

Оценка характеристик канала радиосвязи в морской среде

© А.Ф. Лукин,¹ А.К. Томилин,² А.Н. Гульков,¹ К.А. Кремс¹

¹ Дальневосточный федеральный университет,
690922 Владивосток, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: aktomilin@tpu.ru

Поступило в Редакцию 19 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 3 мая 2022 г.

Принято к публикации 11 мая 2022 г.

Приведены результаты обработки данных, полученных в ходе натуральных экспериментов по передаче коротковолнового радиосигнала в морской среде с помощью специальных шаровых антенн. Оценена пропускная способность, получены спектральные и энергетические характеристики канала радиосвязи. Сделан вывод о возможности создания двухстороннего канала голосовой радиосвязи между мобильными подводными объектами.

Ключевые слова: подводная радиосвязь, пропускная способность канала радиосвязи, шаровые антенны, обобщенная электродинамика.

DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52935.43-22

Введение

Организация каналов радиосвязи между морскими подводными объектами необходима для решения многих задач, связанных с исследованием и освоением Мирового океана [1–3]. В настоящее время для этих целей используются сверхнизкочастотные каналы радиосвязи, которые не обеспечивают достаточную скорость передачи данных, а также кабельные линии, которые имеют также ограниченные возможности связи с мобильными подводными объектами. Кроме того, для связи с мобильными подводными объектами широко применяются гидроакустические комплексы. Однако характеристики распространения гидроакустических волн в океане в значительной степени зависят от вертикального профиля скорости звука, поскольку морская среда является неоднородной, что влияет на качество радиосвязи. Также актуальной является задача создания каналов радиосвязи в других проводящих средах (плазма, вечная мерзлота) и вблизи границы „диэлектрик–проводник“ [4–6].

Высокочастотные поперечные электромагнитные волны в морской среде с высокой электропроводностью использовать невозможно, поскольку они затухают в ближней зоне распространения радиосигнала. Как показано в [1], на частоте 27 МГц при электропроводности воды 4.77 Si/m уровень затухания составляет около 195 dB/m. Вместе с тем имеются публикации [7–11], указывающие на существование электроскалярных продольных волн, которые по своим свойствам отличаются от широко используемых поперечных электромагнитных волн. Теоретически и экспериментально показано, что электроскалярные волны способны распространяться в электропроводных средах. Известно несколько различных конструкций антенн, работающих на электроскаляр-

ных продольных волнах [7]. Однако в доступной научной литературе достоверные сведения об экспериментах с высокочастотными электроскалярными волнами в морской среде не обнаружены.

Цель настоящей работы — представить расширенные результаты обработки радиосигналов и оценки ряда характеристик канала подводной радиосвязи коротковолнового (КВ) диапазона, полученных при проведении экспериментов в 2020 и 2021 годах в акватории г. Владивостока. Все они подтвердили теоретические выводы о возможности передачи коротковолнового радиосигнала в подводной среде с помощью специальных шаровых антенн.

1. Основные параметры экспериментов

В проведенных экспериментах использовались передающие и приемные устройства, подключенные к специально сконструированным шаровым антеннам. Передающая и приемная антенны вместе с радиостанциями и диктофонами в герметичных боксах погружались в море на глубину от 4 до 10 м на капроновых фалах. Антенна передатчика излучала модулированные высокочастотные сигналы, а удаленная антенна их принимала. При этом сигнал модуляции или сигнал промежуточной частоты записывались на цифровой диктофон или в компьютер.

