УДК 621.396.944
DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_03
EDN: GABAIB

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИСТЕМ ПОДВОДНОЙ КОММУНИКАЦИИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

А.Ю. Родионов, А.А. Власов, Л.Г. Стаценко

В статье проведен обзор исследований технических систем, использующих магнитно-индуктивную связь для практического применения в пресноводных и морских акваториях. Отражены особенности распространения магнитного поля в водных средах и возможности применения явления магнитной индукции как одного из методов передачи информации. Проанализирован вопрос обеспечения передачи данных с оценкой качественных показателей канала связи в системах, поддерживающих многочастотный метод ортогонально-частотного разделения сигналов с мультиплексированием (OFDM). Выполнен эксперимент с получением значений по дальности и пропускной способности магнитно-индуктивных систем связи с выбранным типом малогабаритных антенн на ферромагнитных сердечниках. Отмечаются возможности передачи информации на расстояниях до 5 м на скоростях до нескольких десятков кбит/с при использовании передатчиков с мощностью до нескольких десятков ватт, применяя многочастотные системы OFDM с высокой спектральной эффективностью, а также телеметрических данных на дистанциях до 10 м на скоростях до 1 кбит/с. При затруднениях использования радио или гидроакустических систем связи на подводных комплексах магнитно-индуктивные системы возможно использовать для коммуникаций в разнородных средах, таких как вода–воздух и в других условиях.

Ключевые слова: магнитная индукция, подводная связь, ферритовые антенны, ближнепольная магнитная связь, проницаемость, каналы подводной связи, OFDM

Введение

Одним из известных способов организации связи в условиях сред с высокой проводимостью (морская вода) являются магнитно-индуктивные (МИ) системы обмена информацией. В качестве основных элементов в данных системах выступают приемопередающие магнитные антенны, конструктивно представляющие собой катушки индуктивности с большим количеством витков, опционно дополненные ферромагнитными сердечниками с высокой магнитной проницаемостью. Данный тип антенн и сравнительно мощные усилительные тракты (десятки–сотни ватт) в низкочастотном диапазоне (до 1 МГц) способны транслировать сигнал в морской воде на расстояния в пределах 10–100 м [1].

Рабочие частоты МИ-катушки могут достигать мегагерцового диапазона с достоверным и гарантированным качеством передачи сигнала, что способствует получению скоростей передачи данных на порядки более высокие, чем в акустических системах связи [1]. Тем не менее экономное использование частотного ресурса требует более эффективного использования спектра, и на данный момент достаточно эффективным и широко распространенным решением является применение ортогонального многочастотного разделения сигналов с мультиплексированием (OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing).

К преимуществам метода OFDM относят высокую эффективность использования частотного диапазона, хорошую устойчивость сигнала к межсимвольным искажениям, что позволяет обычно снизить негативные последствия многолучевого распространения сигнала, возможность использования большого количества разных схем цифровой модуляции для каждой поднесущей частоты, что позволяет подстраивать сигнал к различным условиям ведения связи, исходя из требований к помехоустойчивости и скорости передачи данных.

Обзор современного состояния работ и существующих технических решений по созданию систем связи на магнитной индукции

В последние десятилетия было проведено немало экспериментов и разработаны испытательные стенды для изучения методов передачи данных в водной среде. Например, Дж. Сойдехей и его коллеги в 2001 г. разработали низкочастотную систему с МИ для организации связи на мелководье [2]. Было проведено несколько испытаний в прибрежных районах, где скорости передачи данных 100…300 бит/с наблюдались в диапазоне 250…400 м. Отмечается, что физические свойства магнитных полей позволяют этим системам работать через любые естественные границы сред.

В 2010 г. была протестирована система передачи голоса дайвера на основе МИ-связи [3], где была успешно достигнута дальность передачи 30 м от поверхности от поверхности воды до дайвера на несущей частоте 12 кГц.

С. Рамадан в своей работе [4] рассмотрел целесообразность улучшения связи в пресной и морской воде при помощи МИ-метода связи с использованием пары катушек в качестве передатчика и приемника. Например, для достижения расстояния 100 м полоса пропускания канала для пресной воды составляла 25 кГц с затуханием в 102,1 дБ, тогда как для морской воды эти показатели были снижены до 10 Гц и 104,5 дБ соответственно. Что касается пропускной способности каналов, то в пресной воде были достигнуты значения 315,51 кбит/с (на расстоянии 100 м) и 200 бит/с для схемы МИ-связи в морской воде на том же расстоянии.

