

11.1

Эксперимент по созданию канала радиосвязи в морской среде© А.К. Томилин¹, А.Ф. Лукин², А.Н. Гульков²¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

E-mail: aktomilin@tpu.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2021 г.

В окончательной редакции 10 марта 2021 г.

Принято к публикации 15 марта 2021 г.

Описан натурный эксперимент по передаче коротковолнового модулированного радиосигнала в морской среде при помощи шаровых антенн на расстояние 470 м. Специальная приемопередающая аппаратура сконструирована в соответствии с результатами обобщенной электродинамической теории. Сделано предположение о возможности создания канала высокочастотной радиосвязи в морской среде посредством продольных электромагнитных волн.

Ключевые слова: радиосвязь в морской среде, обобщенная электродинамика, шаровая антенна.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710

Проблемы создания наземных беспроводных каналов радиосвязи успешно решены более ста лет назад, однако этого нельзя сказать о связи с автономными подводными объектами. Это объясняется значительным затуханием высокочастотных поперечных электромагнитных волн в электропроводной среде. Использование сверхнизких частот ограничено необходимостью применения крупногабаритных антенн и недостаточной скоростью передачи данных [1,2]. Для контактов с мобильными подводными объектами часто применяется гидроакустическая связь, которая также обладает существенными недостатками [3,4].

В настоящее время развивается обобщенная электродинамическая теория, учитывающая как вихревые, так и потенциальные электромагнитные процессы [5–9]. Экспериментально обнаружена потенциальная компонента магнитного поля, которую описывает скалярная функция индукции $B^*(\mathbf{r}, t)$. Определены условия возникновения потенциального магнитного поля и его свойства. Построена теория комплексной электромагнитной волны, описывающая ее как последовательность вихревых и потенциальных процессов. В результате вихревых процессов возникают поперечные электромагнитные волны, определяемые векторами \mathbf{E}_{rot} и \mathbf{H} . Потенциальные процессы генерируют продольные электромагнитные волны, для описания которых используются скалярный потенциал электрического поля $\phi(\mathbf{r}, t)$ и скалярная функция $B^*(\mathbf{r}, t)$. Поскольку электрический потенциал определяет потенциальное электрическое поле ($\mathbf{E}_{grad} = -\nabla\phi$), продольные электромагнитные волны принято называть электроскалярными (или скалярно-продольными) [7–9].

Цель настоящей работы — экспериментальная проверка возможности создания канала коротковолновой радиосвязи на продольных волнах в морской среде.

Чтобы технически осуществить радиосвязь в морской среде, нужно создать нестационарное сферически-симметричное электрическое поле с высокой напряжен-

ностью. Это возможно за счет явления безвихревой электромагнитной индукции [5–9], которое описывается дифференциальным уравнением

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_{grad} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon'} + \frac{\partial B^*}{\partial t}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что потенциальное электрическое поле можно генерировать не только при помощи электрических зарядов плотности ρ , но и за счет нестационарного потенциального магнитного поля, которое создает квазизаряд плотности $\epsilon_0 \epsilon' \partial B^* / \partial t$. В монографии [5] описаны эксперименты, подтверждающие этот феномен.

Реализовать технически эту идею можно с помощью плоской спиральной катушки Тесла при пропускании по ней нестационарного тока [5,8,9]. В ее центре создается нестационарный квазизаряд высокой плотности. Если центр катушки соединить с металлической сферой, то на ней возникнет потенциал $\phi(t)$, изменяющийся с большой амплитудой. Это позволяет создать вокруг сферы сильное потенциальное электрическое поле. Оно является нестационарным и имеет радиальную структуру.

На основе теории, изложенной в монографии [5], разработана методика расчета параметров приемопередающей аппаратуры, изготовлены экспериментальные образцы (рис. 1). Катушка Тесла диаметром 320 мм имеет 27 витков медного провода диаметром 2 мм. Центральный виток катушки соединен металлической штангой с медным шаром диаметром 60 мм. На вход передающей антенны подается сигнал с выхода радиостанции „Штурман-882М“ на частоте 27.4 МГц, модулированный по амплитуде частотой „тонального вызова“, спектр которого находится в полосе частот около 498–511 Hz. Мощность радиостанции на излучение составляет 1.17 W. Действующее высокочастотное напряжение на выходе передатчика при работе на реальную нагрузку составляет 7.66 V. Действующая сила тока