Описание эксперимента, выполненного 27 октября 2020 года в бухте Новик на острове Русский, детально представлено в работе [1]. Цель этого эксперимента заключалась в проверке принципиальной возможности передачи высокочастотного модулированного радиосигнала в морской воде. Была использована амплитудная

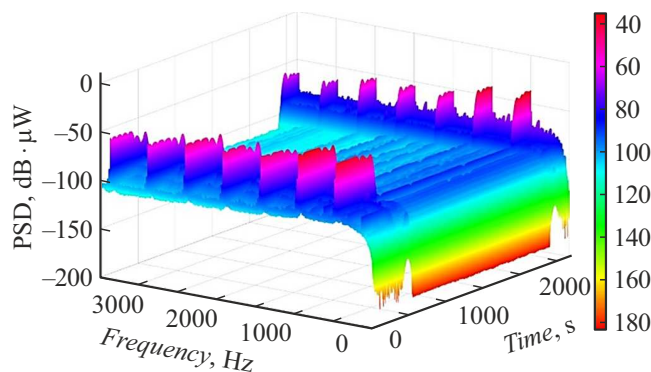


Рис. 1. Сонограмма СПМ записанного радиосигнала.

модуляция несущей частоты 27.4 MHz сигналом „тонального вызова“, предусмотренного конструкцией передающей радиостанции. Был зафиксирован уверенный прием сигнала модуляции на расстоянии 470.7 m между передающей и приемной антеннами.

Другой эксперимент был выполнен 19 марта 2021 года в районе острова Скрыплев в акватории г. Владивостока. Цель этого эксперимента заключалась в подводной передаче высокочастотного узкополосного радиосигнала и оценке ее параметров. В качестве передающего устройства использовалась радиостанция „Штурман 882М“, высокочастотный выход которой был подключен к шаровой антенне. Несущая частота составляла 27.135 MHz. Модуляция не применялась. Прием осуществлялся на SDR-приемник, подключенный к выходу шаровой антенны. Частота гетеродина приемника была выставлена равной 27.131 MHz. С помощью кабеля USB приемник был подключен к компьютеру на борту катера. Запись сигналов промежуточной частоты около 4000 Hz производилась на диск компьютера. В результате эксперимента был зафиксирован устойчивый узкополосный радиосигнал на частоте 3960 Hz на расстояниях 70–80 m между передающей и приемной антеннами.

2. Обработка результатов экспериментов

На рис. 1 в изометрии представлена сонограмма спектральной плотности мощности (СПМ) в $\text{dB}\mu\text{W}$ принятого сигнала амплитудной модуляции (сигнала „тонального вызова“ радиостанции) в зависимости от времени и от частоты для всего периода записи. На всех графиках СПМ обозначена, как PSD (Power Spectrum Density). Она получена с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) в окне 120 s с шагом по времени 1 s. Использовалось весовое окно Гаусса. Значения СПМ приведены с усреднением к полосе частот 1 Hz. Диапазон частот на графике от 0 до 3500 Hz перекрывает частотный диапазон амплитудной модуляции радиостанций 300–3400 Hz.

Как следует из рис. 1, спад уровня СПМ на низких частотах повторяет частотную характеристику канала демодуляции радиостанции. Во всем частотном диапазоне в начале и в конце записи видны характерные пики СПМ, достигающие $20 \text{ dB}\mu\text{W}$, расположенные равномерно по всему частотному диапазону. Первый пик на частоте 509–510 Hz соответствует основной гармонике генератора „тонального вызова“ передающей радиостанции. Наблюдаемый провал в уровне СПМ для периода времени с 540 по 2400 s соответствует интервалу, когда приемная и передающая станции находились в подводном положении.

На рис. 2 в изометрии показана сонограмма СПМ в течение всего времени записи для области частот, в которой находится основная гармоника сигнала „тонального вызова“ радиостанции, а именно от 450 до 550 Hz. Все характеристики обработки и отображения на рис. 2 выбраны такими же, как и на рис. 1. Для интервалов времени 540–2400 s, когда обе станции полностью находились в подводном положении, на рис. 2 отчетливо видна основная гармоника сигнала „тонального вызова“ на частотах 509–510 Hz при уровне СПМ $-87.5 \text{ dB}\mu\text{W}$. Как видно из рис. 2, фоновый уровень СПМ на других частотах ниже уровня основной гармоники 509–510 Hz более чем на $10 \text{ dB}\mu\text{W}$. До начала протяжки передающей станции с момента времени 540 s, заметно характерное увеличение центральной частоты сигнала „тонального вызова“ от 504 до 508 Hz, что может быть связано с дрейфом характеристик радиостанций из-за изменения температуры после погружения боксов в морскую воду. В период протяжки центральная частота сигнала изменялась в диапазоне от 508 до 510 Hz в период 540–1700 s, а после 1700 s составила 509 Hz.

