

УДК 621.3.095.3, 621.396.67.095

Разработка математической модели для учета влияния морской среды на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи

¹ Широков И. Б., ² Редькина Е. А., ³ Сердюк И. В.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация*

¹ *shirokov@ieee.org*
² *elenaredkina@gmail.com*
³ *serdyuk_igor@mail.ru*

Получено: 12 декабря 2022 г.

Отрецензировано: 10 января 2023 г.

Принято к публикации: 20 января 2023 г.

Аннотация: В статье предложена математическая модель для учета влияния электропроводящей среды на распространение магнитного поля в задаче реализации беспроводной связи под водой, то есть в среде с высоким затуханием электрической составляющей электромагнитного поля. Приведены результаты моделирования зависимости затухания от расстояния амплитуды напряженности магнитного поля в свободном пространстве и в поглощающей среде на частоте 3 МГц. Планируется провести экспериментальные исследования для уточнения модели.

Ключевые слова: беспроводная связь, магнитно-индукционная связь, мобильные сенсорные системы, электропроводящие среды.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Редькина Е. А., Сердюк И. В. Разработка математической модели для учета влияния морской среды на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 63—69.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Широков, И. Б. Разработка математической модели для учета влияния морской среды на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, Е. А. Редькина // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 63—69.

1. Введение

Вопросами распространения радиоволн в проводящих средах, в том числе морской воде, занимаются уже достаточно давно. Известно, что ра-

диоволны очень низкой частоты могут проникать на глубину до сотен метров. Однако для формирования современных каналов связи для задач морского интернета вещей, а также задач причаливания, требуются новые методы и новые подходы. Например, применение магнитного поля для формирования канала передачи информации.

В статье рассмотрен вопрос разработки математической модели, которая бы позволила учесть влияние электропроводящей морской среды на распространение магнитного поля, формируемого в канале передачи информации под водой.

2. Моделирование

На рис. 1 представлен канал передачи на основе магнитно-индукционной связи, где источником магнитного поля выбрана многovitковая катушка индуктивности, а приемная катушка располагается в указанной на рисунке расчетной области. Подобная модель позволяет определить, на какой дальности можно обеспечить передачу информации при заданной чувствительности приемной катушки. Данная модель может быть дополнена для учета влияния электропроводной среды на распространение магнитного поля.

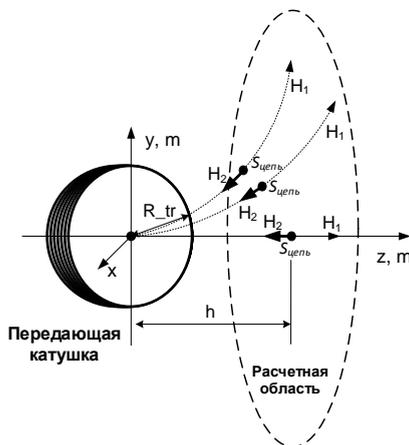


Рис. 1. Модель распространения магнитного поля в поглощающей среде.

Fig. 1. Model of magnetic field propagation in an absorbing medium

С учетом экранирующих свойств морской воды [1], можно сделать предположение, что в каждой точке пространства в модели канала связи располагается некий гипотетический резонансный контур (рис. 2), в котором под воздействием распространяющегося магнитного поля от переда-

ющей катушки формируется ток индукции, соответствующий реальным макроскопическим вихревым токам. Размер и положение этой катушки будет определяться параметрами среды и направлением магнитного поля от передающей катушки.

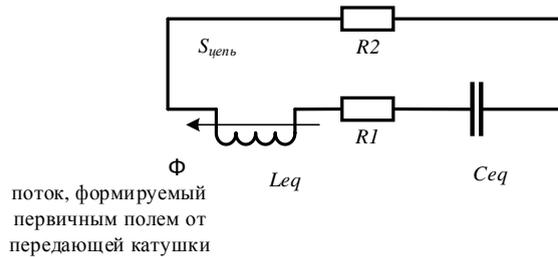


Рис. 2. Электрическая модель поглощающей среды в каждой точке пространства.

Fig. 2. Electrical model of an absorbing medium at each point in space

Подобные предположения о применении эквивалентных схем для оценки влияния воды на распространение радиоволн уже делались в [2]. В этой работе частотная характеристика воды представлялась в виде частотной характеристики RC -цепи с резонансной частотой порядка 10—20 ГГц.

