



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

Политехнический институт
(Школа)
Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения

ЧЕРЕМУХИН ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ

**ВСЕНАПРАВЛЕННЫЕ МАГНИТНЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СРЕДАХ «ВОДА- ВОЗДУХ»**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

по образовательной программе подготовки магистров
по направлению подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Профиль «Системы радиосвязи и радиодоступа»

г. Владивосток
2021



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

Политехнический институт
(Школа)

Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения

УТВЕРЖДЕНО

Руководитель ОП д.ф.-м.н., профессор
(ученая степень, должность)
Л.Г. Стаценко
(подпись) (ФИО)
« ____ » _____ 2021г.

Директор департамента д.ф.-м.н., профессор
(ученая степень, звание)
Л.Г. Стаценко
(подпись) (ФИО)
« ____ » _____ 2021г.

З А Д А Н И Е
на выпускную квалификационную работу

Студенту _____ Черемухину Дмитрию Андреевичу _____ Группа М3119-
(Фамилия, Имя, Отчество) 11.04.02сррд
(номер группы)

1. Наименование темы Всенаправленные магнитные антенны для систем передачи данных в средах «вода- воздух»
2. Основания для разработки Приказ № 62-01-06-77 от 14.04.2020г.
3. Источники разработки учебная литература, научные статьи, опубликованные работы, законодательные и нормативные документы
4. Технические требования (параметры) Разработка эффективных моделей конструкций антенн для передачи информационного сигнала с магнитной составляющей (OFDM).
5. Дополнительные требования отсутствуют
6. Перечень разработанных вопросов изучение особенностей построения магнитоиндукционных подводных систем связи; изучение теоретических основ распространения магнитоиндукционного сигнала в разных средах; изучение практических основ разработки конструкций перспективных антенных систем;

7. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных плакатов)
Графический материал представить в виде слайдов с изложением актуальности, целей и
задач работы. Показать результаты проделанной работы по проектированию разных
конструктивов перспективных магнитных систем ближней связи. Графически оценить
амплитудно-частотные характеристики принятых сигналов, а также диаграммы
направленности изготовленных антенн.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

№ п/п	Наименование этапов дипломного проекта (работы)	Срок выполнения этапов дипломного проекта (работы)	Примечание
1.	Анализ задания научно-исследовательской работы (НИР). Поиск и исследование литературы по теме НИР	20.10.2019-10.01.2021	
2.	Составление плана НИР	14.03.2020-15.05.2020	
3.	Разработка и согласование с руководителем основной части НИР	08.12.2020-23.03.2021	
4.	Согласование с руководителем введения, выводов и предложений	26.03.2021-08.04.2021	
5.	Подготовка и публикация статей по тематике НИР	20.11.2019-14.12.2020	
6.	Подготовка доклада и графического материала, ознакомление с рецензией	05.05.2021-25.06.2021	

Дата выдачи задания _____

Срок представления к защите _____

Руководитель ВКР _____

(подпись)

(ФИО)

Студент _____

(подпись)

(ФИО)

АННОТАЦИЯ

Тема ВКР: «Всенаправленные магнитные антенны для систем передачи данных в средах «вода- воздух»

Объём - 92 страниц, 60 рисунков, 7 таблиц, список литературы 68 источников.

При расчетах и подготовке графического материала использовалось программное обеспечение:

- *Adobe Audition 3.0 (Adobe Systems)*;
- *sPlan 7.0 (ABACOM-Ingenieurgesellschaft Incorporated)*;
- *Microsoft Office Visio 2016 (Microsoft Corporation)*.

При подготовке материалов работы использовались следующие ресурсы глобальной сети Интернет: URL: <https://www.academia.edu>; URL: <https://www.elibrary.ru>; URL: <https://www.ieee.org>.

Структура подготовленной ВКР включает: аннотацию, введение, основную часть из четырех глав - теоретических основ, обзора литературы, постановки задачи, основной части, а также заключения и список литературы.

В первой главе отражены специфические особенности распространения сигнала посредством магнитного поля в различных средах и возможности применения явления магнитной индукции как эффективного метода передачи информации в водной среде, а также физико-математическое описание указанных процессов.

Вторая глава посвящена обзору открытой информации по существующим практическим системам связи и опытным моделям, использующим магнитно-индуктивную связь, для решения различных задач, разработанными и созданными зарубежными и российскими научными коллективами. Эти материалы, в основном, представляют собой перспективные лабораторные и опытно-технические разработки.

В третьей главе рассмотрены основные ограничения в прикладном использовании применяемой технологии. Произведён обзор и определены основные направления по более глубокому изучению принципов магнитно-индуктивной связи. Раскрыты основные характеристики каждого направления и различных вариантов технических реализаций на основе моделирования этих процессов. Обозначены имеющиеся проблемы и направления их решения.

В основной части содержатся данные по подбору различных конструкций и дальнейшему изготовлению МИ– антенн, а также приведены результаты проведенных экспериментов по передаче сигнала в различных средах, используя явление магнитной индукции. Выполнен анализ экспериментальных данных.

Результаты исследовательской деятельности были апробированы в двух научных статьях РИНЦ: «Осуществление подводной связи через МИ», с публикацией в периодических изданиях конференций ПАО «Газпром»: «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство», а также на конференции РИНЦ: «САПР И МОДЕЛИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ», с тезисом: «Применение всенаправленной магнитной антенны в подводной связи».

Также 15 октября 2020 года была опубликована статья Scopus: «Organization of data transmission in the developed communication system for implementation in the agro-industrial complex», и представлен доклад на конференции: «International Scientific and Practical Conference «Development of the Agro-Industrial Complex in the context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and abroad» (DAIC 2020). Ссылки на сборник и публикацию: *URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20202220102>*.

Ключевые слова: магнитная индукция (МИ), скорость передачи, информация, подводная связь, эксперимент, канал связи, затухание, потери при распространении, магнитная проницаемость, магнитное поле, антенна, передатчик, индуктивная рамка, ближнее поле, глубина проникновения, элемент с током, коэффициент усиления, ферритовый стержень, высота подвеса, медный кабель, информация, мониторинг.

ANNOTATION

Subject of FQW: «Omnidirectional magnetic antennas for transmission systems data in water-air environments».

Volume - 92 pages, 60 figures, 8 tables, references 68 sources.

When calculating and creating graphic material, the following software was used:

- *Adobe Audition 3.0 (Adobe Systems)*;
- *sPlan 7.0 (ABACOM-Ingenieurgesellschaft Incorporated)*;
- *Microsoft Office Visio 2016 (Microsoft Corporation)*.

In preparing the materials for the work, the following resources of the global Internet were used: URL: <https://www.academia.edu>; URL: <https://www.elibrary.ru>; URL: <https://www.ieee.org>.

The structure of the prepared FQW includes: annotation, introduction, the main part of five chapters - theoretical foundations, literature review, problem statement, main part, as well as conclusions and a list of references.

The first chapter reflects the specific features of signal propagation by means of a magnetic field in various media and the possibility of using the phenomenon of magnetic induction as an effective method of transmitting information in an aquatic environment, as well as a physical and mathematical description of these processes.

The second chapter is devoted to a review of open information on existing practical communication systems and experimental models using magnetic-inductive communication for solving various problems developed and created by foreign and Russian research teams. These materials are mainly promising laboratory and experimental-technical developments.

In the third chapter, the main limitations in the applied use of the applied technology are considered. A review is made and the main directions for a deeper study of the principles of magnetic inductive communication are determined. The main charac-

teristics of each direction and various options for technical implementations are disclosed based on modeling these processes. The existing problems and directions of their solution are indicated.

The main part contains data on the selection of various designs and further manufacture of MI antennas, as well as the results of experiments on signal transmission in various media using the phenomenon of magnetic induction. The analysis of the experimental data is carried out.

The results of research activities were tested in two scientific articles of the RSCI: «Implementation of underwater communication through MI», with publication in the periodicals of the conferences of RJSC «Gazprom»: «Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production», as well as at the RSCI conference: «CAD AND MODELING IN MODERN ELECTRONICS», with the thesis: «Application of an omnidirectional magnetic antenna in underwater communications».

Also on October 15, 2020, the Scopus article was published: «Organization of data transmission in the developed communication system for implementation in the agro-industrial complex», and a report was presented at the conference: «International Scientific and Practical Conference Development of the Agro-Industrial Complex in the context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and abroad» (DAIC 2020). Collection and publication links: URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20202220102>.

Keywords: magnetic induction (MI), transmission rate, information, underwater communication, experiment, communication channel, attenuation, propagation loss, magnetic permeability, magnetic field, antenna, transmitter, inductance coil, current, magnetic moment, inductive frame, near field, penetration depth, element with current, gain, ferrite rod, suspension height, copper cable, information, monitoring.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит разработка нестандартных и перспективных систем связи, использующие необычные методы для передачи различного рода полезных данных. Также они соответствуют важному критерию- устойчивостью к переходу между различными средами (например, «вода- воздух»). Магнитоиндукционная трансляция данных (МИ) является перспективным способом физического уровня, предназначенного управлять передачей потока бит).

Используя МИ, открывается множество возможностей для взаимодействий в различных сферах, а конкретно: текстовая и голосовая связь между водолазами; экологические экспедиции и поисковые миссии; управление подводным оборудованием и его контроль с надводных судов.

Если взять во внимание океаны, которые покрывают две трети поверхности Земли, то можно представить какие бесценные знания для разных областей науки они собой представляют. Помимо ключевой роли океанов в международной торговле и рыболовстве, они содержат информацию о климате и становлении нашей планеты, а также еще не изученные полезные ископаемые и обитателей. Я считаю, что, разрабатывая инновационные проекты подводных беспроводных систем наблюдения за океаном, человечество приближается к более полному пониманию и поддержанию жизни на Земле.

В дальнейшем с помощью исследуемой технологии можно улучшить известные способы сбора научных данных, контроль загрязнения среды, увеличить объём и достоверность поступающей информации об изменении мирового климата, повысить точность обнаружения различных объектов на дне океана и передачу мультимедиа в реальном времени.

Исходя из этого, исследование водных ресурсов привлекает все большее внимание среди прибрежных стран, одновременно с этим был выдвинут ряд амбициозных проектов по наблюдению за морем, чтобы максимально изучить

неоткрытый подводный мир. Так, например, межконтинентальный план под названием EMSO был запущен Европейским союзом для измерения биогеохимических параметров океанов и мониторинга морской среды, которая охватывает Северный Ледовитый океан, Атлантический океан, Средиземное море и Черное море.

Соединенные Штаты и Канада начали проекты IOOS и NEPTUNE-Canada в своих территориальных океанах для создания интегрированной и устойчивой системы мониторинга океана. Китай также объявил о создании сети подводных научных наблюдений с предварительным охватом Восточного моря и Южного моря.

В основном практические работы по организации каналов подводных связей, была реализована через акустические виды связи. Данная связь характерна многими известными минусами: высокая задержка распространения сигнала, очень низкая ёмкость передаваемых данных, а также сильная зависимость канала от физических свойств и состояния среды распространения. Реализация подводной связи с помощью магнитной индукции (МИ), в отличие от традиционных способов, обладает уникальными и перспективными функциями, такими как: небольшая задержка распространения сигнала; стабильное поведение канала; достаточно широкий диапазон связи; низкие показатели шума канала.

Отметим, что ЭМ-волны испытывают высокую степень затухания под водой, которая сильно ограничивает возможности связи, с ростом частоты падает эффективное расстояние передачи информации. Для увеличения дальности связи, необходимы антенны большого размера для низкочастотной ЭМ-связи, которая не имеет практического применения для небольших подводных объектов. Например, размер антенны ЭМ-передатчика будет около двух метров для рабочей частоты 50 МГц.

Незначительная задержка распространения МИ волны обуславливается ее со скоростью распространения под водой: 33300000 м/с, в то время как у акустических волн: 1500 м/с. Эта чрезвычайно высокая скорость

распространения в дальнейшем поможет проектировать и создавать разнообразные подводные сетевые сервисы (например, локальные сети).

Приняв во внимание, что реактивное сопротивление у катушки значительно меньше, чем у антенны-диполя, только очень малая часть энергии излучается далеко в виде магнитного поля катушки. Следовательно, в сравнении с акустической связью, многолучевое замирание не является проблемой для подводной связи на базе МИ. Кроме того, из-за высокой скорости распространения МИ-волны, сдвиги частот, вызванные эффектом Доплера, будут незначительны.

В МИ-каналах связи, передача и прием данных осуществляется с помощью нескольких катушек небольших размеров – антенн, которые переносят информацию изменяющимся во времени магнитным полем. Данное магнитное поле генерируется модулированным синусоидальным током в катушке МИ-антенны на передатчике. Приёмник получает информацию с помощью демодулированного индуцированного тока в спиральной антенне. В МИ-каналах связи дальность передачи меньше, чем длина волны.

Также МИ может являться физическим уровнем для развития сетей связи ближнего уровня Body Area (BAN). Применить данную технологию, с большим успехом, можно в различных сферах социального обеспечения. Таким образом, область медицины и здравоохранения с внедрением данной технологии приобретет: удаленный мониторинг артериального давления, температуры тела, уровня глюкозы, сердцебиения пациента. В тоже время используемое цифровое устройство (передатчик), контролируется самими пациентам.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Планируется производить исследования в воде, где параметр электропроводность (мера способности вещества проводить электрический ток), приводит к снижению энергии материала из-за вихревого тока, который производит сильное вторичное поле.

На рисунке 1 схематично представлен принцип магнитной индукции, используемый в изготовленных антеннах, выражает производство магнитного поля при течении тока в первичной антенне (передатчика), которое наводится внутри вторичной антенны (приемника).

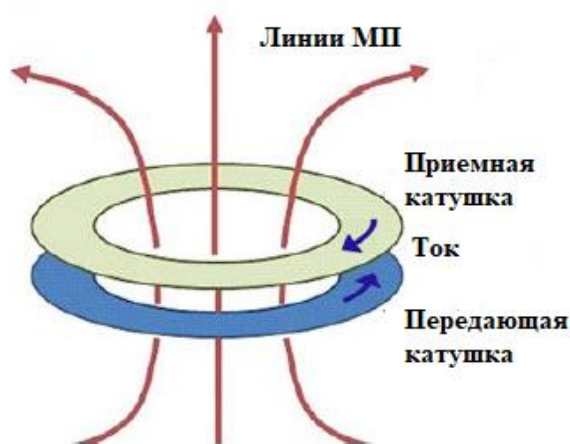


Рисунок 1 - Линии МИ пронизывающие катушки

Параметр магнитной проницаемости μ определяет степень намагничивания материалов в присутствии внешнего магнитного поля и вычисляется как:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_e, \quad (1)$$

где μ_0 - проницаемостью свободного пространства; μ_e - относительная магнитная проницаемость материала.

При дальнейшем конструировании антенн можно использовать ферритовые стержни, что является наиболее практичным и эффективным способом генерации магнитного поля. Магнитное поле, создаваемое антенной, делится на три следующие области:

- ближняя область;
- дальнюю область (электрическое и магнитное поля находятся в фазе);
- область перехода (расположена между ближней и дальней областями поля)

Основным, при проектировании магнитных антенн, является факт ослабления ближнего поля обратно кубу расстояния. Согласно закону Био – Савара - Лапласа, небольшой элемент с током длины $d\vec{l}$, создает поле с МИ:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (2)$$

Изобразить процесс протекания тока по участку проводника, можно рисунком 2. Как видно, вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости, проходящей через участок $d\vec{l}$ и точку, в которой вычисляется поле.

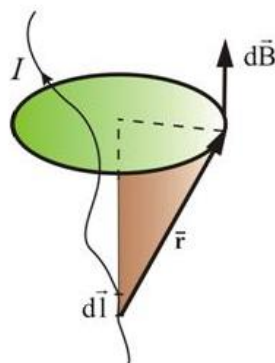


Рисунок 2 - Иллюстрация стержня антенны с током

Далее рассматривая магнитное поле одиночного витка с током, найдем его поле в любой точке пространства, согласно рисунку 3 [2]. Для нахождения магнитного поля воспользуемся законом Био-Савара-Лапласа.

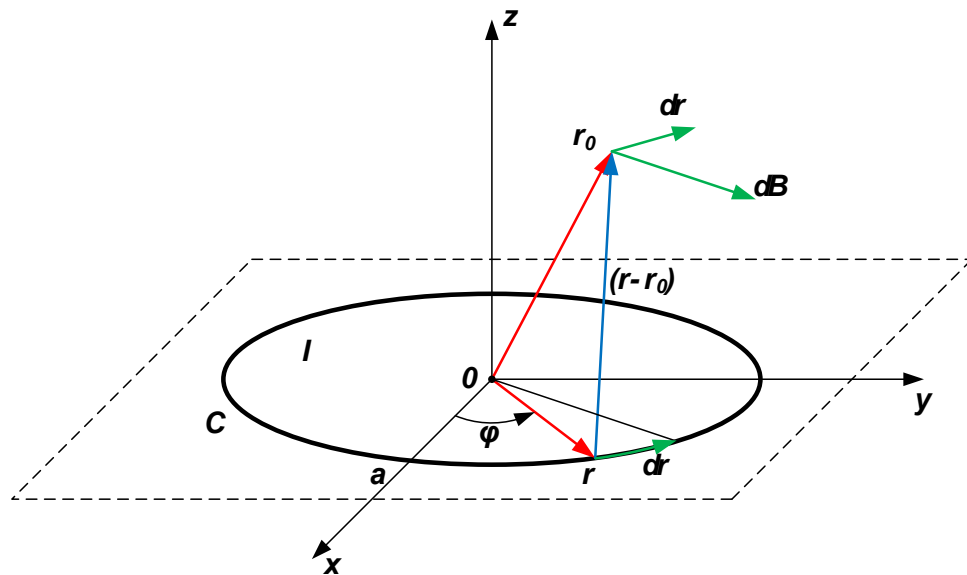


Рисунок 3 - Иллюстрация к закону Био-Савара-Лапласа

Заметно, что центр системы координат O совпадает с центром витка C . Радиус окружности обозначен - как a . По витку течет ток I . \vec{r} - переменная радиус-вектор из начала координат в произвольную точку витка. \vec{r}_0 - это радиус-вектор в точку наблюдения. Также нам понадобится полярный угол φ - угол между радиус-вектором \vec{r} осью Ox . Расстояние от оси витка до точки наблюдения обозначим за ρ . И наконец, $d\vec{r}$ - элементарное приращение радиус-вектора \vec{r} .

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

$$d\vec{B}(\vec{r}_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{[d\vec{r} \times (\vec{r}_0 - \vec{r})]}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3}, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная проницаемость в свободном пространстве.

Для того чтобы найти результирующее магнитное поле, нужно проинтегрировать по всему контуру витка, то есть:

$$\vec{B}(\vec{r}_0) = \int_C d\vec{B}(\vec{r}_0). \quad (4)$$

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

$$B_z(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(a^2 - \rho \cdot a \cos \varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a^2 + z^2 - 2\rho \cdot a \cos \varphi)^{3/2}}, \quad (5)$$

$$B_r(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a \cdot z \cdot d\varphi}{(\rho^2 + a^2 + z^2 - 2\rho \cdot a \cos \varphi)^{3/2}}. \quad (6)$$

Найдем абсолютное значение магнитного поля, просуммировав компоненты по теореме Пифагора:

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2}. \quad (7)$$

Согласно автору [2], рисунок 4 демонстрирует полученное решение на примере витка радиуса $a=0,1$ м и $I=1$ А.

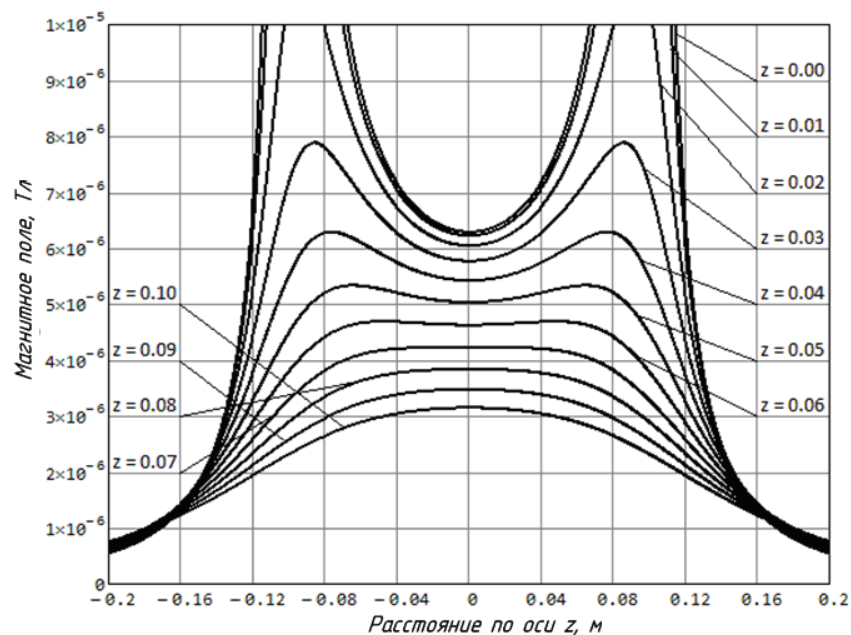


Рисунок 4 – График абсолютной амплитуды магнитного поля

Зная решение для магнитного поля одного витка, можем найти индуктивность катушки, состоящей из n витков. Индуктивность – это коэффициент пропорциональности между током в витке и магнитным потоком через площадь сечения витка. Мы пользуемся здесь идеальной моделью катушки, которая безразмерна по направлению своей оси симметрии. Конечно же, на практике такого не бывает. Хотя катушки и считаются безразмерными вдоль OZ , необходимо задаться ненулевым радиусом сечения провода [2]. Обозначим его δ .