Необходимо отметить, что на рис. 2 наблюдаются и другие характерные частоты, присутствующие до начала протяжки передающей станции. Однако линии этих частот отсутствуют в период 540–2400 s. Во время протяжки на сонограмме наблюдаются более слабые характерные частоты, которые отсутствуют в начальный и конечный периоды записи. Чтобы разобраться с их происхождением, был выполнен спектральный анализ записи одним большим окном в интервале времени 600–2400 s,

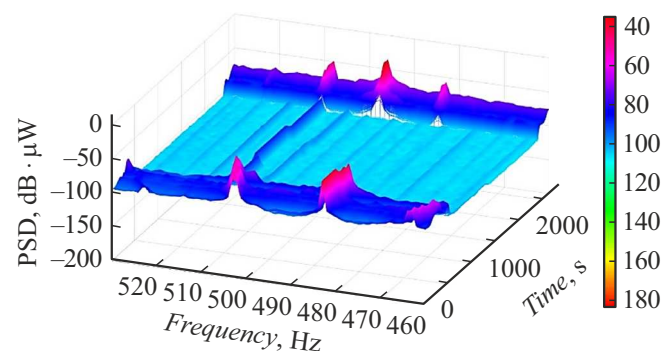


Рис. 2. Сонограмма СПМ записанного сигнала в интервале 450–550 Hz.

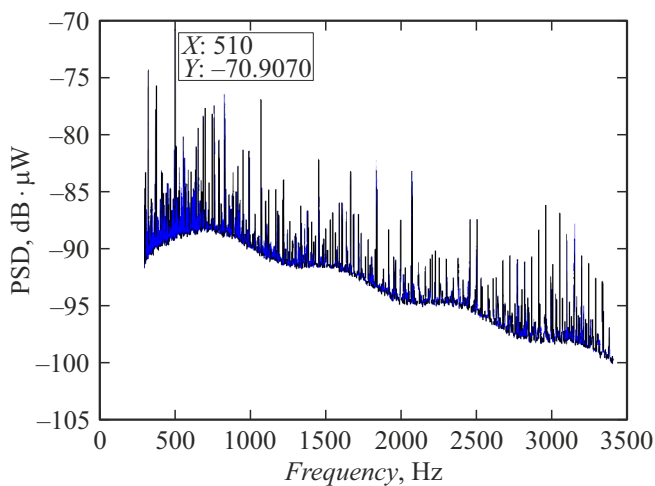


Рис. 3. Спектральная плотность мощности для окна 600–2400 с с разрешением 1 Hz.

с последующим усреднением СПМ по частоте до разрешения 1 Hz. Этот спектр в единицах $\text{dB}\mu\text{W}$ для рабочего диапазона радиостанции 300–3400 Hz представлен на рис. 3.

Уровень основной гармоники 510 Hz помечен флажком на рис. 3. Как следует из этого рисунка, подводный спектр сигнала, который существует в период протяжки имеет множество характерных максимумов. Часть из них объясняется широкополосным спектром сигнала „тонального вызова“. Вопрос наличия большого множества других гармонических составляющих в спектре подводного сигнала, тестируемого шаровой антенной, требует дополнительного исследования.

