

УДК 534.222

© Р. А. Балакин¹, Г. И. Вилков²

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «АНИИ»), Санкт-Петербург

² Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс» (АО «НПП «Радар ммс»), Санкт-Петербург

rigms@aari.ru, glebvilkov@gmail.com

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 07.02.2018, после доработки 25.02.2018

Рассмотрены физические механизмы формирования информативных признаков отраженного от объекта акустического эхосигнала, обусловленного упругими свойствами материала объекта. Показано, что под воздействием зондирующего гидроакустического сигнала в облучаемом объекте возникают вынужденные и собственные механические колебания различных видов, в том числе на частотах, не связанных с частотой облучения. Эти колебания имеют достаточную амплитуду и вызывают вторичное индуцированное звуковое излучение, которое складывается с основным отражением, и в результате интерференции возникает суммарный модулированный сигнал, несущий в себе информацию о материале объекта. Основными классификационными признаками, позволяющими идентифицировать материал объекта, являются: волновое сопротивление, скорость поверхностной звуковой волны, частоты собственных резонансных колебаний и декремент их затухания. Описаны результаты проведенных лабораторных экспериментов по распознаванию материала объекта методом гидроакустической эхолокации. Определены направления и задачи дальнейших исследований. Для усиления информативных признаков отраженных эхосигналов, особенно для идентификации малогабаритных объектов, требуется оптимизировать характеристики приемо-излучающей аппаратуры в определенном направлении, в том числе характеристики приемо-излучающих антенн. Кроме того, должны быть оптимизированы параметры зондирующих сигналов и алгоритмы обработки отраженных сигналов.

Ключевые слова: гидроакустика, эхолокация, звуковая волна, распознавание материала объекта.

R. A. Balakin¹, G. I. Vilkov²

¹ Arctic and Antarctic Research Institute (FSBI «AARI»), St.-Petersburg, Russia

² JSC «Research and Production Enterprise «Radar mms» (JSC «NPP «Radar mms»), St.-Petersburg, Russia

IDENTIFICATION OF SUBMERGED OBJECT MATERIALS METHODS OF HYDROACOUSTIC SOUNDING

Received 07.02.2018, in final form 25.02.2018

This paper reviews physical mechanisms of formation for informative features of acoustic target echo induced by elastic characteristics of the object's material. It is demonstrated that a probing acoustic signal causes forced and self-induced vibrations of various kinds in the investigated object (including on frequencies unconnected with exposure rate). The vibrations have sufficient amplitude and cause secondary stimulated emission that is added to the main reflection, and as a result of interference there appears an ultimate modulated signal carrying information on the object's material. The main classification features that allow identifying the object's material are: surge resistance, surface acoustic wave speed, frequency and damping ratio of natural resonant vibrations.

To improve the returned signal's informative features, especially for identifying small-sized objects, it is required to optimize the characteristics of transducing devices in a particular direction, including the characteristics of transducing antennas. Moreover, probing signal parameters and reflected signal processing algorithms need to be optimized.

Keywords: hydro-acoustics, echolocation, sound wave, recognition of the material of the object.

Ссылка для цитирования: Балакин Р.А., Вилков Г.И. Идентификация материалов подводных объектов методами гидроакустического зондирования // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 2. С. 3–11.

For citation: Balakin R.A., Vilkov G.I. Identification of submerged object materials methods of hydroacoustic sounding. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 2, 3–11.

DOI: 10.7868/S2073667319020011

Введение

Задачи идентификации материалов подводных объектов методами гидроакустического зондирования являются актуальными во многих сферах морской деятельности. Одной из таких задач является поиск и распознавание на дне моря объектов, покрытых слоем ила и недоступных для обнаружения другими методами. При этом важно отличать природные объекты в виде крупных камней, неоднородностей грунта и других подобных образований от остатков затонувших судов, металлических конструкций, мин и авиабомб. Чувствительность методов обнаружения к материалу объекта дает важную дополнительную информацию.

Другой актуальной задачей, которая требует распознавания материала объекта, является охрана морских портов и подводных сооружений типа добывающих нефтегазовых платформ и трубопроводов. В этих охранных гидроакустических системах, работающих на принципе активной эхолокации, очень важно отличать дрейфующие льдины или крупных морских животных от антропогенных объектов типа подводных аппаратов, роботов или подводных пловцов.

В настоящее время возможность распознавания материала объекта методом акустической эхолокации принципиально доказана и подтверждена многочисленными экспериментами [1–3].