Авторы в статье [5] представили результаты теста МИ-связи для объектов, расположенных в воздушной и водной средах. Разработана система МИ-связи, где МИ-сигналы, модулированные с помощью частотной манипуляции (FSK), излучаются передающей антенной, расположенной в воздухе, и принимаются погруженным в воду приемником с трехнаправленной антенной. После подавления посторонних шумов, узкополосной фильтрации и других методов обработки сигнала в тракте приёма стала возможной безошибочная передача данных с высоты 2 м над поверхностью моря до объекта на глубине до 35 м.

В статье [6] предлагается оптимизированная конструкция антенной системы МИ-связи на основе активных элементов. Результаты показывают, что активная антенная система с оптимизированной конструкцией может увеличить мощность сигнала и обеспечить усиление по сравнению с обычной антенной системой на 30 дБ. Это является существенным улучшением по сравнению с пассивной антенной системой, у которой на практике достигается только 8 дБ усиления. Антенная система оптимизирована благодаря специальной структуре размещения катушек и физических параметров, посредством аналитических выводов и моделирования в среде разработки COMSOL.

Институтом физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск) [10] исследованы резонансный и нерезонансный варианты построения передатчиков ближнепольных магнитных систем связи, которые могут быть использованы для передачи информации в сложных условиях: связь с подземными и подводными объектами, обмен информацией с объектами, находящимися в железобетонных конструкциях и подвалах зданий, а также в других случаях, когда широко распространенные системы связи с использованием электромагнитных волн неэффективны. Практическую реализацию эта система нашла в усилителе мощности, производимом предприятием АО «НПП «Радиосвязь». Параметры усилителя мощности позволяют обеспечить работоспособность при предельных условиях: напряжении до 150 В, токе до 100 А, частоте до 200 кГц.

В [3] упоминается разработка передающей ферритовой антенны для спасательного морского аварийного передатчика. Анализ условий работы этого устройства привёл конструкторов разработки к выводу, что ферритовая магнитная антенна оказывается значительно эффективнее антенн других типов, обеспечивая максимальную надежность и дальность действия. Такой передатчик обеспечивает непрерывную работу в течение 72 ч и отыскание его в радиусе до 10 км при длине изделия 0,5 м, диаметре 0,1 м, массе 3,6 кг.

Оценки энергетических параметров для подводной магнитно-индуктивной связи

Рассмотрим магнитное поле одиночного витка с током и определим магнитное поле витка в любой точке пространства [7–9]. Для нахождения магнитного поля воспользуемся законом Био–Савара–Лапласа.

На рис. 1 видно, что центр системы координат O совпадает с центром витка. Контур окружности витка обозначен как C, а радиус окружности – как a. По витку течет ток I. $\overline{r}$ – это переменная радиус-вектор из начала координат в произвольную точку витка. $\overline{r}_0$ – это радиус-вектор в точку наблюдения. Полярный угол φ – угол между радиус-вектором $\overline{r}$ и осью OX. Расстояние от оси витка до точки наблюдения обозначим за ρ, $d\,\overline{r}$ – элементарное приращение радиус-вектора $\overline{r}$.

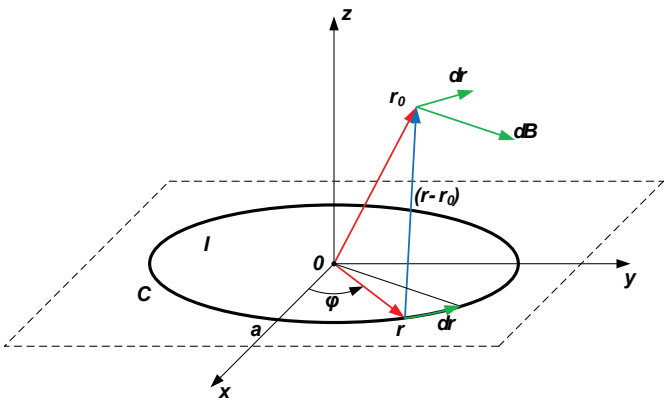

Рис. 1. Иллюстрация к закону Био–Савара–Лапласа

Согласно закону Био–Савара–Лапласа, элемент контура с током $d\,\overline{r}$ создает элементарный вклад в магнитное поле, который определяется формулой:

$$d\vec{B}(\vec{r}_0)=\frac{\mu_0}{4\pi}\cdot\frac{\left[d\vec{r}\times(\vec{r}_0-\vec{r})\right]}{\left|\vec{r}_0-\vec{r}\right|^3}. \qquad (1)$$

где μ_0 = 4·π·10^{-7} Гн/м – магнитная проницаемость в свободном пространстве.

