

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-169-177

УДК 621.376.4; 621.396.944; 621.396.945

Оценка границ применимости и методов модуляции ближнепольной магнитной связи

Алексей Юрьевич Гришенцев¹, Вячеслав Александрович Горошков², Роман Ильич Чернов³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ AGrishentsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1373-0670>

² gorosvia@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9950-5778>

³ aeijo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9361-1238>

Аннотация

Предмет исследования. Одним из актуальных направлений исследований в области беспроводной связи является разработка ближнепольных магнитных систем и средств передачи сообщений в средах или сквозь среды, значительно поглощающие электромагнитное поле. К таким средам относятся: вода, грунт, строения. В проводящих средах ослабление магнитного поля возрастает с увеличением частоты. Для организации каналов связи сквозь проводящую среду, например морскую воду, применяют электромагнитное излучение крайне низких и сверхнизких частот от 3 до 300 Гц. Применение излучения в таких диапазонах частот сопряжено с большими размерами передающих и приемных антенн. Метод ближнепольной связи позволяет существенно уменьшить габариты приемных и излучающих антенн и потребляемую передатчиком мощность. Существенным ограничением ближнепольной длинноволновой связи является невысокая скорость передачи сообщений и небольшая, до десятков метров, дальность связи. **Метод.** Принцип действия предложенной системы связи основан на использовании магнитной компоненты электромагнитного поля. Передающим элементом такой системы служит катушка индуктивности с сердечником. Прием осуществляется датчиком магнитного поля в виде магнита, закрепленного на торсионном подвесе. Магнит совмещен с зеркалом, отражающим лазерный луч. Под действием внешнего магнитного поля магнит совершает крутильные движения, которые приводят к изменению угла отражения лазерного луча от зеркальной поверхности магнита. Отраженный сигнал регистрируется линейным фотоприемником. Оценка ослабления и затухания магнитного поля при передаче излучения из диэлектрической в проводящую среду выполнена на основе решения уравнений Максвелла. Разработаны трехпозиционная бинарная фазовая манипуляция и модифицированная трехпозиционная бинарная фазовая манипуляция, обеспечивающие противоположное расположение сигнальных символов, высокую информационную плотность сообщений, локализацию энергии излучаемого сигнала в низкочастотной области и повышение дальности связи. **Основные результаты.** Эксперименты показали, что в результате использования модифицированного вида манипуляции в сравнении с трехпозиционной бинарной фазовой манипуляцией удалось увеличить дальность связи на 10 % при неизменной высокой надежности доставки сообщений. Модельные оценки, выполненные в соответствии с предложенной методикой расчета ослабления и затухания магнитного поля при распространении в слонистых средах, подтверждены экспериментальными измерениями. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут найти применение при решении задач локального развертывания защищенных систем ближнепольной связи при обеспечении беспроводной коммуникации через среды, поглощающие электромагнитное поле.

Ключевые слова

магнитная связь, бинарная фазовая манипуляция, передача сообщений, магнитное экранирование, распространение радиоволн

Ссылка для цитирования: Гришенцев А.Ю., Горошков В.А., Чернов Р.И. Оценка границ применимости и методов модуляции ближнепольной магнитной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 169–177. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-169-177

Assessment of the limits of applicability and methods of modulation of near-field magnetic coupling

Alexey Yu. Grishentsev¹, Viacheslav A. Goroshkov², Roman I. Chernov³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ AGrishentsev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1373-0670>

² gorosvia@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9950-5778>

³ acijo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9361-1238>

Abstract

The development of near-field magnetic systems and means of transmitting messages through media that significantly absorb the electromagnetic field is one of the topical areas of research in the field of wireless communication. These lossy media include water, soil, buildings. The attenuation of the magnetic field in conducting media increases with increasing frequency. To organize communication channels through a conductive medium such as sea water electromagnetic radiation of extremely low frequencies and ultra-low frequencies from 3 Hz to 300 Hz is used. Traditional communication methods due to electromagnetic radiation in that frequency ranges require large sizes of transmitting and receiving antennas. The near-field communication method makes possible significant reduction both the dimensions of receiving and emitting antennas and the transmitter power consumption. A significant limitation of near-field long-wave communication is the low bandwidth and small, up to tens of meters, communication range. The operating principle of the proposed communication system is based on the use of the magnetic component of an electromagnetic field. Transmitting element in proposed system is a solenoid with a magnetic core. Receiving magnetic field sensor is a magnet fixed on a torsion suspension. The magnet is combined with a mirror reflecting the laser beam. Rotation of the magnet under the action of an external magnetic field leads to a change in the angle of reflection of the laser beam from the mirror surface of the magnet. The reflected signal is recorded by a linear photodetector. The attenuation of the magnetic field during the transmission of radiation from a dielectric to a conducting medium was evaluated with the solution of Maxwell's equations. A three-position binary phase shift keying and a modified three-position binary phase shift keying are developed and substantiated. The proposed solutions provide the opposite arrangement of signal symbols, high message information density, localization of the emitted signal energy in low-frequency region and an increase in communication range. Experiments had shown that usage of modified keying type shown an increase the communication range by 10 % with the same reliability of message delivery in comparison with three-position binary phase keying. The estimates of the weakening and attenuation of the magnetic field during propagation in layered media obtained from the simulation are confirmed by experimental measurements. The results of research could be used in solving problems of local deployment of secure near-field communication systems through media that absorb an electromagnetic field.