Интенсивные исследования во многих странах в данном направлении начались в 1970-х гг. после того, как была обнаружена способность дельфинов-афалин и других китообразных животных дистанционно различать материал достаточно малогабаритных предметов одинаковой формы и размеров, отличающихся только материалом. Так, в работе [2] подробно представлены результаты натурных экспериментов по эхолокационному различению дельфином шаровых мишеней, отличающихся одновременно и размерами, и материалом в различных сочетаниях. В экспериментах использовались шары диаметром около 40 мм, изготовленные из латуни и дюралюминия, одинаково покрашенные в черный цвет. Авторами была предложена модель механизма эхолокационного различения шаровых мишеней. Согласно этой модели, информативным признаком материала служил не собственно отраженный от мишеней акустический сигнал, а вторичное излучение собственных резонансных колебаний шаров, возбуждаемых акустическим импульсом. Шары, изготовленные из разного металла, имели существенно различную резонансную частоту и декремент затухания. Эта версия подтверждалась большим объемом экспериментальных данных. Из экспериментов делался вывод, что дельфин определяет тип объекта зондирования по типу его звучания узкополосным анализом, как отклик звучащего колокола на короткий удар.

Такое представление о механизме распознавания в данном конкретном эксперименте возможно и соответствует действительности, но в более широком аспекте представляется слишком упрощенным. Из техники связи известно, что широкополосные сигналы обладают большей информативностью, и чем шире полоса, тем больший объем информации может нести такой сигнал. Более поздними исследованиями [4–5] были детально изучены типы излучаемых дельфином сигналов и механизмы их возбуждения. В частности установлено, что навигационные сигналы дельфина имеют форму коротких щелчков с переменной периодичностью в зависимости от расстояния до объекта, а информационные сигналы для определения вида объектов, например, породы рыб или вида препятствия, имеют форму частотно-модулированных свистов (аналог сигналов линейной частотной модуляции ЛЧМ), с помощью которых устанавливаются детализированные характеристики окружающей среды. Таким образом, дельфин обладает «цветным» акустическим зрением, используя широкополосные акустические сигналы.

Попытки копировать акустический сигнал дельфина с целью расширения информативности отраженных от объектов эхосигналов пока не увенчались успехом. В частности, предпринимались попытки создать узконаправленные приемо-излучающие антенны типа бегущей волны [6] по аналогии с органами дельфина [7], но эти работы не были доведены до практического применения. Однако по итогам исследований акустического аппарата дельфина были разработаны разделы теории, позволяющие ставить и решать задачи создания эхолокационной аппаратуры, обладающей «цветным» восприятием окружающей среды и в частности распознаванием подводных объектов, скрытых от визуального наблюдения в мутной воде или закрытых слоем грунта.

1. Механизмы взаимодействия зондирующего сигнала с материалом объекта

На поверхности твердого тела при попадании на него звуковой волны, распространяющейся в воде, по законам гидроакустики возникает отраженная волна. Амплитуда и фаза отраженной волны зависят от соотношения волновых сопротивлений воды и материала твердого тела. Определенная

часть энергии звуковой волны, зависящая от соотношения волновых сопротивлений, проникает внутрь твердого тела и далее испытывает многократное переотражение от границ раздела, при этом, частично поглощаясь, проходит сквозь тело.

Степень поглощения звука зависит от декремента затухания в материале. Таким образом, уже амплитуда отраженного сигнала может быть отличительным признаком материала, поскольку зависит от его волнового сопротивления. Для большинства материалов, кроме сыпучих тел, зависимость волнового сопротивления от частоты отсутствует, поэтому не может служить признаком «цветного» акустического восприятия по аналогии с оптическими эффектами.

Чем больше волновое сопротивление материала, равное произведению его плотности на скорость распространения звука, тем больше его акустическая жесткость и, соответственно, больше амплитуда отраженного сигнала при прочих равных условиях. Но амплитуда отраженного от объекта сигнала в гораздо большей степени зависит от многих других факторов, таких как форма и габариты тела, степень экранирования промежуточными слоями разделяющей среды и других, поэтому не может быть достаточным признаком материала.

Кроме непосредственно отраженного звука, в твердом теле возникает собственное индуцированное звуковое излучение от ударного возбуждения механических колебаний зондирующим сигналом [8]. Колебания возникают на нескольких резонансных частотах – основного тона и обертонах, как при ударе по колоколу. Эти колебания дают вторичное излучение в воду во всех направлениях и затухают относительно быстро согласно декременту затухания в материале с учетом присоединенной массы воды. Металлические предметы дают более длительное послезвучание в отличие, например, от ледяных образований, деревянных или биологических объектов. Горные породы занимают промежуточное положение.