С учетом большого количества кратных частот в спектре сигнала „тонального вызова“ радиостанции были выбраны частоты 454–455 Hz, которые лежат ниже области частот основной гармоники. Сигналы на этих частотах рассматривались как помеха. Это позволило на отрезке времени подводного распространения сравнить между собой уровни мощности узкополосных огибающих сигнала и помехи с целью оценки скорости передачи данных в канале радиосвязи. Соответствующие СПМ приведены на графиках (рис. 4) с усреднением по окнам длительностью 1 с. На протяжении всего времени подводного распространения уровень СПМ огибающей помехи составил около $-100 \text{ dB}\mu\text{W}$. Уровень СПМ огибающей сигнала P_s вместе с собственной помехой P_0 в период 400–1000 с составил около $-91 \text{ dB}\mu\text{W}$. Поэтому разница в уровнях СПМ сигнала и помехи $(P_s + P_0)/P_0$ составляет 9 dB, т.е. сигнал с помехой превышает уровень помех в 7.94 раза.

Расчет пропускной способности канала связи или передачи данных в зависимости от частотной ширины канала и от отношения сигнал/помеха дает формула Шеннона [12]:

$$I = B \log_2(1 + P_s/P_0), \quad (1)$$

где I — пропускная способность канала бит в секунду, [bps], B — ширина полосы канала, [Hz], P_s — мощность сигнала, [W], P_0 — мощность помехи, [W]. В рассматриваемом узкополосном случае $B = 2 \text{ Hz}$ с учетом ширины полосы фильтра, поэтому из формулы (1) получаем

$$I = 2 \log_2 7.94 = 5.98 \text{ bps}. \quad (2)$$

Таким образом, в рамках условий проведенного эксперимента удельная пропускная способность канала радиосвязи шириной 1 Hz оказалась около 3 bps. Это значение может быть увеличено за счет мощности передатчика, применения направленных антенн и специальных методов модуляции. Радиосигнал, переданный в ходе описанного эксперимента на расстояние до 470 m после его преобразования в звук, хорошо прослушивается на частоте 509 Hz. Таким образом, принципиальная возможность передачи высокочастотного модулированного радиосигнала в морской воде экспериментально доказана.

В эксперименте, проведенном 19 марта 2021 года, модуляция не применялась. Использовалась прямая запись промежуточной частоты, пик которой пришелся на частоту 3960 Hz, при частоте передатчика 27.135 MHz и частоте гетеродина 27.131 MHz.

Для анализа принятый сигнал промежуточной частоты пропускался через узкополосные фильтры 3959–3961 Hz для оценки смеси сигнала с помехой и 3999–4001 Hz для оценки уровня помех на близких частотах. После фильтрации применялось преобразование Гильберта и СПМ смеси сигнала с помехой, и помехи оценивалась в полосе 2 Hz. На рис. 5 приведены зависимости СПМ огибающих для сигнала с помехой и для помехи от времени для записи длительностью около 360 с.

Наиболее стабильная регистрация сигнала относится к периоду времени 108–197 s записи. Уровень сигнала с помехой составлял $-84.4 \text{ dB}\mu\text{W}$, а уровень помех $-113.1 \text{ dB}\mu\text{W}$. Таким образом, отношение СПМ сигнала с помехой к СПМ помехи составило 28.7 dB. Это соответствует значению в формуле (1) $(P_s + P_0)/P_0 = 741$.

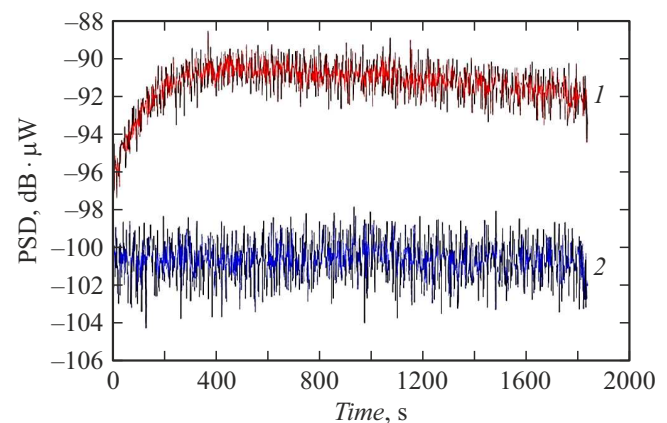


Рис. 4. Спектральная плотность мощности модуляции: 1 — сигнала с помехой, 2 — помехи.