Keywords

magnetic coupling, binary phase manipulation, message transmission, magnetic shielding, radio wave propagation

For citation: Grishentsev A. Yu., Goroshkov V.A., Chernov R.I. Assessment of the limits of applicability and methods of modulation of near-field magnetic coupling. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 169–177 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-169-177

Введение

Одно из актуальных направлений исследований в области систем беспроводной связи — разработка методов и средств передачи сообщений в средах или сквозь среды, значительно поглощающие электромагнитное поле. В частности, подобные решения востребованы для организации беспроводной передачи информации сквозь толщу воды, в том числе морской, грунта, бетонных сооружений и экранирующих конструкций. Магнитное экранирование реализуется за счет разнообразных кожухов и экранов, изготовленных из материалов, магнитное сопротивление которых меньше, чем магнитное сопротивление внешней среды [1]. В проводящих средах ослабление магнитного поля возрастает с увеличением частоты и происходит за счет индуцированных токов Фуко [2]. Полное экранирование магнитного поля обеспечивают сверхпроводники. Для организации каналов связи¹ сквозь проводящую среду, например, морскую воду, обычно применяют крайне

низкие частоты в диапазоне от 3 до 30 Гц и сверхнизкие частоты — от 30 до 300 Гц. В некоторых случаях используют частоты менее 3 Гц. Для организации связи на сверхнизких и крайне низких частотах с возможностью передачи сообщений объектам, находящимся под водой, применяют протяженные антенно-фидерные системы, габаритные размеры которых могут варьироваться от сотен метров до единиц километров. Питание таких антенно-фидерных систем требует значительной энергии, исчисляемой сотнями киловатт и мегаваттами в зависимости от реализации и режимов работы. Излучаемые радиоволны могут несколько раз огибать естественный волновод, образованный поверхностью Земли и ионосферой, прежде чем будут поглощены, и их энергия трансформируется в тепло [3]. При таком виде передачи информации не обеспечивается локальность развертывания и действия систем связи. Альтернативные методы связи за счет электромагнитного излучения с локальным действием, в том числе за счет магнитной компоненты электромагнитного поля, предлагают отечественные разработчики. Так,

¹ Рекомендация МСЭ-R V.431-7* Номенклатура диапазонов частот и длин волн, используемых в электросвязи [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/

[itu-r/rec/v/R-REC-V.431-7-200005-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/rec/v/R-REC-V.431-7-200005-S!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 03.12.2022).

например, АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» предлагает комплекс ближнепольной магнитной связи¹ для решения задач в интересах Министерства обороны Российской Федерации в промышленности, медицине и др. Зарубежные коллективы и отдельные исследователи предлагают свои решения в области магнитной связи, например в [4] представлена магнитоиндукционная система связи, обеспечивающая скорость передачи сообщений 100–300 бит/с и дальность связи до 400 м. В работе [5] рассмотрена магнитная система связи, действующая в средах воздух-вода (пресная), с дальностью действия до 30 м. В [6] выполнен обзор систем магнитоиндукционной ближнепольной связи, отмечены ее особенности и преимущества.

Цель настоящей работы — разработка методов поддержки и обеспечения системы связи за счет магнитной компоненты электромагнитного поля.

Предложен вид модифицированной трехпозиционной бинарной фазовой манипуляции, обеспечивающий противоположное расположение сигнальных символов и высокую информационную плотность сообщений. Данный вид является новизной для системы магнитной связи, в которой использован в качестве детектора магнитооптический датчик.

В рамках работы представлен метод оперативной оценки ослабления и затухания магнитного поля при распространении излучения из диэлектрической среды в проводящую. Отличительные особенности разработанной системы связи: локальность действия и развертывания; относительно небольшое энергопотребление. Например, экспериментальная установка имеет объем приемного устройства не более 0,25 дм³, объем передающего устройства (усилитель и магнитоиндукционный излучатель) — не более 4,5 дм³. При мощности излучателя 100 Вт обеспечивается дальность связи в воздушной среде до 25 м, в средах воздух-вода (вода морская составляет 95 % от длины всей трассы) до 16 м. При этом дальность действия можно увеличивать за счет наращивания мощности излучателя и использования излучателей с более «узкой» диаграммой направленности.

Принцип действия магнитной системы связи

Система магнитной связи образована передатчиком и приемником. В свою очередь передатчик состоит из модуля преобразования бинарных сообщений в модулированный сигнал, усилителя модулированного сигнала и магнитного излучателя, выполненного в виде сдвоенной катушки индуктивности с сердечником. Приемник включает датчик магнитного поля, оптический усилитель, фотоприемник, систему детектирования на микроконтроллере и интерфейсе, выдающую полученные сообщения в бинарном виде [7]. В качестве датчика магнитного поля использован магнит с зеркальной поверхностью на торсионном подвесе (не витой и нера-

стяжимой кевларовой нити). Падающий на зеркальную поверхность лазерный луч изменяет свое положение (угол отражения) в зависимости от положения магнита. Отраженный от магнита лазерный луч проходит систему зеркал, позволяющую в относительно компактном объеме добиться значительного изменения в положении луча. Таким образом, реализуется усиление отраженного сигнала. Отраженный лазерный луч регистрируется фотоприемной линейкой, которая отслеживает смещение пятна от лазерного луча. С фотоприемной линейки аналоговый сигнал поступает на микроконтроллер, выполняющий функцию аналого-цифрового преобразования и детектирования информационного сообщения.

