

УДК 551.463.22

Г.Н. Серавин, И.И. Микушин, В.Н. Лобанов

**ПРЯМЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА
В ЖИДКОСТИ**

Рассмотрены погрешности прямых импульсных методов измерения скорости звука в жидкости. Особое внимание обращено на перспективные импульсные методы с использованием время-пролетных и цилиндрических пьезоэлектрических акустических систем с многократным отражением импульсов. Оригинальность метода измерения скорости звука в воде заключается в использовании акустической базы, выполненной из пьезоэлектрического цилиндра. Рабочим расстоянием акустической базы является внутренний диаметр цилиндра. Основные функциональные устройства выполняются на элементах цифровой техники.

Скорость звука; импульсный метод; погрешность измерения; акустическая система.

G.N. Seravin, I.I. Mikushin, V.N. Lobanov

**DIRECT PULSE METHODS OF MEASUREMENT OF SPEED OF THE SOUND
IN THE LIQUID**

Errors of direct pulse methods of measurement of speed of a sound in a liquid are considered. The special attention is turned on perspective pulse methods with use time-flying and cylindrical piezoelectric acoustic systems with repeated reflexion of impulses. Originality of the method of sound speed measurement in water consists in use of the acoustic base executed as the piezoelectric cylinder. Working distance of acoustic base is internal diameter of the cylinder. The basic functional devices are carried out on digital elements.

Speed of a sound; pulse method; measurement error; acoustic system.

Прямые импульсные методы измерения скорости звука основаны на непосредственном определении времени распространения t_c импульсным акустическим сигналом известного пути L . Скорость звука C находят по соотношению $C = L/t_c$. Общая структурная схема наиболее распространенных импульсных измерителей скорости звука в воде с компенсированной относительно обтекающего ее водного потока акустической системой представлена на рис. 1.

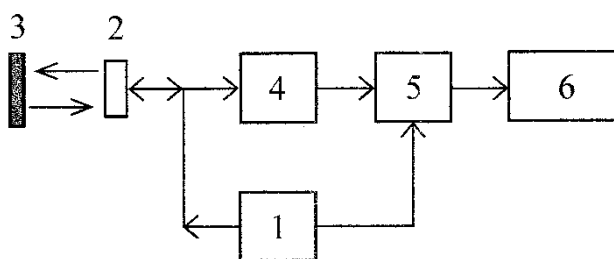


Рис. 1. Общая структурная схема прямых импульсных измерителей скорости звука

Она включает генератор видеоимпульсов 1, которыми ударно возбуждается обратимый акустический преобразователь 2. Соответствующие ультразвуковые радиоимпульсы распространяются до акустического отражателя 3 и от него – обратно к акустическому преобразователю 2. Отражатель установлен на фиксиро-

ванном расстоянии l от акустического преобразователя. Обычно во внимание принимают однократно отраженный акустический сигнал, которому соответствует путь распространения $L = 2l$. Сигналы от генератора видеоимпульсов и с выхода приемного усилителя 4 подаются на формирователь временного интервала 5, соответствующего промежутку времени от момента излучения до момента приема акустического сигнала. Его значение определяют измерителем временного интервала 6. Общее выражение для предельной относительной погрешности измерения скорости звука импульсными методами может быть записано как

$$\delta C = \delta C_o + \delta t,$$

где δC_o – составляющие относительной погрешности общие для прямых контактных методов измерения скорости звука;

$\delta t = \Delta t / t \approx \delta t_{II} + \delta t_{3B}$ – предельное значение составляющей относительной погрешности определения времени распространения акустического импульса;

δt_{II} – инструментальная относительная погрешность измерения временного интервала, обусловленная выбранным методом его измерения;

δt_{3B} – относительная погрешность временного интервала, обусловленная нестабильностью уровня «звона» акустического преобразователя и порога срабатывания измерителя временного интервала.

Из составляющих погрешностей общих для прямых контактных методов измерения скорости звука δC_o , у импульсных измерителей скорости звука учитываются изменение геометрических размеров акустической базы и влияние обтекающего ее водного потока $\delta C_o = \delta C_l + \delta C_v$.

Для компенсированной акустической системы при выполнении ее основания из инвара $\Delta C_l \approx 0,05$ м/с и $\delta C_v \approx 5 \cdot 10^{-6}$.

