

Экспериментальные оценки удельной электропроводности морской воды в области частот КВ-диапазона

© А.Ф. Лукин¹, О.А. Кулагин¹, А.Н. Гульков²

¹ ООО „Телеком-Владивосток“, Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

E-mail: a.lukin@list.ru

Поступило в Редакцию 11 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 11 февраля 2026 г.

Принято к публикации 18 июня 2026 г.

Впервые представлены результаты экспериментов по оценке удельной электропроводности морской воды в области частот 2–5 МГц в условиях реального моря. При распространении электромагнитных волн в короткозамкнутых на конце двухпроводных линиях Лехера, погруженных в морскую воду, экспериментально измеряются соответствующие им частоты колебаний. Сделаны выводы о перспективности использования электромагнитных каналов связи и передачи данных в морской среде.

Ключевые слова: морская вода, электромагнитные волны, двухпроводные линии, удельная электропроводность, тангенс угла потерь, подводная связь, передача данных.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.19.63591.20652

Наличие электропроводности является основной причиной, по которой морскую воду считают средой с большими потерями при распространении электромагнитных волн. Это практически исключает перспективы развития подводной электромагнитной связи. Однако публикации, посвященные связи и передаче данных в морской воде, показывают, что фактическое значение удельной электропроводности морской воды допускает распространение электромагнитных волн.

В 1966 г. компания „Page Communications Engineers“ продемонстрировала успешную передачу сигнала в морской воде на частоте 7 МГц на расстояние 457 м [1]. В 2004 г. Al-Shamma’a с соавторами [2,3] опубликовал данные по распространению электромагнитных волн на частоте 5 МГц на расстояние до 90 м. В 2021 г. авторы настоящей работы описали эксперименты по созданию подводного канала радиосвязи с дальностью 470 м [4].

Задача настоящей работы заключается в прямом экспериментальном измерении характеристик электромагнитных волн с целью оценки удельной электропроводности морской воды в области частот 2–5 МГц.

В 1888 г. австрийский физик Э. Лехер предложил способ измерения длины радиоволны, основанный на использовании двух параллельных проводников и оценке резонансных частот в этой цепи. Такие проводники получили название „лехеровы линии“. Короткие лехеровы линии используют также в качестве резонансных высокочастотных контуров (резонансных шлейфов). Четвертьволновая ($\lambda/4$) линия Лехера, замкнутая на конце, имеет высокое сопротивление на резонансной частоте и низкий импеданс на других частотах. Она действует как параллельный резонансный контур [5]. Характерная особенность лехеровых линий заключается в том, что скорость распространения электромагнитных

волн в линии в точности совпадает со скоростью распространения волн в среде, окружающей линию [6].

Резонансная частота четвертьволновой лехеровой линии, погруженной полностью в морскую воду, измерялась в экспериментах с помощью современного калиброванного антенного анализатора „Anritsu S331L“ (номер в Росреестре 51533-12).

Оценка фазовой скорости распространения электромагнитных волн в морской воде с учетом отмеченного будет определяться выражением

$$V = 4fL, \quad (1)$$

где L — физическая длина линии, а f — измеренная резонансная частота.

Теоретическая оценка фазовой скорости волны для проводящих сред выводится из уравнений Максвелла [7–9] в виде

$$V = \frac{C}{\sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1)}}. \quad (2)$$

В (2) использованы следующие обозначения: C — скорость света в вакууме, ϵ — диэлектрическая проницаемость морской воды, $\mu = 1$ — магнитная проницаемость морской воды, $\operatorname{tg} \delta$ — значение тангенса угла потерь, который определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon \epsilon_0}, \quad (3)$$

где σ — удельная электропроводность морской воды [S/m], f — частота электромагнитных колебаний [Hz], $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m — диэлектрическая постоянная. Для частот КВ-диапазона диэлектрическая



Рис. 1. Длинная линия и антенный анализатор.

Таблица 1. Данные по частоте и фазовой скорости волн

Частота, МГц	Длина волны, м	Фазовая скорость волн, м/с
1.92 ± 0.05	11.88	$22\,800\,000 \pm 500\,000$
3.11 ± 0.05	7.88	$24\,500\,000 \pm 500\,000$
4.92 ± 0.05	5.49	$27\,000\,000 \pm 500\,000$

проницаемость морской воды находится в пределах 78–81. По формуле (1) вычисляется значение фазовой скорости волны, и далее на основе соотношения (2) вычисляется значение тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$. После этого по формуле (3) находится значение удельной электропроводности морской воды σ [S/m].