Метод оценки границ применения и методы модуляции в системе ближнепольной магнитной связи

Для оценки границ применимости системы магнитной связи и особенностей распространения электромагнитной волны сквозь неоднородные среды в качестве источника излучения используем единичный виток с током (рис. 1). Магнитная индукция витка с током на торцах эквивалентна индукции на торцах индукционного излучателя. Запишем уравнение, выражающее приращение вектора магнитной индукции $d\mathbf{B}$, обусловленное протеканием тока i , через участок проводника $d\mathbf{l}$:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu i}{4\pi} \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{|\mathbf{r}|^3}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость среды; \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из участка проводника $d\mathbf{l}$ в данную точку пространства. На чертеже (рис. 1) приведен виток с током в прямоугольной $Oxyz$ системе координат. R — радиус единичного витка, который направлен в сторону элементарного сонаправленного с током i участка $d\mathbf{l}$; φ — угол, отложенный от оси Oy и определяющий положение участка $d\mathbf{l}$; $\mathbf{B}(x,y,z)$ — вектор магнитной индукции в точке с координатами (x,y,z) .

Учитывая осевую симметрию (рис. 1) магнитного поля витка с током, отметим, что аналогичной симметрией будет обладать и многovitковый соленоид.

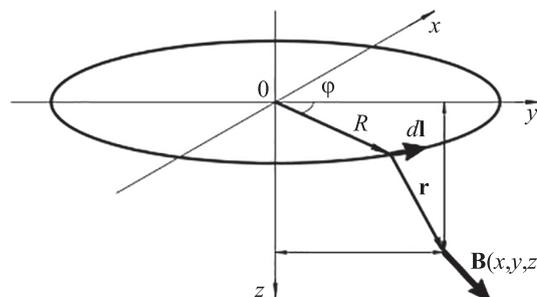


Рис. 1. Единичный виток с током в прямоугольной системе координат

Fig. 1. Single circular current loop in Cartesian coordinate system

¹ Системы ближнепольной магнитной связи. Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» [Электронный ресурс]. URL: <https://krtz.su/node/286> (дата обращения: 21.11.2022).

Запишем решение (1) для частного случая в плоскости yOz , предложенное в работе [8], в виде:

$$\begin{cases} B_x(0,y,z) = \frac{\mu_0 \mu I R z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin(\varphi)}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos(\varphi))^{3/2}} d\varphi \\ B_y(0,y,z) = -\frac{\mu_0 \mu I R z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\varphi)}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos(\varphi))^{3/2}} d\varphi \\ B_z(0,y,z) = \frac{\mu_0 \mu I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - y \cos(\varphi)}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos(\varphi))^{3/2}} d\varphi \end{cases} \quad (2)$$

Решение уравнений Максвелла в общем виде позволяет найти электромагнитное поле в любой точке пространства [9]. Численное решение обычно реализуется методами конечных разностей, конечных или граничных элементов. Для современных программных средств, реализующих подобные методы, для которых разрабатывается система магнитной связи, не всегда доступно применение таких решений в полевых условиях. Для решения данной задачи выведем выражение для оценки ослабления и затухания магнитного поля при прохождении из диэлектрика в проводник и распространения по проводнику.

Рассмотрим случай плоской электромагнитной волны (рис. 2). Выберем систему координат $(Oxyz)$ таким образом, что направления векторов: \mathbf{E} и \mathbf{H} — напряженности электрического и магнитного полей, а также и $\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$ — вектора Умова–Пойтинга, совпадают с базисными векторами системы координат. На рис. 2 представлены обозначения для первой и второй сред: ϵ_1, ϵ_2 — диэлектрические проницаемости; μ_1, μ_2 — магнитные проницаемости; γ_1, γ_2 — удельные электропроводности.

Тогда из уравнений Максвелла для плоской электромагнитной волны $\text{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E}$ и $\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$, следует:

$$\begin{cases} -\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} = \gamma \mathbf{E}_x \\ \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t} \end{cases}, \quad (3)$$

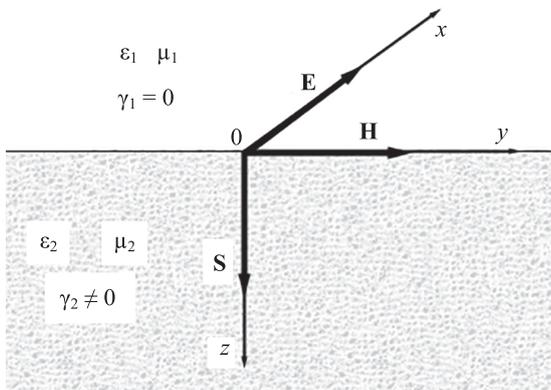


Рис. 2. Распространение плоской электромагнитной волны через границу раздела двух сред

Fig. 2. Propagation of a plane electromagnetic wave through the interface between two media

где t — время.

Решение системы уравнений (3) известно из работы [10]:

$$\begin{cases} \dot{H}_y = \dot{H}_0 e^{-kz} e^{-j\omega t} \\ \dot{E}_x = \frac{1}{\gamma} (1+j) k \dot{E}_0 e^{-kz} e^{-j\omega t} \end{cases}, \quad (4)$$

где \dot{H}_0 и \dot{E}_0 — комплексные напряженности магнитного и электрического полей при $z = 0$; $k = \sqrt{\frac{\omega \mu \gamma}{2}}$. Множитель e^{-kz} определяет затухание, а $e^{-j\omega t}$ — фазу волны в среде от z .