Для того чтобы найти результирующее магнитное поле, нужно выполнить интегрирование по всему контуру витка:

$$\vec{B}(\vec{r}_0)=\int_C d\vec{B}(\vec{r}_0). \qquad (2)$$

После подстановки всех выражений и некоторых тождественных преобразований получаем выражения для аксиальной и радиальной компонент магнитного поля соответственно:

$$B_z(\rho,z)=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\left(a^2-\rho\cdot a\cos\varphi\right)d\varphi}{\left(\rho^2+a^2+z^2-2\rho\cdot a\cos\varphi\right)^{3/2}}, \qquad (3)$$

$$B_r(\rho,z)=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_0^{2\pi}\frac{a\cdot z\cdot d\varphi}{\left(\rho^2+a^2+z^2-2\rho\cdot a\cos\varphi\right)^{3/2}}. \qquad (4)$$

Продемонстрируем полученное решение на примере витка радиуса $a = 0.1$ *м* и тока $I = 1$ *А* (рис. 2).

Зная решение для магнитного поля одного витка, можно найти индуктивность катушки, состоящей из n витков. Здесь используется идеальная модель катушки, которая безразмерна по направлению своей оси симметрии, но хоть катушка и считается безразмерной вдоль OZ, необходимо задаться ненулевым радиусом сечения провода, обозначим его δ.

На рис. 3 изображены две магнитно связанные катушки. Для первой катушки радиус обозначен a_1 и содержит n_1 витков, у второй – a_2 и n_2 соответственно.

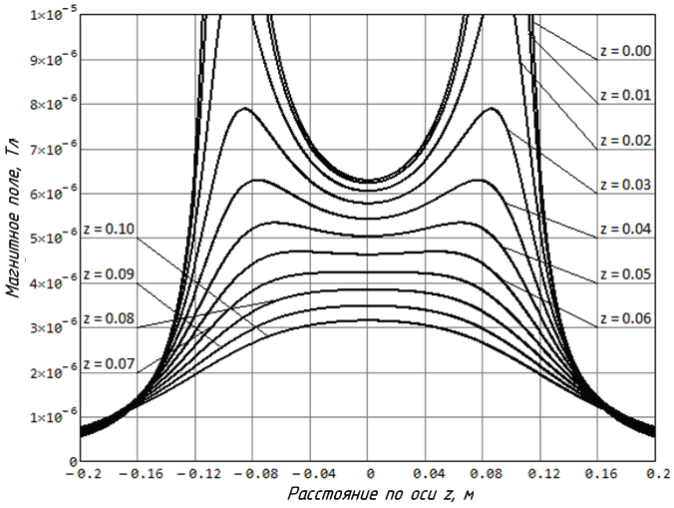

Рис. 2. Абсолютная амплитуда магнитного поля

Взаимная индуктивность выражается следующим образом:

$$M_{12}=\frac{1}{2}n_1n_2\times$$

$$\times\mu_0\int_0^{a_2-\delta}\int_0^{2\pi}\frac{\left(a_1^2-\rho a_1\cdot\cos\varphi\right)d\varphi}{\left(\rho^2+a_1^2+d^2-2\rho a_2\cdot\cos\varphi\right)^{3/2}}\rho d\varphi. \qquad (5)$$

Интегрирование выражений 1, 2 и 3 выполняется численно. Заметим, что, как правило, M_{12}=M_{21}=M. Коэффициент связи катушек определяется выражением:

$$=\frac{}{\sqrt{L_1\cdot L_2}}. \qquad (6)$$

Исследуем зависимость коэффициента связи катушек от расстояния. Для этого рассмотрим две одинаковые катушки с радиусом катушек a_1=a_2=0.1 м и количеством витков n_1=n_2=100, при этом собственная индуктивность каждой из катушек составит