В проведенных экспериментах использовалась линия Лехера, выполненная из медных трубок диаметром 5 mm с расстоянием между ними 30 mm. Первоначальная длина линии составляла 3.0 m, а затем она последовательно укорачивалась до 2.0 и 1.4 m. После укорочения линии на ее удаленном конце восстанавливалось короткое замыкание.

На рисунке 1 приведен общий вид линии Лехера с подключенным прибором перед измерениями. Для линий Лехера с длинами 3.0, 2.0 и 1.4 m были измерены частоты резонансов 1.92, 3.11 и 4.92 МГц соответственно.

Измерения выполнены с катера в акватории Амурского залива в районе г. Владивостока. Важным фактором является проведение экспериментальных измерений в условиях открытого моря, чтобы длинную линию окружал слой морской воды достаточных размеров, значительно превышающих длину волны. В экспериментах линия опускалась в воду вертикально на глубину 15 m при глубине моря около 35 m.

Относительная ошибка измерения физической длины линии, так же как и длины волны, составляла около 0.03 m, что связано с конструкцией области подключения линии, залитой эпоксидной смолой.

В поиске точки резонанса визуальное считывание точки с помощью антенного анализатора давало случайную ошибку на экране прибора, равную 0.05 МГц, для всех линий. В табл. 1 приведены рассчитанные значения этих ошибок измерений для частоты и фазовой скорости электромагнитных волн.

С учетом формулы (2), а также проведенных измерений и результатов оценки фазовых скоростей волн после коррекции систематических ошибок в табл. 1 были выполнены расчеты для различных значений тангенса угла потерь. Затем с учетом формулы (3) для каждого значения тангенса угла потерь были получены средние оценки удельной электропроводности морской воды. Результирующие данные по оценкам с учетом случайных относительных ошибок, приведенных в табл. 1, представлены в табл. 2.

Значение удельной электропроводности морской воды, равное 4 S/m, обычно рассматривается как средняя удельная электропроводность в различных акваториях [10]. К сожалению, во многих публикациях это значение используется для расчетов на высоких частотах, что приводит к значительным искажениям результатов. Выполненные измерения и оценки показали, что реальные значения удельной электропроводности морской воды в условиях высокочастотных резонансных измерений в открытом море значительно (в 100–150 раз) ниже для области частот 2–5 МГц, чем для частот 10 kHz, при которых проводят измерения кондуктометрами. Даже в

Таблица 2. Итоговые оценки выполненных измерений и расчетов

Частота, МГц	Тангенс угла потерь	Удельная электропроводность, S/m
1.92 ± 0.05	3.1 ± 0.2	0.027 ± 0.001
3.11 ± 0.05	2.51 ± 0.07	0.035 ± 0.001
4.92 ± 0.05	1.79 ± 0.03	0.040 ± 0.001

достаточно узком диапазоне частот 1.92–4.92 MHz наблюдается существенная зависимость значений удельной электропроводности от частоты.

В целом модель возникновения токов проводимости в морской воде чрезвычайно сложна и недостаточно изучена. Среди публикаций можно выделить работу группы ученых из Китая [11], в которой анализируется компонентная зависимость электропроводности основных солей, входящих в состав морской воды, а именно NaCl и MgSO₄, в диапазоне частот от 40 Hz до 2 MHz при различных концентрациях солей. Приводятся зависимости электропроводности от частоты. При 10 % концентрации раствора NaCl в дистиллированной воде с ростом частоты от 40 Hz до 10 kHz электропроводность раствора увеличивается от 0.1 до 0.8 S/m, затем до частоты около 100 kHz она остается на уровне около 0.8 S/m и далее, до частоты 2 MHz, снижается до значений, близких к нулю. Для 10 % концентрации раствора MgSO₄ его электропроводность с ростом частоты от 40 Hz до 20 kHz возрастает от значений, близких к нулю, до 0.15 S/m. После этого с ростом частоты до 130–160 kHz электропроводность возрастает до максимального значения 1.2 S/m, а далее с ростом частоты до 2 MHz уменьшается до минимальных значений, близких к нулю. Таким образом, электропроводность растворов каждой из двух солей, обеспечивающих основной вклад в электропроводность морской воды, для области частот около 2 MHz характеризуется малыми абсолютными уровнями, близкими к нулю.

В работе [12] описываются результаты измерений электропроводности морской воды на высоких частотах с помощью измерения импеданса и *S*-параметров в лабораторных условиях с использованием векторного сетевого анализатора. Показано, что электропроводность асимптотически уменьшается до нуля с ростом частоты от 300 kHz до 750 MHz.

