

Интеллектуальный анализ данных в гидроакустических системах: постановка задачи

Н. В. Размочаева¹, Д. М. Клионский²

Факультет компьютерных технологий и информатики
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹nvrasmochaeva@etu.ru, ²dmklionsky@etu.ru

Аннотация. В данном исследовании описывается краткая история развития гидроакустики как самостоятельной научной области. Отмечены поворотные исторические события и ключевые деятели в данной области. Представлены основные теоретические сведения о физике гидроакустических сигналов. Отмечена трудоемкость оценки параметров сигналов и проблемы их определения. Приведена основная классификация на сложные и простые гидроакустические сигналы. Перечислены основные этапы и методы обработки гидроакустических сигналов для каждой группы сигналов. Рассмотрены результаты интеллектуального анализа в гидроакустике, которые позволяют говорить о самостоятельности обсуждаемого подхода.

Ключевые слова: гидроакустика; анализ данных; управление; гидроакустические системы; интеллектуальный анализ данных

I. ВВЕДЕНИЕ

В основе обсуждаемой проблемы лежит несколько определений. Рассмотрим их подробнее. Во-первых, *акустика* – наука о явлениях, происходящих в упругой среде и связанных с излучением, приемом и распространением акустических волн. Акустика может включать в себя различные прикладные области, например, электроакустика, биоакустика или архитектурная акустика. Во-вторых, *гидроакустика* – раздел акустики, изучающий излучение, приём и распространение звуковых волн в водной среде (в океанах, морях, озёрах и т.д.) [1], [2].

Гидроакустика нашла широкое применение при решении задач подводной локации, обеспечении подводной связи и т.п. Главная особенность распространения звуковых волн под водой – их малое затухание. Благодаря этому звуковые волны под водой могут распространяться на значительно большие расстояния, чем в более разреженных средах, например, в воздухе.

Кроме затухания, обусловленного свойствами самой воды, на дальность распространения звуковых волн под водой влияют различные свойства самих волн. Например, рефракция звуковой волны, рассеяние и поглощение волн различными неоднородностями среды. Такого рода неоднородности могут возникать ввиду разницы температур, разного уровня солёности или плотности воды.

Еще одной особенностью распространения звуковых волн в подводной среде является их способность возбуждаться при сравнительно малых затратах энергии. Также звуковые волны являются самыми простыми с точки зрения распространения в подводной среде, по сравнению с другими типами волн. Например, радиоволны и свет затухают в мутной и соленой морской воде значительно быстрее, чем механические колебания, называемые распространением звуковой волны. Если сравнить дальность распространения плоской электромагнитной волны в морской электропроводной среде с акустической волной той же частоты, то последняя будет иметь в 1000 раз большую дальность. Эти и многие другие факты оказывают влияние на развитие гидроакустики как технической науки. Наиболее существенные области для применения гидроакустики: (1) для решения военных задач; (2) морская навигация; (3) звукоподводная связь; (4) рыбопоисковая разведка; (5) океанологические исследования; (6) сферы деятельности по освоению богатств дна Мирового океана; (7) использование акустики в бассейне (дома или в тренировочном центре по синхронному плаванию); (8) тренировка морских животных.

II. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ГИДРОАКУСТИКИ

Гидроакустика как наука, которая изучает явления, связанные со звуковыми волнами, распространяющимися в водной среде, существует очень давно. Однако вопросы точности регистрации звукопроводящих свойств среды распространения звуковых волн начали решать на практике для подводного наблюдения и связи только в XX столетии.

Самостоятельной наукой гидроакустика стала по результатам долгого пути развития теоретической и прикладной акустики. Первые упоминания о заинтересованности человека в изучении звуковых волн и их распространении в водной среде можно обнаружить в высказываниях Леонардо да Винчи: «Если ты, будучи на море, опустишь в воду отверстие трубы, а другой ее конец приложишь к уху, то услышишь идущие вдали корабли» [3].