Такой вид вторичного излучения твердых тел на собственных резонансных частотах может служить ориентировочным признаком, позволяющим различать металлические объекты с относительно более высокочастотным спектром и продолжительным послезвучанием от объектов из дерева или ледовых образований, но не может быть надежным признаком для классификации материала [9]. Причина недостаточности таких признаков в отраженном сигнале заключается в том, что спектральный состав сигнала и длительность послезвучания в значительной степени зависят от размеров и формы объекта, а не только от физических свойств материала.

Но кроме названных эффектов, в твердых телах существуют и другие звуковые эффекты, возникающие при ударном возбуждении звуковой волны. К таким эффектам относятся поперечные и поверхностные звуковые волны Рэлея. В отличие от продольных, звуковые волны Рэлея обусловлены существованием, помимо продольной упругости материала, еще и поперечной упругостью, или модулем Пуассона, который по порядку величины примерно в два раза меньше модуля продольной упругости Юнга. Соответственно различию модулей упругости волновое сопротивление и скорость распространения поперечных и поверхностных волн также отличаются в два раза. Бегущая звуковая волна Рэлея возникает на поверхности твердого тела при наклонном падении зондирующего импульса (рис. 1).

Эта волна также вызывает индуцированное излучение в воду со сложной веерной диаграммой направленности по типу фазированной антенной решетки. Скорость распространения бегущей звуковой волны одинакова для всех частот спектра, но длина волны и, соответственно, шаг фазированной решетки различаются на каждой частоте. Амплитуда акустического излучения, индуцированного поверхностной волной, составляет лишь несколько процентов от прямой отраженной волны, но достаточна, чтобы в точке приема вызывать интерференцию с основным отражением на каждой частоте спектра и тем самым производить сложную модуляцию амплитуды и фазы каждой составляющей частотного спектра.

Поскольку характер такой модуляции однозначно связан со скоростью поверхностной бегущей

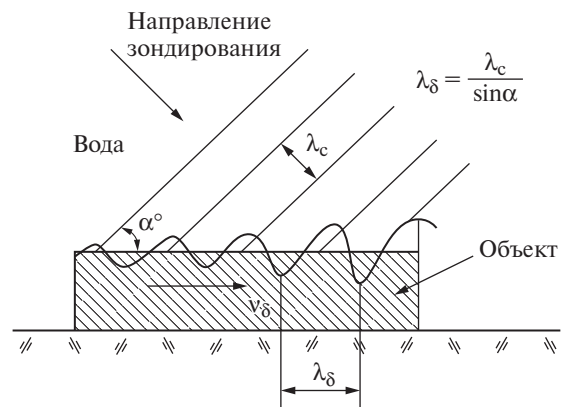


Рис. 1. Звуковая волна на поверхности твердого тела.

Fig. 1. Sound wave on the surface of a solid.

волны, то форма огибающей частотного спектра отраженного сигнала может служить надежным идентификационным признаком материала, мало зависящим от других влияющих факторов, например, от габаритов и формы объекта.

В качестве подтверждения работоспособности данного механизма формирования информативного признака можно привести результаты экспериментов работы [6]. В этой работе предложена имитационная математическая модель генерации акустических сигналов дельфина по типу антенны поверхностной бегущей волны и проведены лабораторные эксперименты, подтверждающие энергетические и спектральные характеристики такого излучения, а также расчетную диаграмму направленности.

Поверхность тела с бегущей акустической волной рассматривается как излучающая антенна типа фазированной антенной решетки с линейными излучающими элементами, расположенными с определенным шагом, равным длине поверхностной волны. Каждый элемент имеет определенную фазовую задержку на частоте излучения, которая и определяет угол направленности излучения в воду. Решение уравнения колебательной излучающей системы имеет вид:

$$x(t) = [A \cos \omega(t - T) + B \sin \omega(t - T) \exp[\delta(T - t)]],$$

$$\dot{x}(t) = [v_1 \cos \omega(t - T) - (\frac{\omega_0^2}{\omega} A + \frac{\delta}{\omega} v_1) \sin \omega(t - T)] \exp[\delta(T - t)],$$

$$\ddot{x}(t) = [A_2 \cos \omega(t - T) + B_2 \sin \omega(t - T) \exp[\delta(T - t)]],$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $A = x(T)$; $B = [v_1 + \delta x(T)] / \omega$; $A_2 = -A\omega_M^2 - 2\delta v_1$; $B_2 = A\omega_M^2 \frac{\delta}{\omega} + v_1(\frac{\delta^2}{\omega} - \omega)$, x – координата излучающей поверхности; A – амплитуда действительной составляющей сигнала; B – амплитуда мнимой составляющей; T – длительность посылки; t – текущее время; ω – угловая частота; δ – параметр дифракционной решетки.