Инструментальная относительная погрешность измерения временного интервала современными методами его измерения $\delta t_{II} \leq 10^{-5}$.

Если измерения временного интервала $t_c \approx L / C$ производят в режиме регистрации перехода сигнала через пороговый уровень $t_c \approx L / C$ по фронту второго полупериода принятого радиоимпульса [1], то составляющая относительной погрешности временного интервала, обусловленная нестабильностью уровня «звона» акустического преобразователя и порога срабатывания импульсного генератора равна $\delta \tau_{3B} \approx \Delta \tau_{3B} / t_c$.

Здесь $\Delta \tau_{3B}$ – максимальное абсолютное значение нестабильности составляющей временной задержки, соответствует выражению

$$\Delta \tau_{3B} = \left[\frac{1}{2 \cdot f} + \frac{\arcsin(K_0 + K_{3B})}{2 \cdot \pi \cdot f} \right] \cdot \delta f + \frac{\Delta(K_0) + \Delta(K_{3B})}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{1 - (K_0 + K_{3B})^2}}, \quad (1)$$

где $\delta f \approx \Delta f_p / f_p$ – относительная нестабильность частоты заполнения излучаемого сигнала;

$K_0 = U_0 / U_2$ и $K_{3B} = U_{3B} / U_2$ – относительный уровень порога срабатывания и «звона» соответственно;

$\Delta(K_0)$ и $\Delta(K_{3B})$ – абсолютная изменчивость K_0 и K_{3B} соответственно.

Из всех известных прямых импульсных методов измерения скорости звука в жидкостях в судовой серийной аппаратуре был реализован в XXI в. цифровой импульсный метод [2–4]. В датчике скорости звука погружаемого зонда этой аппаратуры аналоговыми функциональными устройствами являются формирователь импульсов ударного возбуждения акустического преобразователя, акустическая система и приемный усилитель. Остальные функциональные устройства выполнены на элементах цифровой техники. Создание подобного измерителя стало возможным только в настоящее время благодаря достигнутому уровню развития микроэлектроники, в том числе появлению высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей и микропроцессоров, а также микросхем программируемой логики, что позволило по новому реализовать известный метод прямого импульсного измерения скорости звука.

В цифровой импульсном методе в общем случае используются многократные отражения акустического импульса от отражателя и акустического преобразователя. При наличии таких отражений в прямых импульсных измерителях скорости звука, когда период следования излучаемых импульсов $T \gg L / C$, на выходе приемного усилителя будет иметь место несколько затухающих по амплитуде радиоимпульсов (рис. 2).

При формировании временного интервала по амплитуде n -го полупериода принятого радиоимпульса, его значение t_N от момента излучения до N -го принятого импульса равно

$$t_N = \frac{2 \cdot l \cdot N}{C} + \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot f} + \tau_{\text{э}},$$

где $\frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot f}$ – известная систематическая погрешность определения времени;

$\tau_{\text{э}}$ – временная задержка в электронных цепях;

f – несущая частота принятого импульса.

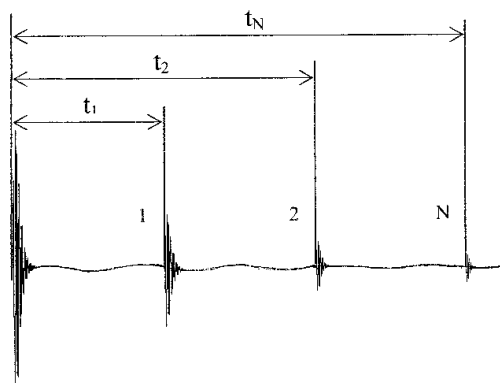


Рис. 2. Сигналы на выходе приемного усилителя при наличии многократных отражений в акустической системе

В данном случае составляющая погрешность δt_{3B} практически отсутствует, принимается во внимание максимальное абсолютное значение нестабильности

составляющей погрешности формирования временного интервала и временной задержки в электронных цепях

$$\Delta t_N \approx \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot f} \cdot \delta f + \Delta \tau_{\text{э}}. \quad (2)$$