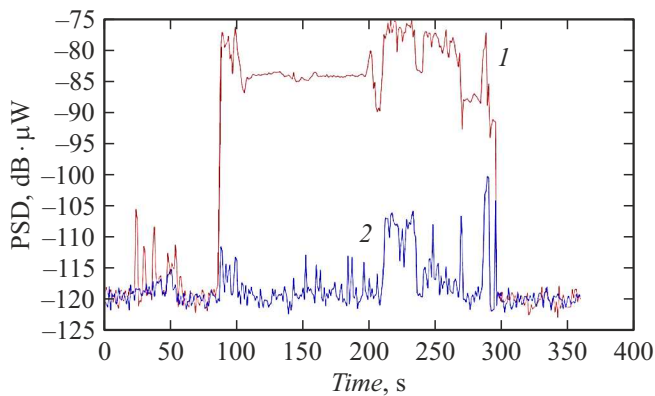


Рис. 5. Спектральная плотность мощности огибающих: 1 — сигнала с помехой, 2 — помехи в эксперименте от 19.03.21.

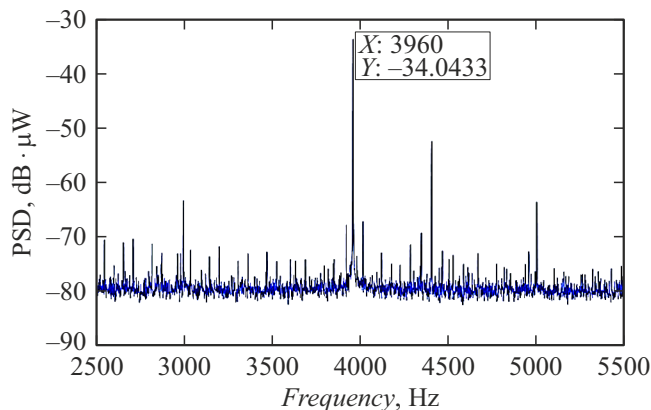


Рис. 6. Спектральная плотность мощности сигнала с помехой в полосе частот 2500–5500 Hz.

В результате для полосы 2 Hz, получается оценка пропускной способности канала:

$$I = 2 \log_2 741 = 19.07 \text{ bps.} \quad (3)$$

В пересчете на 1 Hz полосы частот удельная пропускная способность канала радиосвязи, полученная в эксперименте, оценивается около 9.5 bps.

На рис. 6 представлен спектр плотности мощности смеси сигнала с помехой в области частот 2500–5500 Hz. Флажком отмечена частота 3960 Hz, уровень которой составляет $-34.0 \text{ dB}\mu\text{W}$. Ближайший к ней по уровню $-52.5 \text{ dB}\mu\text{W}$ тональный сигнал находится на частоте 4407 Hz. Более мощные помехи по уровню в рассматриваемой области частот 2500–5500 Hz отсутствуют. Таким образом, отношение уровня СПМ для сигнала с помехой к СПМ помехи в указанном диапазоне составляет 18.5 dB или 70.79 раз. Поэтому при организации канала радиосвязи в полосе от 2500 до 5500 Hz с учетом существующего фактически уровня сигналов и помех в этом диапазоне его пропускная способность составит:

$$I = \frac{5500 - 2500}{2} \log_2 70.79 = 9218 \text{ bps.} \quad (4)$$

Этой пропускной способности достаточно для организации качественного канала голосовой связи между мобильными подводными объектами.

Картина СПМ, приведенная на рис. 6, показывает, что кроме узкополосного сигнала, созданного радиопередатчиком, в морской воде в рассматриваемом частотном диапазоне существуют и другие узкополосные тональные сигналы, в частности, на частотах 3000 Hz ($-63.4 \text{ dB}\mu\text{W}$), 4407 Hz ($-52.5 \text{ dB}\mu\text{W}$), 5001 Hz ($-63.6 \text{ dB}\mu\text{W}$) и другие. С учетом промежуточной частоты, которая была установлена в приемном устройстве 27.131 MHz, указанные частоты соответствуют значениям абсолютных радиочастот, равных 27.099040, 27.100447, 27.101041 MHz соответственно. Происхождение указанных частот и их источники не установлены.