Если применить предложенную в [2] эквивалентную схему, то параметры RC -контура, определяющие потери (тангенс угла потерь) в среде, составят: $R1 = 0,085$ Ом, $R2 = 53$ кОм и $C1 = 100$ пФ. С учетом того, что резонансная частота поглощения морской воды составляет порядка 2,4 ГГц, значение вводимой в модель эквивалентной индуктивности составит 43,976 пГн.

Оценим влияние морской среды на распространение магнитного поля с применением уточненной математической модели. Для этого определим напряженность магнитного поля от передающей антенны (многовитковой катушки индуктивности радиусом $R_{tr} = d_{tr}/2$) на ее оси на расстоянии h по приближенной формуле, как суммарное поле от N_{tr} витков катушки с током амплитудой I_m :

$$H(h, f, t) = \sum_{i=1}^{N_{tr}} \frac{\pi R_{tr}^2 I_m \sin(2\pi f t)}{2\pi [R_{tr}^2 + (h + d_{tr} + id_{tr})^2]^{3/2}}.$$

На основании первичного поля в свободном пространстве может быть произведен расчет вторичного магнитного поля в расчетных точках пространства как результата влияния сформировавшихся макроскопиче-

ских вихревых токов в морской среде (тока от одного витка эквивалентной индуктивности).

Поскольку ток в эквивалентной катушке индуктивности зависит от ее геометрических параметров, была проведена оценка этих параметров и найден радиус витка и его мнимая толщина из выражения [3]

$$L_{eq}(r_{eq}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S dS \oint_l \frac{\mu}{r_{eq}^3} [d\mathbf{l} \mathbf{r}]_{\mathbf{n}},$$

где S — площадь витка, μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, μ — относительная магнитная проницаемость среды, $\mathbf{r}_{\mathbf{n}}$ — нормаль к контуру, r_{eq} — радиус витка.

Полученные значения геометрических параметров катушки составили $r_{eq} = 4,96$ мм и $a_{eq} = 4,13$ мм.

Значение наведенного вихревого тока было определено из соотношения

$$I_{eq}(h, f, t) = \frac{\varepsilon_{eq}(h, f, t)}{Z_{eq}(f)},$$

где $\varepsilon_{eq}(h, f, t)$ — ЭДС электромагнитной индукции, полученная как отрицательное значение дифференциала магнитного потока через виток эквивалентной катушки; $Z_{eq}(f)$ — сопротивление эквивалентного колебательного контура (рис. 2) на частоте передачи в канале связи (частоте первичного магнитного поля).

Зная соотношение для вихревого тока в каждой точке пространства, рассчитаем напряженность вторичного магнитного поля на оси передающей катушки на расстоянии h , считая ток на эквивалентной катушке в виде одного витка:

$$H_2(h_2, f, t) = \frac{\pi r_{eq}^2 I_{eq}(h, f, t)}{2\pi (r_{eq}^2 + (h_2 + 2a_{eq})^2)^{3/2}}.$$

В формуле h_2 — расстояние от эквивалентной катушки.

Таким образом, результаты расчета амплитуды напряженности $H_1(h)$ первичного магнитного поля от передающей многovitковой катушки индуктивности и вторичного магнитного поля $H_2(h)$, порождаемого вихревым током на расстоянии $h = 0,1$ м от передающей антенны, рассчитанное на общей оси передающей катушки и эквивалентной катушки, показаны на рис. 3 а), 3 б).

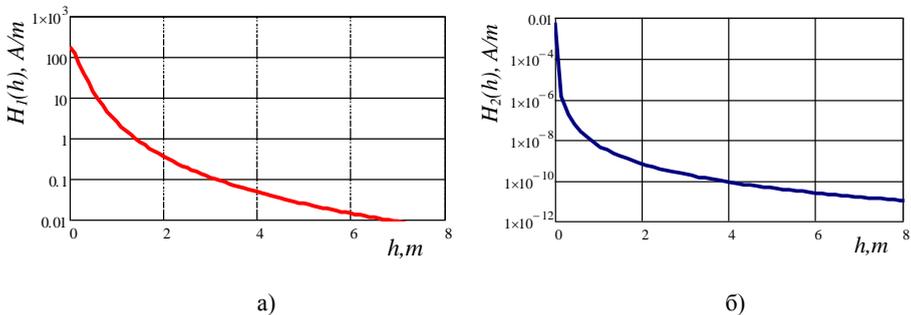


Рис. 3. Результаты расчета магнитного поля от передающей антенны вдоль ее оси в свободном пространстве (а) и вторичного магнитного поля в точке h из-за влияния среды (б).
 Fig. 3. The results of calculating the magnetic field from the transmitting antenna along its axis without the influence of the propagation medium (a) and secondary magnetic field from the medium, calculated on the point h (b)

Сравнение распространения магнитного поля в свободной и поглощающей среде в децибелах показано на рис. 4, на котором показано не относительное затухание сигнала, а выигрыш в его уровне на различных частотах.

