

Экспериментальные исследования в гидроакустическом бассейне модулированного и демодулированного сигнала для оценки эффективности использования амплитудной модуляции в гидроакустических системах связи

Р.С. Кириленко

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования в гидроакустическом бассейне по распространению амплитудно-модулированного сигнала сложной формы для задач связи с подводными объектами на основе параметрической антенны. Приведены параметры гидроакустического бассейна, разработаны режимы модуляции и демодуляции гидроакустических сигналов. Проведена оценка коэффициента битовых ошибок при каждом измерении, доказано, что эксперимент проводился при строго контролируемых параметрах, а именно при отсутствии течений, шумов и отражений (гидроакустический бассейн), точная установка приёмника и обеспечена идеальная синхронизация сигнала. Данные передавались короткими пакетами несколько раз. Отсутствовали нежелательные фазовые и частотные отклонения передаваемого сигнала, а так же временные задержки между передатчиком и приёмником.

Ключевые слова: гидроакустика, параметрическая антенна, связь, амплитудная модуляция.

Характеристики цифровых систем подводной акустической связи тесно связаны со специфическими свойствами передачи подводного канала. В зависимости от характеристик канала обычно реализуются архитектура и методы модуляции, которые известны как надежные решения для передачи данных в сложных радиоканалах. Технология OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) на сегодняшний день представляется наиболее перспективной [1,2]. Параметры физического уровня и уровня канала передачи данных модели ISO/OSI адаптированы к потребностям подводной связи, чтобы наилучшим образом защитить сигнал от искажений и помех, типичных для подводной среды [3]. Из-за особенностей среды подводного акустического канала развитие подводной акустической связи сталкивается с проблемами низкой скорости передачи информации, малой пропускной способности и низкой надежности. Каждая конкретная среда обладает различными характеристиками, которые влияют на потенциальную

производительность цифровых систем связи. Адаптация современных методов передачи данных к ультразвуковой подводной связи требует предположения о гибкой модели канала, которая учитывает разнообразие явлений, происходящих в нем [4].

Не существует типичного подводного канала. Каждая конкретная среда обладает различными характеристиками, которые влияют на потенциальную производительность цифровых систем связи. Адаптация современных методов передачи данных к ультразвуковой подводной связи требует предположения о гибкой модели канала, которая учитывает разнообразие явлений, происходящих в нем [5].

В настоящее время активно разрабатываются беспроводные системы подводной связи, поскольку различные виды работ, проводимые под водой, требуют стабильной беспроводной связи. Например, сегодня желательны следующие современные и перспективные области применения подводных беспроводных систем: связь с автономными и дистанционно управляемыми подводными аппаратами (AUV, ROV), мониторинг подводного оборудования, техническое обслуживание подводных трубопроводов, изучение поведения животных и т.д. [6, 7]. Наиболее эффективной и широко используемой технологией цифровой гидроакустической связи в настоящее время является широкополосная связь на основе ортогонального частотного уплотнения (технология OFDM) [8].

Авторы работы приводят структуру для повышения производительности подводных акустических систем связи на основе предварительной эквализации и снижения отношения пиковой к средней мощности, что позволяет избежать искажений нелинейности [9].

Традиционные наземные радиосистемы не работают под водой, проводные системы только на малых расстояниях. Таким образом единственным каналом остается гидроакустический канал. Особенности

формирования сигнала под водой - это доплеровское смещение, реализация многолучевого излучения, применение модулируемых по частоте и амплитуде сигналов позволяют использовать эти преимущества для управления необитаемыми подводными аппаратами. В результате обеспечение высокой скорости и надежности подводная связь с использованием этого канала является перспективной задачей и рядом проблем, которые необходимо решить.

При разработке гидроакустических систем связи использование параметрических антенн (ПА), выбор и расчёт характеристик направленности ПА и приемной антенны позволяют адаптировать параметры таких систем для решения конкретной задачи передачи информации [10].

Аппаратура

Эксперимент проводился гидроакустическом заглушенном бассейне кафедры ЭГА и МТ ЮФУ с размерами 4х3х2,5 м оснащенный поворотными координатными устройствами и автоматизированным комплексом для проведения гидроакустических лабораторных измерений с аттестованным контрольно-измерительным оборудованием, совместимым с ПК. Частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления антенны приведена на рисунке 1.