На рисунке 5 изображены две магнитно связанные катушки. Пусть первая катушка имеет радиус a_1 и содержит n_1 витков, а вторая - a_2 и n_2 соответственно.

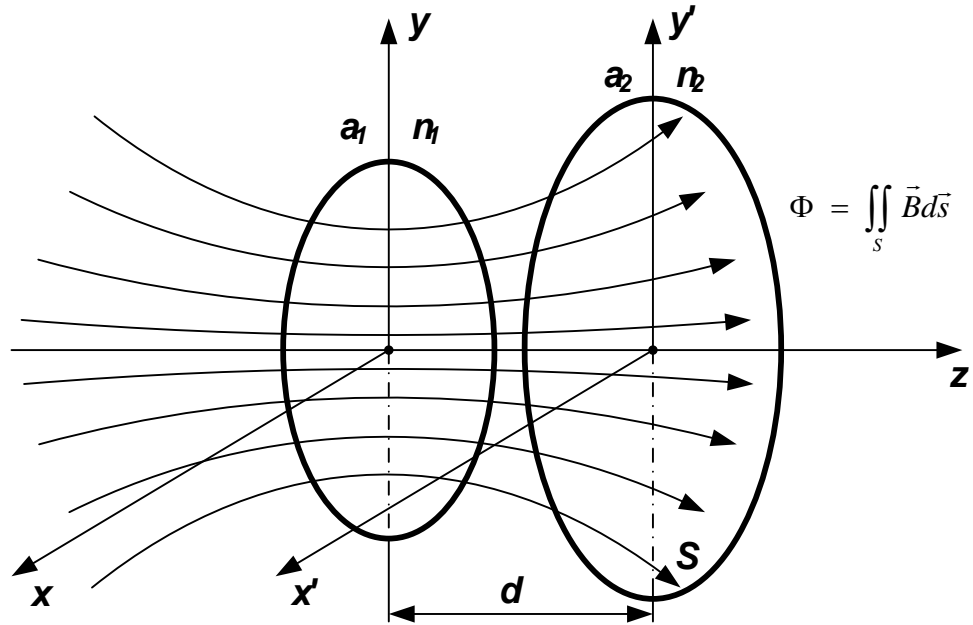


Рисунок 5 - Индуктивно связанные катушки

Тогда для нахождения собственных индуктивностей необходимо вычислить магнитный поток каждой катушки через свое собственное сечение с площадью S :

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^{a-\delta} B_z(\rho, z) \rho d\rho d\varphi = 2\pi \int_0^{a-\delta} B_z(\rho, z) \rho d\rho. \quad (8)$$

Собственные индуктивности катушек равны:

$$L_1 = \frac{1}{2} n_1^2 \mu_0 \int_0^{a_1-\delta} \int_0^{2\pi} \frac{(a_1^2 - \rho a_1 \cdot \cos \varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a_1^2 - 2\rho a_1 \cdot \cos \varphi)^{3/2}} \rho d\rho, \quad (9)$$

$$L_2 = \frac{1}{2} n_2^2 \mu_0 \int_0^{a_2-\delta} \int_0^{2\pi} \frac{(a_2^2 - \rho a_2 \cdot \cos \varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a_2^2 - 2\rho a_2 \cdot \cos \varphi)^{3/2}} \rho d\rho. \quad (10)$$

Тогда взаимная индуктивность выражается:

$$M_{12} = \frac{1}{2} n_1 n_2 \cdot \mu_0 \int_0^{a_2 - \delta} \int_0^{2\pi} \frac{(a_1^2 - \rho a_1 \cdot \cos \varphi) d\varphi}{(\rho^2 + a_1^2 + d^2 - 2\rho a_2 \cdot \cos \varphi)^{3/2}} \rho d\varphi. \quad (11)$$

Заметим, что, как правило, $M_{12}=M_{21}=M$. Коэффициентом связи катушек называется величина:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}. \quad (12)$$

Исследуем зависимость коэффициента связи катушек от расстояния, изображенную на рисунке 6. Для этого рассмотрим две одинаковые катушки с радиусом катушек $a_1=a_2=0.1$ м и количеством витков $n_1=n_2=100$ [56, 57]. При этом собственная индуктивность каждой из катушек составит $L_1=L_2=8.775$ мГн.

График останется постоянным, если одновременно на одинаковую величину изменить число витков в обеих катушках, либо радиус обеих катушек. Коэффициент связи удобно выражать в процентах. Из графика видно, что даже при расстоянии между катушками в 1 мм коэффициент связи меньше 100%. Коэффициент падает до 10% на расстоянии порядка 60 мм, и до 1% на 250 мм.

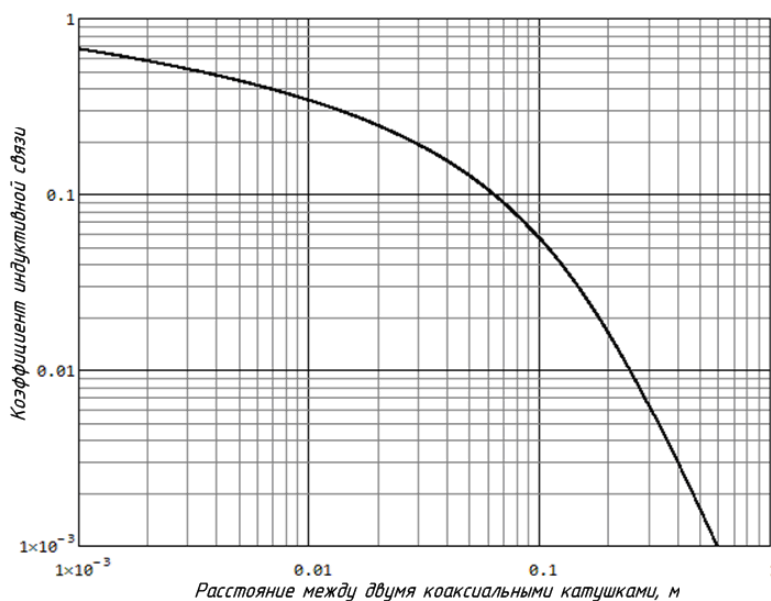


Рисунок 6 - График зависимости коэффициента связи катушек от расстояния между ними

На рисунке 7 показана глубина проникновения, зависящая от частоты (морская вода – синий цвет ($\sigma = 4 \text{ См/м}$) и пресная – оранжевый цвет ($\sigma = 0,01 \text{ См/м}$).

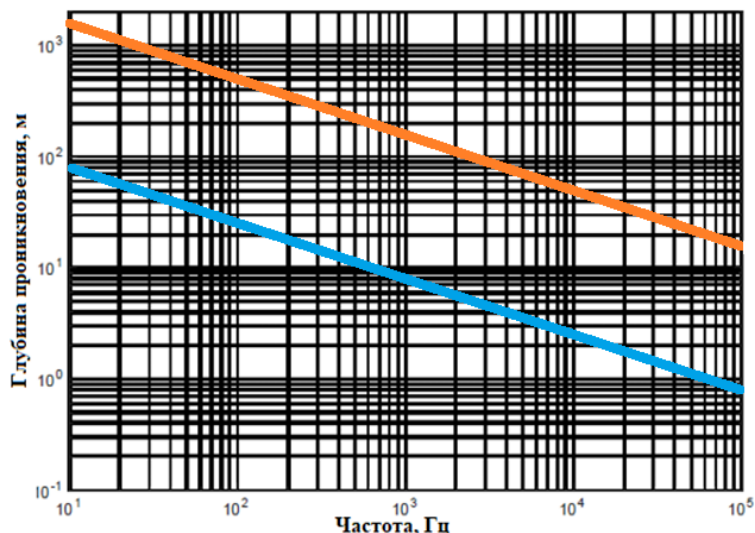


Рисунок 7 - Графики зависимости глубины проникновения МИ-сигнала от частоты в морской и пресной воде

Соответственно, известны индуктивности и коэффициент связи. Используя теорию электрических цепей переменного тока для поиска оптимальных параметров, при которых передаваемая мощность оказалась бы максимальной. Как известно из теории цепей, две индуктивно-связанные катушки образуют воздушный трансформатор, схема которого изображена на рисунке 8. Для анализа трансформаторов удобна Т-образная схема замещения [47].

Передающую катушку слева будем условно называть «трансммиттер», а принимающую катушку справа - «ресивер». Между ними существует коэффициент связи k . На стороне ресивера находится потребитель, представленный нагрузкой z_L .

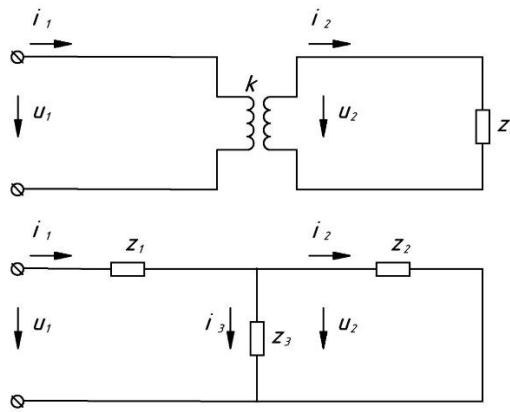


Рисунок 8 - Эквивалентная схема воздушного трансформатора

Нагрузка в общем случае может быть комплексной. Входное напряжение на стороне трансмиттера u_1 , а входной ток - i_1 . Напряжение, передаваемое на ресивер - u_2 , и передаваемый ток i_2 . Полный импеданс на стороне трансмиттера обозначим как z_1 , а полный импеданс на стороне ресивера z_2 .

$$z_1 = r_1 + jx_1, \quad (13)$$

$$z_2 = r_2 + jx_2, \quad (14)$$

где r_1, r_2 - полные активные сопротивления на стороне трансмиттера и ресивера соответственно; x_1, x_2 - полные реактивные сопротивления.

Импеданс связи равен:

$$z_3 = j\omega M = jx_3, \quad (15)$$

где ω - угловая частота передаваемого сигнала.

Комплексная мощность, переданная на ресивер:

$$s_2 = p_2 + jq_2, \quad (16)$$

где p_2 - активная компонента мощности; q_2 - реактивная компонента мощности.

Рассмотрим задачу передачи максимальной активной мощности:

$$p_2 \rightarrow \max \Rightarrow \left| \frac{z_3}{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3} \right|^2 \rightarrow \max. \quad (17)$$

Эта задача имеет несколько решений. Первое решение, при начальных условиях $x_1=x_2=-x_3$:

$$p_2 = \frac{|u_1|^2 x_3^2 r_2}{(r_1 r_2 + x_3^2)^2}, \quad (18)$$

$$q_2 = \frac{|u_1|^2 x_3^3}{(r_1 r_2 + x_3^2)^2}. \quad (19)$$

В практическом варианте рассмотрения функции $p_2(x_3)$ - она достигает максимума при $x_3 = \sqrt{r_1 r_2}$, тогда верны следующие выражения [7]:

$$p_2 = \frac{|u_1|^2}{4r_1}, \quad (20)$$

$$q_2 = \frac{|u_1|^2}{\sqrt{r_1 r_2}}. \quad (21)$$

Второе и третье решения, при условии $x_3^2 > r_1 r_2$ будут иметь вид:

$$p_2 = \frac{|u_1|^2}{4r_1}, \quad (22)$$

$$q_2 = \frac{|u_1|^2 x_2}{4r_1 r_2}. \quad (23)$$

Реактивные сопротивления для первого решения находятся из выражений:

$$x_1 = \frac{1}{r_2} \left(\sqrt{r_1 r_2 (x_3^2 - r_1 r_2)} - r_2 x_3 \right), \quad (24)$$

$$x_2 = \frac{1}{r_1} \left(\sqrt{r_1 r_2 (x_3^2 - r_1 r_2)} - r_1 x_3 \right). \quad (25)$$

Для второго решения реактивные сопротивления рассчитываются по формулам [8]:

$$x_1 = \frac{1}{r_2} \left(\sqrt{r_1 r_2 (x_3^2 - r_1 r_2)} - r_2 x_3 \right), \quad (26)$$

$$x_2 = \frac{1}{r_1} \left(\sqrt{r_1 r_2 (x_3^2 - r_1 r_2)} - r_1 x_3 \right). \quad (27)$$

Потери передаваемой мощности на распространение МИ-волны в водной среде рассчитываются по формуле [47]:

$$PL_{SW} = PL_{MI} + PL_{\alpha}, \quad (28)$$

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.

$$PL_{MI} = -10 \log \frac{R_L \omega^2 M^2}{R_{TX} (R_L + R_{RX})^2 + R_{TX} (X_L + \omega L_{RX})^2}, \quad (29)$$

где R_{TX} и R_{RX} - активные сопротивления передающей и приёмной антенн (r_1 и r_2); R_L - общее активное сопротивление приёмной системы; L_{RX} - индуктивность приёмной антенны.

В общем случае сопротивление катушки (антенны) определяется как:

$$R = \frac{N \cdot 2\pi \cdot a \cdot \rho}{A}, \quad (30)$$

где N - число витков катушки; a - радиус катушки; ρ - удельное электрическое сопротивление; A - площадь поперечного сечения провода.

Индуктивность катушки (антенны) определяется как:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}, \quad (31)$$

где μ - магнитная проницаемость среды (для воды $\mu=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); l - длина соленоида.

Общий импеданс приёмной системы равен:

$$Z_L = R_L + jX_L, \quad (32)$$

$$Z_L = R_{RX} + \frac{\omega^2 M^2 R_{TX}}{R_{TX}^2 + \omega^2 L_{TX}^2} + j \left(\frac{\omega^3 M^2 L_{TX}}{R_{TX}^2 + \omega^2 L_{TX}^2} - \omega L_{RX} \right), \quad (33)$$

где L_{TX} - индуктивность передающей антенны.

Взаимную индуктивность между двумя катушками можно рассчитать, как:

$$M = \frac{\mu \cdot N_{TX} \cdot a_{TX}^2 \cdot N_{RX} \cdot a_{RX}^2 \cdot \pi}{2\sqrt{(a_{TX}^2 + r^2)^3}}, \quad (34)$$

где a_{TX} и a_{RX} - радиусы катушек передатчика и приемника соответственно; N_{TX} и N_{RX} - число витков катушек передатчика и приемника, соответственно; r - расстояние между ними (от центра катушек в направлении оси z).

$$PL_\alpha = 20 \log(e^{ar}) = 8,69ar. \quad (35)$$

Ослабление (коэффициент затухания), обратное к поверхностному эффекту, рассчитывается по формуле [9]:

$$\alpha = 1 / \delta = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} , \quad (36)$$

где - где σ - электрическая проводимость среды; f - частота передаваемого сигнала.

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

$$P_{RX} = P_{TX} - PL_{SW} . \quad (37)$$

На рисунке 9 [47] представлены графики затухания сигнала в зависимости от количества витков (катушек передатчика и приемника) и частоты для пресной и морской воды. Дальность передачи составляет 4,5 м, а радиус излучающей и приемной катушек составляет 1 м. Потери в морской воде больше по сравнению с пресной водой (она выше на 57,7% в морской воде на $f=1$ кГц и $N=400$).

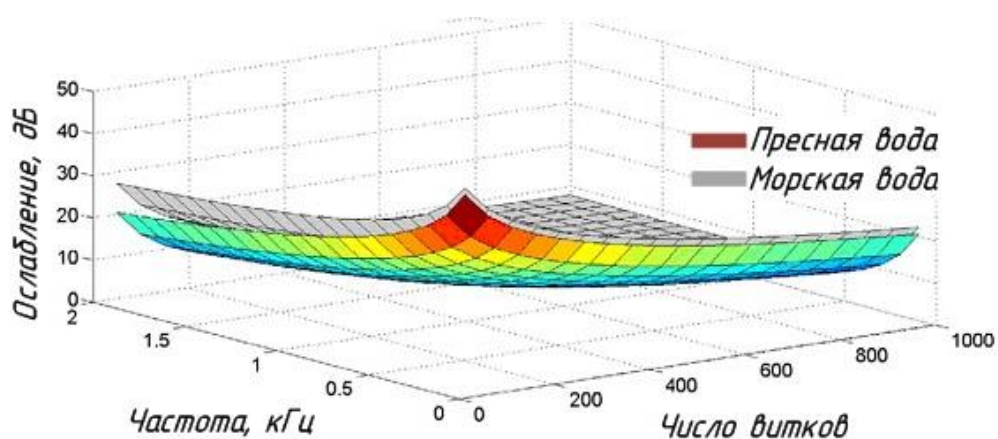


Рисунок 9 – График ослабления сигнала МИ-связи в зависимости от частоты и числа витков

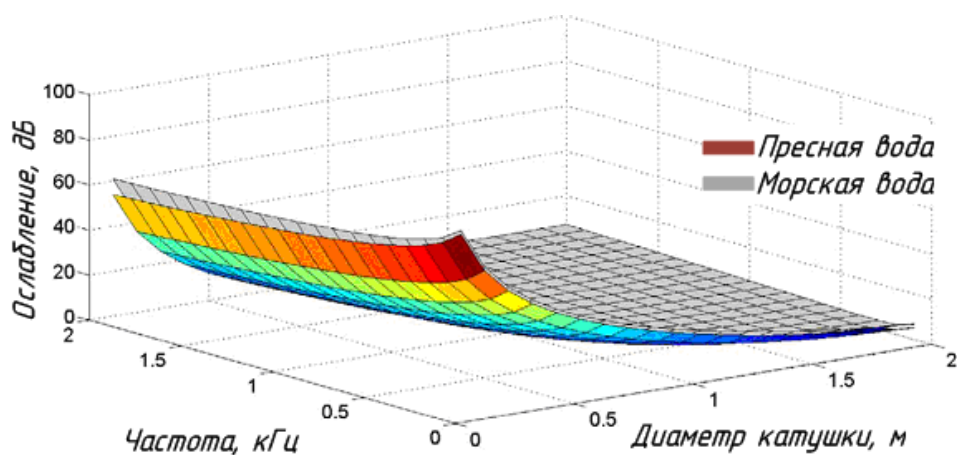


Рисунок 10 – График потерь сигнала МИ-связи в зависимости от частоты и радиуса катушки

На рисунке 10 показаны потери сигнала в зависимости от радиуса (излучающей и приемной катушек) и рабочей частоты для пресной и морской воды. Дальность передачи составляет $4,5$ м, а число витков катушек передатчика и приемника равно 1000 . Мы видим, что потери уменьшаются с увеличением радиуса катушки и частоты. Для больших радиусов катушек существует низкая зависимость между потерями на трассе и частотой. Потери в морской воде также больше по сравнению с пресной водой (в морской воде в $1,8$ раза выше для $f=1$ кГц и $a=1$ м) [19].

Разрабатывая МИ-канал связи, за основу была взята идея, представляющая передачу и прием информации осуществляющийся с помощью пар катушек небольших размеров, как показано на рисунке 11.

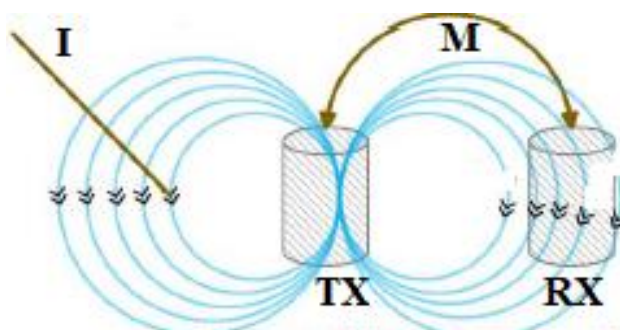


Рисунок 11 - МИ система передачи данных

Для увеличения дальности приема можно использовать систему связи подводной, многоэтапной ретрансляции, состоящую из приемопередатчиков МИ. Данная схема позволит сохранять целостность передаваемых данных, при низком значении потерь на трассе. Также в перспективе снизить и энергозатраты с помощью точек реле. Данные релейные катушки образуют волновод МИ, который направляет магнитоиндуктивные волны. На рисунке 12, показана схема данного волновода.

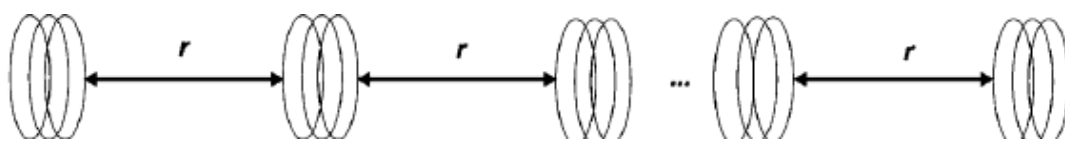


Рисунок 12 - Схема магнитоиндукционного волновода

Концепция связи основана на том, что магнитный поток, создаваемый изменяющимся со временем током в одной катушке, связывается со своими непосредственными соседями, чтобы вызывать дополнительные токи, в свою очередь, индуцирующие дополнительные токи в своих соседях. Повторяющиеся отношения между токами приводят к распространяющейся волне.

2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРАКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Благодаря преимуществам, таким как: высокая скорость распространения сигнала; достаточная степень скрытности ведения связи и предполагаемой низкой стоимостью оборудования, МИ-коммуникации имеют потенциал для применения в различных сферах деятельности. На сегодняшний день разработано немало технических систем на основе МИ-связи для решения различных задач в условиях моря.