Амплитуда возбуждаемой в объекте бегущей волны в большей степени зависит от угла падения зондирующего импульса, поскольку этот угол определяет так называемую фазовую скорость падающей волны согласно выражению:

$$V_\phi = c / \sin \alpha,$$

где V_ϕ – фазовая скорость падающей волны; c – скорость звука в воде; α – угол падения зондирующего импульса.

При этом, если скорость распространения этой волны по поверхности объекта равняется фазовой скорости возбуждающего сигнала, возникает эффект резонансного возбуждения бегущей волны. Резкое возрастание амплитуды индуцированного излучения при резонансном угле падения зондирующего сигнала может использоваться как классификационный признак материала.

2. Оптимизация зондирующего сигнала

Отраженный от объекта сигнал должен быть достаточно информативным, чтобы надежно выделить из него классификационные признаки материала. Поскольку составляющая отраженного сигнала, обусловленная индуцированным излучением поверхностной звуковой волны объекта, относительно мала и находится на уровне шумов моря, то необходимо сформировать такой зондирующий сигнал, чтобы полезная составляющая многократно повторялась и накапливалась за счет статистики. Наибольшей информативностью обладают сложные широкополосные сигналы, в которых каждая спектральная составляющая несет в себе необходимые для анализа признаки. При этом полная энергия зондирующего сигнала должна быть максимально возможной, чтобы преодолеть уровень шумов и помех, а ширина излучаемого спектра частот должна укладываться в полосу пропускания приемно-излучающего тракта. Данному условию частично отвечает зондирующий сигнал в виде колоколообразного импульса без высокочастотного заполнения, длительность которого соответствует полосе пропускания излучающей и приемной антенн. Именно такие сигналы излучают дельфины и другие китообразные, когда хотят идентифицировать объект. Для технической реализации недостаток такой формы сигнала заключается в том, что его широкополосный частотный спектр является сплошным и бесконечным, а амплитуды спектральных составляющих бесконечно малы. По этой причине раздельный анализ амплитуды частотных составляющих спектра, отраженных от объекта, представляется

затруднительным. Полезная информация о материале объекта при таком сигнале заключена в нюансах формы отраженного импульса, а именно в изгибах вершины и фронтов. Такие признаки легко маскируются шумами и помехами и поэтому трудно поддаются математическому анализу.

В мире китообразных анализ формы звукового сигнала относится к категории распознавания образов и успешно выполняется на уровне интеллекта животного.

Для технической реализации более оптимальным является сложный широкополосный зондирующий сигнал с дискретным линейчатым спектром, в котором составляющие несущие частоты имеют одинаковую амплитуду, равномерно распределены в отведенной полосе частот с одинаковым шагом и являются взаимно ортогональными [10]. Количество дискретных несущих частот должно быть настолько большим, чтобы за счет статистики преодолеть шумы и помехи и выделить закономерную составляющую амплитудной модуляции. Такие сигналы находят широкое применение в технологии цифровой акустической связи типа OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). На практике используются сигналы с количеством несущих частот в одном излучаемом импульсе до 512 и более (кратно степени 2), причем все частоты излучаются одновременно. На приемной стороне частоты демодулируются отдельно и несут в себе свою часть передаваемой цифровой информации. Условие ортогональности несущих частот (отсутствия взаимного влияния) выполняется, если длительность излучаемого импульса удовлетворяет условию:

$$\Delta f = 1/T,$$

где Δf – шаг несущих частот; T – длительность импульса.

В частотной области такой сигнал имеет линейчатый спектр с прямоугольной огибающей, плоской вершиной и относительно крутыми фронтами, а во временной области представляет собой шумоподобный сигнал определенной длительности с глубокими и нерегулярными пульсациями амплитуды. Все несущие частоты такого сигнала распространяются независимо и взаимодействуют с объектом, не влияя друг на друга. В определенном аспекте такой широкополосный сигнал равноценен сканирующему по частоте узкополосному сигналу, который воспроизводит амплитудно-частотную характеристику отражающего объекта.