На основании решения (3), определим отношение между падающими ($\dot{E}_{\varphi 1}, \dot{H}_{\varphi 1}$) из диэлектрика на поверхность проводника волнами, отраженными ($\dot{E}_{\psi 1}, \dot{H}_{\psi 1}$) и преломленными ($\dot{E}_{\varphi 2}, \dot{H}_{\varphi 2}$) волнами, прошедшими в проводящую среду. Примем, что: $Z_2 = \frac{\dot{E}_x}{\dot{H}_y} = (1+j) \sqrt{\frac{\omega \mu_2}{2\gamma_2}}$ — комплексное волновое сопротивление проводящей среды; $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$ — волновое сопротивление для падающей и отраженной волн в диэлектрике. Тогда запишем:

$$\begin{cases} \dot{E}_{\varphi 2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{E}_{\varphi 1} \\ \dot{H}_{\varphi 2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{H}_{\varphi 1} \end{cases}. \quad (5)$$

На достаточно большом расстоянии, виток с током можно считать точечным источником электромагнитного поля. Используя уравнения (2), (4), (5) запишем общее выражение оценки затухания и ослабления магнитного поля при прохождении из диэлектрика в проводящую среду и движении по проводящей среде в предположении, что источник магнитного поля мал по сравнению с рассматриваемыми расстояниями z . Тогда получим, что в дальней зоне витка с током:

$$\dot{H}_{\varphi 2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} e^{-zk} \frac{1}{z^3} \dot{H}_{\varphi 1}. \quad (6)$$

Решим следующую задачу: разработаем метод манипуляции магнитного сигнала. При разработке способа манипуляции [10, 11] представлены следующие требования и рекомендации:

- 1) с учетом крайне низкой частоты передачи сообщений необходимо выбрать вид манипуляции, который обеспечит высокую информационную плотность манипулированного сообщения;
- 2) желательно использовать вид манипуляции, который сможет работать без явной синхронизации передатчика и приемника и при некотором изменении несущей частоты;
- 3) необходимо учесть конструктивные особенности приемного устройства для снижения вероятности ошибки при приеме сообщений.

В результате анализа различных видов манипуляции с учетом требований и рекомендаций, в качестве осно-

вы выберем способ бинарной фазовой манипуляции (БФМ). БФМ доработан в вид — трехпозиционной бинарной фазовой манипуляции (ТБФМ), задаваемой выражением:

$$x_{\text{ТБФМ}}(t) = \begin{cases} A_{\max} \sin\left(2\pi f\left(t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right)\right), & s[n] = 1 \\ -A_{\max} \sin\left(2\pi f\left(t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right)\right), & s[n] = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi f$ — несущая частота; $n = 1, \dots, N$ — индекс дискретного сообщения $s[n]$, выдаваемого каналным кодером; T — длительность одного сигнального символа; A_{\max} — амплитуда сигнального символа; $\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor$ — округление в меньшую сторону. Пример манипуляции приведен на рис. 3.

Разработанный вид ТБФМ удовлетворяет требованиям и рекомендациям (1)–(3), но в то же время содержит точки с резкой сменой фазы, обозначенные красными окружностями. Видно резкое изменение фазы, которое образует устранимый разрыв первого рода, что,

$$x_{\text{ТБФМ}}(t) = \begin{cases} -0,5 - 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi), & a(t) < N, s[a(t)] = 0, s[b(t)] = 0 \\ -\sin(0,5\omega t + \pi(a(t) \bmod 2)), & a(t) < N, s[a(t)] = 0, s[b(t)] = 1 \\ +\sin(0,5\omega t + \pi(a(t) \bmod 2)), & a(t) < N, s[a(t)] = 1, s[b(t)] = 0 \\ +0,5 + 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi), & a(t) < N, s[a(t)] = 1, s[b(t)] = 1 \\ -0,5 - 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi), & s\left[1 + \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor\right] = 0, t \leq \frac{T}{2} \\ +0,5 + 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi), & s\left[1 + \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor\right] = 1, t \leq \frac{T}{2} \\ -0,5 - 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi), & a(t) = N, s[a(t)] = 0 \\ +0,5 + 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi), & a(t) = N, s[a(t)] = 1 \end{cases}, \quad (8)$$

где $a(t) = 1 + \left\lfloor \frac{t}{T} - 0,5 \right\rfloor$; $b(t) = 2 + \left\lfloor \frac{t}{T} - 0,5 \right\rfloor$.

Основные результаты

В плоскости yOz из выражения (2) компонента вектора магнитной индукции $B_x(0, y, z)$. Отметим, что в любой плоскости, параллельной оси Oz , нормальная компонента вектора магнитной индукции равна нулю

в свою очередь, в соответствии с теоремой Дирихле [12, 13], приводит к значительному расширению спектра Фурье сигнала $x_{\text{ТБФМ}}(t)$. Отметим, что разрыв происходит в критически значимой области для обеспечения прохождения пятном лазерного луча нейтрального положения на фотоприемной линейке. Установлено, что затухание магнитного сигнала с ростом частоты возрастает. Спектр сигнала, содержащего разрывы, возрастает настолько, что значимые гармоники превышают частотный диапазон, регистрируемый датчиком. В результате вероятность недостижения пятном лазерного луча нейтрального положения значительно возрастает, следовательно, возрастает вероятность ошибки при приеме сообщений.

Для устранения перечисленных недостатков предложен модифицированный вид трехпозиционной бинарной фазовой манипуляции (МТБФМ), основанный на сшивке гармонических функций $\sin(\omega t)$ и $\sin(0,5\omega t)$ в точке равенства значений функций и первой производной. Данные условия обеспечили концентрацию энергии сигнала в низкочастотной области.

(рис. 1). Исходя из этого, решение трехмерной задачи (1) сводится к решению плоской задачи (2), которая в силу центральной симметрии относительно начала координат приводит к необходимости поиска решения в одной четверти плоскости. В результате расчета (2), для значений радиуса витка $R = 0,05$ м и тока в витке 1 кА, построим модуль вектора магнитной индукции в плоскости yOz (рис. 4, а) и по осям Oy и Oz (рис. 4, б).