При этом относительная погрешность формирования временного интервала составляет

$$\delta t \approx \delta t_N \approx \frac{\Delta t_N}{t_N} \approx \frac{C}{2 \cdot l \cdot N} \cdot \Delta t_N. \quad (3)$$

При принятых исходных данных $l \approx 0,1$ м, $f \approx 3 \cdot 10^6$ Гц, $|\delta f| \approx 0,01$, $\Delta \tau_{\text{э}} \approx 10^{-8}$ с и $N = 4$, $n = 3$ получим из (2) для максимального значения $\Delta t_N \approx 14 \cdot 10^{-9}$ с и далее по (3) для $\delta t \approx \delta t_N \approx 5 \cdot 10^{-5}$, чему соответствует абсолютное значение этой составляющей погрешности по скорости звука $\Delta C_N \approx 1500 \cdot \delta t_N \approx 0,08$ м/с.

Наиболее радикальной мерой уменьшения погрешности определения временного интервала при наличии многократных отражений импульсов является его формирование по амплитудам n -го полупериода i -го и N -го принятых радиоимпульсов [5]. Значение временного интервала в этом случае будет составлять

$$t_{N-i} = \frac{2 \cdot l \cdot (N - i)}{C}.$$

Абсолютная погрешность его определения будет равна

$$\Delta t_{N-i} = \sqrt{2} \cdot \Delta t_{II}, \quad (4)$$

где в данном случае $\Delta t_{II} < 10^{-8}$ с – абсолютная случайная погрешность определения положения по времени амплитуды n -го полупериода. Максимальная относительная случайная погрешность определения этого промежутка времени

$$\delta t_{N-i} = \frac{C}{\sqrt{2} \cdot (N - i) \cdot l} \cdot \Delta t_{II}. \quad (5)$$

Выражение для относительной погрешности измерения скорости звука данным импульсным методом будет соответствовать выражению $\delta C = \delta C_O + \delta t_{N-i}$.

То же самое относится к импульсным измерителям скорости звука, в которых применяется акустическая система, содержащая один обратимый акустический преобразователь и два акустических отражателя, установленных на различных фиксированных расстояниях l_1 и l_2 ($l_2 > l_1$) от него. Такая акустическая система получила название «время-пролетная» или «двухбазовая» [6]. Она также является компенсированной относительно водного потока. Акустический сигнал в базе распространяется по двум путям. Время распространения акустических импульсов по первому пути равно $t_1 = 2l_1 / C$, по второму пути – $t_2 = 2l_2 / C$. Если измеряется разница этих времен $t_{ВП}$ по амплитудам n -го полупериода 1-го и 2-го принятых радиоимпульсов

$$t_{ВП} = t_2 - t_1 = \frac{2 \cdot (l_2 - l_1)}{C},$$

где $l_2 - l_1$ – расстояние между отражателями, то относительная погрешность измерения скорости звука будет равна $\delta C = \delta C_O + \delta t_{ВП}$.

Здесь $\delta t_{ВП} = \frac{C}{\sqrt{2} \cdot (l_2 - l_1)} \cdot \Delta t_H$ – значение относительной случайной погреш-

ности определения промежутка времени $t_{ВП}$.

Перспективным является использование в импульсных измерителях скорости звука в воде акустической базы [7], выполненной из пьезоэлектрического цилиндра, у которой рабочим расстоянием является его внутренний диаметр $l = d$. Она представляет собой тонкостенный цилиндрический пьезоэлемент с общим электродом, нанесенным на всю внутреннюю его поверхность и двумя электродами, нанесенными на внешнюю поверхность. Все поверхности пьезоэлемента изолированы от морской воды соответствующим покрытием. На один из внешних электродов пьезоэлемента с импульсного генератора подается короткий видеоимпульс. Цилиндрический пьезоэлемент ударно возбуждается по толщине стенки. Соответствующий ультразвуковой импульс распространяется в воде, заполняющей полость цилиндра, до противоположного участка внутренней поверхности, где отражается и возвращается обратно. Данный процесс повторяется многократно, до полного затухания отраженных импульсов. Со второго внешнего электрода цилиндрического пьезоэлемента снимается соответствующий принятый электрический сигнал.