Главное преимущество сигнала OFDM заключается в возможности его формирования с помощью цифрового алгоритма – дискретного быстрого преобразования Фурье (ДБПФ), который технически реализуется на базе одного микропроцессора. Зондирующий сигнал первоначально формируется в цифровом виде, а затем преобразуется в аналоговую форму цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) и излучается через антенну.

Отраженный от объекта сигнал принимается и преобразуется в исходную форму частотного спектра с помощью обратного преобразования Фурье.

После обработки отраженного сигнала каждая восстановленная несущая частота спектра несет на себе признаки амплитудной модуляции, обусловленной интерференцией индуцированного излучения поверхностной акустической волны объекта. Глубина модуляции отдельных несущих частот имеет относительно малую амплитуду, но путем последующего корреляционного анализа позволяет выделить закономерную часть спектра и удалить шумы и помехи.

Если собственные резонансные частоты колебания объекта, вызванные зондирующим сигналом, попадают в полосу частот приемного тракта, то анализируется также длительность послезвучания объекта и его спектральный состав. Это дает дополнительную информацию для идентификации объекта (но не материала).

3. Устройство для эхолокации материала объектов

Устройство состоит из передающего и приемного модулей, снабженных приемо-передающей гидроакустической антеннами пьезо-керамического типа. Блок-схема устройства приведена на рис. 2.

В состав передающего модуля входят: формирователь зондирующего сигнала, усилитель мощности и широкополосная слабонаправленная гидроакустическая антенна. Формирователь построен на базе сигнального микропроцессора (DSP) высокой производительности, реализующего алгоритм ДБПФ. Формирователь генерирует периодическую последовательность шумоподобных зондирующих импульсов с дискретным линейным спектром. При этом длительность импульсов и период их следования согласованы с ожидаемой дистанцией эхолокации. Каждый зондирующий импульс состоит из

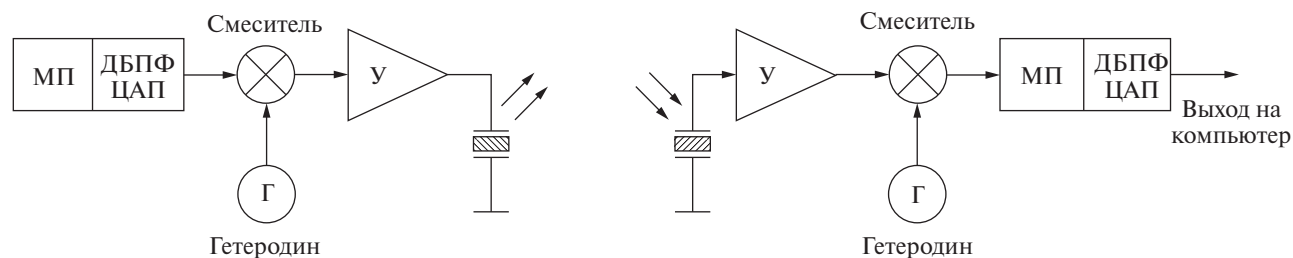


Рис. 2. Блок-схема устройства для эхолокации материала объектов.

Fig. 2. The block diagram of the device for the echolocation of material objects.

512 взаимно-ортогональных несущих частот, перекрывающих с равномерным шагом выделенную полосу частот. Оптимальный рабочий диапазон частот составляет 200–300 кГц с длиной волны порядка 0.5 см, что соответствует размерам лоцируемых объектов около 0.5 м, так, чтобы на протяженности объекта укладывалось несколько десятков поверхностных звуковых волн.

Все несущие частоты имеют одинаковую амплитуду, но различную фазу, распределенную в пределах угла 360° по псевдослучайному закону. Такое распределение фаз предусмотрено для минимизации так называемого пик-фактора излучаемой мощности передатчика, который наступает в момент совпадения достаточно большого числа фаз несущих частот. Фазы несущих частот формируются сначала в цифровом виде путем генерации мнимой и действительной составляющих, затем суммируются и преобразуются в аналоговую форму с помощью ЦАП, входящего в состав микропроцессора.

Полностью сформированный зондирующий сигнал подается с выхода микропроцессора на усилитель мощности и далее излучается через антенну.