Раннее прогнозирование возможности стихийных бедствий с помощью МИ-коммуникации. Различным видам деятельности на море угрожают потенциальные стихийные бедствия, такие как тайфуны, цунами и подводные землетрясения. Подводные системы на основе МИ-связи могут найти применение в создании оперативных и надежных систем обнаружения, предупреждения бедствий. Например, группой инженеров под руководством С. Киселёва [52] спроектирована беспроводная сенсорная сеть на основе МИ с реконфигурируемыми возможностями для раннего обнаружения бедствий. Численные результаты показали очень хорошую производительность с точки зрения времени уведомления и потери пропускной способности. Решена проблема неоднозначности оценки канала, используя предложенный метод МИ-связи, и рассмотрена возможность оперативного обмена данными в созданной сети, путем изменения параметров резонансной частоты.

Оборонное применение. Проведение подводных специальных операций обычно носит скрытный характер действий, чтобы избежать обнаружения. Принимая во внимание низкую степень детектирования подводной связи с использованием МИ, имеется ряд технических решений обеспечения специальных операций, таких как, обмен информацией между автономными необитаемыми подводными объектами и подводными лодками [38].

Мониторинг на основе подводных беспроводных сенсорных сетей. Развертывание многочисленных датчиков в море для формирования подводных беспроводных сенсорных сетей (ПБСС) является важным способом мониторинга физического, химического и биологического состояния моря. Поскольку затраты на внедрение и потребление энергии катушек МИ, как правило, невелики, устройства на основе МИ являются хорошим выбором для создания крупномасштабных и долгосрочных ПБСС.

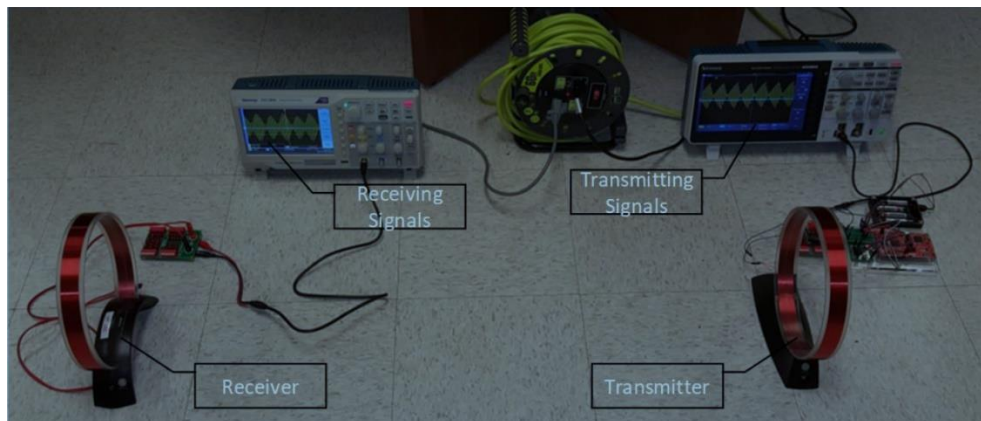
В последние десятилетия было проведено немало экспериментов и разработаны испытательные стенды для изучения методов передачи данных в водной среде. Например, Дж. Сойдехей и его коллеги в 2001 году разработали низкочастотную систему с МИ для организации связи на мелководье [40]. Они провели несколько испытаний в прибрежных районах, в которых скорости передачи данных $100...300 \text{ бит/с}$ наблюдались в диапазоне $250...400 \text{ м}$ в граничных условиях сред (воздух-вода). Была разработана и усовершенствована МИ концепция связи: сигнализации и навигации аппаратных средств, которые используют квазистатические переменные магнитные поля в качестве канала. Физические свойства магнитных полей позволяют этим системам работать через любые естественные границы сред.

В 2010 году команда инженеров из Великобритании под руководством И. Боги разработала систему передачи голоса дайвера на основе МИ-связи [36], где была успешно достигнута дальность передачи 30 м от поверхности воздуха до подводного дайвера на несущей частоте 12 кГц . Система связи основана генерации сильного переменного магнитного поля в качестве несущей, которая модулируется на звуковой частоте. Утверждается, что данный метод не зависит от границы раздела воздух-вода.

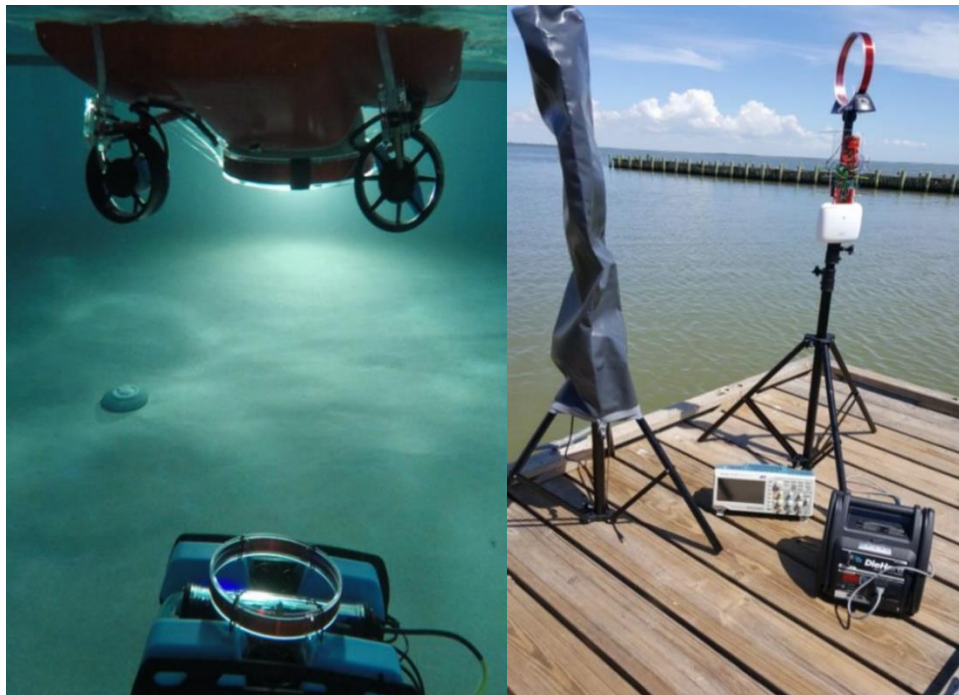
Недавно группа китайских инженеров Д. Вэй и его коллег для разработки прототипа МИ-приемопередатчика использовала МИ-катушки, универсальное программное радиоустройство и микроконтроллер *MSP432* [18]. Взяв за основу для управления трансиверами дистанционно управляемое транспортное

средство и лодку с дистанционным управлением, они успешно провели испытания МИ-связи как в пресной, так и в морской воде.

В дополнение к вышеупомянутым экспериментам и испытательным стендам, перспективы использования подводных систем коммуникации с помощью МИ подтолкнули к проведению многочисленных исследований для решения различных инженерных проблем, как с теоретической, так и с технической точек зрения.



а)



б)

в)

Рисунок 13 - Аппаратное исполнение системы тестирования методов МИ-связи:

а) - воздушное испытание; б) - испытание в бассейне; в) - морские испытания

Сотрудники Школы морской науки и техники Северо-Западного политехнического университета г. Сиань (КНР) в своей статье [14] представили результаты теста МИ-связи для объектов, расположенных в воздушной и водной средах, изображенных на рисунке 13. Смоделирована взаимосвязь между напряженностью магнитного поля и различными факторами, такими как расстояние и частота сигнала, и результаты измерений показывают, что частота и передающий магнитный момент оказывают большое влияние на характеристики МИ-канала, следовательно, и на глубину проникновения. 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. Полученные результаты доказывают эффективность методов МИ-связи для систем коммуникации между воздушной средой и средой моря.

Авторы Чжанюй Ли и Чжи Сун [35] в этой статье предлагают оптимизированную конструкцию антенной системы МИ-связи на основе активных элементов. Посредством аналитического расчета получается структура в виде массива катушек, которая оптимизирует производительность всей системы, поскольку существующие системы МИ-связи полагаются на высокую мощность передачи и большую антенну для достижения практического диапазона связи. Результаты показывают, что активная антенная система с оптимизированной конструкцией может увеличить мощность сигнала, обеспечив дальность связи примерно до 28 м, которая может повысить уровень сигнала исходной антенной системы до 30 дБ. Это является существенным улучшением по сравнению с пассивной антенной системой, практическая реализация системы которой достигает только 8 дБ усиления уровня сигнала. Антенная система, представленная на рисунке 14, оптимизирована благодаря

специальной структуре размещения катушек и физических параметров канала благодаря аналитическому выводу и моделированию в среде *COMSOL*.

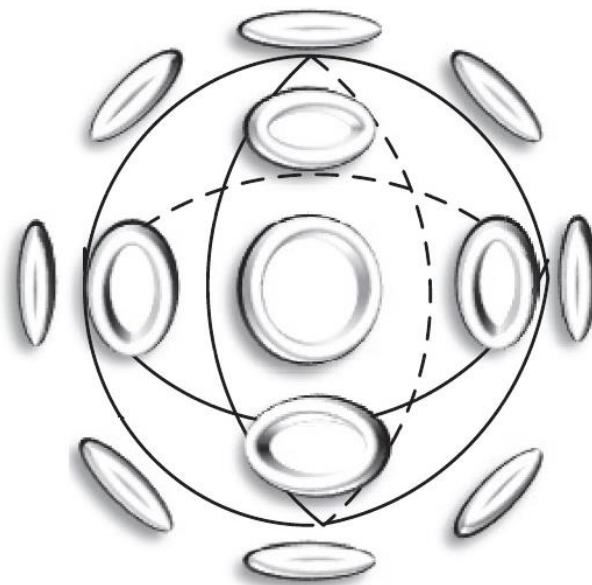


Рисунок 14 - Предлагаемая конструкция активной МИ-антенны с массивом катушек

Благодаря этим исследованиям удалось значительно продвинуться в познании принципов и применения подводной связи с помощью МИ. Тем не менее, было опубликовано очень мало статей для обзора этой темы и ее достижений.

Институтом физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск) [1] 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 на основе электромагнитных волн неэффективны.

Рассмотрены варианты построения передатчиков с непосредственным подключением усилителя мощности к передающей катушке и с подключением через согласующий трансформатор. Приведены преимущества и недостатки

представленных вариантов построения передатчиков, показаны возможности их практического использования.

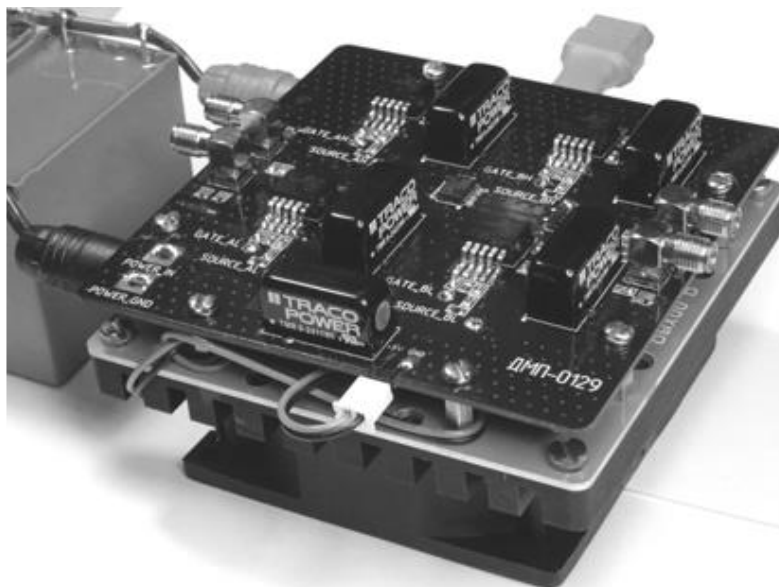


Рисунок 15 - Фотография усилителя мощности передатчика системы ближнепольной магнитной связи

Практическую реализацию эта система нашла в усилителе мощности, изображенный на рисунке 15 который производится предприятием АО «НПП «Радиосвязь». Параметры усилителя мощности позволяют обеспечить работоспособность при предельных условиях: напряжениях до 150 В , токах до 100 А , частотах до 200 кГц .

В книжных изданиях В.И. Хомича [3] упоминается разработка передающей ферритовой антенны для спасательного морского аварийного передатчика, антенна которого, представлена на рисунке 16.

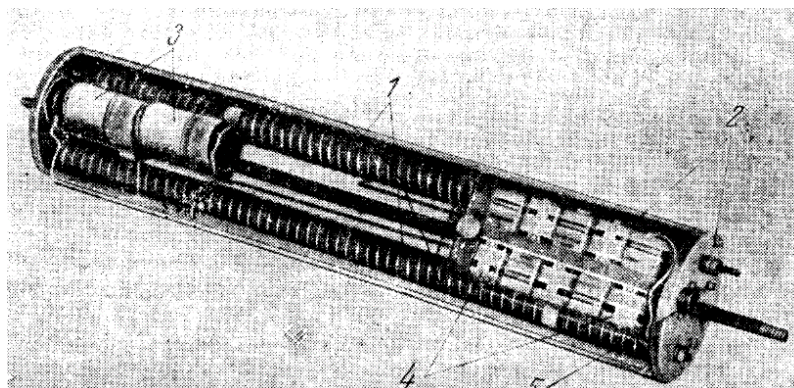


Рисунок 16 - Спасательный передатчик с магнитной ферритовой антенной:

1 - ферритовые антенны; 2 – корпус; 3 – батареи; 4 - детали генератора; 5- подстроечный штифт

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 час* и отыскание его в радиусе до *10 км*. Длина изделия *0,5 м*, диаметр *0,1 м*, масса *3,6 кг*.

Авторы в [11] описали некоторые основные принципы МИ-коммуникаций и представили несколько открытых вопросов, связанных с проектированием системы. В этой статье предпринята попытка охватить все существующие исследования в области подводной связи с использованием МИ. Результаты изучения МИ-связи подтвердили возможность организации стабильных каналов передачи данных в водной среде на расстояние до *100 м*, с полосой пропускания *2 кГц*, на частоте *200 МГц*, со скоростью передачи данных порядка *1 Мбит/с*, применяя различные способы обработки сигнала.

Помимо изучения, анализа и проведения экспериментов российская компания «Хай Тек» г. Москва официально заявила, что разработала технологию подводной радиосвязи, которая позволяет передавать сигнал на поверхность [4], представленная на рисунке 17. Производственная компания «*IVA Technologies*» объявила о завершении испытаний портативной подводной радиостанции, работающая на принципах передачи данных магнитной составляющей электромагнитной волны [4]. Серийное производство намечено на 2021 г.

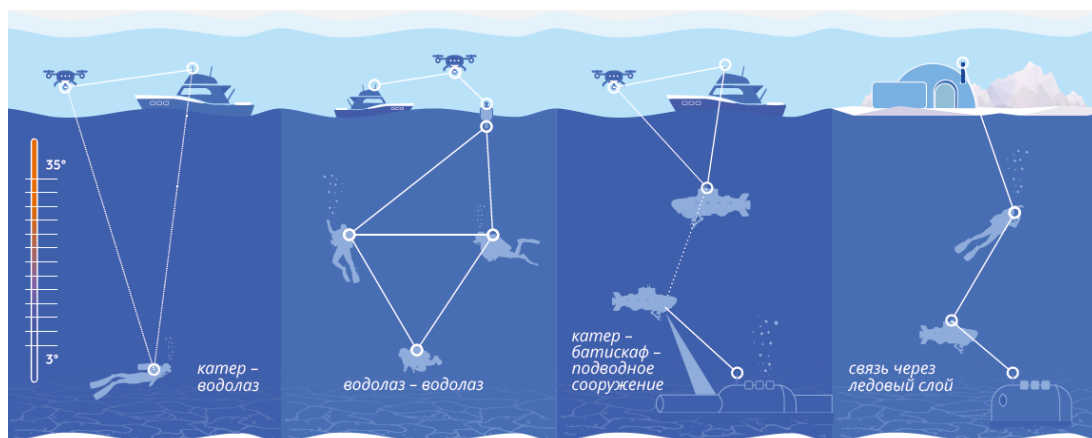


Рисунок 17 - Применение подводной радиостанции IVA S/W

Радиостанция обеспечивает передачу данных на расстояние 500 м и глубине погружения до 100 м , для условий гидрологических неоднородностей и между средами дальность связи составляет 60 м . Чувствительность приёмника $0,6\text{ мкВ}$, мощность передатчика 5 Вт , масса оборудования 4 кг .

При проектировании этой технологии были использованы наработки приморских ученых Рублёва Виктора Петровича [5] и Шибкова Анатолия Николаевича [6]. В работе Рублёва В.П. рассмотрена система подводной радиотелефонной связи, представленная на рисунке 18, и предназначенная для симплексной связи между аквалангистами и обеспечивающим судном, в которой применен принцип модуляции электрического токового поля, состоит из двух полуккомплектов.



Рисунок 18 - Конструкция подводного переговорного устройства для легководолазов

Она обладает следующими техническими характеристиками: дальность связи (в режиме «аквалангист - аквалангист») 70 - 80 м; на мелководье (глубины до 20 м) - более 100 м. Связь между берегом (судном) и аквалангистами - более 150 м. Возможна связь непосредственно с береговой чертой. Рабочая полоса частот 300...3000 Гц, чувствительность приемника 0,5 мкВ, потребляемая мощность в режиме приёма до 0,72 Вт, в режиме передачи - до 96 Вт.

В работах Шибкова А.Н. [7, 9] изложено теоретическое обоснование возможности создания системы, обеспечивающей в типичных условиях для водной и воздушной сред применение речевой и кодовой связи. При мощности в антенне 0,125 Вт можно обеспечить связь между водолазом на дне и обеспечивающим судном с антенной на поверхности на расстояние до 250 м (глубина места 30 м).

В данной работе была проверена и протестирована система беспроводной связи нефтепровода на основе специальной конструкции магнитной антенны. Мы самостоятельно разрабатываем и проектируем аппаратную схему и выполняем цифровую модуляцию и демодуляцию 2ASK на языке Verilog. Фактические результаты испытаний показывают, что эта система может осуществлять беспроводную связь через металлическую трубу и морскую воду. Эта система имеет преимущества стабильной работы, простоты реализации, оптимальной производительности и так далее. Таким образом, эта система имеет определенный ориентир для передачи информации по нефтепроводу под водой.

Также имеется еще одна интересная статья китайских студентов, очень похожая на нашу научную проект, только с другим видом манипуляции, в которой предлагается создать систему, предназначенную для реализации связи по водопроводу и металлическому трубопроводу. Система связи состоит из магнитной антенны и программного обеспечения, использующего технологию модуляции и демодуляции 2ASK.

Поскольку магнитный сигнал имеет более сильную способность проникать через воду и металлический трубопровод, чем электромагнитный сигнал, они проектируют и реализуют подводную систему беспроводной связи с магнитной антенной в качестве антенны связи для улучшения качества беспроводной связи.

Система беспроводной связи состоит из излучательной части: главного компьютера (ПК), модуля цифровой модуляции, модуля преобразования ЦАП, усилителя мощности и антенны. Компьютер загружает переданные данные в модуль цифровой модуляции через последовательный порт. Во-вторых, модуль модуляции генерирует данные модуляции 2ASK. Затем ЦАП преобразует цифровой сигнал 2ASK в аналоговый сигнал и выводит его на усилитель мощности. Сигнал мощности с выхода усилителя мощности передается в канал с помощью магнитной антенны.

Приемная часть состоит из магнитной антенны, компьютера, приемника, модуля преобразования АЦП и модуля цифровой демодуляции. Сначала беспроводной сигнал, полученный из канала магнитной антенной, передается в модуль приемника. Далее в модуле приемника слабый сигнал фильтруется и усиливается, затем усиливается с помощью технологии АРУ (автоматическая регулировка усиления) и передается в модуль АЦП. Модуль АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой и передает сигнал в модуль цифровой демодуляции. В модуле цифровой демодуляции цифровой сигнал выполняет цифровую фильтрацию, выравнивание каналов, демодуляцию и восстановление исходного сигнала. Наконец, сигнал демодуляции передается на главный компьютер через последовательный порт и отображается на главном компьютере.

В схеме усилителя мощности основное внимание уделяется не только усилению напряжения и входному и выходному сопротивлению, но и искаженной (или менее искаженной) выходной мощности. Усилитель сигнала спроектирован на основе высокопроизводительного операционного усилителя с биполярным входом Texas Instruments OPA 1611.

Чтобы получить лучшую производительность фильтра, разработан полосовой активный фильтр Баттерворта 8-го порядка с полосой пропускания 20 кГц.

Также автором была показана цилиндрическая антенна с двумя катушками, представленная на рисунке 19, и имеющая одинаковое число витков катушки, но противоположное направление намотки.

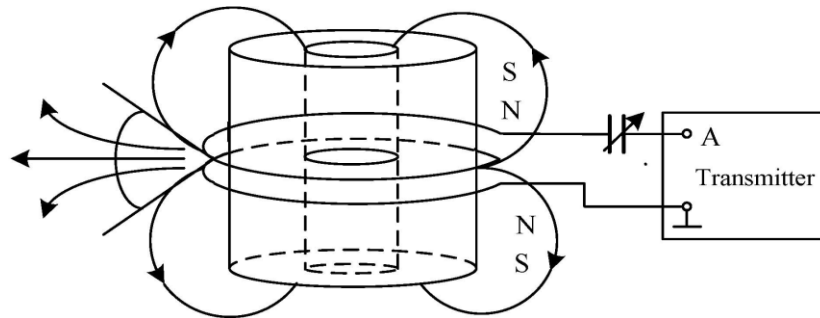


Рисунок 19 - Структура разработанной магнитной антенны

Когда на нее подается переменное напряжение, две катушки с противоположным направлением намотки будут создавать противоположную петлю магнетизма и создавать сильное направленное магнитное поле в центре двух катушек. На рисунке 20 изображена осциллограмма модуляции сигнала 2ASK.

