излучения на расстояниях $D_{1iv} = D + V \cdot t_{1iv}$ и $D_{2iv} = D + V \cdot t_{2iv}$ соответственно. Горизонты пересечения характеристик направленности будут равны

$$Z_{1,2iv} = D_{1,2iv} \cdot \tg \alpha_{1,2iv}. \quad (15)$$

На рис. 6 показаны положения приёмной антенны в точке 2_{v1i} и штриховой линией её оси ХН для $D_{liV} = (D_{1iv} + D_{2iv})/2$. Времена t_{1iv} и t_{2iv} можно найти из уравнения

$$t_{1,2iv}^2 \cdot (C^2 \cdot \cos^2 \alpha_{1,2iv} - V^2) - 2 \cdot D \cdot V \cdot t_{1,2iv} - D^2 = 0. \quad (16)$$

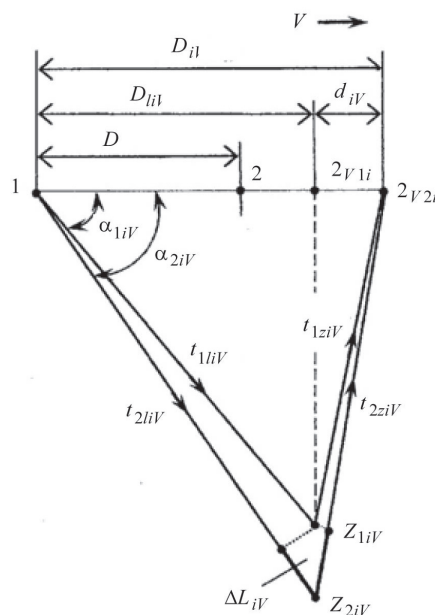


Рис. 6. Схема зондирования на ходу судна для пары лепестков ХН излучателя

Через время t_{1ziV} и t_{2ziV} рассеянные акустические сигналы с горизонтов Z_{1iV} и Z_{2iV} достигнут приёмной антенны, которая от точки 2_{iV} переместится на расстояния $d_{1iV} = V \cdot t_{1ziV}$ и $d_{2iV} = V \cdot t_{2ziV}$ соответственно. На рис. 6 показано положение приёмной антенны в точке 2_{v2i} для $d_{iv} = (d_{1iV} + d_{2iV})/2$. При этом времена t_{1ziV} и t_{2ziV} можно найти из соотношения

$$t_{1,2iV} = D_{1,2iV} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{1,2iV} / \sqrt{C^2 - V^2}. \quad (17)$$

Времена распространения акустических сигналов от излучающей антенны до рассеивающего объёма к приёмной антенне будут равны

$$t_{1,2iV} = t_{1,2liV} + t_{1,2ziV}. \quad (18)$$

При этом расстояние от точки излучения 1 до точки приёма 2_{v2i} будет составлять

$$D_{iV} = D + V \cdot 0.5 \cdot (t_{1iV} + t_{2iV}). \quad (19)$$

Для каждой пары i -х лепестков ХН излучателя разницу путей ΔL_{iV} распространения по ним сигналов определяется выражением

$$\Delta L_{iV} = D_{iV} \cdot \left(\frac{1 + \sin \alpha_{2iV}}{\cos \alpha_{2iV}} - \frac{1 + \sin \alpha_{1iV}}{\cos \alpha_{1iV}} \right). \quad (20)$$

Значения скорости звука на горизонтах $Z_{iV} = 0.5(Z_{1iV} + Z_{2iV})$ равны

$$C_{iV} = \Delta L_{iV} / \Delta t_{iV}, \quad (21)$$

где $\Delta t_{iV} = t_{2iV} - t_{1iV}$.

Частоты принятых акустических сигналов примут значения

$$f_{1,2iV} = f_{1,2} \cdot \left(1 + \frac{V \cdot \cos \alpha_{1,2iV}}{C_0} \right) \cdot \left\{ 1 - \frac{V \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{Z_{1,2iV}}{d_{1,2iV}} \right) \right]}{C_0} \right\}, \quad (22)$$

здесь $Z_{1,2iV} = D_{1,2iV} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{1,2iV}$.

Изменения несущих частот приводит к изменению значения разностной частоты

$$F_{iV} = f_{2iV} - f_{1iV}. \quad (23)$$

Изменяется и полный набег фаз между принятыми сигналами частот f_2 и f_1 , который становится равным

$$\Psi_{iV} = 2\pi \cdot (F_{iV} \cdot t_{1iV} + 2\pi \cdot f_{2iV} \cdot \Delta t_{iV}) = 2\pi \cdot n_{iV} + \varphi_{iV}. \quad (24)$$

Необходимо учитывать, что в реальности мы можем определить значение только времени распространения t_{1iV} . Поэтому принимаем $D_{iV} \approx D_{1iV}$, тогда

$$\Delta L_{iV} \approx \Delta L_{1iV} = D_{1iV} \cdot \left(\frac{1 + \sin \alpha_{2iV}}{\cos \alpha_{2iV}} - \frac{1 + \sin \alpha_{1iV}}{\cos \alpha_{1iV}} \right), \quad (25)$$

$$Z_{1,2iV} \approx Z_{1,21iV} = D_{1iV} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{1,2iV}, \quad (26)$$

$$Z_{iV} \approx Z_{1iV} = 0.5 D_{1iV} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{1iV} + \operatorname{tg} \alpha_{2iV}), \quad (27)$$

$$C_{iV} \approx C_{1iV} = \Delta L_{1iV} / \Delta t_{iV}. \quad (28)$$

В табл. 2 представлены результаты численной оценки влияния хода судна для аппаратуры «Эхомер» с использованием соотношений (2), (8)—(24) с учётом (25)—(28) при $V = 0, 2.5$ и 5 м/с, $C = C_0 = 1500$ м/с.