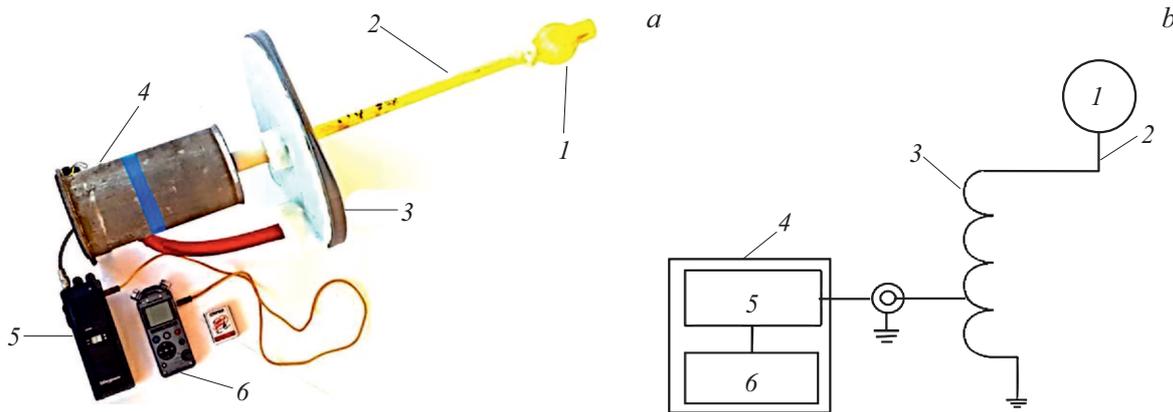


Рис. 1. Экспериментальный образец приемной станции (а) и ее электрическая схема (b). 1 — сфера из меди (антенна), 2 — штанга, 3 — катушка Тесла, 4 — герметичный металлический бокс, 5 — радиостанция, 6 — цифровой диктофон.

в катушке 0.15 А. В результате трансформации в катушке Тесла амплитуда высокочастотного напряжения на шаровой антенне составляет примерно 45 V. Это соответствует нестационарному заряду, изменяющемуся с амплитудой $12.5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$, который генерируется на медном излучающем шаре, находящемся в водной среде.

Радиостанция вместе с батареями электропитания помещена в герметичный бокс, жестко сопряженный с антенной. Все элементы антенны изолированы слоем диэлектрика от контакта с морской водой. Приемная станция имеет аналогичную конструкцию. В ней сигнал модуляции с разъема наушников радиостанции подается на вход диктофона „Olympus LS-12“, размещенного в герметичном боксе.

Проведена серия экспериментов с постепенным увеличением дальности передачи сигнала. В работе представлены данные об испытаниях, которые проводились 27 октября 2020 г. во Владивостоке, в бухте Новик (остров Русский). Приемная станция была установлена на заякоренном буе на глубине 6 м. Глубина моря в этом месте составляет 13 м. Проводимость морской воды в районе испытаний 4.77 S/m. Температура воды +8°C. Как приемная, так и передающая станция опускались в воду на капроновых фалах, не имеющих металлических частей. Этим обеспечивалась полная электромагнитная автономность обоих модулей в погруженном состоянии. Передающая станция была полностью погружена в морскую среду и находилась на глубине 4 м от поверхности моря. С 9-й по 40-ю минуту передающая станция равномерно буксировалась катером по направлению от приемного модуля. Расстояние между станциями измерялось с помощью GPS-приемника.

Записанный на диктофон сигнал обрабатывался с использованием спектрального анализа в окне длительностью 30 с с шагом окна 7.5 с с весовым окном Гаусса. Рассчитана средняя мощность сигнала „тонального вызова“ для модулирующего сигнала (МС) передающей радиостанции в полосе частот 498–511 Hz, приведенная к полосе частот 1 Hz. Для сравнения в полосе частот 515–520 Hz, где отсутствовали компоненты частот сиг-

нала „тонального вызова“, рассчитана средняя мощность фоновых шумов (МФ), также приведенная к полосе частот 1 Hz. Спектральный анализ записи на диктофон сигнала от калиброванного и поверенного звукового генератора позволил пересчитать уровни МС и МФ в dB относительно уровня мощности $1 \mu\text{W}$, приведенной к полосе частот 1 Hz. Полученные результаты в зависимости от времени эксперимента представлены на рис. 2.