Решение задачи и описание процесса исследования

Целью эксперимента было получить модулированный сигнал с амплитудной модуляцией. Разрабатывается модель распространения амплитудно-модулированного сигнала на примере которой необходимо провести экспериментальные исследования с фазовой и квадратурно-амплитудной модуляциями излучаемые параметрической антенной. Формирования излучающего сигнала выполнялось в программной среде

MathLab. Модулированный аналоговый сигнал через генератор сигнала GWInstek MGF-72120MA, усиливался и излучался антенной. Принятый гидрофоном сигнал был записан и оцифрован для последующей обработки в MathLab.

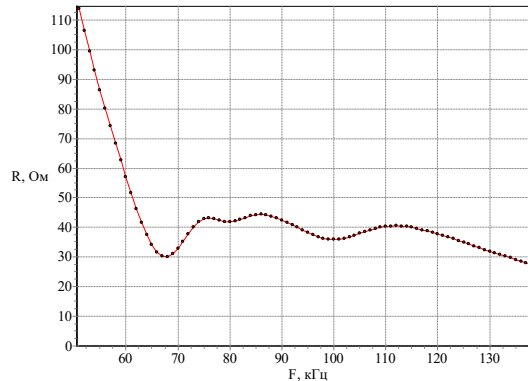


Рисунок 1. - Частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления антенны.

Амплитудно-модулированный сигнал формировался со следующими параметрами: длительность одного бита $2 \cdot 10^{-5}$ сек., несущая частота 100 кГц, кодируемая последовательность: 1; 1; 1; 0.1; 0.1; 0.1; 1; 0.1; 0.1; 1; 0.1; 1; 1; 1; 0.1; 1; 0.1; 0.1; 1; 0.1; 1; 1; 0.1; 0.1; 1; 1; 0.1; 1; 0.1; 1; 0.1; 1; 0.1; 1; 0.1; 1; 0.1; 1; 1; 0.1; 0.1; 0.1; 1.

На рисунке 2 представлен излучаемый сигнал, где оранжевым цветом показана кодируемая последовательность, соответствующая логическим «0» и «1», а синим цветом показан амплитудно-модулированный сигнал.

На рисунке 3 представлен сигнал, записанный гидрофоном. Данный сигнал в последствии был оцифрован и подготовлен для обработки в MathLab.

Проведя сравнение излучённого и принятого сигнала видно их определённое сходство.

При помощи MathLab была проведена демодуляция сигнала. Принятый сигнал был разбит на символы исходя из заданной длительности каждого

символа $2 \cdot 10^{-5}$ сек. и была найдена огибающая каждого символа в прямоугольном виде. Результат показан на рисунке 4.