В табл. 3 приведены значения погрешностей некоторых величин $\Delta Z_{iV} = Z_{1iV} - Z_{2iV}$, $\Delta F_{iV} = F_{2iV} - F_{1iV}$ и $\Delta C_{iV} = C_{2iV} - C_{1iV}$ в зависимости от угла наклона пар лепестков ХН $\alpha_{iV} \approx \alpha_{1iV}$ источника при скорости хода судна $V = 5$ м/с.

Выполненные оценки показывают увеличение на ходу судна погрешности определения аппаратурой «Эхомер» значений горизонтов пересечения характеристик направленности и скорости звука

Таблица 2

Влияние хода судна

$V = 0$							
α_{1P}°	α_{2P}°	$\Delta\alpha_P^{\circ}$	Z_P м	—	f_1 , кГц	f_2 , кГц	F , кГц
85.957	86	0.04393	145.1	—	212.77	215.05	2.28
$V = 2.5$ м/с (~ 5 уз)							
α_{1IV}°	α_{2IV}°	$\Delta\alpha_{IV}^{\circ}$	Z_{1IV} м	Z_{iDV} м	f_{1IV} кГц	f_{2IV} кГц	F_{IV} кГц
86.053	86.096	0.04294	152.34	156	212.794	215.074	2.27998
$V = 5$ м/с (~ 10 уз)							
α_{1IV}°	α_{2IV}°	$\Delta\alpha_{IV}^{\circ}$	Z_{1IV} м	Z_{iDV} м	f_{1IV} кГц	f_{2IV} кГц	F_{IV} кГц
86.108	86.191	0.04594	160.3	168.2	212.815	215.095	2.27994
$V = 0$							
F_{iV} кГц	n_i	φ_P°	D , м	ΔL_P м	Δt_P мс	C_P м/с	
2.27998	884	22.40	10.2	3.105	2.07	1500	
$V = 2.5$ м/с (~ 5 уз)							
F_{iV} кГц	n_{iV}	φ_{iV}°	D_{iDV} м	ΔL_{iDV} м	Δt_{iV} мс	C_{iDV} м/с	
2.27998	951	54.49	10.706	3.419	2.281	1498.7	
$V = 5$ м/с (~ 10 уз)							
F_{iV} кГц	n_{iV}	φ_{iV}°	D_{iDV} м	ΔL_{iDV} м	Δt_{iV} мс	C_{iDV} м/с	
2.27994	1028	35.06	11.264	3.779	2.527	1495.4	

Таблица 3

Погрешности некоторых величин, $V = 5$ м/с

i	4	6	8	10	11	12	13	14
α_{IV}°	39.3	50.8	60.6	69.5	73.8	78	82.1	86.1
ΔZ_{IV} м	0.02	0.05	0.11	0.25	0.41	0.76	1.8	7.9
$-\Delta C_P$ м/с	0.11	0.13	0.18	0.29	0.4	0.65	1.28	4.57
$-\Delta F_{IV}$ м	0.066	0.06	0.058	0.055	0.054	0.053	0.054	0.056

на них. Они наиболее значительны для последних двух горизонтов ($i = 13$ и 14) определения ВРСЗ при скорости хода судна $V > 2.5$ м/с (~ 5 уз).

ВРСЗ должно определяться на ходу судна ≤ 5 уз. В блоке памяти дистанционной фазовой аппаратуры записываются опорные сигналы излучения и принятые. ЭВМ аппаратуры по результатам первичной обработки принятых и опорных сигналов по структурной схеме рис. 4 определяет значения времён t_{iIV} и разности фаз φ_{iIV} . Далее ЭВМ по соотношениям:

- (13) вычисляет углы α_{1IV} и α_{2IV} ;
- (25)—(27) определяет Z_{iDV} и ΔL_{iDV} ;
- (22) и (23) вычисляет значения частот f_{1IV} и F_{iIV} ;
- (10) и (12) с учётом (24) определяет Δt_{iIV} ;
- (28) находит значения $C_{iDV} \approx C_{iIV}$.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность определения ВРСЗ на ходу судна дистанционным акустическим фазовым методом (в верхних слоях морской среды на глубинах до 35 м, на скоростях хода судна до 5 уз), что позволяет осуществлять непрерывный контроль гидрофизических параметров морской акватории в процессе движения судна без использования

дорогостоящих измерительных зондов с приемлемой точностью определения скорости звука. Рассмотренный метод получения ВРСЗ может быть успешно применен в бортовой измерительной аппаратуре, размещенной на подводном аппарате, не требующий специального маневрирования по глубине хода при измерении гидрофизических характеристик.

Литература

1. *Brown E. H., Farmer D. M.* The echometer-an acoustic ocean sound speed profiler // Int. Geosci. Sens. Symp. San Fransisco, Calif. 31 august-2 sept. 1983. V. 2. P. FA6 3/1—FA6 3/6.
2. *Brown E. H., Farmer D. M., Gilheany J. J., Woodward W. E.* The Echometer: An acoustic sound speed profiler // IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing. 1984. V. GE-22, № 6. P. 641—647.
3. *Отнес Р., Энуксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 194 с.
4. *Зарайский В. А., Тюрин А. М.* Теория гидролокации. Л.: ВМОЛУА, 1975. 604 с.
5. *Пестряков В. Б.* Фазовые радиотехнические системы. М.: Сов. радио, 1968. 466 с.
6. *Евтютов А. П., Митько В. Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.