Приемный модуль эхолокатора построен также на базе сигнального микропроцессора DSP, выполняющего функцию зеркально-обратного дискретного преобразования Фурье. В результате преобразования производится демодуляция принятого сигнала и восстанавливается исходный сигнал в виде частотного спектра. В этом спектре каждая из 512 несущих частот имеет определенную амплитуду и фазу, измененные по отношению к зондирующему сигналу под влиянием интерференции основной части отражения от объекта и дополнительной части индуцированного излучения поверхностной звуковой волны. Кроме индуцированной составляющей каждая несущая частота имеет случайное отклонение амплитуды и фазы под влиянием шумов и помех. Для исключения случайных помех принятый сигнал подвергается финишной математической обработке с помощью корреляционного анализа. Обработка позволяет устранить помехи за счет осреднения и выявить огибающую амплитуды, обусловленную интерференцией с поперечной звуковой волной на поверхности объекта. Интерпретация полученной огибающей отраженного сигнала производится решением обратной задачи, которая позволяет вычислить скорость поперечной звуковой волны и по ней идентифицировать материал объекта.

Другой возможный способ интерпретации вида огибающей отраженного от объекта сигнала заключается в сравнении с образцами записей, полученных путем зондирования тестовых образцов. Этот способ интерпретации результатов зондирования может оказаться предпочтительным по сравнению с расчетным, поскольку учитывается гораздо большее количество влияющих факторов.

4. Лабораторное моделирование

Задача лабораторного моделирования состояла в экспериментальной проверке работоспособности алгоритма распознавания материала объекта методом гидроакустической эхолокации, а также в получении количественных оценок уровня вторичного излучения, вызванного индуцированной поверхностной волной. Лабораторный эксперимент проводился на малогабаритной модели, которая размещалась в водяном баке емкостью 30 л и глубиной 20 см, рис. 3.

Для эксперимента использовались малогабаритные образцы твердых тел из различных материалов в форме прямоугольных брусков с линейными размерами порядка 100 мм, которые размещались на дне бака. Согласно масштабу модели использовалась повышенная рабочая частота в диапазоне 2.6 МГц

с длиной волны в воде 0.58 мм. Скорость звука в твердых телах имеет порядок величины от 3000 до 6000 м/с, так что длина продольной звуковой волны в образцах составляла 1–2 мм. Длина поверхностной звуковой волны на данной частоте зависит от скорости распространения поперечных сдвиговых волн, которая примерно в 2 раза меньше продольной волны и находится в диапазоне от 0.5 до 1 мм.

В качестве излучателя и приемника использовались два разнесенных по расстоянию пьезокерамических диска диаметром 8 мм и толщиной 0.7 мм. Такие диски эффективно излучают и принимают акустический сигнал на собственной резонансной частоте 2.6 МГц с полосой пропускания 70 кГц. Ширина основного лепестка диаграммы направленности, определяемая волновыми размерами дисков, составила около 6°.

Зондирующий акустический сигнал представлял собой широкополосный импульс длительностью 20 мс, состоящий из 128-ми взаимно ортогональных частот, распределенных в полосе 6 кГц с шагом через 48 Гц. На осциллограмме такой импульс выглядит как выборка белого шума, в которой отдельные периодические составляющие не различимы. Формирование зондирующего сигнала производилось на относительно низкой промежуточной частоте 30 кГц с последующим переносом спектра в высокочастотную область. На стороне приема выполнялось обратное преобразование и восстанавливалась исходная промежуточная частота. На низкой частоте производилась оцифровка сигнала и последующая математическая обработка с помощью алгоритма ДБПФ. Все математические операции выполнялись на компьютере, а для аналоговых операций использовалась штатная звуковая карта компьютера в режиме цифро-аналогового преобразования (ЦАП). Для каждого испытуемого образца выполнялась серия зондирований не менее 10 сеансов длительностью по 15 с. Внутри серии для анализа производилась выборка из 16 384 импульсов согласно алгоритму ДБПФ. Результаты экспериментов по измерению скорости поперечной волны в материале приведены в таблице.

В отраженном от образца сигнале визуально не наблюдается каких-либо признаков, обусловленных вторичным индуцированным излучением. Полезный сигнал обнаруживается только после спектрального анализа и последующей оценки результата в спектральной области по форме огибающей спектра.