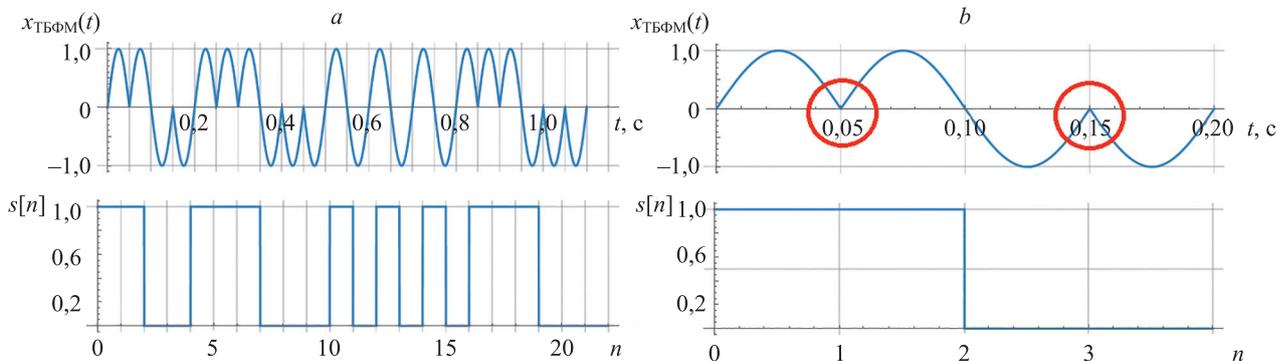


Рис. 3. Трехпозиционная бинарная фазовая манипуляция $x_{\text{ТБФМ}}(t)$ и бинарный сигнал сообщения $s[n]$ длительностью сообщения: 22 символа (а); четыре символа (б)

Fig. 3. Three-position binary phase shift keying $x_{\text{ТБФМ}}(t)$ and binary message signal $s[n]$

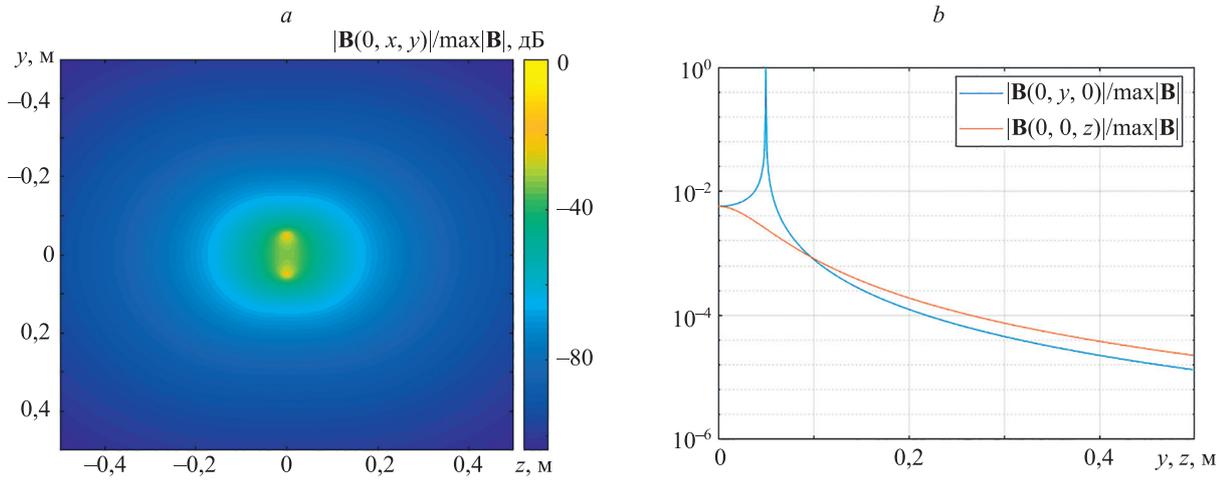


Рис. 4. Нормированный модуль вектора магнитной индукции в плоскости $y0z$ (a); график нормированного модуля вектора магнитной индукции по осям $0y$ и $0z$ (b). На рис. 4, b по вертикальной оси указана безразмерная величина

Fig. 4. Distribution of the normalized modulus of the magnetic induction vector in the $y0z$ plane (a); graph of the normalized modulus of the magnetic induction vector along the axes $0y$ and $0z$ (b). On fig. 4, b the dimensionless value is indicated along the vertical axis

Полученная картина поля (рис. 4, b) позволила сделать вывод, что при расстояниях от центра витка, больших чем $4R$, соотношения между векторными компонентами $B_y(x, y, z)$ и $B_z(x, y, z)$ приобретают определенную тенденцию, которая сохраняется далее. Таким образом, дальней зоной для единичного витка можно считать расстояния, большие чем $4R$, а из рис. 4, a видно, что при достаточно больших расстояниях от единичного витка его можно рассматривать как точечный источник.

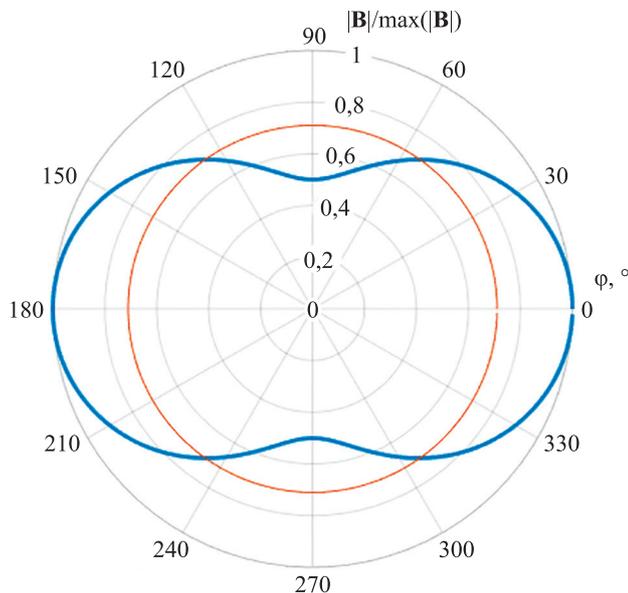


Рис. 5. Диаграмма направленности магнитного излучателя в дальней зоне ($100R$), красной линией обозначен уровень ослабления в 0,71 раз (-3 дБ), синей — модуль нормированного вектора магнитной индукции

Fig. 5. The radiation pattern of the magnetic emitter in the far zone ($100R$), the red line indicates the attenuation level of 0.71 times (-3 dB), the blue line indicates the module of the normalized magnetic induction vector

Диаграмма направленности единичного витка, как излучателя магнитного поля в полярных координатах, приведена на рис. 5. Ось единичного витка соответствует $\varphi = 0^\circ$.