История гидроакустики началась с попыток измерить расстояние с использованием звуковых волн. Первым это сделал русский исследователь академик Яков Дмитриевич Захаров (3.10.1765 г. – 2.10.1836 г.), который 30 июня 1804

г. совершил полет на воздушном шаре. Целью данного полета было зарегистрировать отражение звуковых волн от поверхности земли для определения высоты полета.

Первые попытки передачи информации под водой были совершены в ходе практических исследований распространения звуковых волн в море. Адмирал Степан Осипович Макаров (8.01.1849 г. – 13.04.1904 г.) в 1881 – 1882 гг. предложил использовать для передачи информации о скорости течения под водой специальный прибор – флюктометр [4]. Использование флюктометра положило начало развитию новой отрасли науки и техники – гидроакустической телеметрии.

Новые достижения в разработке подводных устройств были совершены в 1890-х гг. на Балтийском судостроительном заводе. Там по инициативе капитана 2 ранга Михаила Николаевича Беклемишева (26.09.1858 г. – 18.02.1936 г.) была проведена разработка приборов гидроакустической связи. Первые испытания гидроакустического излучателя для обеспечения подводной связи через звуковые волны проводились в конце XIX в. в опытовом бассейне в Галерной гавани в Петербурге [3]. Излучаемые устройством колебания хорошо прослушивались за 7 верст на Невском плавучем маяке. В результате исследований в 1905 г. создали первый прибор гидроакустической связи, в котором роль передающего устройства играла специальная подводная сирена, управляемая телеграфным ключом, а приемником сигналов служил угольный микрофон, закрепленный внутри на корпусе корабля. Сигналы регистрировались аппаратом Морзе и на слух. Позднее сирену заменили излучателем мембранного типа. Разработанное устройство было названо гидрофонической станцией [4]. Морские испытания новой станции состоялись в марте 1908 г. на Черном море, где дальность уверенного приема сигналов превышала 10 км. В 1909–1910 гг. при установке станций на подводные лодки использовали специальный обтекатель в целях уменьшения помех. К подобному решению англичане пришли лишь во время Первой мировой войны.

Также во время первой мировой войны был разработан первый прибор, обнаруживающий объекты, издающие шум, и определяющий их местонахождение, – так называемый шумопеленгатор. Французский физик П. Ланжевен в 1915 г. предложил использовать чувствительный приемник из сегнетовой [5] соли для первой шумопеленгаторной станции.

Основательные исследования распространения акустических волн в водной среде были начаты в годы Второй мировой войны. Экспериментальные и теоретические работы, которые были продолжены и в послевоенные годы, собраны в ряде монографий. В результате этих работ были выявлены и уточнены некоторые особенности распространения акустических волн в воде: поглощение, затухание, отражение и рефракция. В настоящее время гидроакустика является одной из самых быстро развивающихся областей науки.

III. ОСНОВЫ ГИДРОАКУСТИКИ

А. Особенности распространения звуковых волн в воде

Далее рассмотрим особенности распространения акустических волн в воде: поглощение, затухание, отражение и рефракция [6].

Поглощение энергии акустической волны в морской воде обуславливается двумя процессами: внутренним трением среды и диссоциацией растворенных в ней солей. Первый процесс преобразует энергию акустической волны в тепловую. Второй процесс преобразует энергию акустической волны в химическую энергию и таким образом выводит молекулы из равновесного состояния, которые впоследствии распадаются на ионы. Этот вид поглощения резко возрастает с увеличением частоты акустического колебания. Наличие в воде взвешенных частиц, микроорганизмов и температурных аномалий приводит также к затуханию акустической волны. Наличие температурных аномалий приводит к тому, что акустическая волна попадает в зоны акустической тени. В зоне акустической тени волна может претерпеть многократные отражения.