Из рис. 4 видно, что влияние морской среды на распространение магнитного поля не велико для относительно низких частот моделирования. На относительно высоких частотах проигрыш в уровне сигнала достигает 60 дБ, что уже оказывается неприемлемым для целей и задач установления беспроводной связи под водой.

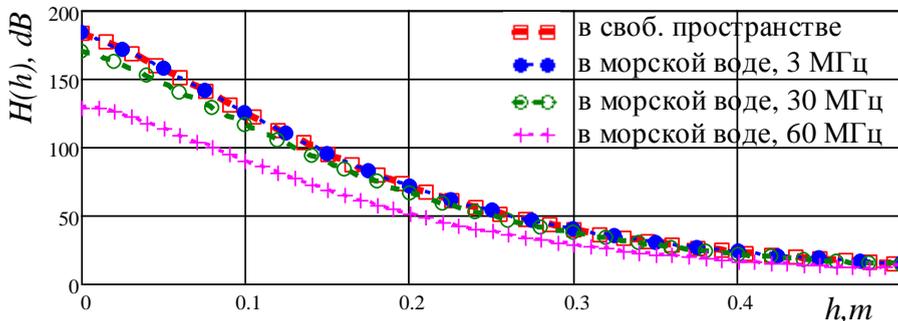


Рис. 4. Сравнение результатов расчета амплитуды напряженности магнитного поля в свободном пространстве и в поглощающей среде на разных частотах.

Fig. 4. The comparison of results of calculating the amplitude of magnetic field in air and sea (absorbing medium) on the different frequencies

4. Заключение

Таким образом, в статье предложена математическая модель для учета влияния электропроводящей среды (морской воды) на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи под водой. Показано, что влияние среды на низких частотах невелико, однако модель необходимо уточнить после проведения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Показеев К. В., Чаплина Т. О. Океанология. Оптика океана : учебное пособие для вузов. — Москва : Юрайт, 2022. 270 с.
2. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. Москва : Иностранная литература, 1960. 439 с.
3. Яворский В. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Москва : Физматгиз, 1963. 848 с.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Редькина Елена Александровна, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-8840-9550.

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Development of a Mathematical Model to Take into Account the Influence of the Marine Environment on the Propagation of a Magnetic Field in Wireless Communication Systems

I. B. Shirokov¹, Ye. A. Red'kina², and I. V. Serdyuk³

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, Russian Federation, 299053

¹ *shirokov@ieee.org*

² *elenaredkina@gmail.com*

³ *serdyuk_igor@mail.ru*

Received: December 14, 2022

Peer-reviewed: January 10, 2023

Accepted: January 20, 2023

Abstract: *The article proposes a mathematical model for taking into account the influence of an electrically conductive medium on the propagation of a magnetic field in the problem of implementing wireless communication under water, that is, in an environment with high attenuation of the electrical component of the electromagnetic field. The results of modeling the dependence of the attenuation on the distance of the amplitude of the magnetic field strength in free space and in an absorbing medium at a frequency of 3 MHz are presented. It is planned to conduct experimental studies to refine the model.*

Keywords: *wireless communication, magnetic-inductive communication, mobile sensor systems, electrically conductive media.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov, Ye. A. Red'kina, and I. V. Serdyuk, "Development of a Mathematical Model to Take into Account the Influence of the Marine Environment on the Propagation of a Magnetic Field in Wireless Communication Systems," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 63–69, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.06. (In Russ.).

References

- [1] K. V. Pokazeyev, T. O. Chaplina, *Oceanology. Optics of the ocean*. Moscow : Yurayt, 2022.
- [2] A. R. Hippel, *Dielectrics and Waves*. New York : Wiley; London : Chapman and Hall, 1954.
- [3] V. M. Yavorsky and A. A. Detlaf, *Handbook of Physics*. Moscow : Fizmatgiz, 1963.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Yelena A. Red'kina, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-8840-9550.

Igor V. Serdyuk, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.