Следует отметить, что при эхолокации объектов в высокочастотном диапазоне теряется существенная часть информации, обусловленной послезвучанием объекта на собственных резонансных

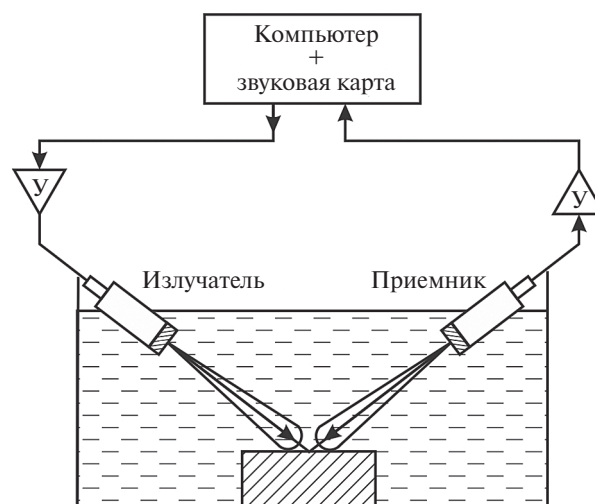


Рис. 3. Лабораторная модель.

Fig. 3. Laboratory model.

Таблица

Результаты экспериментов по измерению скорости поперечной волны в различных материалах

The results of experiments on measuring the speed of the transverse wave in various materials

Материал объекта	Волновое сопротивление $\rho \cdot c$, $\text{г/см}^2 \cdot \text{с} \cdot 10^{-4}$	Действительная скорость поперечной волны, м/с	Относительная амплитуда волны Релея, %	Отношен. сигнала к шумам S/N	Результат расчета скорости поперечной волны, м/с	Относительная погрешность измерения, %
Сталь	456	3230	0.7	1.0	2900 ± 300	10
Дюралюминий	169	3080	1.5	2.0	2700 ± 200	8
Гранит	145	2605	2.0	2.5	2400 ± 150	6
Лед	32	1990	4.0	4.0	2050 ± 90	5

частотах. Это происходит потому, что собственные резонансные частоты объекта не попадают в полосу пропускания приемного канала.

Результаты лабораторных экспериментов подтвердили принципиальную работоспособность предлагаемого алгоритма распознавания материала, но выявили его существенное ограничение применимости.

Эксперимент показал, что амплитуда отраженной части сигнала, обусловленная поверхностной звуковой волной, очень мала и находится на уровне 1–2% от полной амплитуды, что соизмеримо с уровнем фоновых шумов и помех. При этом подтвердилось предположение, что по мере увеличения акустической жесткости материала пропорционально снижается амплитуда поверхностной волны. Наибольшую акустическую жесткость имеют металлы, поэтому полный отраженный от металла сигнал имеет максимальную амплитуду, а индуцированный поверхностной волной сигнал – наоборот, имеет минимальную амплитуду. Поэтому в эксперименте удалось надежно различить материалы образцов из металла, гранита и льда. Но, различные металлы между собой (сталь, латунь, дюралюминий), в лабораторном эксперименте идентифицировать не удалось. Есть основания предполагать, что при акустическом зондировании объектов в натуральных условиях на относительно низких частотах, контраст между различными металлами увеличится, и, кроме того, будет доступна для анализа дополнительная информация о послезвучании объектов на собственных резонансных частотах.

Заключение

Проведенные лабораторные исследования подтвердили принципиальную возможность распознавания материала твердого тела методом гидроакустической эхолокации, используя сложный широкополосный зондирующий сигнал в виде импульса с дискретным линейчатым спектром и последующим спектральным анализом отраженного сигнала. Количественные результаты, полученные в результате проведенных лабораторных экспериментов, не вполне совпали с расчетными значениями излучения, индуцированного поверхностной звуковой волной, что ограничило разрешающую способность распознавания материала по его характеристикам упругости. Причины расхождений результатов расчетов и экспериментальных данных будут исследованы при продолжении работ. В планируемых дополнительных исследованиях будут рассмотрены вопросы влияния на достоверность и разрешающую способность метода габаритов объекта, кривизны его поверхности, степени загрязнения, угловой ориентации по отношению к направлению гидроакустического зондирования.

Исследования, выполненные в настоящей работе, были проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках прикладных научных исследований по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.», Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0009 от 05.06.2014 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0009).