Наличие границ раздела вода – воздух и вода – дно приводит к отражению от них акустической волны. В первом случае акустическая волна отражается полностью. Во втором случае коэффициент отражения зависит от материала дна: плохо отражает илистое дно, хорошо – песчаное и каменистое. На небольших глубинах из-за многократного отражения акустической волны между дном и поверхностью возникает подводный звуковой канал. В этом канале акустическая волна может распространяться на большие расстояния. Изменение величины скорости звука на разных глубинах приводит к искривлению звуковых лучей – рефракции.

В. Искривление пути звукового луча

Известно, что скорость распространения звука изменяется с глубиной. Изменения зависят от времени года и дня, глубины водоёма и ряда других причин. Звуковые лучи, выходящие из источника под некоторым углом к горизонту, изгибаются. Направление изгиба зависит от распределения скоростей звука в среде. Например, летом верхние слои теплее нижних, лучи изгибаются книзу и в большинстве отражаются от дна, теряя при этом значительную долю своей энергии. Зимой нижние слои воды сохраняют свою температуру, между тем как верхние слои охлаждаются, лучи изгибаются вверх и многократно отражаются от поверхности воды, при этом теряется значительно меньше энергии. Таким образом, зимой дальность распространения звука больше, чем летом.

Вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) и градиент скорости оказывают определяющее влияние на распространение звука в морской среде. Распределение скорости звука в различных районах Мирового океана различно и меняется во времени. Различают несколько типичных случаев ВРСЗ: (1) изотермия, (2) положительная

рефракция, (3) отрицательная рефракция, (4) неоднородное распределение.

С. Рассеивание и поглощение звука неоднородностями среды

На распространение звуковых волн высокой частоты оказывают влияние мелкие неоднородности. К таким неоднородностям относят имеющиеся в естественных водоёмах: пузырьки газов, микроорганизмы и т.д. Эти неоднородности действуют двояким образом: одновременно поглощают и рассеивают энергию звуковых волн. В результате с повышением частоты звуковых колебаний дальность распространения звуковых волн сокращается. Особенно сильно этот эффект заметен в слое воды, близком к поверхности, в котором больше всего неоднородностей.

К рассеиванию звука из-за наличия неоднородностей часто присоединяется рассеивание из-за неровностей поверхности воды и дна. Вместе эти два фактора рассеивания приводят к подводной реверберации. Эффект реверберации имеет место, когда звуковые волны, отражаясь от совокупности неоднородностей и сливаясь в дальнейшем, дают затягивание звукового импульса. Затягивание звукового импульса заключается в его продолжении после фактического его окончания.

Помимо звуковых волн, создаваемых искусственными объектами (надводные и подводные суда), необходимо учитывать и собственные шумы водной среды. К собственным шумам можно отнести результаты взаимодействия среды с окружающей средой: звуковые волны от ударов волн на поверхности воды, от морского прибоя, от шума перекачиваемой гальки и т.п. К собственным шумам моря также относят звуковые волны, связанные с морской фауной (звуки, производимые гидробионтами: рыбами и др. морскими животными – сфера исследований биогидроакустики). Собственные шумы моря также ограничивают пределы дальности распространения подводных звуков.

Д. Дальность распространения звуковых волн

Дальность распространения звуковых волн является сложной функцией от частоты излучения. Частота излучения однозначно связана с длиной волны акустического сигнала. Как известно, высокочастотные акустические сигналы быстро затухают благодаря сильному поглощению водной средой. Низкочастотные сигналы напротив способны распространяться в водной среде на большие расстояния. Так акустический сигнал с частотой 50 Гц способен распространяться в океане на расстояния в тысячи километров, в то время как сигнал с частотой 100 кГц, обычный для гидролокатора бокового обзора, имеет дальность распространения всего 1-2 км. Приблизительные дальности действия современных гидролокаторов с различной частотой акустического сигнала (длиной волны) приведены в [6].