Для данного эксперимента сигнал, записанный на промежуточной частоте и преобразованный в звуковой файл, хорошо прослушивается на частоте 3960 Hz.

Заключение

В работе получены характеристики сигнала амплитудной модуляции и сигнала промежуточной частоты без использования модуляции для высокочастотных сигналов КВ диапазона в результате их распространения на различные расстояния в морской среде. Приводятся рассчитанные спектры плотности мощности смеси сигналов с помехой и отдельно для помехи. Выполнены оценки удельной пропускной способности каналов подводной связи в пересчете на 1 Hz полосы частот.

Результаты исследования указывают на возможность создания малогабаритных радиостанций КВ диапазона с шаровыми антеннами, обеспечивающими голосовую связь между подводными мобильными объектами в пределах нескольких километров.

Замечено, что спектры сигналов, зарегистрированных с помощью подводных шаровых антенн (рис. 3 и 6), включают другие узкополосные гармоники, наличие которых невозможно объяснить только кратными частотами „тонального вызова“ или другими причинами. Можно предположить, что источники этих сигналов находятся в воздушном эфире, а сами сигналы, трансформируясь, проходят через границу раздела сред „воздух–вода“ и далее распространяются под водой в виде электроскалярных волн.

Полученные экспериментальные данные полностью подтверждают возможность организации высокочастотных каналов радиосвязи в подводных условиях морской среды с использованием предложенных шаровых антенн. Полученные результаты могут применяться, например, в системах сигнализации и связи при эксплуатации подводных добычных комплексов и для решения многих технических задач.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программ повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета и Дальневосточного федерального университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.К. Томилин, А.Ф. Лукин, А.Н. Гульков. Письма в ЖТФ, **47** (11), 48 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710 [А.К. Tomilin, A.F. Lukin, A.N. Gulkov. Tech. Phys. Lett., **47** (6), (2021). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785021060146>]
- [2] В.П. Федосов, С.П. Тарасов, В.В. Воронин, С.В. Кучерявенко, П.П. Пивнев, А.А. Легин, А.В. Ломакина, В.А. Франц. *Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов* (Изд-во ЮФУ, Ростов-на-Дону–Таганрог, 2018), 178 с.
- [3] В.Г. Максименко. Радиотехника и электроника, **65** (2), 141 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420020138
- [4] В.К. Балханов, Ю.Б. Башкуев, В.Р. Адвокатов. ЖТФ, **88** (1), 107 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45491.1982 [V.K. Balkhanov, Yu.B. Bashkuev, V.R. Advokatov. Tech. Phys., **63** (1), 104 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218010061]
- [5] А.С. Запелалов. Радиотехника и электроника, **64** (4), 332 (2019). DOI: 10.1134/S0033849419040132
- [6] Г.Я. Шайдуров, Г.Н. Романова, Д.С. Кудинов. Радиотехника и электроника, **65** (8), 757 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420070116
- [7] А.К. Томилин. *Обобщенная электродинамика* (Триумф, М., 2020), 300 с. DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
- [8] Е.И. Нефедов. *Электромагнитные поля и волны* (Академия, М., 2014), 368 с.
- [9] E.I. Nefyodov, S.M. Smolskiy. *Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas* (Scientific Research Publishers, USA, 2012), 449 p.
- [10] *Systems, Apparatuses, and Methods for Generating and/or Utilizing Scalar-Longitudinal Waves*: пат. 9306527 В1 США. Hively L.M.; заявл. 29.05.2015; опубл. 05.04.2016.
- [11] О.А. Займидорога. J. Mod. Phys., **7** (8), 808 (2016). DOI: 10.4236/jmp.2016.78074
- [12] К.Э. Шеннон. *Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике* (М.: ИИЛ, 1963), 832 с.