На основании полученных выражений (2) и (6) произведем оценку затухания и ослабления индукции магнитного поля в направлении оси $0z$, при прохождении из диэлектрика в проводящую среду (морскую воду, почву) (рис. 2) и в воздухе¹. При построении графиков (рис. 6) в качестве источника магнитного поля используем единичный виток, расположенный на расстоянии R от границы раздела, при условии, что точка начала координат расположена на границе раздела сред.

Практическая реализация системы магнитной связи выполнена с использованием в качестве излучателя электромагнита в виде соленоида [14]. Соленоид состоит из двух катушек, каждая по 600 витков, проводящих синусоидальный ток с амплитудой 5 А, равный $6 \text{ кА} \cdot \text{витков}$. Система в воздушной среде при скорости передачи 20 бит/с при экспериментальных исследованиях показала уверенный прием сообщений на расстоянии 25 м, что соответствует 135 дБ затухания (рис. 6). Таким образом, при заданном режиме работы излучателя и скорости передачи 20 бит/с, расстояние уверенного приема оценено: для морской воды около 16 м; для глинистой почвы — 17 м.

В случае магнитного экранирования для оценки ослабления магнитной составляющей электромагнитного поля предлагается использовать уже имеющиеся модели, например [1, 9], предоставляющие относительно простые методы оценки ослабления магнитного поля при различных формах и материалах экранов.

¹ Рекомендация МСЭ-R P.527-4 Электрические характеристики земной поверхности. Серия Р Распространение радиоволн. Электронная публикация Женева: МСЭ-R, 2018 [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-4-201706-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 10.12.2022).

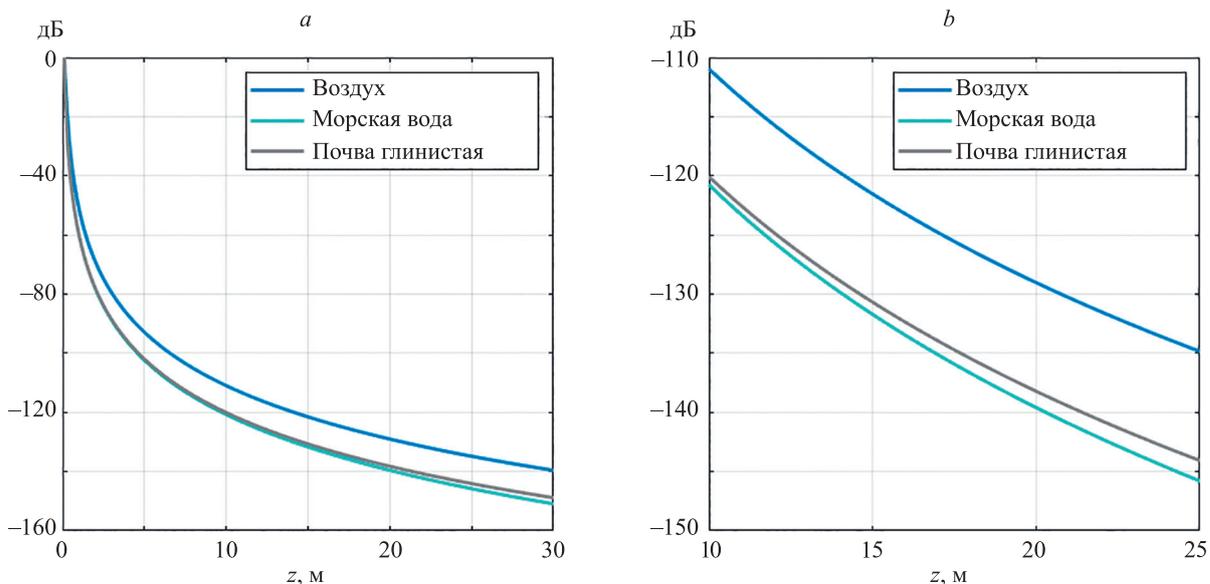


Рис. 6. График ослабления магнитного поля (а) и фрагмент графика в увеличенном масштабе (b)
 Fig. 6. Attenuation of magnetic field induction in air, sea water and clay soil

Из (8) видно, что сшивка функций $f_1(t) = \pm 0,5 \pm \pm 0,5\sin(\omega t - 0,5\pi)$ и $f_2(t) = \sin(0,5\omega t)$ происходит в точках равенства значений гармонических функций. Данные точки одновременно являются минимумами и максимумами гармонических функций \cos и \sin , где

все нечетные производные равны нулю, при: $f_1^{(k)}(t) = = f_2^{(k)}(t) = 0$, при $k = 1, 3, 5, \dots$

Сравнительный анализ спектров МТБФМ и ТБФМ (рис. 7) показал, что в результате модификации удалось существенно снизить амплитуду высокочастотных ком-