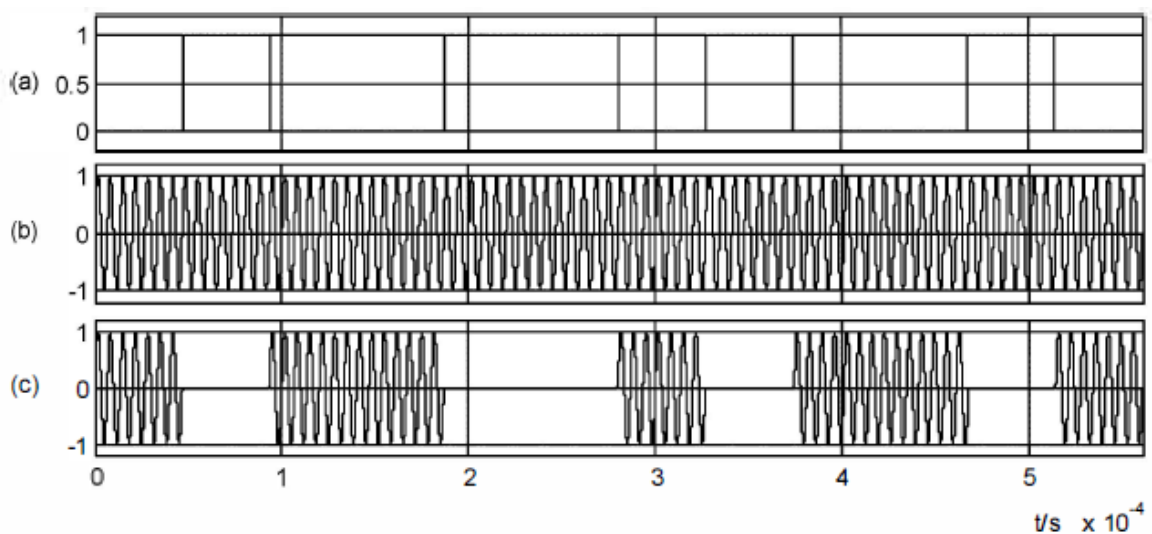


Рисунок 20 - Процесс модуляции сигнала 2ASK

Также был осуществлен процесс демодуляции, где собранный цифровой сигнал 2ASK умножает локальную несущую, и получается цифровой сигнал, удвоенный исходной частотой сигнала модуляции, затем полученный цифровой сигнал проходит через фильтр нижних частот.

В итоге перед испытаниями в воде передатчика было запечатано и помещено в металлическую трубу уплотнения, катушечная антенна была принята в качестве приемной, и произведен тест на передачу информации под водой. Было отправлено 863 кадра данных, информационных символов было 7767, при этом мы получили 7767 символов. В процессе связи не было потери заголовка кадра из-за блокировки и потерянных кадров. Заголовок кадра кода Баркера может каждый раз правильно демодулироваться. Как утверждает автор, согласно статистическим результатам, в полученных 7767 символах ошибок не было.

3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостатками систем МИ-связи являются - узкая полоса пропускания сигнала, ограниченная дальность его передачи и высокая чувствительность катушки. На рассмотрение этих фундаментальных вопросов необходимо сосредоточить внимание для дальнейшего развития и применения подводной связи с использованием МИ.

Проводимые исследования по изучению МИ, а также по проектированию полноценной системы связи, можно разделить на несколько задач, а именно:

- моделирование МИ системы для условий водной среды;
- общий анализ вопросов повышения качества канала связи (достоверность, надёжность, оперативность);
- расширение частотного диапазона;
- увеличение пропускной способности.

Для повышения емкости канала необходимо учесть, что скорость передачи данных при величине $Mбит/с$ теоретически достижима для МИ-связи, их эффективная полоса пропускания и пропускная способность канала практически полностью ограничены в большинстве сценариев подводной передачи, в пределах $100 кГц$ и $100 Кбит/с$ соответственно [47]. Причин этому несколько. Во-первых, даже небольшое отклонение от оптимальной рабочей частоты катушки может вызвать значительное падение действующих значений мощности и, следовательно, приводит к более узкой эффективной ширине. Во-вторых, системы МИ-связи должны работать на низких частотах, чтобы снизить уровни затухания передаваемого сигнала, обусловленные вихревыми токами в морской воде с высокой проводимостью.

Также при проектировании МИ систем связи является главным изготовить наиболее эффективный конструктив антенн с высоким уровнем чувствительности. Это позволит вести передачу на дальние расстояния, и получить наибольший уровень излучаемого сигнала.

Следует отметить, что максимальная эффективность канала МИ-связи при использовании катушек индуктивности достигается, если они расположены коаксиально [30]. Если это условие не выполняется, ослабление сигнала, напрямую зависящее от взаимной ориентации катушек, может вырасти до недопустимого уровня, что приведет к ненадежной передаче информации.

При рассмотрении вопросов расширения диапазона необходимо учесть, что согласно теории электромагнитного поля, сила магнитного поля ослабляется с увеличением расстояния передачи информации в шестой степени [34]. С другой стороны, потери на вихревые токи достаточно высоки в подводных условиях и линейно возрастают с увеличением дальности передачи. Эти два факта приводят к резкому скачку потерь на трассе с расстоянием, что резко ограничивает эффективную дальность передачи в соответствии с требованиями обеспечения надежности канала связи. Например, подводная система связи,

которая использует магнитное поле в качестве носителя, имеет максимальный диапазон 30 м при рабочей частоте 500 Гц [47].

Для повышения емкости канала необходимо учесть, что скорость передачи данных при величине $M\text{бит/с}$ теоретически достижима для МИ-связи, их эффективная полоса пропускания и пропускная способность канала практически полностью ограничены в большинстве сценариев подводной передачи, в пределах 100 кГц и 100 Кбит/с соответственно [47]. Существует несколько причин. Во-первых, даже небольшое отклонение от оптимальной рабочей частоты катушки может вызвать значительное падение действующих значений мощности и, следовательно, приводит к более узкой эффективной ширине. Во-вторых, как уже упоминалось ранее, системы МИ-связи должны работать на низких частотах [41]. В следующих разделах данные вопросы будут рассмотрены подробнее, а также будут освещены их современные уровни развития и возможности практического применения.

Оценка канала МИ-связи. Однонаправленные МИ-антенны. Качество канала имеет главное значение для верного детектирования получаемого сигнала в соответствии с теорией связи. Тем не менее, очевидно, что довольно сложно гарантировать эффективную подводную МИ-связь из-за неконтролируемых процессов ослабления сигнала, вызванного часто меняющимися взаимными ориентациями катушек в подводной среде. Одним из конструктивных методов, гарантирующих надежность передачи информации в подводных МИ-системах, является разработка высокоэффективных антенн, нечувствительных к ориентации. Основываясь на перспективных направлениях моделирования МИ-антенн, в данном разделе будет проведен обзор от традиционных однонаправленных МИ-антенн до продвинутых всенаправленных МИ-антенн, включая трехнаправленные (TD) антенны, антенны с применением метаматериалов - композитных материалов, обеспечивающих отрицательные значения магнитной проницаемости (M^2I), сферическую матрицу катушек,

упоминавшуюся ранее, антенны с замкнутым контуром (*SCENL*). При детальном рассмотрении вопросов моделирования высокоэффективных МИ-антенн постараемся выработать общие рекомендации по проектированию антенн для будущих исследований.

Для простоты или в качестве первого шага многие разработчики исследовали процессы передачи МИ-сигнала, предполагая, что оси приемной и передающей катушек перекрываются, например, в [12], [47], [54], [67]. Эти модели с одной переменной могут стать недействительными практически в двумерных (*2D*) или трехмерных (*3D*) сценариях, где обычно имеют место угловые смещения между осями катушек, и, таким образом, только одной переменной недостаточно для описания таких смещенных ориентаций. Поэтому необходимо выяснить, как ориентация катушки влияет на характеристики передачи МИ. В работе [68], рассматривая катушки как за пару магнитных диполей, выведем формулу определения коэффициента поляризации для количественной оценки влияния различных ориентаций катушек:

$$J_{2D} = 2\sin\theta_t \cdot \sin\theta_r + \cos\theta_t \cdot \cos\theta_r, \quad (38)$$

где θ_t и θ_r - углы между радиальными направлениями катушки и линией, соединяющей два центра передающей и приёмной катушек соответственно.

Далее в [54] авторы включили коэффициент поляризации J_{2D} в модели МИ-канала и исследовали емкость двумерных беспроводных подземных сенсорных сетей. Однако уравнение (38) справедливо только тогда, когда оси катушек компланарны, т.е. находятся в одной плоскости.

Для трехмерного пространства авторы [75] качественно оценили работу однонаправленных МИ-приемопередатчиков путем анализа напряженности магнитного поля вокруг МИ-приемника. Полученные результаты показали, что взаимная ориентация оказывают значительное влияние на уровень влияния магнитного поля и, следовательно, мощность принимаемого сигнала. В

продолжение работы [68] в [53] вывели количественный коэффициент поляризации в трехмерном пространстве как:

$$J_{3D} = 2\sin\theta_t \cdot \sin\theta_r + \cos\theta_t \cdot \cos\theta_r \cdot \cos\phi, \quad (39)$$

где ϕ - разность углов между осями катушек в плоскости, которая ортогональна направлению передачи.

В J_{3D} взаимная индуктивность между катушками, может быть переставлена как магнитный момент:

$$M_{3D} = \frac{\mu\pi N_t N_r a_t^2 a_r^2}{4\sqrt{(a_t^2 + d^2)^3}} \cdot J_{3D} = M_{2D} \cdot J_{3D}. \quad (40)$$

Из уравнений (39) и (40) видно, что магнитный момент достигает своего максимума, когда ориентации двух осей перекрывают направление передачи (то есть $\theta_t = \theta_r = \pi/2$ и $\phi = 0$), но уменьшаются до половины максимума, если ориентации двух осей являются компланарными и перпендикулярными (то есть $\theta_t = \pi/2$, $\theta_r = 0$ и $\phi = 0$). Взаимная индуктивность M_{3D} и коэффициент ослабления сигнала не могут стать основными факторами даже для большого значения M_{2D} , если при этом значение J_{3D} очень мало. Как уже отмечалось, в подводной среде приемопередатчики неизбежно колеблются вместе с океанскими волнами, течениями и приливами. Принимая во внимание эти факторы, ориентации осей средств систем связи непредсказуемы и очень динамичны, если они не имеют эффективных средств управления и взаимного юстирования. В результате надежная подводная МИ-связь вряд ли может быть гарантирована для традиционных однонаправленных МИ-приемопередатчиков, поскольку высокая взаимная индуктивность может поддерживаться только в ограниченном и изменяющемся во времени диапазоне ориентации.

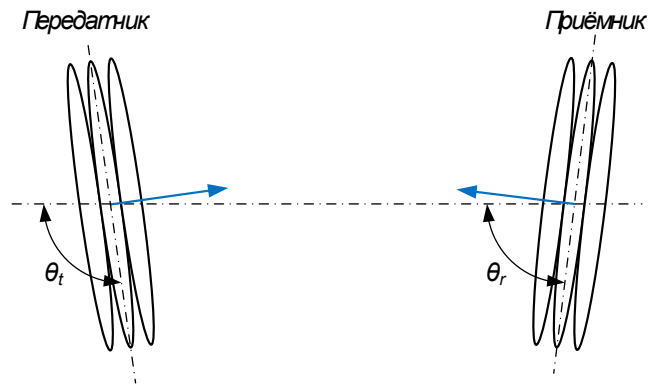


Рисунок 21 - Схема ориентации традиционных однонаправленных антенн

Теперь поговорим о всенаправленных антеннах. Основываясь на приведенном выше анализе, для высоконадежной передачи подводного МИ-сигнала важно поддерживать приемлемое значение J_{3D} даже в сценариях с неблагоприятной ориентацией катушки. Одним из эффективных методов является создание разнонаправленных МИ-антенн путем правильной интеграции нескольких однонаправленных катушек, чтобы гарантировать не зависящее от ориентации магнитную связь между передатчиком и приемником. В оставшейся части этого раздела мы представим три существующих современных всенаправленных МИ-приемопередатчика, разработанных на основе традиционных однонаправленных антенн, а именно трехнаправленные (TD) антенны, МИ-антенны (M^2I) с улучшенными метаматериалами и сферическую антенну-матрицу с замкнутым контуром ($SCENL$).

TD -антенна состоит из трех взаимно-ортогональных катушек. Каждая из трех однонаправленных катушек образует луч вдоль одной из трех осей в декартовых координатах, которые вместе охватывают все трехмерное подводное пространство. В результате независимо от того, как антенна катушки TD вращается в пространстве, надежные магнитные связи между объектами всегда могут быть сохранены. TD -антенна была впервые предложена и рассмотрена коллективом И. Акылдиз, П. Ван и З. Сунн в работе [19], где они численно сравнили производительность использования приемопередатчиков с одной катушкой и использования TD -приемопередатчиков. Результаты показали, что эффективность работы TD -приемника, не зависит от ориентации антенн и

намного лучше, чем у однонаправленной катушки, когда антенна отклоняется от своей оптимальной ориентации. В работе [58] З. Чжан и его коллеги предложили неоднородную структуру МИ-связи, которая состоит из одной направленной передающей катушки и приемной антенны *TD*. Что еще более важно, они теоретически доказали, что мощность принимаемого сигнала изменяется для различных вариантов взаимной ориентации не более чем на одну треть от максимальной мощности передачи. Далее в работе [48], рассматривая случайным образом распределенную структуру МИ-катушек в трехмерном пространстве, был предложен метод определения оптимальной схемы взаимного расположения излучающих элементов исходя из мощности передачи. Однако результаты, полученные в [58] и [48], обеспечивают только рабочие характеристики, ограниченные тем, что может быть достигнуто с использованием приемных *TD*-антенн. Для практического применения и точного управления МИ-системой связи необходимо разработать более точную модель канала применительно к *TD*-антеннам.

С этой целью, основываясь на тщательном анализе теории и практики распространения электромагнитного поля, описанных в [28], [29] разработан расчет параметров канала для подводных систем МИ-связи с *TD*-антеннами. Эта модель учитывает влияние динамической ориентации антенны и характеризует распространение сигнала для различных условий подводной среды.

Несмотря на то, что всенаправленные антенны продемонстрировали потенциал в надежной передаче подводного вида МИ-связи, в сложных подводных условиях остается много проблем. Во-первых, сложно получить точные модели каналов для этих всенаправленных МИ-антенн, учитывая, что подводная среда с учётом потерь создает дополнительное сопротивление для всех МИ-катушек. Кроме того, когда несколько катушек вводятся для увеличения магнитного поля или диапазонов покрытия, они также вызывают значительные взаимные влияния между собой, что, в свою очередь, может ухудшить надежность передачи. В результате модель канала становится намного более сложной, когда учитываются эффекты взаимного влияния.

Расширение частотного диапазона каналов связи. Другой фундаментальный вопрос исследования заключается в том, как максимально эффективно передавать данные при подводной связи с использованием МИ. Среди всех показателей эффективности важным является эффективное расстояние передачи, которое имеет решающее значение для работы под водой на значительном удалении и с большим объёмом данных, таких как удаленный мониторинг подводных объектов. Как уже упоминалось, дальность передачи подводных сообщений МИ-методом довольно ограничена, потому что ослабление магнитного поля и потери на вихревые токи резко возрастают с увеличением расстояния [24]. Как распространенный метод расширения диапазона передачи, построение сетей ретрансляции сигнала передачи МИ-методом посредством развертывания ретрансляторов между передатчиком и приемником широко изучалось в литературе. В зависимости от того, нужны ли ретрансляторам дополнительные источники питания и процессорные устройства или нет, передаваемая с помощью МИ информация может быть реализована двумя способами, а именно, посредством МИ-волновода и активная ретрансляционная сети. В этом разделе мы последовательно рассмотрим основные принципы и современные достижения этих двух типов и методов ретрансляции. Кроме того, мы определим возможность гибридной схемы ретрансляции при достижении как энергосберегающих, так и дальних подводных передач.

Волноводные методы передачи. В области техники связи термин волновод относится к определенной линейной или нелинейной структуре, которая способна передавать физические волны между приемопередатчиками. Авторами в работах [67] и [62] были впервые рассмотрены волноводы в МИ-коммуникации для преодоления узких диапазонов частот. Сравнивая с традиционными методами ИМ, авторы пришли к выводу, что внедрение волновода в подземной

системе ИМ может снизить потери на трассе и, следовательно, увеличить расстояние передачи независимо от уровня содержания воды в почве.

Канальная модель для связи с МИ-волноводом в последние годы получила широкое развитие благодаря теории эквивалентных цепей [26], [47], [66], [67], [68]. В большинстве этих работ волновод МИ моделируется как многоступенчатый трансформатор. Для удобства анализа обычно предполагается, что все катушки имеют одинаковые параметры (то есть радиус и число витков), и, таким образом, взаимная индукция M между любыми двумя соседними катушками одинакова. Для эффективной передачи магнитных сигналов значение конденсатора C должно быть определено соответствующим образом, чтобы сделать каждую катушку резонансной, т. е.

$$j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = L. \quad (41)$$

На основе теории линий передачи [67], чтобы минимизировать общие потери на трассе, импеданс нагрузки на приемнике Z_L должен равняться комплексному сопряжению выходного импеданса на конце порта u .

При взаимной индуктивности M , импедансе Z катушки и согласованном импедансе Z_L нагрузки, мощность P_T передачи и мощность P_R приема могут быть легко получены рекурсивным способом (способ обращения выражения к самому себе). Из [67] потери на трассе волноводной системы МИ-связи в среде могут быть выражены как:

$$PL_{MI-WG} = -10 \log \frac{P_R}{P_t} \cong 10 \log \frac{4(Z_{n-1,n} + R)}{R} + 20 \log \zeta \left(\frac{R}{\omega M}, n - 1 \right), \quad (42)$$

где $Z_{n-1,n}$ - отраженное сопротивление n -ой катушки на $(n - 1)$ катушке;

$\zeta \left(\frac{R}{\omega M}, n - 1 \right)$ - рекурсивная функция, составленная из $(n - 1)$ полиномов

порядка от $\frac{R}{\omega M}$, которая количественно определяется как:

$$\zeta\left(\frac{R}{\omega M}, n - 1\right) = b_{n-1}\left(\frac{R}{\omega M}\right)^{n-1} + b_{n-2}\left(\frac{R}{\omega M}\right)^{n-2} + \dots + b_2\left(\frac{R}{\omega M}\right)^2 + b_1\left(\frac{R}{\omega M}\right)^1, \quad (43)$$

где $\{b_i, i = 0, 1, 2, \dots, n - 1\}$ - множество коэффициентов участвующих многочленов в формуле, каждый из которых является константой для данного номера узла n .

Впоследствии, принимая во внимание потери на вихревые токи, общие потери на трассе подводной волноводной системы МИ определяются как:

$$PL_{UMI-WG} = PL_{MI-WG} + PL_{EC-WG}, \quad (44)$$

где PL_{EC-WG} представляет потерю на пути вихревых токов в подводной среде и количественно определяется как [27]:

$$PL_{EC-WG} = 20 (n - 1) \log e^{or} = 20 (n - 1) \log e^{r\sqrt{(\pi f \mu \sigma)}}. \quad (45)$$

В формуле r обозначает интервал между двумя соседними узлами. Исходя из этого, общее расстояние передачи равно $(n - 1) \cdot r$.

Как правило, дальность связи волноводной МИ-системы может быть дополнительно расширена за счет развертывания большего количества пассивных узлов ретрансляции сигнала, а потери в тракте также могут быть снижены за счет уменьшения дистанций между узлами. Однако увеличение количества катушек ретрансляторов, в свою очередь, приведет к дополнительным потерям сопротивления, и плотно располагающиеся катушки также могут вызвать серьезные перекрестные помехи среди несмежных катушек. Поэтому важно понимать, как развертывание ретрансляторов влияет на производительность подводных МИ-волн и как количественно оценить эти воздействия.

Таблица 1 - Примеры работ по моделированию МИ-волноводов

Ссылки	Топология	Сущность	Допущенные ограничения
[67]	Линейно равноудаленная	Рассмотрена модель канала для подземных волноводных МИ-систем	Без учета влияния несмежных перекрестных помех
[47]	Линейно равноудаленная	Рассмотрена модель канала для подводных волноводных МИ-систем	Без учета влияния несмежных перекрестных отклонений взаимного расположения
[60]	Линейно равноудаленная	Рассмотрена проблема минимизации количества ретрансляторов	Без предоставления количественных решений
[67]	Линейно равноудаленная	Разработка испытательного стенда для МИ-волновода	Дальность передачи довольно ограничена
[45]	Нелинейная	Предложены три нелинейных кооперативных волноводных конфигураций МИ-канала	Без учета влияния несмежных перекрестных помех и вихревых токов
[66]	Плоская сеть	Рассмотрены два алгоритма для построения связанных МИ-сетей датчиков	Без оценки сходимости и сложности вычислений алгоритмов
[12]	Трехмерная сеть	Подтвердить потенциал формирования подводной полноценной трехмерной сети	Без учета влияния движущихся катушек и механизма вещания

В настоящее время были проведены обширные работы по исследованию связи с помощью волноводного МИ-метода с использованием сети ретрансляторов. В [47] и [67] авторы вывели зависимости потерь на трассе от количества катушек и дистанции между ними в подземных и подводных волноводных МИ-системах. В обоих сценариях численные результаты показали, что эффективный диапазон пропускания МИ-волновода может быть значительно расширен по сравнению с электромагнитными и обычными МИ-системами. В частности, при измерении с порогом затухания на трассе, равным 100 дБ , увеличение дальности до 270 м и 70 м может быть достигнуто путем внедрения МИ-волновода в условия грунта и морской воды, соответственно. Тем не менее, они также указали, что грубо приближенные к условиям канала схемы сетей

ретрансляторов и интервалов между ними в сети могут ухудшить производительность волноводных МИ-систем.