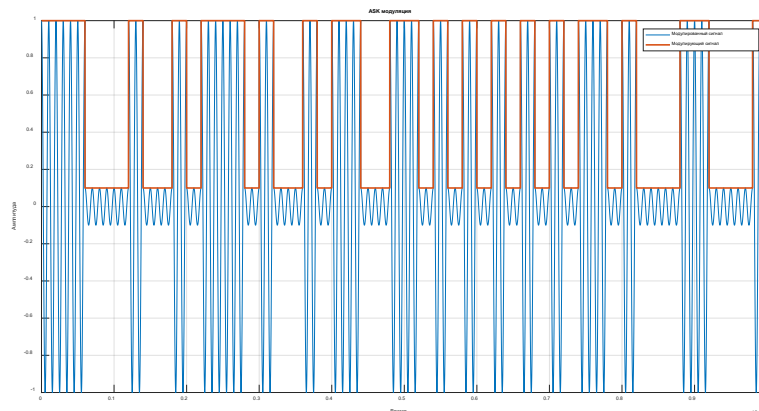


Рисунок 2. – Излучаемый сигнал

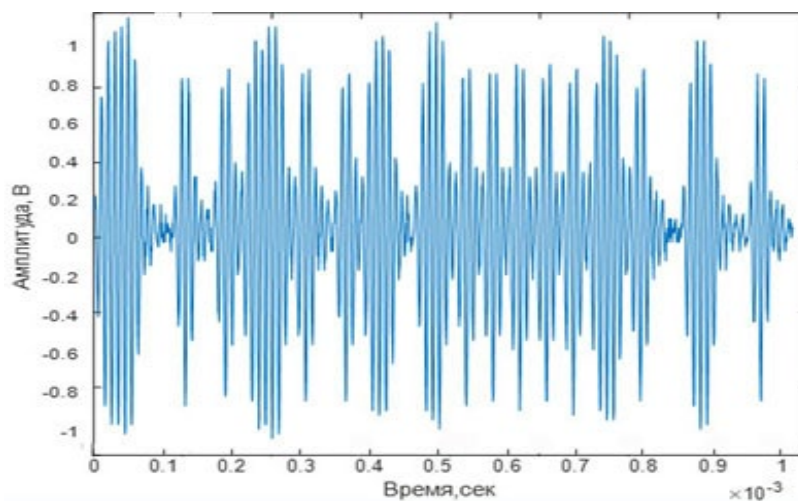


Рисунок 3. – Сигнал, принятый гидрофоном

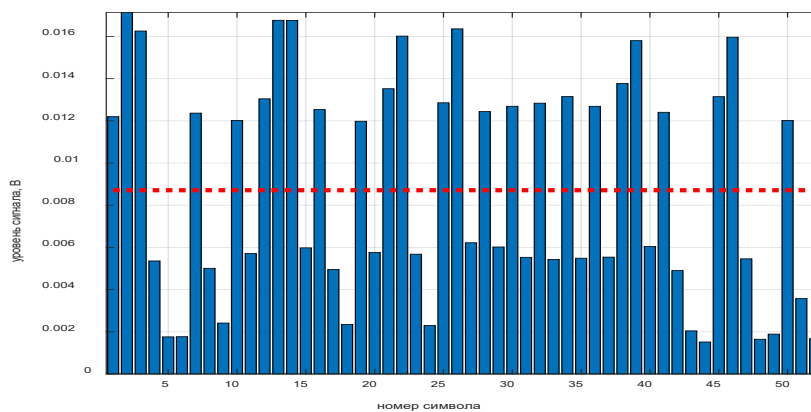


Рисунок 4. – Предварительная демодуляция

Затем полученный сигнал был пронормирован по уровню. Сигнал с уровнем менее $6 \cdot 10^{-3} \text{В}$ - логический «0», а с уровнем $12 \cdot 10^{-3} \text{В}$ – логическая «1». Затем было выполнено сравнение с исходным сигналом. Результат сравнения показан на рисунке 5.

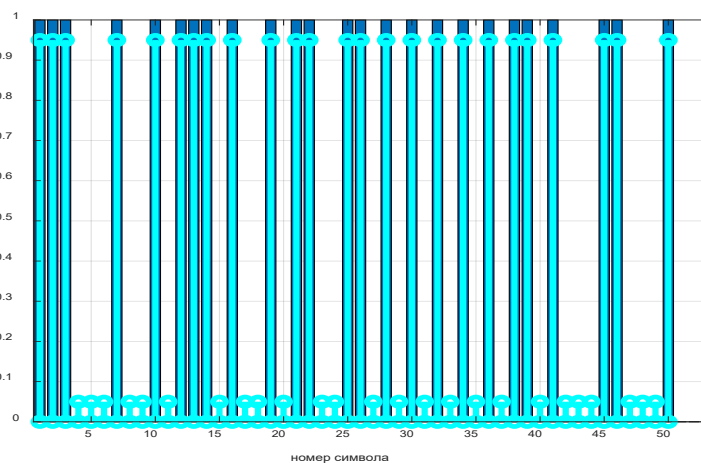


Рисунок 5. – Сравнение сигналов (синий-демодулированные символы, голубой – исходные символы)

При каждом измерении проводился расчёт коэффициента битовых ошибок. На рисунке 6 представлен сводный расчёт коэффициента битовых ошибок за все 51 измерение.