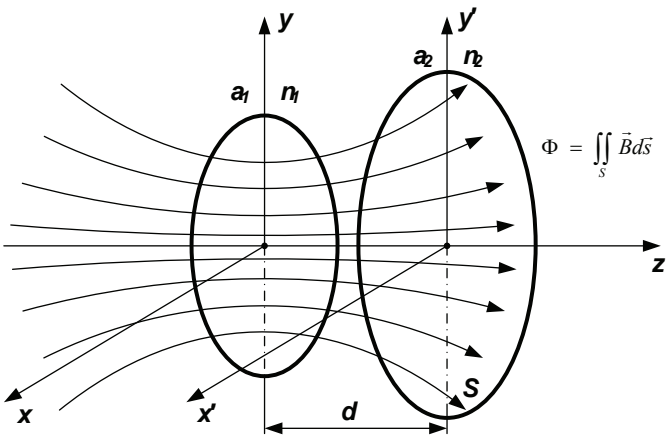

Рис. 3. Индуктивно связанные катушки

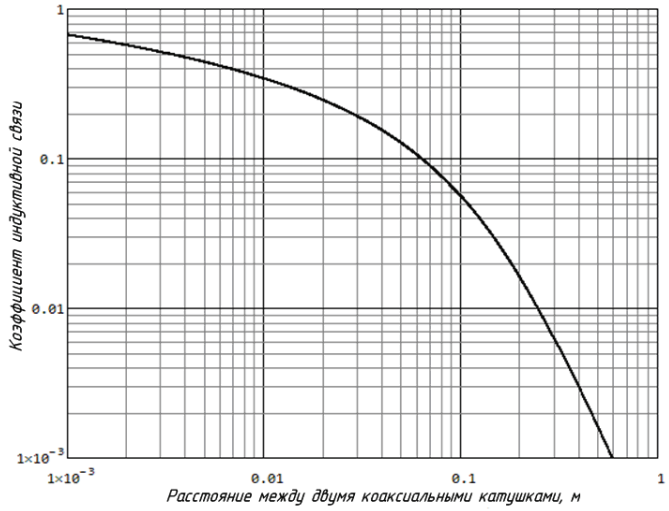

Рис. 4. График зависимости коэффициента связи катушек от расстояния между ними

L_1=L_2=8.775 мГн (рис. 4). Приведенный график на рис. 4 не изменится, если одинаково изменить число витков в обеих катушках либо одинаково изменить радиус обеих катушек. Из графика видно, что даже при расстоянии между катушками в 1 мм коэффициент связи меньше 100% и коэффициент падает до 10% на расстоянии порядка 60 мм и до 1% на 250 мм.

Потери передаваемой мощности на распространение МИ-волны в водной среде рассчитываются по формуле:

$$PL_{SW} = PL_{MI} + PL_{\alpha}, \quad (7)$$

где PL_{MI} – потери мощности МИ-сигнала без учета среды распространения (в воздушном пространстве или вакууме), PL_{α} – потери передаваемой мощности, вызванные затуханием сигнала в водной среде.

$$PL_{MI} = -10\log\frac{R_L\omega^2M^2}{R_{TX}\left(R_L+R_{RX}\right)^2+R_{TX}\left(X_L+\omega L_{RX}\right)^2}, \quad (8)$$

где R_{TX} и R_{RX} – активные сопротивления передающей и приёмной антенн, R_L – общее активное сопротивление приёмной системы, L_{RX} – индуктивность приёмной антенны.

$$PL_{\alpha} = 20\ log\ (e^{\alpha r}) = 8{,}69\alpha r, \quad (9)$$

где α – коэффициент затухания и рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\pi\cdot f\cdot\mu\cdot\sigma}, \quad (10)$$

где σ – электрическая проводимость среды (для морской воды σ = 4 См/м), f – частота передаваемого сигнала.