Исследователями в статье [60] рассмотрена проблема оптимизации развертывания ретрансляторов в линейных сетях мониторинга трубопроводов на основе волновода. Для заданной длины линии связи и желаемой мощности приема они сначала тщательно разработали функцию оценки в отношении развернутого отдельного в сети ретранслятора. Оптимальное количество пассивных катушек было получено путем математического приближения кривых функции оценки. Основываясь на приведенных выше теоретических результатах, авторы в [67] внедрили испытательный стенд с МИ-волноводом в лабораторной подземной среде. Было получено, что при общей дальности связи 2 м МИ-волновод с шестью пассивными реле показал лучшую производительность по сравнению с обычной МИ-системой даже при высоком содержании воды в объемах.

Отметим, что в работах [47], [67], [60] рассматриваются только линейные топологии для исследования производительности МИ-систем с волноводом. Однако в практических подводных системах есть некоторые другие нелинейные сети, такие как двумерные и трехмерные сети. Учитывая это, были приложены значительные усилия к более сложным волноводным топологиям для обеспечения заявленных требований по производительности. В [45] авторы представили три нелинейные кооперативные волноводные конфигурации и сравнили их потери на трассе в линейных топологиях МИ-волноводов. Экспериментальные результаты показали, что одинаковое расположение всех пассивных ретрансляторов вдоль линии, перпендикулярной линии передачи, может максимизировать принимаемый сигнал для данного диапазона связи и мощности передачи.

Рассматривая две более сложные сети, включая гексагональную матрицу и случайные топологии, авторы в [66] посвятили себя созданию сети МИ-датчиков на основе k -связного волновода. Для этих двух топологий сначала был предложен алгоритм минимального связующего дерева (*MST*), который

учитывает уникальную форму покрытия МИ-волновода, чтобы минимизировать количество катушек.

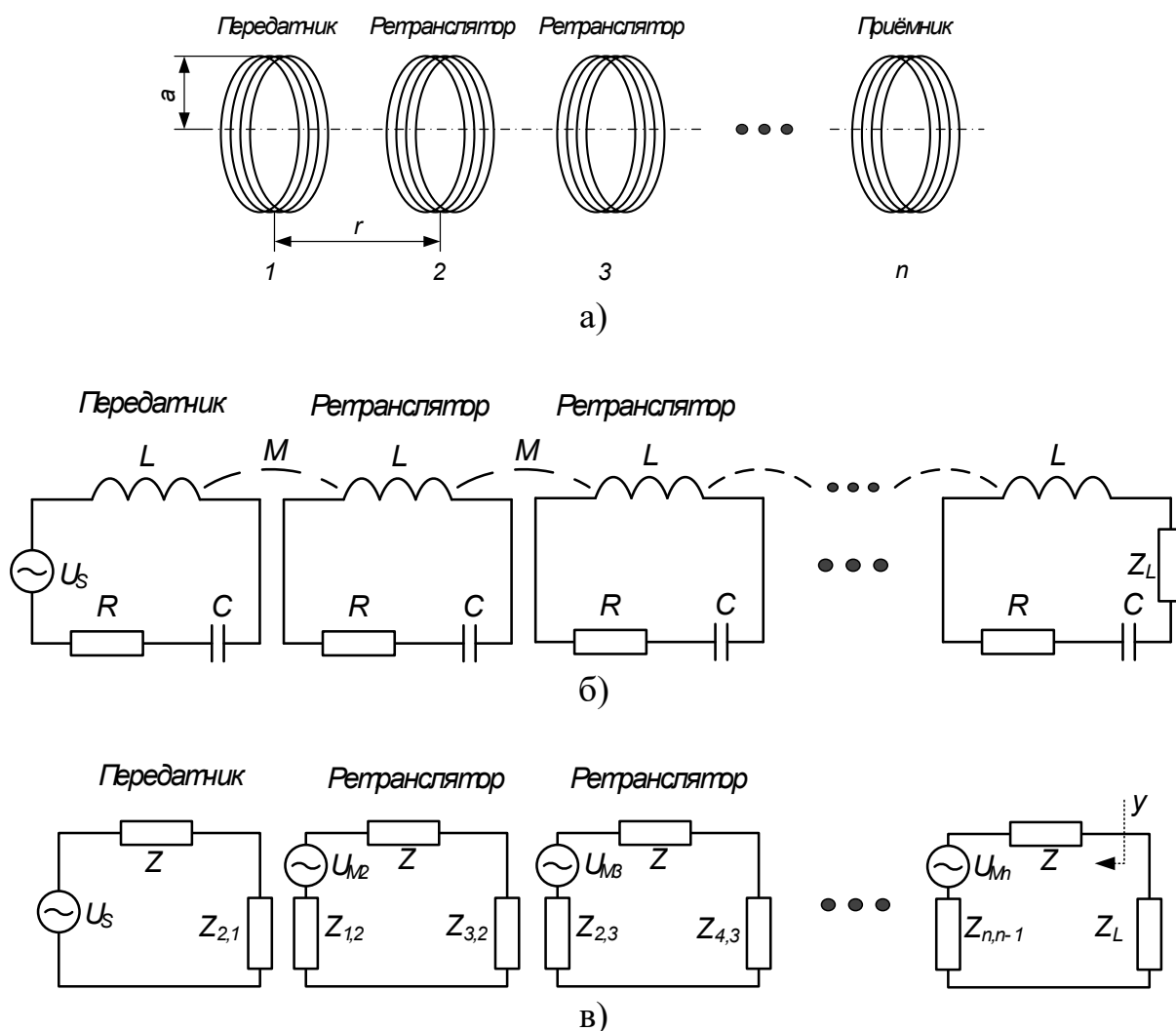


Рисунок 22 - Схемы волноводной МИ-связи: а) - общая; б) - трансформаторная модель; в) - эквивалентная

Чтобы повысить устойчивость сети к сбоям, они дополнительно разработали алгоритм базисного треугольника на основе диаграммы Вороного. Результаты моделирования показали, что алгоритм базисного треугольника может построить надежную сеть МИ-датчиков с k -связью за счет развертывания большего количества пассивных катушек. Затем в [12] разработчики разработали теоретическую модель для анализа пропускной способности, надежности и производительности в трехмерной сети подводной МИ-сети. Численный анализ подтвердил потенциал формирования полноценной трехмерной сети на основе

волноводов, которая покрывает площадь размером в несколько км² в глубоководной среде.

По итогу обсудим проблемы и открытые вопросы. Хотя были проведены исследования по построению ретрансляционных МИ-сетей для широкого применения, между теоретическим анализом и практической реализацией все еще существует значительный разрыв. Некоторые из ключевых проблемных вопросов сводятся к следующему.

В существующих работах исследуются методы МИ-ретрансляции, в основном исходя из того, что между различными катушками нет перекрестных помех, но это на самом деле неправильно. На практике довольно сложно определить, где развернуть ретранслятор для увеличения дальности связи, не вызывая перекрестных помех. Существование перекрестных помех может снизить общую скорость передачи данных, особенно в МИ-сетях с высокой плотностью. Для точного анализа и проектирования подводных МИ-сетей взаимное влияние узлов сети должно быть включено в будущие исследования.

Несмотря на возможность увеличения расстояния передачи без ущерба для энергии, системы ретрансляции должны быть тщательно рассмотрены при разработке гибридной схемы ретрансляции передачи. Во-первых, необходимо разработать точную энергетическую модель для количественной оценки влияния интервалов и чисел реле. На основе этой модели может быть сформулирована соответствующая задача оптимизации и получены оптимальные схемы системы ретрансляции. Однако расчет этих схем очень сложный, поскольку участвующие выражения, которые являются нелинейными и многомерными. Кроме того, расчёты становятся намного сложнее, если учитывать другие вводные параметры для проектирования примеру, характеристики катушки.

В настоящее время исследования в основном сосредоточены на улучшении определенных показателей производительности сети, например, емкости общего объёма информации в телекоммуникационной сети и способов сопряжения отдельных узлов системы.

Увеличение пропускной способности МИ-каналов. Помимо надежной передачи на большие расстояния, собранные морские данные часто нуждаются в оперативной доставке, чтобы соответствовать критериям для специальных областей применения, таких как спасение на море [22, 23]. Скорость передачи данных для подводной МИ-связи довольно ограничена из-за присущей ей узкой полосы пропускания и значительных потерь на вихревые токи. Конструктивным решением для увеличения скорости передачи данных является одновременная доставка нескольких сигналов через многодиапазонный резонатор или мультиантенную систему. С технической точки зрения, существующие подходы можно условно разделить на два типа: многополосный МИ-метод (*MB MI*) с расширенной полосой пропускания [25], [51] - [56] и МИ-метод с несколькими приемными и несколькими передающими системами (*MIMO MI*) с повторным использованием частоты [16], [31], [33], [46], [49], [50], [55], [64].

Для того чтобы оценить приблизительную величину потерь (ослабления) магнитоиндукционного сигнала в водной среде, произвести расчет можно согласно физическим формулам, приведенным ниже.

Магнитное поле утрачивает свою интенсивность с пройденным расстоянием в среде, и по мере углубления в воду, согласно формуле 46:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (46)$$

где σ - электрическая проводимость, См/м.

Магнитная проницаемость в вакууме находится по формуле 47:

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}. \quad (47)$$

С помощью закона Био-Савара-Лапласа выразим напряжённость МП:

$$dB = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I dl}{R^2}; B = \int dB = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} \oint dl = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\pi \cdot R \cdot I}{R^2} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I}{2R}. \quad (48)$$

Магнитная индукция связана с H , как:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H. \quad (49)$$

После необходимых преобразований, определим напряженность МП по формуле 50:

$$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} = \frac{I}{2R}. \quad (50)$$

Принимаемую мощность вычислим по формуле 51:

$$P_{RX} = 20 \log(\omega \cdot \mu \cdot H \cdot K_y), \quad (51)$$

где P_{RX} – принимаемая мощность, дБ.

Формула емкости Шеннона для плоского канала, которая устанавливает верхнюю границу того, как быстро мы можем передавать информацию по беспроводному каналу [15]:

$$c = w \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_N} \right), \quad (52)$$

где w -полоса пропускания, Гц; $\frac{P_s}{P_N}$ - отношение мощности сигнала к шуму.

На основе формулы Шеннона пропускная способность каналов подводной МИ системы связи, в которой используется одна пара приемника и передатчика, обозначаемая C_{MI} , выражается как:

$$C_{MI} = B \log\left(1 + \frac{P_r / PL_{MI}}{N_f}\right). \quad (53)$$

Очевидно, что емкость МИ-канала в основном зависит от ширины полосы B и мощности принимаемого сигнала P_r/PL_{MI} [63]. Как описано выше, пропускная способность канала подводной МИ-системы довольно низкая по причине узкой доступной полосы пропускания и серьезных потерь на вихревые токи (соответственно, больших потерь в тракте PL_{MI}). Используя приведённые уравнения, строим график зависимости пропускной способности подводного МИ-канала от действующей частоты при различных настройках диапазона передачи.

Из рисунка 23 видно, что пропускная способность канала составляет только порядка нескольких $Kбит/с$ в радиусе 2 м и резко уменьшается при увеличении дальности передачи. Поэтому необходимо улучшать возможности подводных МИ-систем.

Было проведено несколько работ по исследованию характеристик емкости и связанных с этим проблем выбора параметров в традиционных системах с одной антенной. В работе [63] авторами проанализировано как характеристики катушки влияют на мощность принимаемого сигнала и, следовательно, на пропускную способность системы с помощью экспериментального наблюдения

В частности, мощность принимаемого сигнала и пропускная способность канала могут быть увеличены либо путем увеличения радиуса катушки и ее проницаемости, либо путем сокращения расстояния передачи.

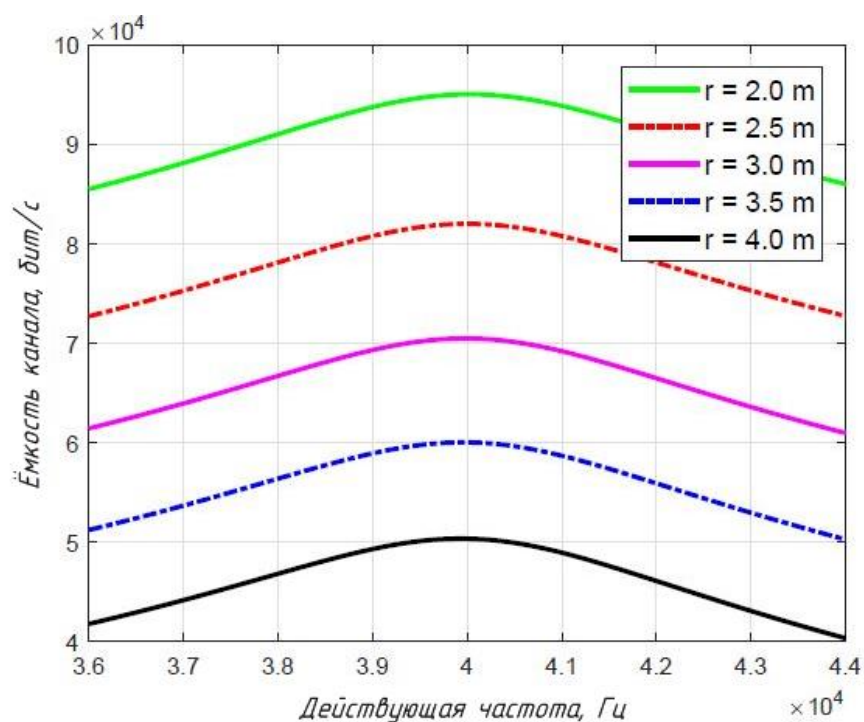


Рисунок 23 - Ёмкость канала в зависимости от центральной частоты при разных расстояниях передачи

На рисунке 23 полоса пропускания и проводимость установлены на 4 кГц и 4 См/м соответственно [65]. Кроме того, они также обнаружили, что более высокий показатель добротности приемной антенны приведет к увеличению показателей принимаемой мощности, что, однако, не обязательно приведет к повышению производительности. Причина этого была дополнительно раскрыта в материале [39] путем теоретического заключения о связи между добротностью антенны и пропускной способностью канала. Было получено, что принимаемая мощность может быть увеличена за счет увеличения добротности, но при этом полоса пропускания будет сужена. Поэтому сделан основной вывод, что существует оптимальное значение величины добротности для передающей и приемной антенн, которое обеспечит максимум пропускной способности канала для данного расстояния.

Из приведенного выше анализа можно улучшить пропускную способность традиционных МИ-систем с одной антенной путем оптимизации основных параметров, таких как действующая частота. Однако увеличение пропускной способности такими методами обычно ограничено: менее 100 Кбит/с в пределах

2 м для полосы частот 4 кГц, на оптимальной действующей частоте. Для значительного увеличения пропускной способности канала в существующих работах были тщательно исследованы два передовых МИ-метода, а именно: *MB MI* и *MIMO MI*. Далее мы представим принципы, лежащие в основе этих двух методов, и рассмотрим существующие подходы к реализации.

MIMO MI технологии. Другим широко распространенным методом увеличения пропускной способности каналов подводных МИ-систем является технология *MIMO MI*, в котором реализовано несколько пар катушек для параллельной передачи потоков данных по всем доступным полосам частот [20], [21], [37], [59]. На рисунке 24 показана структура типичной системы *MIMO MI* $N \times N$, в которой N пар коаксиальных передающей и приемной катушек, размещенных параллельно.

Общая пропускная способность канала такой системы *MIMO MI* $N \times N$ в полосе пропускания B может быть представлена следующим образом [65]:

$$C_{MIMO-MI} = B \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{t,i} / PL_i}{N_i + I_i} \right), \quad (54)$$

где $P_{t,i}$, PL_i , N_i и I_i обозначают мощности передачи, потери на трассе, мощность шума и общие помехи на i -й катушке соответственно.

В частности, $\frac{P_{t,i} / PL_i}{N_i + I_i}$ представляет отношение сигнал/помеха плюс шум (*SINR*) на i -м приемнике.

Из уравнения следует, что пропускная способность МИ-канала может быть повышена путем использования большего количества пар катушек для передачи множества потоков данных по всем доступным частотным диапазонам, то есть путем улучшения повторного использования частот [13]. Однако чрезмерное повторное использование частоты вызовет серьезные перекрестные помехи между различными катушками, что, в свою очередь, может ухудшить показатели *SINR* и, следовательно, пропускную способность системы.

В системе *MIMO MI* существует два типа перекрестных помех: диагональные перекрестные помехи, как показано черными пунктирными линиями на рисунке 24, и являются деструктивными для МИ-связи; боковые перекрестные помехи, изображены черными сплошными линиями на рисунке 24, являются менее вредными для МИ-каналов. Чтобы сравнить силу желаемых сигналов и перекрестных помех, здесь мы возьмем 2×2 подводную систему *MIMO MI* в качестве примера, чтобы показать их уровни мощности на рисунке 25.

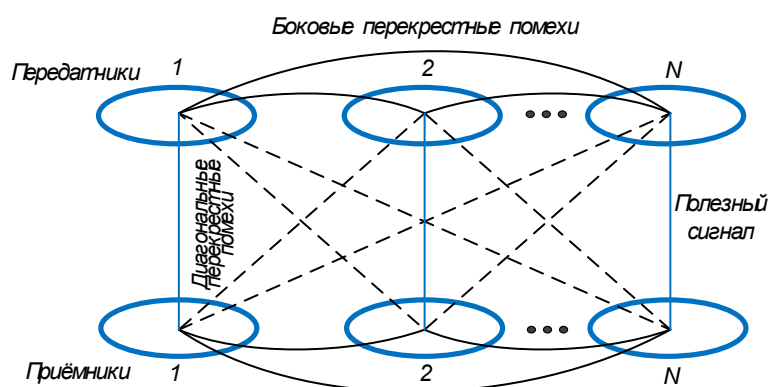


Рисунок 24 - Структура типичной системы $N \times N$ *MIMO MI* с различными видами перекрестных помех

Стоит обратить внимание, что боковые перекрестные звуки играют доминирующую роль и даже более существенную, чем искомые сигналы. Следовательно, чтобы полностью раскрыть потенциал *MIMO MI* в повышении пропускной способности, необходимо уменьшить количество перекрестных помех, особенно боковых.

Существует два основных направления для снижения влияния перекрестных помех систем *MIMO MI*, а именно предварительное кодирование [17], [33], [46], [50] и размещение катушки [31], [49], [55], [64].

Что касается метода предварительного кодирования, он определяет структуру и размер подходящей матрицу для передаваемых сигналов так, чтобы предварительно кодированные сигналы были выровнены по предполагаемым

линиям связи, в то время как наложенные помехи в каждом приемнике хорошо подавлены.

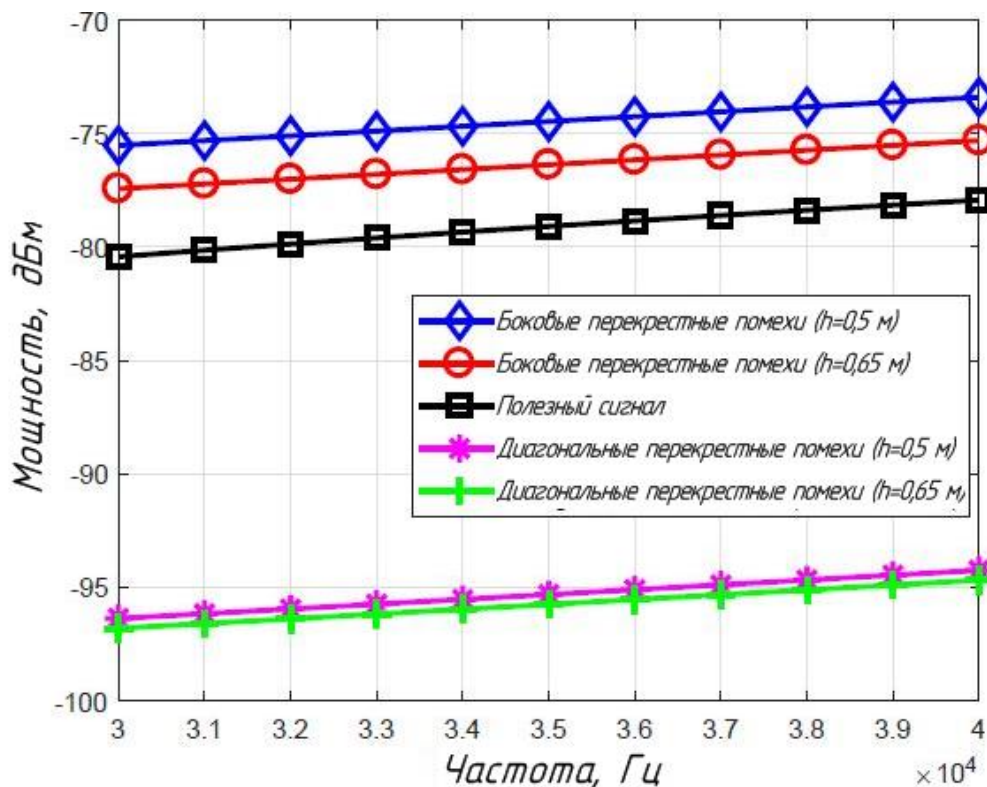


Рисунок 25 - Уровни мощности полезных сигналов и различных перекрестных помех при различных боковых интервалах h в подводной системе *MIMO MI 2x2*. На этом рисунке мощность передачи каждого подканала установлена на 100 мВт

Учитывая, что отклики каналов подводных МИ-систем предсказуемы и стабильны, предварительное кодирование, таким образом, является хорошим выбором для ликвидации диагональных перекрестных помех.