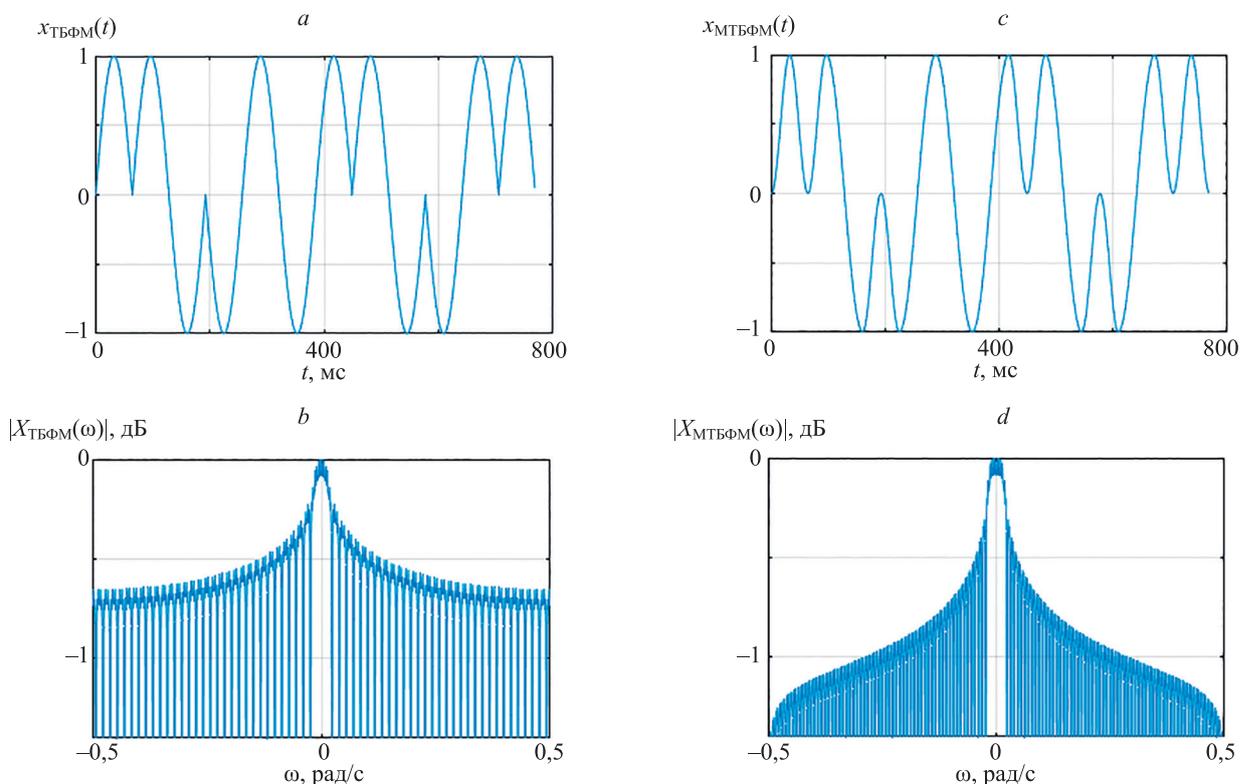


Рис. 7. Сравнение сигналов: трехпозиционной бинарной фазовой манипуляции $x_{\text{ТБФМ}}(t)$ (а), модифицированной трехпозиционной бинарной фазовой манипуляции $x_{\text{МТБФМ}}(t)$ (с) и их нормированных по частоте модулей спектров $|X_{\text{ТБФМ}}(\omega)|$ (b) и $|X_{\text{МТБФМ}}(\omega)|$ (d)

Fig. 7. Comparison of signals: $x_{\text{ТБПСК}}(t)$ — three-position binary phase shift keying (a) with $x_{\text{МТБПСК}}(t)$ — modified three-position binary phase shift keying (c) and their frequency-normalized spectrum modulus $|X_{\text{ТБПСК}}(\omega)|$ (b) and $|X_{\text{МТБПСК}}(\omega)|$ (d)

понент. Из (8) видно, что манипулированный сигнал образован гармоническими функциями двух несущих частот: ω и $0,5 \omega$. В результате использования МТБФМ удалось повысить надежность системы магнитной связи за счет того, что лазерный луч проходит нейтральное положение на фотополоске. Из выражений (7)–(8) получено, что разработанные методы манипуляции используют противоположные сигналы, которые обеспечивают максимальное евклидово расстояние $2\sqrt{E}$ среди сигналов с равной энергией E . Данный результат определяет максимально возможную помехоустойчивость при бинарной манипуляции сигнальными символами равных энергий.

Вычисление МТБФМ (8) можно выполнить средствами любого микроконтроллера, имеющего аппаратные или программные функции для арифметики с плавающей точкой и способного вычислять гармонические функции. Альтернативным вариантом может быть использование вычисленных табличных значений гармонических функций в заданных точках.

Полученная МТБФМ удовлетворяет всем требованиям и рекомендациям к способу манипуляции бинарного сигнала для разрабатываемой системы магнитной связи.

Заключение

В ходе исследований разработан метод оценки затухания и ослабления магнитной компоненты электро-

магнитного поля при прохождении из диэлектрика в проводящую среду. На основе выведенного выражения (6) произведена сравнительная оценка ослабления и затухания магнитного поля при распространении в слоистых средах: воздух-воздух; воздух-морская вода; воздух-почва. Выполнены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность численных расчетов.

Разработаны два вида манипуляции цифрового сигнала: трехпозиционная бинарная фазовая манипуляция и модифицированная трехпозиционная бинарная фазовая манипуляция. Оба вида манипуляций позволяют без явной синхронизации производить передачу сообщений за счет возвращения чувствительного элемента датчика и лазерного луча в нейтральное положение после передачи каждого бита. За счет разработанного модифицированного вида манипуляции значительно сужен спектр манипулированного сообщения и уменьшены амплитуды высших гармоник в спектре сигнала, что приводит к концентрации энергии сигнала в низкочастотной области и способствует возвращению датчика магнитного поля в нейтральное положение после передачи каждого бита.