В результате проведенных экспериментов в условиях реального моря с помощью лехеровых линий были измерены резонансные частоты для трех значений длин волн. Это определило оценки фазовой скорости электромагнитных волн для данных частот и позволило получить оценки удельной электропроводности морской воды. В области частот от 2 до 5 MHz значения удельной электропроводности морской воды, полученные в результате измерений в условиях открытого моря, составили 0.027–0.040 S/m. Это соответствует результатам работ [11,12].

Предварительные оценки возможного затухания, связанного с поглощением мощности электромагнитных волн в области частот 2–5 MHz в морской воде, показывают, что подводная морская радиосвязь осуществима на расстояниях, как минимум, 100 m.

При этом оценка скорости передачи цифровых данных может иметь порядок величины 1 Mbps. Для сравнения наиболее скоростные гидроакустические модемы обеспечивают скорость передачи данных 50–60 kbps на дальности до 300 m. Таким образом, расчет показывает,

что электромагнитный канал связи в морской воде на коротких дистанциях может обеспечить скорости передачи данных, более чем в 20 раз превышающие скорости, обеспечиваемые лучшими гидроакустическими модемами. Такие потенциальные возможности в настоящее время востребованы в морской геологии, при строительстве морских подводных сетей различного назначения, а также для связи, навигации и передачи в реальном масштабе времени видеосигналов с автоматических необитаемых подводных аппаратов.

В целом подход с использованием линий Лехера различной длины с короткозамкнутым концом оказался конструктивным при проведении экспериментов. Длина стоячей волны в линии была равна ее учетверенной длине, а частота колебаний, соответствующая резонансу на этой длине волны, измерялась антенным анализатором. Остальные параметры, представленные в табл. 2, рассчитывались по известным формулам, выведенным из уравнений Максвелла.

В результате проведенных экспериментальных измерений и выполненных расчетов впервые в условиях открытого моря удалось получить для высокочастотных электромагнитных волн данные о значениях удельной электропроводности морской воды. Значения удельной электропроводности морской воды, полученные для области частот 2–5 MHz, находятся в диапазоне 0.027–0.040 S/m, что ниже предельных уровней удельной электропроводности водопроводной воды (около 0.075 S/m). В результате физические показатели удельной электропроводности морской воды удовлетворяют требованиям для подводной электромагнитной связи, передачи данных и навигации на ограниченных расстояниях. Показано, что вода ведет себя как хороший проводник для частот намного ниже 6 MHz. Поэтому для частот КВ-диапазона морскую воду некорректно относить к классу хороших проводников.

Предложенный метод измерений при использовании короткозамкнутых лехеровых линий позволяет выполнить аналогичные измерения в широком диапазоне частот в морской воде в условиях открытого моря с целью выбора наиболее оптимальных характеристик подводного радиоканала. Это может рассматриваться как направление для будущих экспериментов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.А. Николаеву за практическую помощь в проведении экспериментов на борту морского катера.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Underwater radio communication* (Wireless World, London, 1966).
- [2] A.I. Al-Shamma'a, A. Shaw, S. Saman, IEEE Trans. Antennas Propag., **52** (11), 2843 (2004). DOI: 10.1109/TAP.2004.834449
- [3] A. Goudevenoc, *Through water electromagnetic communications* (University of Liverpool, 2008).
- [4] 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**, 577 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021060146].
- [5] К.А. Путилов, *Курс физики* (Гос. изд-во физ.-мат. лит., М., 1963), т. II.
- [6] В.И. Калинин, Г.М. Герштейн, *Введение в радиофизику* (Гос. изд-во техн.-теор. лит., М., 1957).
- [7] Дж. Джексон, *Классическая электродинамика* (Мир, М., 1965).
- [8] А.К. Томилин, *Обобщенная электродинамика*. (Триумф, М., 2020).
- [9] И.П. Соловьянова, Ю.Е. Мительман, С.Н. Шабунин, *Электродинамика и распространение радиоволн* (УрФУ, Екатеринбург, 2020).
- [10] А.А. Зори, В.Д. Корнев, М.Г. Хламов, Изв. ТРТУ, № 5, 93 (2006).
- [11] S. Guo, X. Han, Y. Peng, J. Li, MATEC Web Conf., **67**, 02021 (2016). DOI: 10.1051/mateconf/20166702021
- [12] E.M. O'Shaughnessy, *Characterising the relative permittivity and conductivity of seawater for electromagnetic communications in the radio band*, summary report (School of Engineering and Information Technology, UNSW@ADFA, 2012).