Что касается подавления боковых перекрестных помех, методика размещения катушек продемонстрировала большой потенциал в существующих исследованиях.

Одна из очевидных причин, которые делают этот метод эффективным, состоит в том, что взаимная индуктивность двух МИ- катушек уменьшается до нуля, когда они расположены перпендикулярно. В [55] была предложена новая конфигурация антенны *MIMO MI 2x2*, в которой одна пара передатчика и приёмника расположена вертикально, а другая пара - горизонтально. Было показано, что пропускная способность рассматриваемой МИ-системы *MIMO*

превосходит пропускную способность МИ-системы с одной антенной в условиях высоких значений SNR . В [49] Р. Готтула предложил массив $MIMO\ 3 \times 3$, состоящий из трех ортогонально расположенных рамочных антенн.

Таблица 2 - Сравнение между различными методами для улучшения использования МИ-метода с использованием $MB\ MI$

Ссылки	Методы	Концепция	Ограничения
[32]	Частотное разделение	Рассмотрена идея частотного разделения для передачи данных	Точный контроль коэффициента связи
[11] и [44]	Многодиапазонный резонатор	Разработка серийного многодиапазонного резонатора МИ	Точного контроля элементов схемы
[25]	Антенная решетка с несколькими катушками	Предложена схема антенной решетки с несколькими катушками и с несколькими резонансными частотами	Все резонансные и рабочие частоты разные
[42]	Динамическое управление частотой	Выдвинута простая в реализации многополосная схема	Чрезвычайно ограниченный диапазон передачи
[43] и [71]	Реализация метода резонансного волновода	Синтез метода волновода и $MB\ MI$ технологии	Точный контроль отклонения частоты

Таблица 3 - Сущность различных методов подавления перекрестных помех в системах $MIMO\ MI$

Ссылки	Конфигурации антенны	Методы	Подавляемые типы перекрестных помех
[17], [33], [46], [50]	$N \times N$	Предварительное кодирование	Диагональные перекрестные помехи
[55]	2×2	Распределение катушек в различных типах массивов	Боковые перекрестные помехи
[49]	3×3		
[64]	4×4		
[31]	$N \times N$	Всенаправленные антенны	Диагональные и боковые перекрестные помехи

Результаты моделирования показали, что показатели данных такого размещения *MIMO MI* примерно вдвое превышают данные обычной МИ-связи с одной антенной.

4 ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ И ИХ ТЕСТИРОВАНИЕ

На территории города Владивосток (остров Русский, бухта Труда) 6 марта 2020 года, состоялся первый эксперимент по передаче данных в водной среде с использованием МИ-связи, согласно схеме, представленной на рисунке 26.

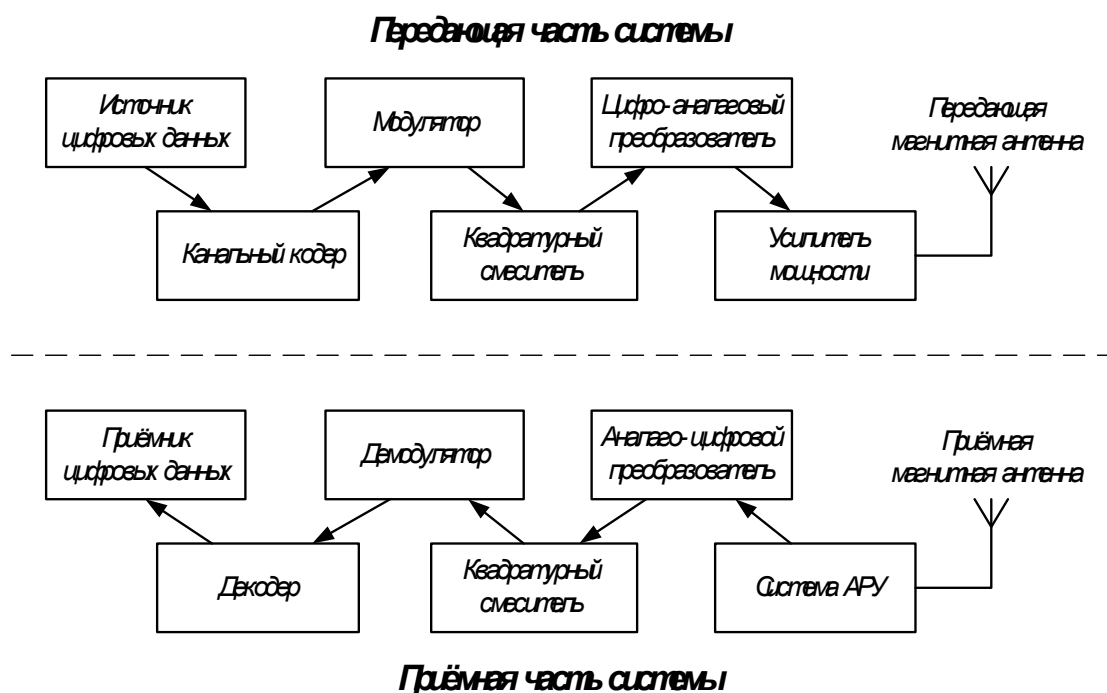


Рисунок 26 - Схема исполнения приёмно-передающей системы

Вместо передающей и приёмной антенны были взяты катушки с большим количеством витков из медного провода диаметром $0,3$ мм и ферромагнитные стержни диаметром 10 мм и длиной 200 мм с проницаемостью сердечника

равной 400. 7 штук стержней были собраны в пучок и обёрнуты многократно и равномерно медным проводом. Все комплектующие эксперимента были надёжно герметизированы.



Рисунок 27 – Передающий модуль

Передающий и приемный модуль связи были соединены с портативными компьютерами по ВЧ кабелю. Ноутбуки предназначались для формирования сигнала и его обработки в тракте. При двоичной фазовой манипуляции (*BPSK*) скорость передачи данных составила 500 бит/с . Сигнал был зафиксирован на приемном модуле с передатчика, который погружался в воду на различную глубину и на вариативном расстоянии от передатчика. Эксперимент проиллюстрирован на рисунках 32 и 33. Результаты опыта отражены в таблице 9.



Рисунок 28 - Опытная установка для проведения эксперимента



Рисунок 29 - Передатчик погружен в воду, приёмник не погружен

Таблица 4 - Результаты проведенных экспериментов, при соосное расположении антенн передатчика и приёмника: передатчик погружен в воду, приёмник не погружен

№ опыта	Дистанция между передатчиком и приёмником, м	Уровень принимаемого сигнала	Наличие принятого G-mode кодированного сигнала	Наличие принятого A-mode кодированного сигнала
1	1	3000	Без ошибок	Без ошибок
2	2	1000	Без ошибок	Без ошибок
3	3	300	Без ошибок	Без ошибок
4	4	120	Без ошибок	Без ошибок
5	5	70	Без ошибок	Без ошибок
6	6	50	Без ошибок	Без ошибок
7	7	30	Без ошибок	Отсутствует
8	8	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

После этого изменили условия опытов - передающий и приёмный модули погружались в воду на различном удалении друг от друга, как показано на рисунке 40. Результаты экспериментов отражены в таблице 10.



Рисунок 30 – Погружение передатчика и приёмника в воду

Таблица 5 - Результаты эксперимента: передатчик и приёмник погружены в воду, при параллельном расположении антенн передатчика и приёмника

№ опыта	Дистанция между передатчиком и приёмником, м	Уровень принимаемого сигнала	Наличие принятого G-mode кодированного сигнала	Наличие принятого A-mode кодированного сигнала
1	1	800	Без ошибок	Без ошибок
2	2	450	Без ошибок	Без ошибок
3	3	190	Без ошибок	Без ошибок
4	4	85	Без ошибок	Без ошибок
5	5	50	Без ошибок	Без ошибок
6	6	35	Без ошибок	Без ошибок
7	7	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Из результатов экспериментов было отмечено, что расстояние для удовлетворительной передачи и приёма сигнала составляет 6...7 м, среда распространения сигнала слабо влияет на уровень принимаемого сигнала.

Для повышения характеристик передающей антенны было принято решение разработать модель антенны с повешенным количеством ферромагнитных стержней. Соответственно, 30 июня 2020 года в городе Владивосток, был проведен второй эксперимент по дистанционной передаче данных в воздушной среде с использованием МИ-связи, при использовании новой антенны.

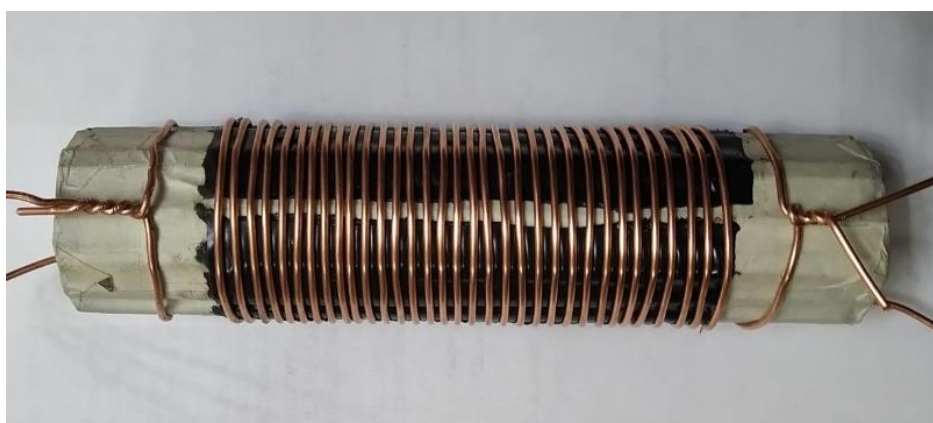


Рисунок 31 - Эскиз изготовленной передающей антенны

Диаметр витка катушки составил - 0,2 мм, диаметр сердечника - 50 мм, длина сердечника - 200 мм, длина катушки - 130 мм, действующая проницаемость сердечника равна 400.

Таблица 6 - Результаты проведенных экспериментов, при не погруженных в воду передатчике и приёмнике (параллельное расположение антенн передатчика и приёмника)

№ опыта	Дистанция между передатчиком и приёмником, м	Условный уровень принимаемого сигнала	Наличие принятого G-mode кодированного сигнала	Наличие принятого A-mode кодированного сигнала
1	1	3000	Без ошибок	Без ошибок
2	2	2500	Без ошибок	Без ошибок
3	3	2100	Без ошибок	Без ошибок
4	4	1800	Без ошибок	Без ошибок
5	5	1450	Без ошибок	Без ошибок
6	6	1050	Без ошибок	Без ошибок
7	7	850	Без ошибок	Без ошибок
8	8	700	Без ошибок	Без ошибок
9	9	550	Без ошибок	Без ошибок
10	10	400	Без ошибок	Без ошибок
11	11	300	Без ошибок	Без ошибок
12	12	200	Без ошибок	Без ошибок
13	13	110	Без ошибок	Без ошибок
14	14	85	Без ошибок	Без ошибок
15	15	50	Без ошибок	Без ошибок
16	16	30	Без ошибок	Отсутствует
17	17	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Исходными данными для расчёта послужили параметры сердечника μ_k (его начальная проницаемость и размеры), а также электрические данные входной цепи. В расчёт входят определение числа витков и выбор конструкции антенной катушки на сердечнике, определение схемы включения, расчёт величины антенного контура с входом приёмника и определение действующей высоты и эффективности антенны [3, 4].

Иногда к антенне предъявляются дополнительные требования, такие как повышенная избирательность входной цепи, получение «чистой» диаграммы направленности (с чётким нулём приёма), простота изготовления и настройки,

максимальная эффективность антенны и другие, которые заставляют вносить в типовой расчёт изменения.

Количество витков антенной катушки определяется в первую очередь величиной допустимой индуктивности входного контура. Зная частотный диапазон $f_{max}=20 \cdot 10^3$ Гц, и конструктивные особенности схемы устройства (схему сопряжения входного контура с другими контурами, ёмкость конденсатора настройки $C_{min}=330 \cdot 10^{-9}$ Ф и других элементов входа) индуктивность катушки находим по формуле:

$$L_K = \frac{2,53 \cdot 10^4}{f_{max}^2 [МГц] C_{min} [нФ]} = \frac{2,53 \cdot 10^4}{0,02^2 \cdot 330 \cdot 10^3} \approx 192 \cdot 10^{-6} Гн. \quad (56)$$

Наиболее сложным является определение коэффициента μ_K :

$$\mu_K = \mu_{э\kappa\beta} m_L p_L q_L, \quad (57)$$

где $\mu_{э\kappa\beta}=400$ - действующая проницаемость сердечника;

m_L - определяется геометрическими параметрами катушки и сердечника;

p_L - коэффициент, зависящий от взаимного расположения катушки и сердечника;

q_L - коэффициент, определяемый геометрическими параметрами катушки и сердечника.

Примем диаметр витка катушки $d=2 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр сердечника $D=5 \cdot 10^{-2}$ м, длина сердечника $l=0,2$ м, длину катушки предварительно примем равной $a=130 \cdot 10^{-3}$ м.

Коэффициент $m_L=0,7$ находим из рисунка 32.

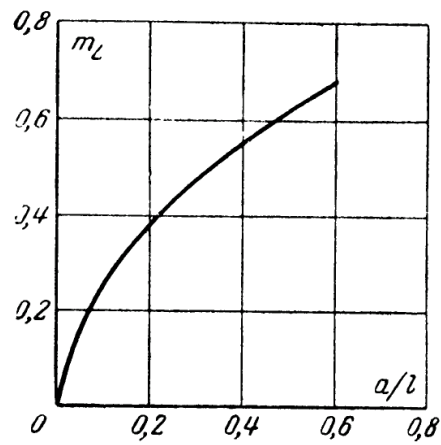


Рисунок 32 - Зависимость m_L от a/l

Коэффициент $p_L=1,2$ определим по рисунку 33, где величина $x=0$ - сдвиг осей симметрии катушки и сердечника относительно друг друга.

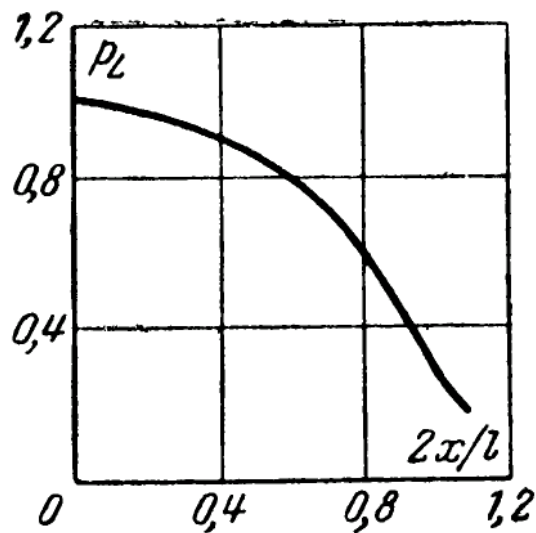


Рисунок 33 - Зависимость p_L от расположения катушки на стержне

$$q_L = \frac{D^2}{(D+2d)^2} = \frac{0,05^2}{(0,05+2 \cdot 0,002)^2} \approx 0,857, \quad (58)$$

$$\mu_K = 400 \cdot 0,7 \cdot 1,2 \cdot 0,857 = 286,944. \quad (59)$$

Коэффициент, зависящий от формы катушки:

$$L = \frac{1}{1 + 6 \frac{D}{a}} = \frac{1}{1 + 6 \frac{0,05}{0,13}} \approx 0,302. \quad (60)$$

Число витков катушки:

$$n_k = \sqrt{\frac{L_k \text{ мкФ Гн}}{L d \mu_k}} = \sqrt{\frac{192}{0,302 \cdot 0,002 \cdot 286,944}} \approx 33. \quad (61)$$

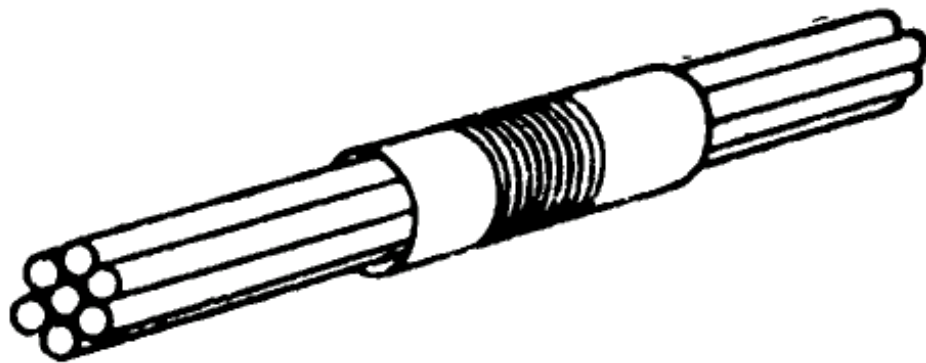


Рисунок 34 - Пример антенны с сердечником в виде пучка стержней



Рисунок 35 - Ферритовые марганец-цинковые стержни

При расчете антенны шаг намотки $1,5...2$ мм незначительно влияет на качество катушки. Методы расчёта приёмных и передающих антенн в основном аналогичны, с той лишь разницей, что несколько ослабляются требования к весу и габаритам антенны.

Антенна была проверена помимо опытного и расчетного способов путем моделирования в среде разработки *COMSOL Multiphysics*. Моделирование показало жизнеспособность применения данной технологии на практике.

Основной задачей при проектировании МИ систем связи, как говорилось ранее, является разработка наиболее эффективного конструктива антенн с высоким уровнем чувствительности. Это позволит вести передачу на дальние расстояния, и получить наибольший уровень излучаемого сигнала.

В ходе написания ВКР были созданы несколько вариаций опытных антенн магнитоиндуктивной связи, представленные на рисунках 36, 37, 38, 39, 40, 41:

- 1) 3D- антенна (сборка трех катушек индуктивности по 10 витков каждая);
- 2) рамочная магнитная антенна;
- 3) антенна с ферритовыми стержнями (38 витков, 4 стержня);
- 4) магнитоиндукционная антенна (380 витков);
- 5) магнитоиндукционная антенна (96 витков);
- 6) магнитоиндукционная антенна (117 витков).