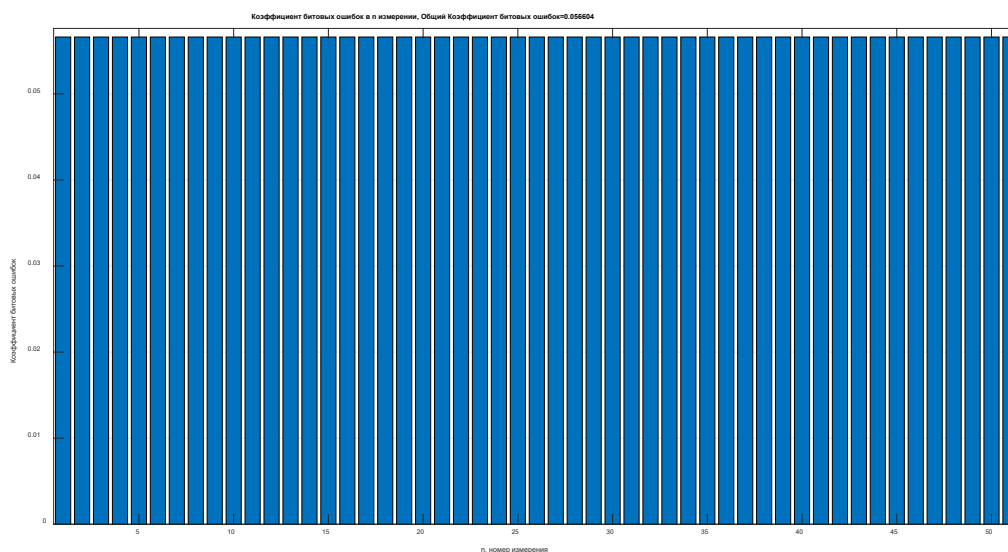


Рисунок 6. – Коэффициенты битовых ошибок

Как видно из рисунка 6, общий коэффициент битовых ошибок (BER) = 0.056604. Столь высокий BER обусловлен тем, что при демодуляции, если длина принятого сигнала отличалась от длины кодируемой последовательности, то лишние или недостающие символы учитывались как ошибочные. Это видно из рисунка 4. Кодируемая последовательность имела длину 50 символов. 2 лишних символа были учтены как ошибочные в BER.

Была выполнена дополнительная синхронизация сигнала с целью точного определения в принятом сигнале начального и конечного символа кодируемой последовательности. Результат показан на рисунке 7.

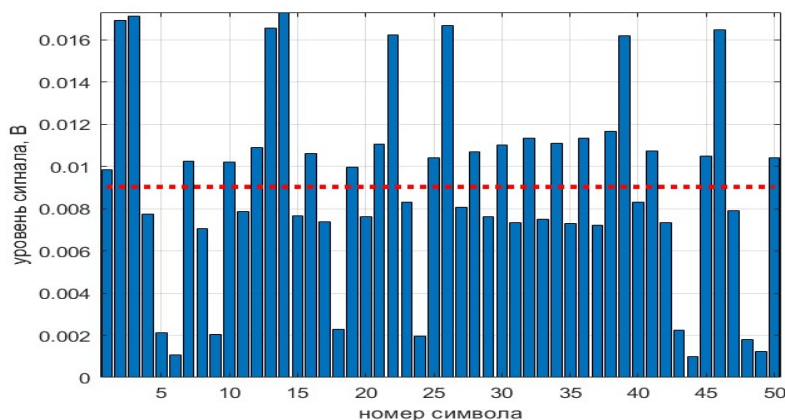


Рисунок 7. – Предварительная демодуляция синхронизированного сигнала

Аналогично был рассчитан коэффициент битовых ошибок. Общий коэффициент битовых ошибок (BER) = 0. Это означает, что все переданные биты были приняты без ошибок. Данный результат был, достигнут благодаря тому, что:

- эксперимент проводился в гидроакустическом бассейне с изолированной средой (чистая вода, отсутствие течений, шумов и отражений);

- расстояние между передатчиком и приёмником составляло 2,5 метра.

Как следствие сигнал не успевает затухнуть или исказиться;

- была обеспечена идеальная синхронизация сигнала. Отсутствовали нежелательные фазовые и частотные отклонения передаваемого сигнала, а так же временные задержки между передатчиком и приёмником;

- данные передавались короткими пакетами, а кратковременные тесты на малом объёме данных могут не выявить ошибок, которые проявляются при длительной передаче информации.

Заключение

Морская среда обладает различными характеристиками, которые влияют на потенциальную производительность цифровых систем связи. Адаптация современных методов передачи данных к ультразвуковой подводной связи требует формирование адаптивной модели канала, которая учитывает разнообразие явлений, происходящих в нем. Из-за сложности механизма распространения акустических волн практически невозможно построить детерминированную модель подводного канала связи. Результаты моделирования показывают, что возможно использовать схемы с амплитудно-модулированным и демодулированным сигналом в гидроакустическом бассейне. Проведена оценка коэффициента битовых ошибок при каждом измерении, его значение составило 0. Это означает, что эксперимент проводился в «идеальных» условиях, достижимых только в строго контролируемых параметрах. Амплитудная модуляция крайне уязвима к следующим факторам:

- затухание сигнала. Вода поглощает акустические волны, особенно на высоких частотах, что снижает амплитуду сигнала;
- шумы. Естественные (волны, морские организмы) и техногенные (двигатели судов) помехи искажают амплитуду;
- многолучевое распространение. Отражения от дна, поверхности воды и объектов создают интерференцию, приводящую к замираниям сигнала;
- доплеровские искажения. Движение источника или приемника меняет частоту сигнала, что критично для амплитудной модуляции.