Таким образом, зная мощность предающей системы P_{TX}, можно определить мощность на приёмной антенне, допустив, что коэффициенты усиления антенн незначительны:

$$P_{RX} = P_{TX} - PL_{SW}. \quad (11)$$

На рис. 5 показано ослабление сигнала в морской воде в зависимости от расстояния передачи при различных рабочих частотах (данные представлены для радиуса катушки, равного 0,25 м, и числа витков, равного 50). Все кривые ослабления на трассе увеличиваются с увеличением расстояния передачи, поскольку PL_{MI} и PL_{α} напрямую зависят от дальности осуществления связи. Кроме того, когда расстояние передачи превышает допустимое значение, потери в децибеллах на трассе растут почти линейно. Это связано с тем, что потери от действия вихревых токов PL_{α} играют значительную роль в случаях передачи на большие расстояния. Кроме того, на рис. 5 также показано, что потери на трассе подводной МИ-системы являются удовлетворительными только в области ограниченного расстояния, примерно до десятков метров, однако есть ряд методов, которые могут увеличить дальность передачи для МИ-канала, и потери на трассе уменьшаются с увеличением радиуса и увеличении числа витков катушек. Этот факт подразумевает, что катушка с большей площадью и большим количеством витков является предпочтительной для эффективной передачи.

Следует отметить, что максимальная эффективность канала МИ-связи при использовании катушек индуктивности достигается, если они расположены соосно.

При повышении емкости МИ-канала необходимо учитывать, что эффективная полоса пропускания и пропускная способность значительно ограничены требованием к высокой добротности контуров излу-

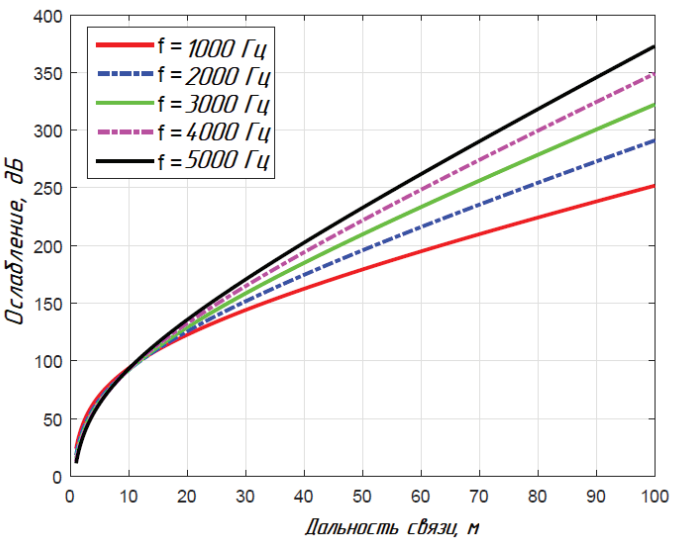

Рис. 5. Ослабление сигнала в морской воде в зависимости от дальности передачи при различных рабочих частотах

чения и необходимости работать системе МИ-связи на низких частотах, чтобы снизить уровни затухания передаваемого сигнала, обусловленного вихревыми токами в морской воде с высокой проводимостью.

Из приведенного выше анализа можно отметить, что формирование низкочастотных сигналов в сочетании с применением высокоиндуктивных приемоизлучающих антенных систем позволит реализовать МИ-связь на расстояниях в несколько десятков метров в морской воде.

Многочастотные методы манипуляции для магнитно-индуктивной связи

Главной идеей многочастотной системы модуляции OFDM является разделение последовательного цифрового потока данных на большое число низкоскоростных потоков, передаваемых на отдельных ортогональных поднесущих [11]. Сумма поднесущих, переносящих компоненты цифрового потока, называется символом OFDM, равным T. Сигнал OFDM является комплексным, так как каждая поднесущая состоит из синфазной и квадратурной компонент

$$\dot{s}(t) = \sum_{p=0}^{J} \dot{d}_k \cdot e^{-2\pi jp \cdot \Delta f \cdot t}, \qquad (12)$$

где $\Delta f = 1/T$ – частотный разнос между соседними поднесущими, d_k – k-й комплексный информационный символ длительностью T, J – количество ортогональных поднесущих частот. Спектральная эффективность OFDM определяется как $n_f \approx \log_2 m$, где m – количество позиций в манипуляционном созвездии M-QAM на каждой поднесущей частоте OFDM-сигнала. Данное выражение применимо для МИ-систем связи, где защитные временные интервалы между символами OFDM могут быть минимальными ввиду малых величин временной дисперсии в МИ-канале связи.