IV. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В [7] предлагается рассмотрение методов и алгоритмов работы с гидроакустическими сигналами. Любое исследование гидроакустического сигнала начинается с построения модели сигнала. Для модели сигнала важно знать параметры излучения сигнала. В большинстве задач эти параметры считают известными. Но большое число других параметров нельзя считать детерминированными, т.к. определение конкретных значений затруднено. В таких случаях используют интервальную оценку для изменений значений параметров. К оцениваемым параметрам относят время запаздывания сигнала, начальную фазу сигнала (используют оценку Крамера-Рао). В построение модели сигнала включают решение задачи обнаружения сигнала. Для обнаружения сигналов используют специальные устройства – детекторы.

Гидроакустические сигналы можно условно разделить на две группы: простые и сложные. Отношение того или иного сигнала к простому или сложному определяется согласно принципу неопределенности Габора. Произведение длительности сигнала T на занимаемую им полосу F (частотно-временное произведение или база сигнала) удовлетворяет неравенству $FT \geq a$, в котором константа a зависит от способа определения длительности и ширины полосы (в большинстве случаев ее значение можно принимать равным единице). Исходя из принципа неопределенности Габора *простым* называется сигнал, для которого $FT \approx a$, а значит, длительность и полоса тесно связаны друг с другом. Детерминированный сигнал, для которого $FT \gg a$ и полоса которого может изменяться независимо от длительности, называется сложным сигналом или сигналом с распределённым (расширенным) спектром [8, 9].

Для оценки времени запаздывания простых гидроакустических сигналов применяются спектральные методы. Для оценки параметров простого сигнала конечной длительности и заданной частоты используют метод периодограмм А. Шустера. Данный метод применяется для оценки фазы и времени запаздывания прихода простого сигнала.

Анализ алгоритмов обработки сложных фазоманипулированных (ФМ) гидроакустических сигналов. ФМ-сигналы – это сигналы в виде состыкованных между собой прямоугольных радиоимпульсов одинаковой амплитуды и частоты, начальные фазы которых могут принимать два значения: 0 и 180°. Асинхронный прием сложных ФМ-сигналов основывается на методе окна или методе последовательного поиска. Этапы обработки сложного ФМ-сигнала и применяемые на каждом этапе методы обработки представлены далее в списке:

1. Предварительная обработка (фильтрация, оцифровка, формирование спектра, децимация и пр.)
2. Выделение полезного сигнала (расчет корреляционной функции (линейная корреляция, знаковая корреляция, корреляция в частотной

области), посимвольная обработка на базе фазового детектора, вычисление логарифмической функции максимального правдоподобия).

3. Обнаружение сигнала по выбранному критерию (правило максимума функции, пороговые критерии (фиксированные и адаптивные)).

V. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Средствами интеллектуального анализа данных (ИАД) решаются различные задачи: классификация, кластеризация и др., – которые имеют место и в случаях с анализом гидроакустических сигналов. Так, в [10] рассматривается ряд методов интеллектуального анализа данных для классификации гидроакустических сигналов. Лучший результат показала оптимизированная по скорости обучения нейронная сеть.

Задачи распознавания сигналов могут быть решены с помощью программной системы RapidMiner, что может облегчить работу многих организаций, выполняющих исследования в области идентификации сигналов. Для решения классификационной задачи использовалось специальное программное обеспечение RapidMinerStudio. Авторами были выбраны следующие алгоритмы ИАД: (1) искусственная нейронная сеть, ANN – *Artificial Neural Network* [11], (2) индукция правил, RI – *Rule Induction* [12], (3) метод k ближайших соседей k-NN [13], дерево решений, DT – *Decision Tree* [14], (4) наивный байесовский классификатор, NB – *Naive Bayes* [15], случайный лес, RF – *Random Forest* [16], (5) логистическая регрессия, LR – *Logistic Regression* [17], (6) метод опорных векторов, SVM – *Support Vector Machine* [18].