Учитывая данные факторы, наиболее предпочтительными способами модуляции сигнала для построения гидроакустических систем связи будут

являться фазовая модуляция или OFDM. Результаты проведённого эксперимента будут использованы при реализации гидроакустической системы связи с OFDM сигнала в условиях мелкого моря.

Литература

1. Gan W.S. Application of Time-Reversal Acoustics to Signal Processing and Underwater Communications // Time Reversal Acoustics. Springer, Singapore. 2021. pp. 83-88.

2. Федосов В.П., Ломакина А. В., Легин А. А. Трёхмерная модель подводного гидроакустического канала и ее математическое описание // Телекоммуникации. 2017. № 11. С. 26-33.

3. Безответных В.В. Система звукоподводной связи с использованием сложных фазоманипулированных сигналов и обращения времени // Подводные исследования и робототехника. 2014. №. 2. С. 58-62.

4. Кириленко Р.С. Применение OFMD сигналов для формирования гидроакустической связи // Акустика среды обитания IX всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2024. С. 196-200.

5. Бондарева Ж.Ю., Кравчук Д.А. Применение широкополосных сигналов в гидроакустических системах связи в мультиагентной системе мониторинга морского шельфа // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. №. 9 (146). С. 256-258.

6. Кириленко Р.С. Исследование придонных и донных структур мелкого моря // Инженерный вестник Дона. 2022. №. 1
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7394.

7. Dushin S.V., Kurov I.Y., Shavrin S.S., Aleshin V.S. and Farkhadov M.P. Multicarrier modulation schemes efficiency investigation in shallow water hydroacoustic communication application. International Conference Engineering

and Telecommunication (En&T). Dolgoprudny, Russia. 2020. pp. 1-5. DOI: 10.1109/EnT50437.2020.9431262.

8. Prashant K., Preetam K. In Proc. IEEE Int. Conference on Communications. 2013. IEEE ICC'13–Workshop on Radar and Sonar Network. Budapest. 2013. p. 977.

9. Abd El-Galil MSoliman, NAbdalla MAbd El-Samie. Efficient underwater acoustic communication with peak-to-average power ratio reduction and channel equalization International // Journal of Speech Technology. 2019. pp. 649-696. DOI: 10.1007/s10772-019-09600-122:3.

10. Кириченко И.А. Повышение эффективности направленных свойств адаптивных гидроакустических систем с параметрическими антеннами // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3845.

References

1. Gan W.S. Application of Time-Reversal Acoustics to Signal Processing and Underwater Communications. Time Reversal Acoustics. Springer, Singapore. 2021. pp. 83-88.

2. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A. Telekommunikacii. 2017. № 11. pp. 26-33.

3. Bezotvetny`x V.V. Podvodny`e issledovaniya i robototexnika. 2014. №. 2. pp. 58-62.

4. Kirilenko R.S. Akustika sredy` obitaniya IX vserossijskaya konferenciya molody`x ucheny`x i specialistov. [Acoustics of the environment IX All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists]. Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana. 2024. 2024. pp. 196-200.

5. Bondareva Zh. Yu., Izvestiya Yuzhnogo federal`nogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2013. №. 9 (146). pp. 256-258.



6. Kirilenko R.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №. 1.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7394.

7. Dushin S.V., Kurov I.Y., Shavrin S.S., Aleshin V.S. and Farkhadov M.P. International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). Dolgoprudny, Russia. 2020. pp. 1-5. DOI: 10.1109/EnT50437.2020.9431262.

8. Prashant K., Preetam K. in Proc. IEEE Int. Conference on Communications, 2013: IEEE ICC'13–Workshop on Radar and Sonar Network. Budapest. 2013. p. 977.

9. Abd El-Galil MSoliman, NAbdalla MAbd El-Samie. Journal of Speech Technology. 2019. pp. 649-696. DOI: 10.1007/s10772-019-09600-122:3.

10. Kirichenko I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3845.

Дата поступления: 7.03.2025

Дата публикации: 25.04.2-25