Практический эксперимент показал, что в результате использования модифицированного вида манипуляции удалось при неизменной высокой надежности доставки сообщений увеличить дальность связи на 10 % по сравнению с использованием трехпозиционной бинарной фазовой манипуляции.

Литература

1. Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
2. Аполлонский С.М. Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике. СПб.: Питер, 2012. 352 с.
3. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павел'ев А.Г. Распространение радиоволн: М.: УРСС ЛЕНАНД, 2009. 496 с.
4. Sojdehei J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F. Magneto-inductive (MI) communications // MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey: Conference Proceedings. V. 1. 2001. P. 513–519. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968775>
5. Bogie I.S. Conduction and magnetic signalling in the sea a background review // Radio and Electronic Engineer. 1972. V. 42. N 10. P. 447–452. <https://doi.org/10.1049/ree.1972.0076>
6. Власов А.А., Родионов А.Ю. Перспективы использования систем подводной коммуникации на основе магнитной индукции (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2021. № 2(47). С. 36–49. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-5>
7. Грищенко А.Ю., Коробейников А.Г., Горшков В.А., Чернов Р.И., Тихомиров А.В., Козин О.В. Разработка и моделирование магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. № 11. С. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.4>
8. Перов Н.С., Грановский С.А., Стрелков Н.В., Шапаева Т.Б., Макарова Л.А., Шапаев Б.А. Изучение постоянного магнитного поля. Численное моделирование и эксперимент. М.: Изд-во МГУ, 2017. 23 с.
9. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3-х томах. Т. 3 / 4-е изд. СПб.: Питер, 2006. 377 с.
10. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / 2-е изд. М.: Вильямс, 2017. 1100 с.

References

1. Apollonskii S.M. *Handbook for the Calculation of Electromagnetic Screens*. Leningrad, Jenergoatomizdat Publ., 1988, 224 p. (in Russian)
2. Apollonskii S.M. *Differential Equations of Mathematical Physics in Electrical Engineering*. St. Petersburg, Piter Publ., 2012. 352 p. (in Russian)
3. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. *Radiowaves Spread*. Moscow, Lenand Publ., 2009, 496 p. (in Russian)
4. Sojdehei J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F. Magneto-inductive (MI) communications. *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings. V. 1, 2001*, pp. 513–519. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968775>
5. Bogie I.S. Conduction and magnetic signalling in the sea a background review. *Radio and Electronic Engineer*, 1972, vol. 42, no. 10, pp. 447–452. <https://doi.org/10.1049/ree.1972.0076>
6. Vlasov A., Rodionov A. Prospects for the usage of underwater communication systems based on magnetic induction (review). *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2021, no. 2(47), pp. 36–49. (in Russian). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-5>
7. Grishentsev A.Y., Korobeynikov A.G., Goroshkov V.A., Chernov R.I., Tikhomirov A.V., Kozin O.V. Development and modeling of a magneto-optical magnetic field gradient sensor with a torsion suspension of the sensor element. *Journal of Radio Electronics*, 2021, no. 11, pp. 8. (in Russian). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.4>
8. Perov N.S., Granovskii S.A., Strelkov N.V., Shapaeva T.B., Makarova L.A., Shapaev B.A. The Study of the Constant Magnetic Field. *Numerical Modeling and Experiment*. Moscow, MSU Publ., 2017, 23 p. (in Russian)
9. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chечурин V.L. *Theoretical Basics of Electrical Engineering. V. 3*. St. Petersburg, Piter Publ., 2006, 377 p. (in Russian)
10. Proakis J.G. *Digital Communications*. New York, McGraw-Hill Book Co., 1989.
11. Sklar B. *Digital Communications*. Pearson Education, 2009, 1164 p.

12. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Основы математического анализа. В 2 частях. Ч. 1 / 5-е изд. М.: Наука, Физматлит, 1998. 616 с.
13. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. М.: Айрис-Пресс, 2010. 608 с.
14. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.

Авторы

Гришенцев Алексей Юрьевич — доктор технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56321138400](https://orcid.org/0000-0003-1373-0670), <https://orcid.org/0000-0003-1373-0670>, AGrishentsev@yandex.ru

Горошков Вячеслав Александрович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9950-5778>, gorosvia@ya.ru

Чернов Роман Ильич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9361-1238>, aeijo@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 22.11.2022
Одобрена после рецензирования 03.01.2023
Принята к печати 26.01.2023*

12. Ilin V.A., Pozniak E.G. *Basics of Mathematical Analysis. Part 1.* Moscow, Nauka, Fizmatlit Publ., 1998, 616 p. (in Russian)
13. Pismennyi D.T. *Higher Mathematics: Lecture Notes.* Moscow, Ajris-Press Publ., 2010, 608 p. (in Russian)
14. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Inductance Calculation. Reference Book.* Leningrad, Jenergoatomizdat Publ., 1986, 488 p. (in Russian)

Authors

Alexey Yu. Grishentsev — D.Sc., Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56321138400](https://orcid.org/0000-0003-1373-0670), <https://orcid.org/0000-0003-1373-0670>, AGrishentsev@yandex.ru

Viacheslav A. Goroshkov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9950-5778>, gorosvia@ya.ru

Roman I. Chernov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9361-1238>, aeijo@mail.ru

*Received 22.11.2022
Approved after reviewing 03.01.2023
Accepted 26.01.2023*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»