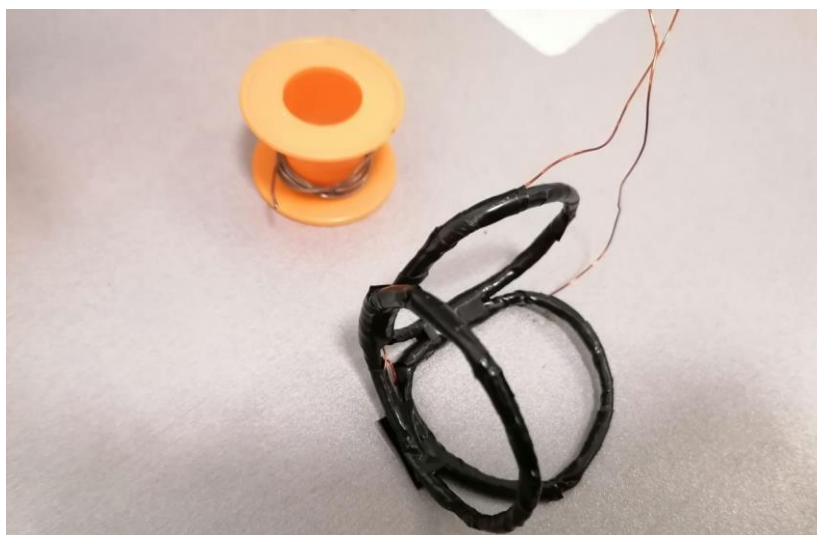


Рисунок 36 – Общий вид магнитной антенны №1: «3-D»

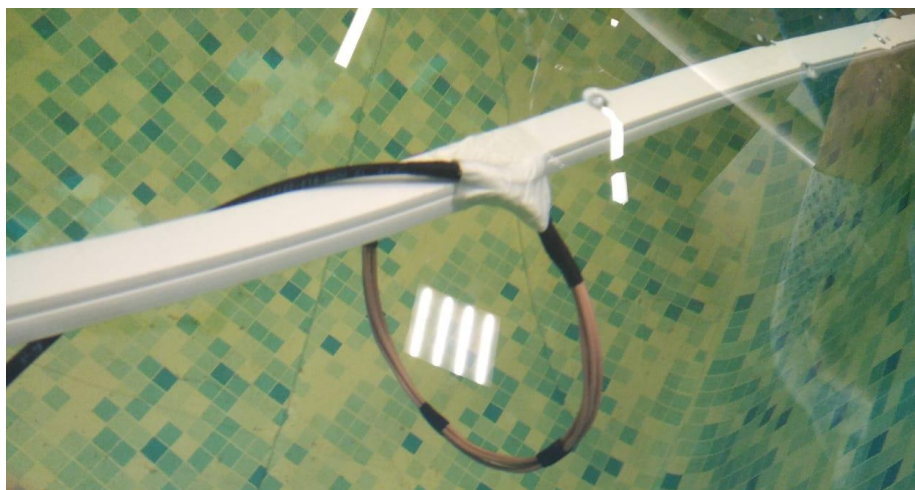


Рисунок 37 - Общий вид магнитной антенны №2: «Рамка»

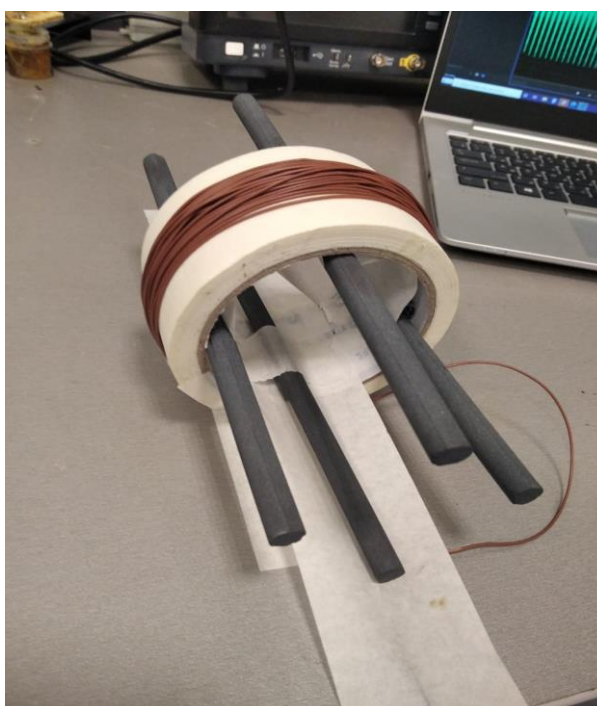


Рисунок 38 - Общий вид магнитной антенны №3: «с ферритовыми стержнями»

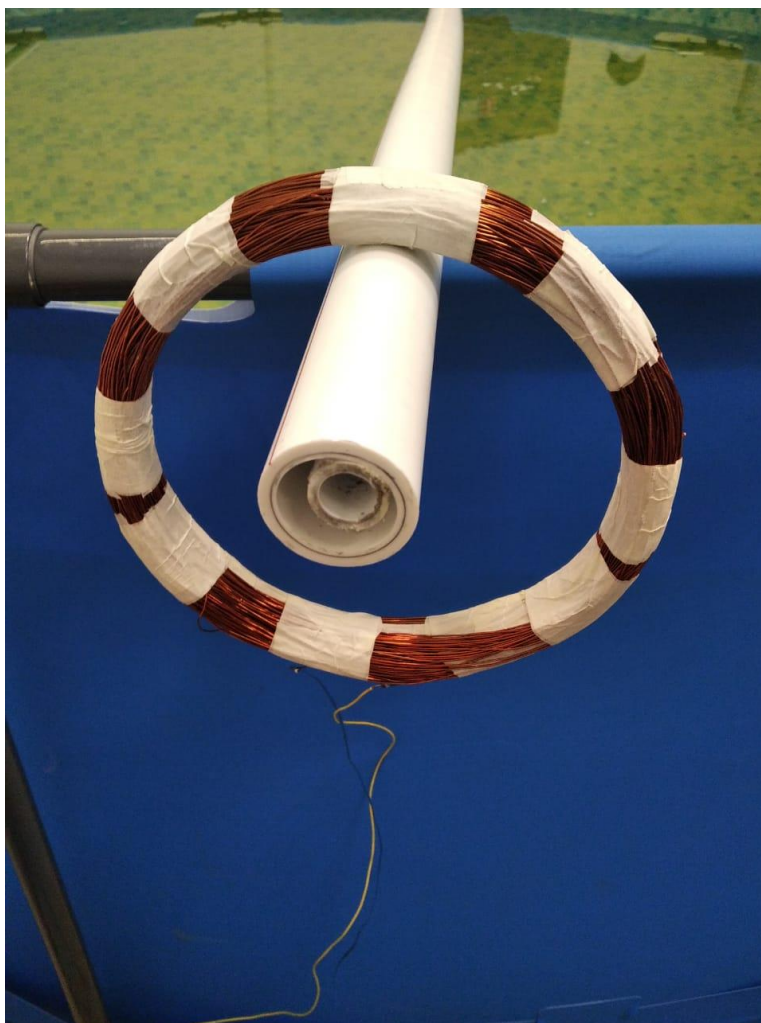


Рисунок 39 - Общий вид магнитной антенны №4: «с 380 витками»

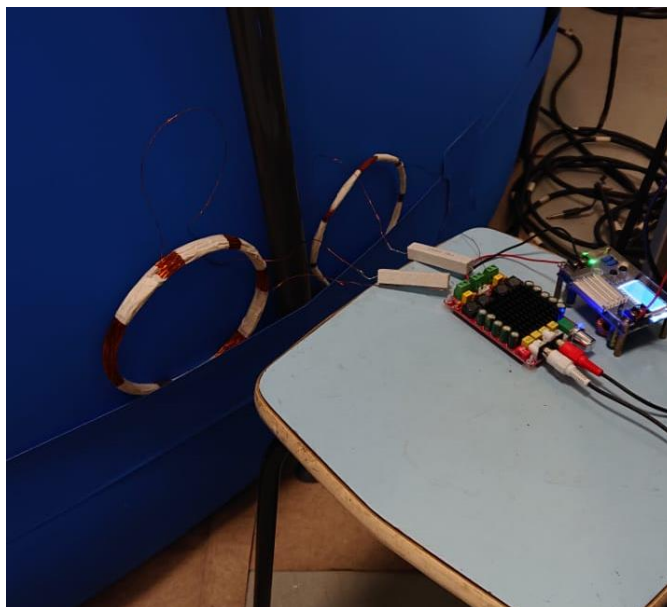


Рисунок 40 - Общий вид магнитной антенны №5: «с 96 витками»



Рисунок 41 - Общий вид магнитной антенны №6: «с 117 витками»

Эксперимент 1: (№3) 1 виток, при $U_{\text{ген}} = 10 \text{ мВ}$:

Сначала была сконструирована антенна №3 в нескольких вариантах намотки медного кабеля. С помощью дальнейших экспериментов была проверена конструкция антенны. Нужно было понять, как влияют ферритовые стержни (их расположение) и количество на уровень принятого сигнала.

При намотке одного витка, что составило 30,1 см провода, диаметр антенны был равен 9,6 см. С генератора, питанием: $U_{\text{ген}} = 10 \text{ мВ}$, подается на усилитель класса «Д» сигнал ЛЧМ с частотами: $f = 25\text{--}35 \text{ кГц}$ с длительностью сигнала в 1 секунду. Регулятор громкости был выставлен на максимальное

значение. Расстояние между передающей и приемной антенной (их обмотками) составляло 44 см, как показано на рисунке 42.



Рисунок 42 – Прием МИ- сигнала на одновитковую антенну (без стержней)

Уровень сигнала на приеме 41 Дб. Расположив катушки в ортогональном режиме, уровень сигнала -60 Дб с фильтрацией программы Adobe Audition 3.0.

Эксперимент 2: (№3) 38 витков, при $U_{ген} = 10 мВ$:

Второй опыт заключался в том, чтобы проверить уровни сигналов при большем количестве витков (38) и без использования ферритовых стержней, согласно рисунку 43. Для этого был использован кабель длиной 12,7 м, при этом уровень на приемной стороне составил 11,5 Дб, а также при ортогональном расположении: 25 Дб.

Далее было решено поочередно размещать стержни в разных точках и фиксировать уровни сигнала. При расположении феррита «в центре»: уровень сигнала составил: -7,8 Дб, «вниз»: -7,4 Дб, «вверх»: -7,5 Дб, «влево»: -6,9 Дб, «вправо»: -8 Дб, согласно рисунку 44. Самое сильное поле было отмечено в непосредственной близости («левое» положение) к передающей антенне.

Следующим этапом являлось расположение четырех стержней «квадратом», где был зафиксирован уровень поля -2,5 Дб, а при помещении в

центр еще одного стержня -1,9 Дб (что является самым высоким показателем уровня на данный момент), согласно рисунку 45.

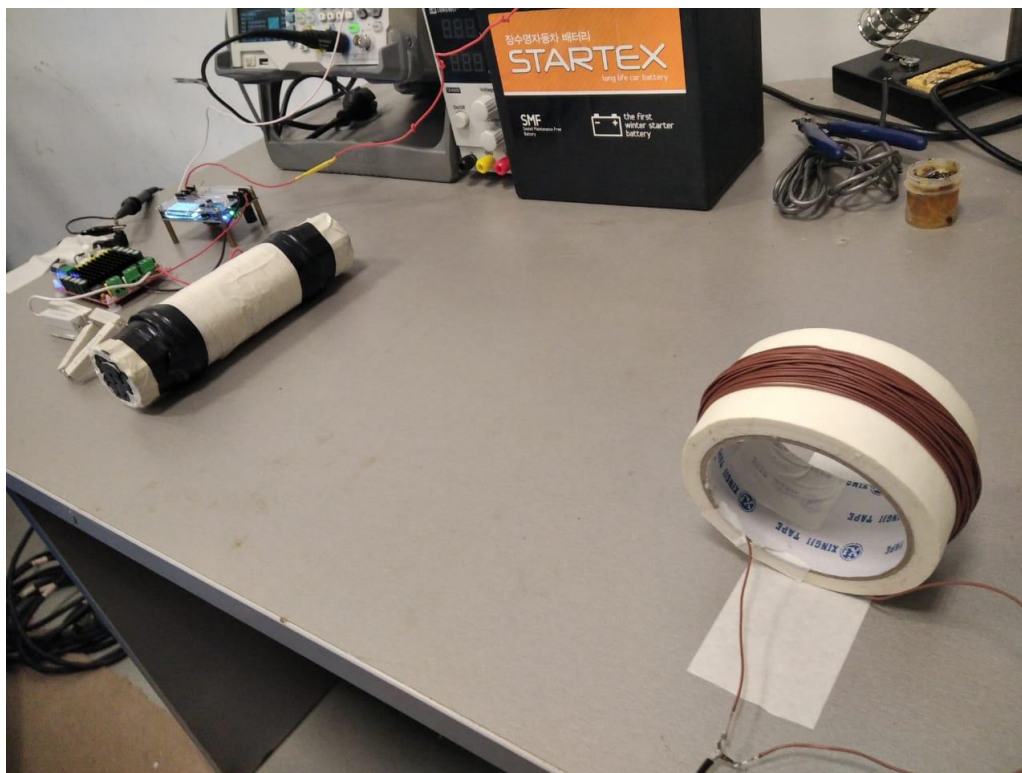


Рисунок 43 – Прием МИ- сигнала на 38-витковую антенну (без стержней)



Рисунок 44 – Прием сигнала на антенну с очередно размещенными стержнями

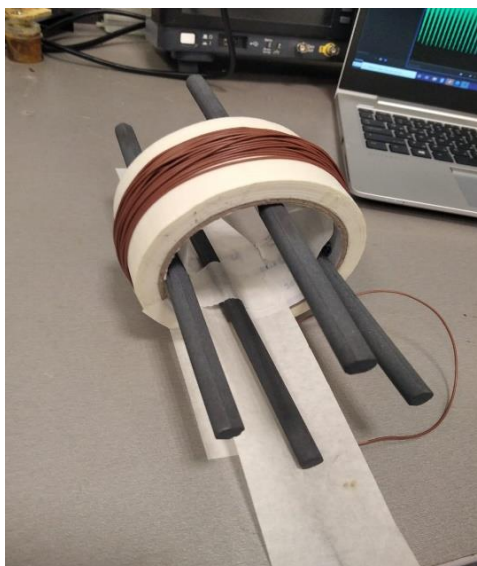


Рисунок 45 – Расположение четырех стержней в антенне вида «квадрат»

Эксперимент 3: (№3) 38 витков, при $U_{\text{ген}} = 2 \text{ мВ}$:

Соблюдая то же расположение стержней («квадрат»), при измененном уровне напряжения генератора, уровень сигнала достиг: -13,5 Дб.

Эксперимент 4: (№3) 38 витков, при $U_{\text{ген}} = 2 \text{ мВ}$:

Далее было решено проверить зависимость уровня принятого сигнала от количества находящихся в антенне стержней. Для этого антенна постепенно «заполнялась» ферритами, согласно рисунку 46, а результаты были систематизированы в таблице 7. Замеры производились при параллельном расположении передающей и приемной антенны.

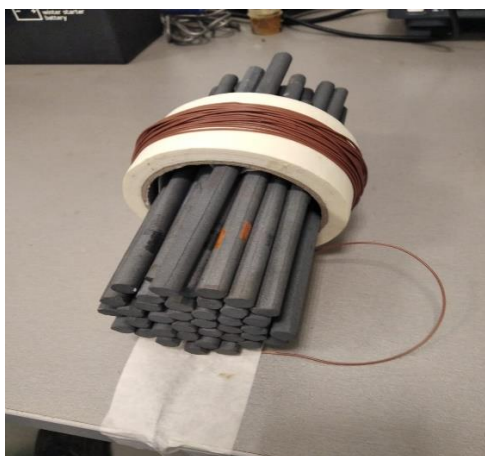


Рисунок 45 - Постепенное заполнение антенны ферритовыми стержнями

Таблица 7 - Уровни сигнала на приемной ферритовой антенне №3

№ стержней, шт	G, Дб	№ стержней, шт	G, Дб
4	-13,3	23	-8,7
5	-12	24	-8,7
6	-11,5	25	-8,6
7	-11,1	26	-8,5
8	-10,9	27	-8,3
9	-10,7	28	-8,2
10	-10,3	29	-8,1
11	-10,1	30	-8
12	-10	31	-8
13	-9,7	32	-7,9
14	-9,5	33	-7,8
15	-9,3	34	-7,7
16	-9,2	35	-7,6
17	-9,1	36	-7,5
18	-9,05	37	-7,4
19	-9	38	-7,3
20	-8,9	39	-7,3
21	-8,8		
22	-8,7		

Исходя из результатов опыта видно, что количество стержней не сильно влияет на уровень сигнала. Более того, рациональнее и эффективнее размещать стержни в определенных точках (приблизительно 5 штук).

Также был установлен уровень принятого сигнала при ортогональном расположении (наблюдается падение мощности) антенны №3 с 39 стержнями, который составил: -21 Дб.

Эксперимент 5: (№3) 38 витков, при $U_{ген} = 10 мВ$:

С помощью данного эксперимента был установлен уровень сигнала на приеме, с увеличенной дальностью разнеса катушек МИ системы связи.

При «наполнении» антенны пятью стержнями («квадрат» + «центр»), на расстоянии 7 м 45 см, зафиксирован уровень: -63 Дб.

Эксперимент 6: (№1,2,3), при $U_{ген} = 70 мВ$:

Также был проведен эксперимент, который позволил оценить уровни принятого сигнала, при разных ориентациях (повороте) антенн, а также

построить диаграммы направленности приемных антенн. Для этого на расстоянии 3,7 м от передающей антенны, были подвешены приемные антенны № 1, 2 и 3, согласно рисункам 46, 47, 48. Далее антенны опускались в бассейн с пресной водой.



Рисунок 46 – Подводный прием сигнала антенной №1

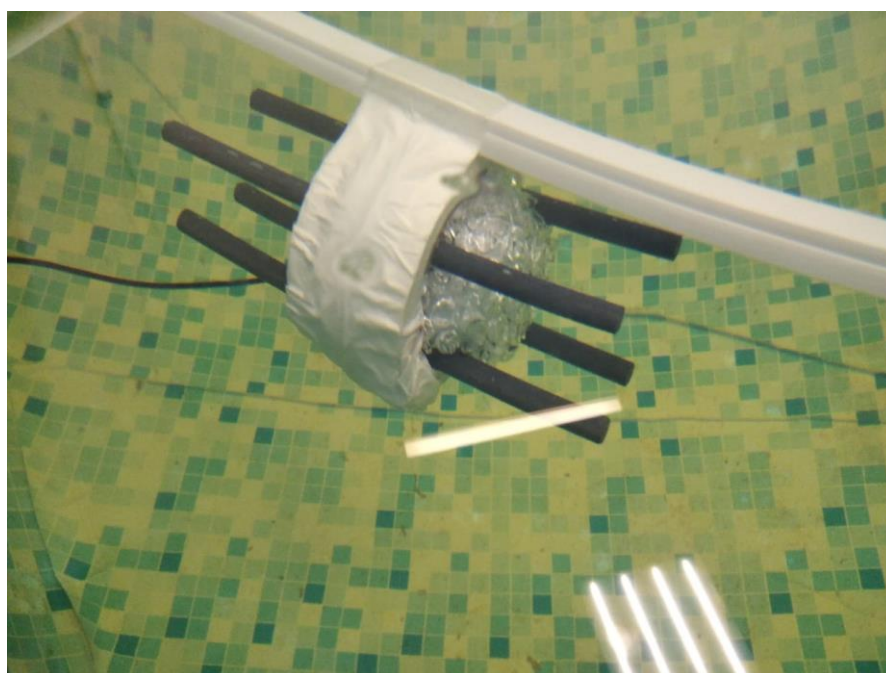


Рисунок 47 - Подводный прием сигнала антенной №2



Рисунок 48 - Подводный прием сигнала антенной №3

При напряжении питания с аккумулятора: $U_{\text{пит}} = 28 \text{ В}$, токе потребления: $I_{\text{потр}} = 0,13- 0,7 \text{ А}$, и поданного напряжения с генератора: $U_{\text{ген}} = 70 \text{ мВ}$, был передан линейно- частотно модулированный сигнал (ЛЧМ) длительностью: $\tau = 4 \text{ сек}$,

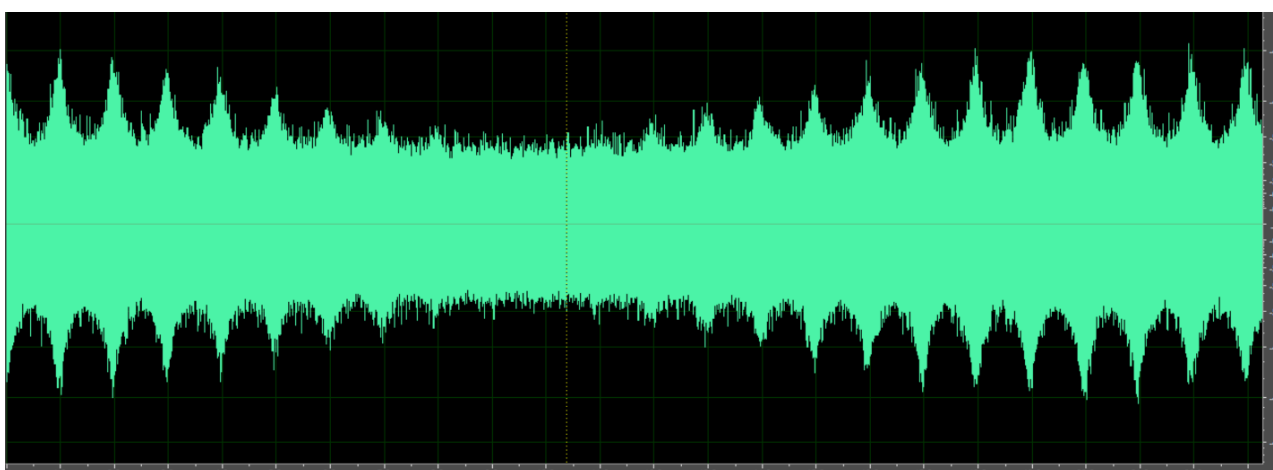


Рисунок 49 – Осциллограмма снятая с антенны типа «рамка»

частотой излучения: $f = 25-35 \text{ кГц}$. Напряжение усилителя мощности: $U_{\text{ум}} = 32 \text{ В}$.

Поворот антенн осуществлялся:

- 1) «Рамка»: От параллельного расположения: 0 до 180 град (по часовой стрелке 180);
- 2) «3-D» (цветок) от 0 до 360 град;
- 3) «С ферритовыми стержнями»: от 0 до 180 град.

Осциллограммы принятых сигналов, представленные на рисунках 49, 50, 51.