Литература

1. *Dubrovskiy N.A., Giro L.R.* Echolocation in Bats & Dolphins // Eds: J.A. Thomas, C.F. Moss and M. Vater. University of Chicago Press, Chicago, 2003. V. II., P. 59–63.
2. *Дубровский Н.А., Тутов А.А.* Эхолокационное различение дельфином-афалиной шаровых мишеней, отличающихся одновременно размерами и материалом // Тр. Акустического ин-та. 1970. Вып. X. С. 163–181.
3. *Giro L.R., Dubrovskiy N.A.* A plausible mechanism of acoustic click production in the dolphin // J. Acoust. Sos. Amer. 1999. V. 105, № 2. Pt. 2. P. 1263.
4. *Au W.W.I., Herzig D.I.* Echolocation signals of wild Atlantic spotted dolphin (*Stenella frontalis*) // J. Acoust. Sos. Amer. 2003. V. 113. P. 598–604.
5. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов // Диссертация кандидата биологических наук. СПб, 2000. URL: <http://earthpapers.net/eholokatsionnye-signalny-delfina-tursiops-truncatus-pri-obnaruzhenii-i-raspoznavanii-podvodnyh-obektov> (дата обращения: 11.01.2018).
6. *Дубровский Н.А., Урусовский И.А.* и др. Модель генерации акустических щелчков дельфина по типу антенны бегущей волны // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 3. С. 423–430.
7. *Иванов М.П.* Эхолокационные сигналы дельфина при обнаружении объектов в сложных акустических условиях // Акустический журнал. 2004. Т. 50, № 4. С. 550–561.

8. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Влияние коэффициента электромеханической связи пьезопластины на длительность акустических импульсов при наличии электрической корректирующей цепи // *Акустический журнал*. 2008. Т. 54, № 5. С. 744–747.
9. *Сай С.В., Сорokin Н.Ю.* и др. Алгоритм поиска и распознавания искусственных объектов подводных изображений // *Вестник Технического государственного университета*. 2012. № 3 (26).
10. *Илларионов А.А., Козловский С.В.* и др. Характеристики гидролокационного отражения автономных объектов мониторинга морской среды // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. № 9 (146). С. 160–165.

References

1. *Dubrovskiy N.A., Giro L.R.* Echolocation in Bats & Dolphins / Eds: J.A. Thomas, C.F. Moss and M. Vater, University of Chicago Press, Chicago, 2003, V.II, 59–63.
2. *Dubrovskii N.A., Titov A.A.* Echolocation discrimination by the dolphin with bottlenose dolphins of ball targets, which differ both in size and material. *Tr. Akusticheskogo in-ta*. 1970, X, 163–181 (in Russian).
3. *Giro L.R., Dubrovskiy N.A.* A plausible mechanism of acoustic click production in the dolphin. *J. Acoust. Sos. Amer.* 1999, 105, 2, 2, 1263.
4. *Au W.W.I., Herzig D.I.* Echolocation signals of wild Atlantic spotted dolphin (*Stenella frontalis*). *J. Acoust. Sos. Amer.* 2003, 113, 598–604.
5. *Ivanov M.P.* Echolocation signals of a dolphin (*Tursiops truncatus*) at detection and recognition of underwater objects. *The Dissertation of the candidate of biological sciences*. SPb, 2000. URL: <http://earthpapers.net/eholokatsionnye-signaly-delfina-tursiops-truncatus-pri-obnaruzhenii-i-raspoznavanii-podvodnyh-obektov> (date of access: 11.01.2018) (in Russian).
6. *Dubrovskii N.A., Urusovskii I.A. and etc.* Model of generating acoustic dolphin clicks by the type of a traveling wave antenna. *Acoustic Zn.* 2009, 55, 3, 423–430 (in Russian).
7. *Ivanov M.P.* Echolocation signals of the dolphin when objects are detected in difficult acoustic conditions. *Acoustic Zn.* 2004, 50, 4, 550–561 (in Russian).
8. *Konovalev S.I., Kuz'menko A.G.* The influence of the electromechanical coupling coefficient of the piezoelectric plate on the duration of acoustic pulses in the presence of an electrical correcting circuit. *Acoustic Zn.* 2008, 54, 5, 744–747 (in Russian).
9. *Sai S.V., Sorokin N. Yu. and etc.* Algorithm of search and recognition of artificial objects of underwater images. *Vestnik Tekhnicheskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2012, 3 (26) (in Russian).
10. *Illarionov A.A., Kozlovskii S.V. and etc.* Characteristics of sonar reflection of autonomous marine monitoring objects. *Izvestiia IUFU. Tekhnicheskie nauki*. 2013, 9 (146), 160–165 (in Russian).