Таким образом, можно сделать заключение, что задача классификации при анализе гидроакустических данных может быть решена с использованием метода ANN. Стоит отметить важность этапа предобработки гидроакустических данных, в ходе выполнения которого можно предопределить применимость некоторых методов.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена краткая история становления гидроакустики как самостоятельной научной отрасли, отмечены поворотные исторические события и ключевые деятели в данной области. Представлены основные теоретические сведения о физике гидроакустических сигналов. Отмечена трудоемкость оценки параметров сигналов и проблемы их определения. Приведена основная классификация на сложные и простые гидроакустические сигналы. Перечислены основные этапы и методы обработки гидроакустических сигналов для каждой группы сигналов. Рассмотрены результаты интеллектуального анализа в гидроакустике, которые

позволяют говорить о состоятельности обсуждаемого подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вашпанов А.Н. История создания и развития гидроакустических средств и систем. [Эл. ресурс]. URL: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/aspirant/portfolio/1%20year/%D0%92%D0%B0%D1%88%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%20%D0%A0%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%20%D0%BF%D0%BE%20%D1%84%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%81%D0%BE%D1%84%D0%B8%D0%B8%20%D0%92%D0%B0%D1%88%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2.pdf (дата обращения: 08-09-2019)
- [2] Фирсов Ю.Г. «Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров». СПб.: Нестор-История, 2010. 348 с.
- [3] Румынская И.А. Основы гидроакустики. Москва: «Судостроение», 1979 г. 105 с.
- [4] Корякин Ю.А. Гидроакустические системы. СПб: «Наука Санкт-Петербурга и морская мощь России», 2002 г. 416 с.
- [5] Шулейкин В.В. Физика моря. Москва: «Наука», 1968 г. 1090 с.
- [6] Гидроакустика. [Эл. ресурс]. URL: <https://wiki.wargaming.net/ru/Navy:%D0%93%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0> (дата обращения: 08-09-2019)
- [7] Карабанов И.В. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов : монография / И.В. Карабанов, А.С. Миронов. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 140 с.
- [8] Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
- [9] Глушков А. Разработка и исследование быстрых цифровых алгоритмов обнаружения и демодуляции узкополосных сигналов: автореф... дис. канд. техн. наук. Воронеж: Воронежский институт МВД РФ, 2006
- [10] Полонская Я.С. Методы интеллектуального анализа данных в задачах распознавания сигналов // Решетневские чтения. 2015. Т. 2. №. 19.
- [11] Girosi F., Jones M., Poggio T. Regularization theory and neural network architecture // *Neural Computation*. 1995. Vol. 7. Pp. 219–270.
- [12] Cohen W.W. Fast effective rule induction // *Proceedings of the twelfth international conference on machine learning*. 1995. C. 115–123.
- [13] Adaptive. Soft k-nearest-neighbour classifiers / S. Bermejo, J. Cabestany // *Pattern Recognition*. 2000. Vol. 33, pp. 1999–2005.
- [14] Quinlan J.R. Generating production rules from decision trees. In McDermott, John. *Proceedings of the Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-87)*. Milan, Italy. 1987. Pp. 304–307.
- [15] An analysis of Bayesian classifiers / Langley P., Iba W., & Thompson K. // *Proceedings of the Tenth National Conference on Artificial Intelligence*. 1992. Pp. 223–228. San Jose, CA: AAAI.
- [16] Antipov E.A., Pokryshevskaya E.B. Mass appraisal of residential apartments: An application of Random forest for valuation and a CART-based approach for model diagnostic // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39, no. 2, pp. 1772–1778.
- [17] An introduction to logistic regression analysis and reporting / Peng, Chao-YingJoann; Lee, Kuk Lida; Ingersoll, GaryM // *J. of Educational Research* 96(1). 2002. Pp. 3–13.
- [18] Data classification using support vector Machine Durgesh K. Srivastava, Lekha Bhambhu *Journal of theoretical and applied information technology*. 2009. Pp. 67–74.