Эксперименты

Тестирование МИ-системы связи с многочастотной OFDM-манипуляцией было выполнено в морских подледных условиях с передачей сигнала с поверхности льда вертикально до погруженного под воду приемника. Частотный диапазон выбирался в соответствии с передаточной характеристикой цепи «усилитель мощности – передающая антенна – приемная антенна» и был выбран от 5 до 35 кГц. Усилитель мощности класса D (мощность 35 Вт) был нагружен на низкодобротный контур магнитной антенны с центральной рабочей частотой 20 кГц с целью расширения рабочей полосы частот. Магнитные антенны (передающая и приемная) выполнены на ферромагнитном сердечнике диаметром 10 мм и длиной 200 мм и размещались соосно друг другу в ходе эксперимента. Неравномерность частотной характеристики всего тракта приемопередачи достигала 10 дБ, инверсия которой позволила выполнить предварительную частотную коррекцию многочастотного сигнала OFDM для выравнивания общего амплитудного спектра на приемной стороне. Усилитель мощности, входные цепи приемного тракта и эмуляторы цифровой сигнальной обработки размещались в герметичных корпусах (рис. 6).

В полосе частот 30 кГц многочастотные сигналы OFDM формируются с длительностью символа T, равной 4 мс, и при ортогональном уплотнении поднесущих частот с шагом Δf = 250 Гц их количество J достигало 120. Защитные временные интервалы между символами OFDM выбирались минимальными (500 мкс) с учетом возможной временной дисперсии в МИ-канале связи. Применялась QPSK (квадратурная фазовая) манипуляция поднесущих частот для формирования информационных символов d_k в выражении (12).

В таблице приведены параметры сигналов, тестируемых в морском эксперименте на глубинах до

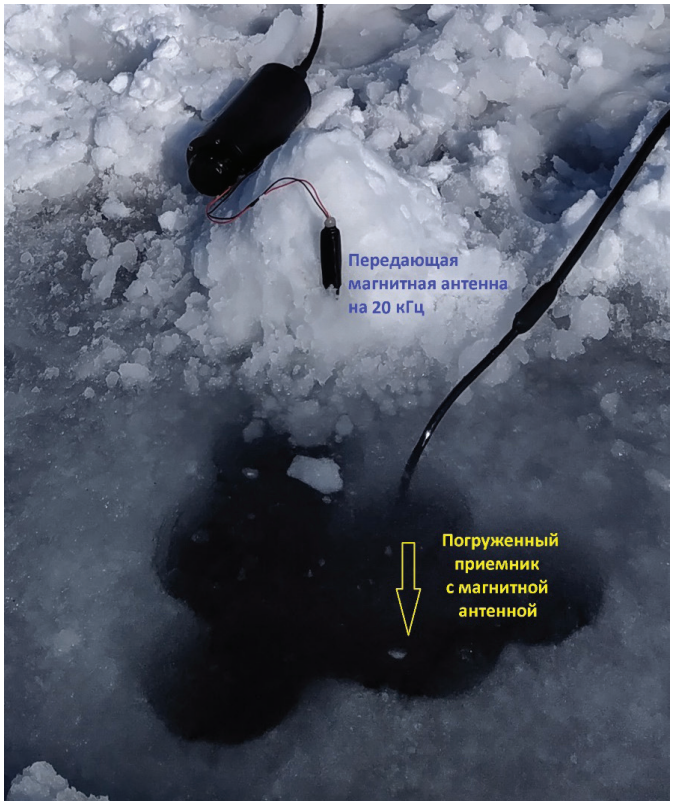

Рис. 6. Модули передачи и приёма МИ-связи с соосно расположенными антеннами

10 м, а также результаты по достигнутой дальности связи при уровне вероятности ошибок не более 10^{-3} на бит. Также для тестов дальности низкоскоростной МИ-связи использовались фазоманипулированные сигналы с расширенным спектром на базе кодов Баркера длиной 13 элементов с пониженной скоростью передачи данных (800–1000 бит/с).

Параметры излучаемых сигналов и результаты проведенных экспериментов

Манипуляция	Длительность символа, с	Частотный разнос поднесущих, Гц	Количество поднесущих	Скорость передачи информации, кбит/с	Достигнутая дальность связи (глубина). При вероятности ошибки на бит не более 10^{-3}
Фазо-манипулированный сигнал с расширенным спектром на базе кодов Баркера (13 элементов)	–	–	1	0.8	10
OFDM-QPSK	0,004	250	120	53.333	3

Результаты и выводы

Полученные значения по дальности и пропускной способности МИ-систем связи с выбранным типом малогабаритных антенн на ферромагнитных сердечниках позволяют судить о возможности трансляции мультимедиа информации невысокого качества (десятки килобит в секунду) на расстояниях до 4–5 м при использовании передатчика мощностью до нескольких десятков ватт, при условии применения многочастотных систем OFDM с высокой спектральной эффективностью. Использование классических видов цифровой манипуляции и расширения спектра с применением псевдослучайных последовательностей позволяет кратно увеличить дальность (до 10 м), однако в подобных системах происходит вынужденное значительное понижение скорости информационного обмена до 1 кбит/с.