Если формирование временного интервала t_N производится по амплитуде n -го полупериода, его значение t_N от момента излучения до N -го принятого импульса равно

$$t_N = \frac{(2 \cdot N - 1) \cdot d}{C} + \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot f} + \tau_{\text{э}}.$$

Максимальное абсолютное значение нестабильности составляющей погрешности формирования временного интервала будет соответствовать выражению (2). Относительное ее значение будет равно

$$\delta t_N \approx \frac{C}{(2 \cdot N - 1) \cdot d} \cdot \Delta \tau_N.$$

Когда формирование временного интервала производится по амплитудам n -го полупериода i -го и N -го принятых радиоимпульсов, его значение t_{N-i} можно записать как

$$t_{N-i} = \frac{2 \cdot d \cdot (N - i)}{C}.$$

Максимальное абсолютное значение нестабильности составляющей погрешности формирования временного интервала в этом случае будет соответствовать выражению (4), а относительное ее значение – выражению (5) при замене в нем l на d .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фукухара М., Техада М. Патент 2181494 РФ. МКИ G 01 V 1/40, G 01 V 1/48. Система акустического каротажа. Оpubл. 20.04.2000. Б.И. №11 (2).
2. Полканов К.И., Романов В.Ю., Смелов Д.А. Патент 2208223 РФ. МКИ G01H 5/00. Измеритель скорости звука в жидких средах. Оpubл. 10.07.2003. Б.И. №19.
3. Васильев С.А., Полканов К.И., Романов В.Ю., Серавин Г.Н., Смелов Д.А. Высокоточный импульсный измеритель скорости звука в воде // Труды VII Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2004)». – СПб.: Наука, 2004. – С. 38-41.

4. Жилина Н.А., Полканов К.И., Романов В.Ю., Васильев С.А., Смелов Д.А. Измеритель скорости звука в морской воде // Навигация и гидрография. – 2005. – № 20-21. – С. 97-101.
5. Тимрот Д.Л., Середницкая М.А., Чиквадзе Т.Д. Установка для измерения скорости звука в жидкостях // Теплофизика высоких температур. – 1984. – Т. 22, № 3. – С. 569-573.
6. Бабий В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане. Морской гидрофизический институт НАН Украины. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – 142 с.
7. Микушин И.И., Серавин Г.Н., Чернов В.П. Цилиндрическая акустическая база импульсного измерителя скорости звука в жидкости. Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2010)». – СПб.: Наука, 2010. – С. 114-118.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.П. Тарасов.

Серавин Георгий Николаевич

Научно-исследовательский центр радиоэлектронного вооружения Военно-Морского Флота 24 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации.

E-mail: srwn37@mail.ru.

196244, г. Санкт-Петербург, Витебский пр., д. 29, корп. 1, кв. 40.

Тел.: +78124653546.

Д.т.н.; старший научный сотрудник.

Микушин Игорь Иванович

E-mail: mikyshin-igor@mail.ru.

196603, Россия, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Саперная, д. 38, корп. 2, кв. 8.

Тел.: +78124505079.

Заместитель начальника; к.т.н.; доцент.

Лобанов Вадим Николаевич

Научно-исследовательского центра радиоэлектронного вооружения Военно-Морского Флота 24 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации.

E-mail: lobanof@inbox.ru.

197372, Россия, г. Санкт-Петербург, Богатырский пр. д. 58, корп. 4, кв. 77

Тел.: +78124653546.

Начальник лаборатории.

Seravin George Nikolaevich

Research Centre Radio-Electronic Arms of Navy 24 Central Scientific Research Institutes of the Ministry of Defence of the Russian Federation.

E-mail: srwn37@mail.ru.

App. 40, 29/1, Vitebsky Pr., St.-Petersburg, Russia, 196244, Russia.

Phone: +78124653546.

Dr. of Eng. Sc.; Leading Research.

Mikushin Igor Ivanovich

E-mail: mikyshin-igor@mail.ru.

App.8, 38/2, Sapernaja Street, St.-Petersburg, Pushkin, 196603, Russia.

Phone: +78124505079.

The Deputy Chief; Cand. of Eng. Sc.

Lobanov Vadim Nikolaevich

E-mail: lobanof@inbox.ru.

App.77, 58/4, Bogatyrsky Pr., St.-Petersburg, 197372, Russia.

Phone: +78124653546.

The Chief of Laboratory.