Приемный модуль находился в морской воде с 9-й по 43-ю минуту записи. Расстояние между передающим и приемным модулями изменялось от 20 m на 9-й минуте записи до максимального 470.7 m на 40-й минуте. Средний уровень МС за время протяжки поддерживался пределах от -87 до -88 dB в результате работы автоматической регулировки усиления в приемной радиостанции. Средний уровень МФ за это же время изменялся в пределах от -95 до -93 dB. Таким образом, зафиксированный в эксперименте уровень превышения МС над уровнем МФ составил 5–8 dB относительно $1 \mu\text{W}$ в полосе частот 1 Hz.

С нулевой по 9-ю минуту записи и с 43-й по 46-ю минуту записи передающий модуль оставался в морской воде, а приемный модуль был на борту катера. В эти

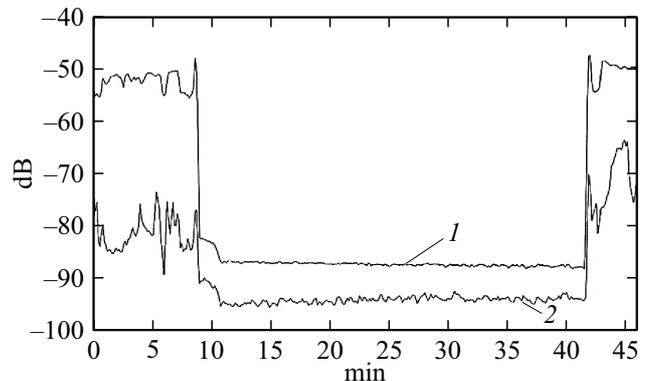


Рис. 2. Средняя мощность принимаемого сигнала (1) и фоновых шумов (2) относительно мощности $1 \mu\text{W}$, приведенной к полосе частот 1 Hz.

периоды времени уровень МС изменялся в пределах от -48 до -55 dB. При этом уровень МФ изменялся в пределах от -74 до -89 dB до начала протяжки и от -64 до -81 dB после ее окончания. Таким образом, был зафиксирован факт уверенной передачи сигнала из воды в воздух при распространении радиосигнала на расстояние 4 м в воде и около 3 м в воздухе с превышением уровня МС над уровнем МФ на 20 dB и более. В других экспериментах также была зафиксирована передача радиосигнала из воздушной среды в морскую.

Расчетное затухание уровня мощности радиосигнала для поперечных волн на расстоянии 1 м в морской среде с проводимостью 4.77 S/m на частоте 27.4 МГц составляет около 195 dB/m. Для расстояния 470 м суммарное затухание должно составлять около 91 650 dB, что многократно превышает запас помехоустойчивости используемых радиостанций. Однако канал подводной радиосвязи на этом расстоянии реально работает. Следовательно, можно предположить, что радиосигнал передается в морской воде при помощи продольных (электроскалярных) волн.

Таким образом, экспериментально в натуральных условиях доказана возможность создания канала высокочастотной радиосвязи в морской среде. Предположительно это происходит с использованием электроскалярных волн. Обнаружен эффект передачи высокочастотного радиосигнала через границу раздела двух сред: морская вода—воздух.

Благодарности

Теория и техника эксперимента, а также результаты испытаний неоднократно обсуждались на рабочих совещаниях с участием специалистов из АО „Корпорация „Московский институт теплотехники“ (Москва) и ПАО „Дальприбор“ (Владивосток). Авторы выражают благодарность сотрудникам этих организаций за поддержку и полезные советы.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программ повышения конкурентоспособности ТПУ и ДВФУ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Г. Максименко, Радиотехника и электроника, **65** (2), 141 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420020138
- [2] Г.Я. Шайдуров, Г.Н. Романова, Д.С. Кудинов, Радиотехника и электроника, **65** (8), 757 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420070116
- [3] 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 н/Д—Таганрог, 2018).
- [4] С.В. Душин, С.С. Шаврин, В.С. Алешин, М.П. Фархадов, DSPA: Вопр. применения цифровой обработки сигналов, **10** (2), 11 (2020).
- [5] А.К. Томилин, *Обобщенная электродинамика* (Триумф, М., 2020). DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
- [6] А.К. Tomilin, in *Progress in Electromagnetics Research Symp.—Spring (PIERS)* (St. Petersburg, 2017), p. 1414. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261969
- [7] Е.И. Нефедов, *Электромагнитные поля и волны* (Академия, М., 2014).
- [8] L.M. Hively, *Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves. Patent US 9306527B1* (Apr. 5, 2016) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US9306527B1/en>
- [9] D. Reed, L.M. Hively, *Symmetry*, **12** (12), 2110 (2020). DOI: 10.3390/sym12122110