Подобные магнитно-индуктивные системы связи возможно использовать для связи в разнородных средах (вода–воздух), в иных ситуациях, где осложняется использование радио или гидроакустических систем связи на подводных комплексах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Akyildiz Ian F., Pu Wang, Zhi Sun. Realizing underwater communication through magnetic induction // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53, Iss. 11. P. 42–48. https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7321970

2. Sojdehei J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F. Magneto-inductive (MI) communications. // Proc. MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295), Honolulu, HI, USA. 2001. Vol. 11. P. 513–519. https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968775

3. Хомич В.И. Ферритовые антенны. М.: Энергия, 1989. 95 с.

4. Ramadan S. Underwater communication thought magnetic induction (MI). Halifax, Nova Scotia: Dalhousie University, 2017. URL: https://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/73429/Sana-Ramadan-MASc-ECED-October-2017.pdf (дата обращения: 19.06.2024)

5. Chai B., Zhang X., Wang J. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea // 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe, Japan: Conference Paper Publisher. IEEE, 2018. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559464

6. Zhangyu Li, Zhi Sun. Antenna system optimization for active metamaterial-enhanced magnetic induction communications. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2019, Conference Paper Publisher, IEEE. Krakow, Poland, 2019. P. 1–5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8739834 (дата обращения: 19.06.2024)

7. Ткачёв А. Беспроводная передача энергии через магнитно-связанные индуктивные катушки // TechMedia издательство интернет-проектов для IT-специалистов. Хабр сообщество IT-специалистов [сайт сообщества]. URL: https://habr.com/ru/post/407819/ (дата обращения: 12.05.2019)

8. Domingo M.C. Magnetic induction for underwater wireless communication networks IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, Iss. 6. P. 2929–2939. URL: https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194670

9. Bogie I.S. Conduction and magnetic signalling in the sea a background review // Radio and Electronic Engineer. 1972. Vol. 42, Iss. 10. P. 447–452. URL: https://doi.org/10.1049/ree.1972.0076

10. Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Боев Н.М., Галлеев Р.Г. Передатчики ближнепольных магнитных систем связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 111–115. eLIBRARY ID: 32498112

11. Родионов А.Ю. , Стаценко Л.Г., Кузин Д.А., Смирнова М.М. Применение некогерентных многочастотных сигналов для передачи информации в нестационарной гидроакустической среде // Акуст. журн. 2023. Т. 69, № 5. С. 652–662. DOI 10.31857/S0320791923600208.

Справка об авторах:

РОДИОНОВ Александр Юрьевич, профессор, д. т. н.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Адрес места работы: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: цифровая связь и навигация, цифровая обработка сигналов
E-mail: deodar1618@yandex.ru. **ORCID:** 0000-0003-2931-900X

ВЛАСОВ Александр Александрович, соискатель
Дальневосточный федеральный университет
Адрес места работы: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
Область научных интересов: цифровая связь и навигация, цифровая обработка сигналов
E-mail: vlasov_aa@students.dvfu.ru

СТАЦЕНКО Любовь Григорьевна, профессор, д. ф-м н.
Дальневосточный федеральный университет
Адрес места работы: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
Область научных интересов: гидроакустика, акустика, связь и навигация, цифровая обработка сигналов
E-mail: statsenko.lg@dvfu.ru. **ORCID:** 0000-0001-7498-9534

DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_03

APPLICATION OF MULTI-FREQUENCY UNDERWATER COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON MAGNETIC INDUCTION

A.Y. Rodionov, A.A. Vlasov, L.G. Statsenko

The article provides a review of research into technical systems using magnetic-inductive coupling for practical use in freshwater and marine areas. The features of the propagation of a magnetic field in aquatic environments and the possibility of using the phenomenon of magnetic induction as one of the methods of information transmission are reflected. The issue of ensuring data transmission with an assessment of the quality indicators of the communication channel in systems that support the multi-frequency method of orthogonal frequency division of signals with multiplexing (OFDM) is analyzed. An experiment was carried out to obtain values for the range and throughput of magnetic-inductive communication systems with a selected type of small-sized antennas on ferromagnetic cores. There are possibilities for transmitting information at distances of up to 5 meters at speeds of up to several tens of kbit/s using transmitters with a power of up to several tens of W, using multi-frequency OFDM systems with high spectral efficiency, as well as telemetry data at distances of up to 10 m at speeds of up to 1 kbit/s. If it is difficult to use radio or hydroacoustic communication systems on underwater complexes, magnetic-inductive systems can be used for communications in heterogeneous environments, such as water-air and other conditions.

Keywords: magnetic induction, underwater communication, ferrite antennas, near-field magnetic communication, permeability, underwater communication channels, OFDM

References

1. Akyildiz Ian F., Pu Wang, Zhi Sun. Realizing underwater communication through magnetic induction. IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53, Iss. 11, pp. 42–48. https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7321970

2. Sojdehei J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F. Magneto-inductive (MI) communications. Proc. MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295), Honolulu, HI, USA. 2001. Vol. 11, pp. 513–519. https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968775

3. Homich V.I. Ferritovye antenny. M.: Jenergija, 1989. 95 p. (In Russ.).

4. Sana Ramadan. Underwater communication thought magnetic induction (MI). Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. 2017. URL: https://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/73429/Sana-Ramadan-MASc-ECED-October-2017.pdf (accessed: 19.06.2024)

5. Binbin Chai, Xin Zhang, Jinhong Wang. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea. 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe, Japan. Conference Paper Publisher, IEEE, 2018. P. 1-4. https://doi.org/10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559464

6. Zhangyu Li, Zhi Sun. Antenna system optimization for active metamaterial-enhanced magnetic induction communications. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2019, Conference Paper Publisher, IEEE. Krakow, Poland. 2019. P. 1–5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8739834 (accessed: 19.06.2024)

7. Tkachjov A. Besprovodnaja peredacha jenergii cherez magnitno-svjazannye induktivnye katushki. TechMedia izdatel'stvo internet-proektov dlja IT-specialistov. Habr soobshhestvo IT-specialistov [sajt soobshhestva]. URL: https://habr.com/ru/post/407819/ (data obrashhenija: 12.05.2019). (In Russ.).

8. Domingo M.C. Magnetic induction for underwater wireless communication networks IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, Iss. 6, pp. 2929-2939. https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194670

9. Bogie I.S. Conduction and magnetic signaling in the sea a background review. Radio and Electronic Engineer. 1972. Vol. 42, Iss. 10, pp. 447–452. https://doi.org/10.1049/ree.1972.0076

10. Babickij A.N., Beljaev B.A., Boev N.M., Galleev R.G. Peredatchiki blizhnepol'nyh magnitnyh sistem svjazi. Uspehi sovremennoj radiojelektroniki. 2017. No. 12. P. 111–115. eLIBRARY ID: 32498112. (In Russ.).

11. Rodionov A.Ju. , Stacenko L.G., Kuzin D.A., Smirnova M.M. Primenenie nekogerentnyh mnogochastotnyh signalov dlja peredachi informacii v nestacionarnoj gidroakusticheskoj srede. Akust. zhurn. 2023. Vol. 69, No. 5. P. 652–662. DOI 10.31857/S0320791923600208. (In Russ.).

Information about the authors

RODIONOV Alexander Yurievich, Professor, Doctor of Technical Sciences
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Work address: 690091, Vladivostok, st. Sukhanova, 5a
Research interests: digital communication and navigation, digital signal processing
E-mail: deodar1618@yandex.ru. **ORCID:** 0000-0003-2931-900X

VLASOV Alexander Alexandrovich, applicant
Far Eastern Federal University
Work address: 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russian Island, Ajax village, 10
Research interests: digital communication and navigation, digital signal processing
E-mail: vlasov_aa@students.dvfu.ru

STATSENKO Lyubov Grigoryevna, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Far Eastern Federal University
Work address: 690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russian Island, Ajax village, 10
Research interests: hydroacoustics, acoustics, communication and navigation, digital signal processing
E-mail: statsenko.lg@dvfu.ru. **ORCID:** 0000-0001-7498-9534