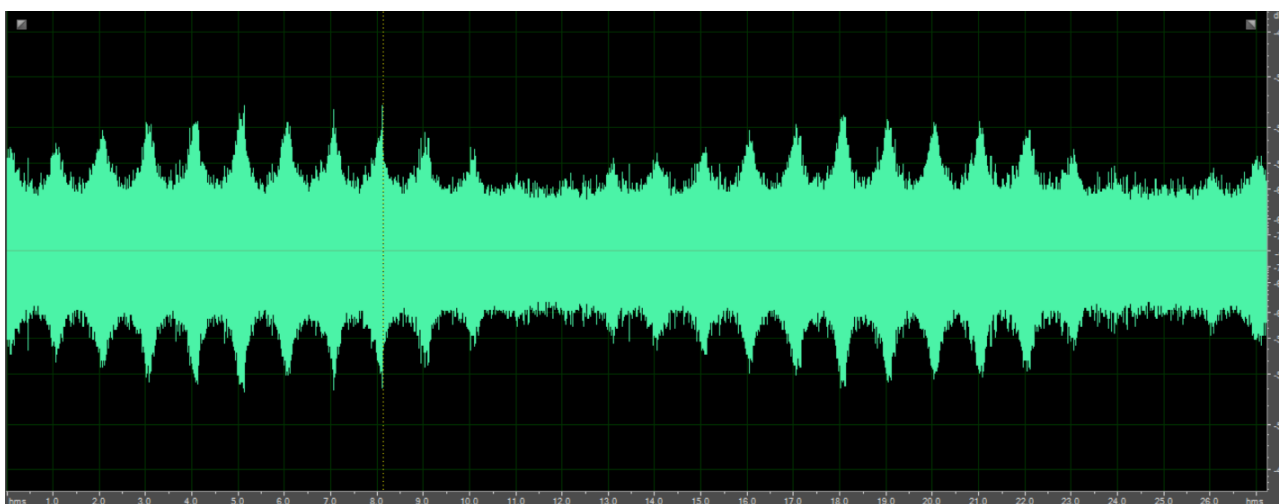


Рисунок 50 – Осциллограмма с антенны типа «3-D»

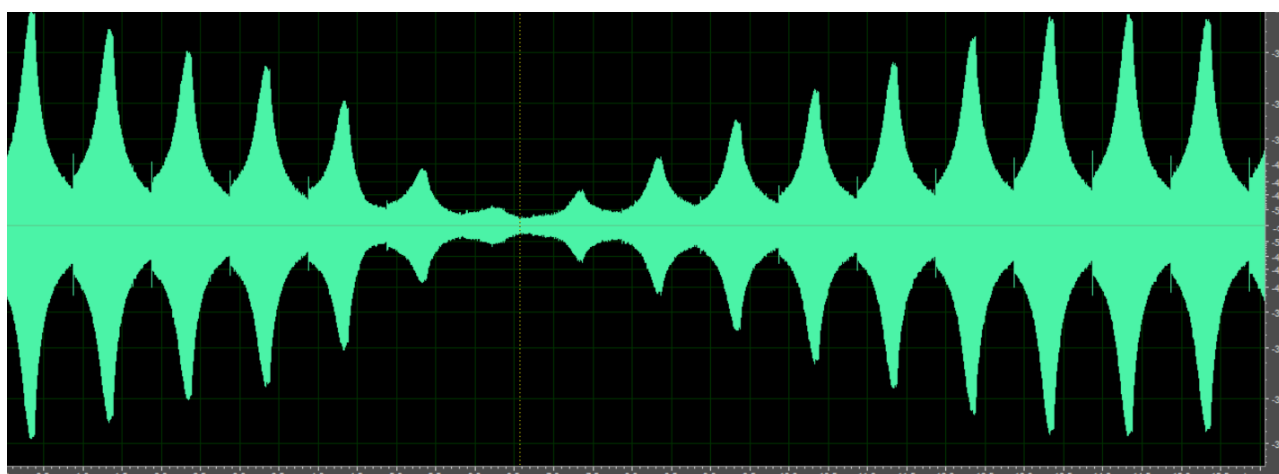


Рисунок 51 – Осциллограмма снятая с антенны типа «ферритовая»

В ходе проектирования системы связи был осуществлен подбор подходящей конструкции усилителя мощности для разрабатываемой системы связи и его тестирование. Цифровой высокомоощный усилитель ХН-М572 имеет

следующие параметры: входное напряжение: 8- 28 В (рекомендуется 24 В), выходная мощность: 240 Вт (2 канала), выходное сопротивление: 4- 8 Ом.

Эксперимент 7: (№3, 4 и антенна, представленная на рисунке 31).

Испытания в морской воде:

Испытания проходили 21 июня 2021 года на территории кампуса ДВФУ (Набережная, Пирс). Место изображено на рисунке 52.

Была предпринята попытка развернуть оборудование и передать сигнал *OFDM*, частотой 25 кГц- 35 кГц. В техническое оснащение входили следующие приборы: 1) Приемная антенна с четырьмя ферритовыми стержнями; 2) многовитковая антенна (380); 3) цифровой высокоомощный усилитель мощности: ХН-М572 (его параметры были представлены ранее в эксперименте №6); 4) передающая ферритовая антенна (рисунок 31); 5) автомобильный аккумулятор на 12 В; 6) Цифровая аудиокарта (передающий тракт): FOCUSRITE Clarett 4Pre USB (четырёхканальная с частотой дискретизации: $f_d = 192$ кГц); Цифровая аудиокарта (приемный тракт): FOCUSRITE SCARLETT 2I2 STUDIO (двухканальная, с частотой дискретизации: $f_d = 192$ кГц).

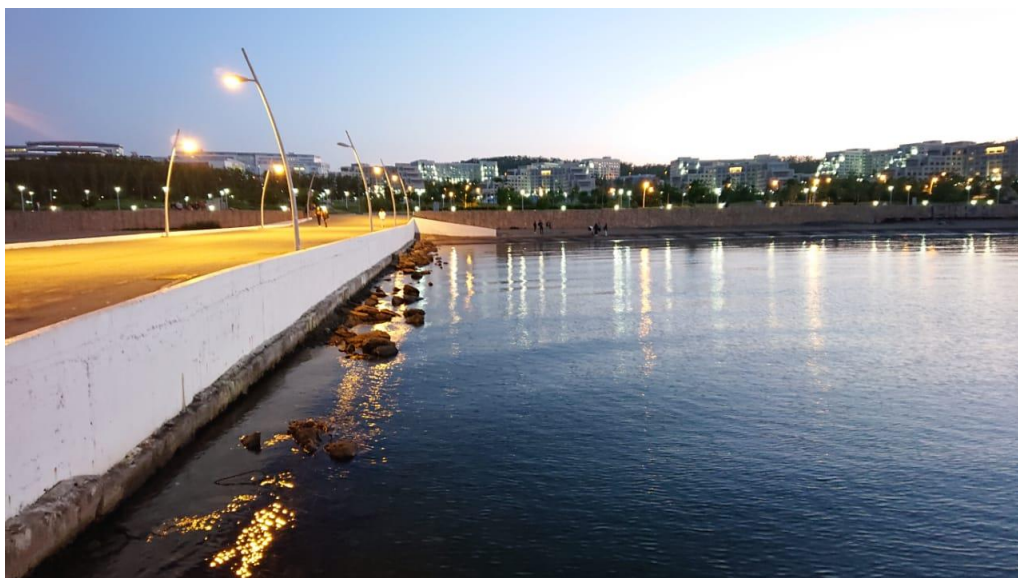


Рисунок 52 – Место проведения эксперимента №7: «Испытания в морской воде»

Передающие модули связи были соединены с портативными компьютерами через аудиокарты, подключенные по интерфейсу USB-C.

Ноутбуки предназначались для формирования сигнала, его обработки в тракте и приеме, как показано на рисунке 53, 54.

Сигнал был зафиксирован на приемном модуле с антенны, который погружалась в воду на глубину 50 см и на расстоянии 6 м от передатчика. Эксперимент проиллюстрирован на рисунках 55 и 56.

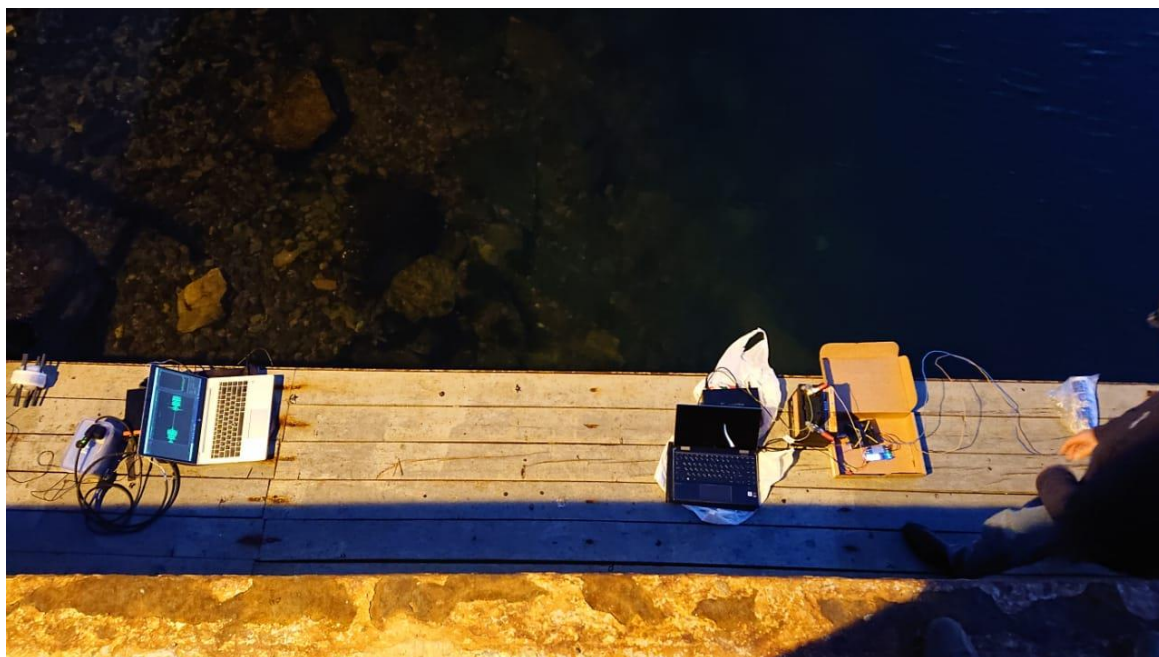


Рисунок 53 – Общий вид лабораторной установки



Рисунок 54 – Общий вид лабораторной установки (передача сигнала)

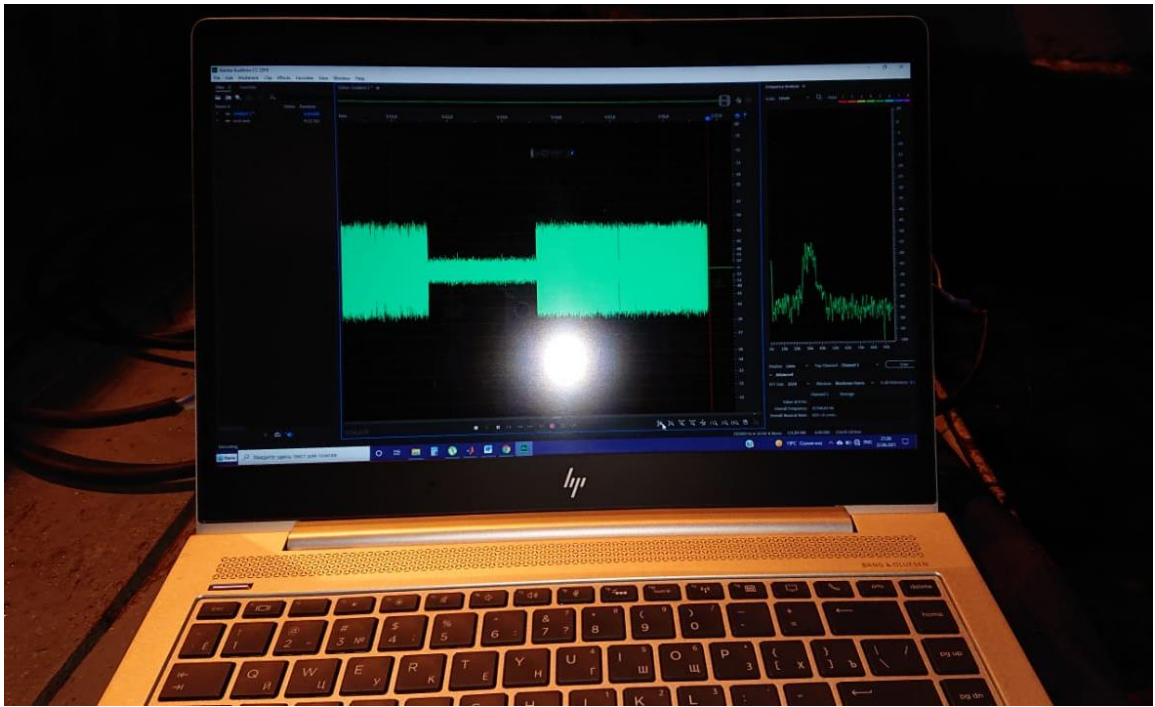


Рисунок 55 – Сигнал принятый под водой методом МИ-связи

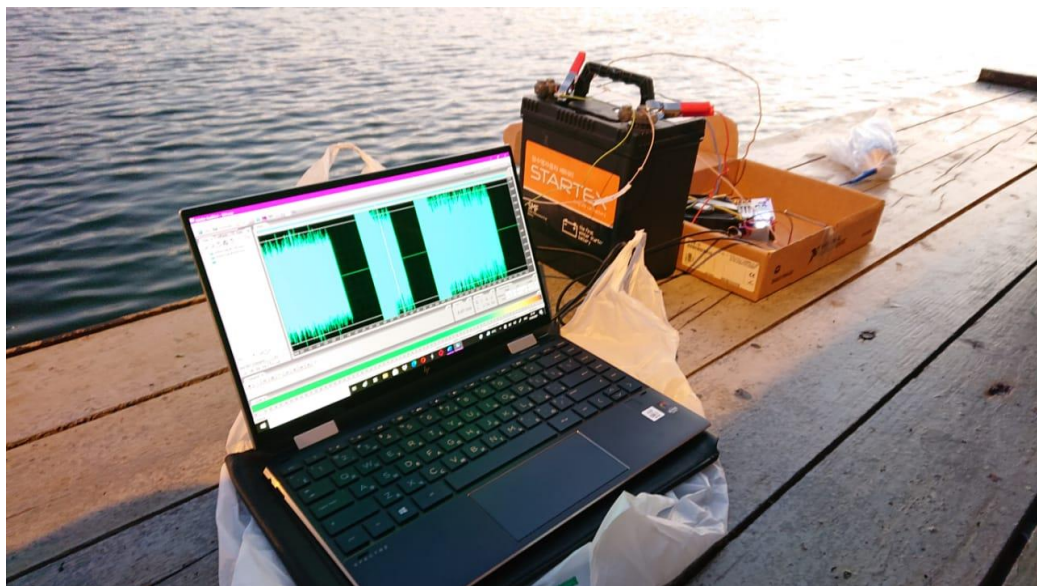


Рисунок 56 – Оборудование для передачи сигнала

Двумя годами ранее, при написании моей ВКР бакалавра, нами был построен магнитный передатчик с трактом антенн, а также рассчитаны параметры канала. Согласно этим данным, можно произвести расчет для спроектированной в настоящее время системы подводной передачи МИ-сигнала.

Ранее было установлено, что рисунок 57 показывает принимаемую мощность сигнала, которая зависит от удаленности передатчика и приемника [13].

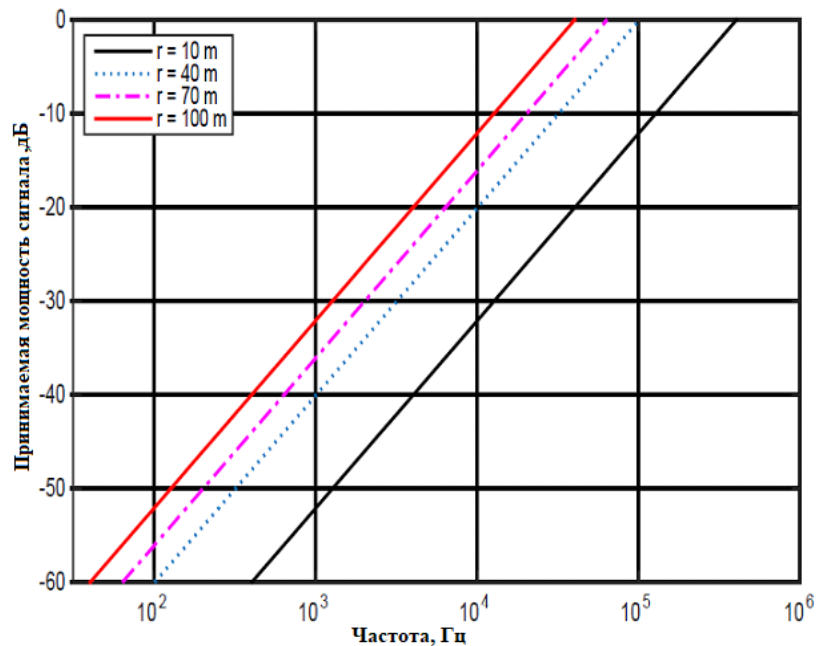


Рисунок 57 - Принятая мощность сигнала в зависимости расстояния

Был произведен расчёт, согласно формулам, представленным в главе 2 и 3. Определив мощность шума, и взяв SNR для АМ сигнала 20, произведем расчет принимаемой мощности:

$$P_{ш} = 30 \cdot 10^{-17} \text{ Вт},$$

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} = 20,$$

$$P_c = 60 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}.$$

Следовательно, при коэффициенте $K = 3$, $f = 153$ кГц, и $R = 10$ метров:

$$60 \cdot 10^{-16} = 20 \log(\omega \cdot \mu \cdot H \cdot K_y),$$

$$I = 8 \text{ А},$$

Напряженность МП определяется по формуле:

$$H = \frac{I}{2R} = 0,4 \frac{A}{m}.$$

На рисунке 58 показаны полученные значения потерь при затухании для морской и пресной воды, в зависимости от расстояния и частоты [43].

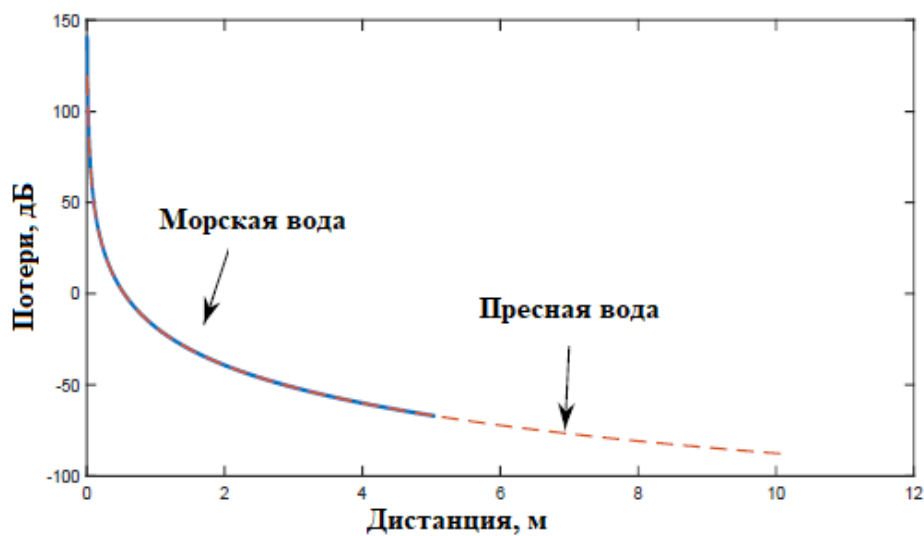


Рисунок 58 - Значение потерь в зависимости от расстояния

Приняв w -полоса пропускания (20000 Гц). Была рассчитана емкость для нашей системы связи, которая составила около 27 кбит/с.

Выполняя разработку передатчика с несущей частотой 153 кГц, было учтено, что структура РПДУ изначально требует усиления сигнала, чтобы с ним можно было работать в дальнейшем (если построить передатчик на одном усилителе мощности, сигнал будет очень слаб по напряжению). Для построения общей схемы передатчика, использовались пара каскадов предварительного усиления на БПТ. Основные требования, предъявляемые к каскадам предусилителя: максимальный коэффициент усиления; минимальные частотные, фазовые искажения.

На рисунке 59 представлена схема спроектированного передатчика в программе Multisim, включающего в себя: генератор сигналов; предварительные

каскады усиления; усилитель мощности; антенну (выполненную в виде LC – контура); блок питания; осциллограф.

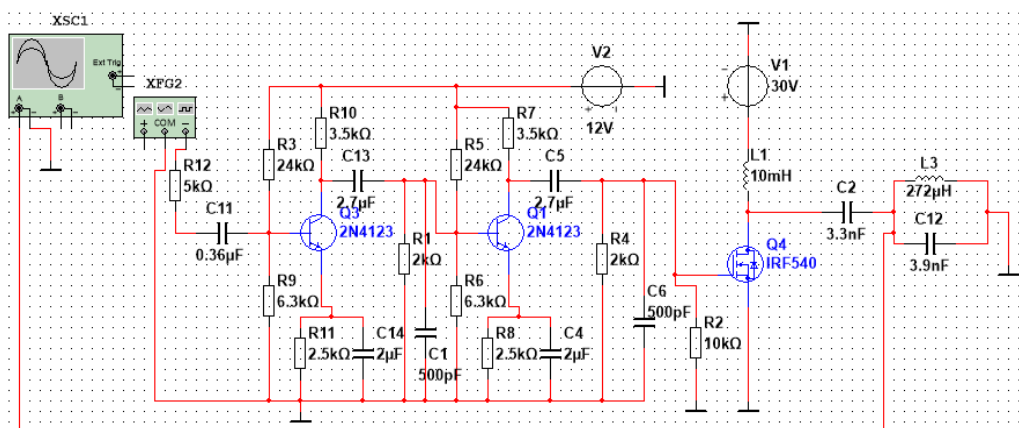


Рисунок 59 - Смоделированная схема РПДУ

После того, как работоспособность схемы была проверена, было решено произвести пайку электронной платы.

Обладая всеми необходимыми программными инструментами и электронные средствами, было произведено моделирование канала связи с использованием изготовленных магнитных антенн. Следующим этапом являлась подача цифрового сигнала на низкочастотный вход передатчика, и установление его по необходимому уровню напряжения. Для того чтобы понизить напряжение питания платы с +12 до +6 В, применялся преобразователь DC-DC, который был подключен к источнику питания. После подключения приемной антенны к осциллографу, и параллельного расположения антенн на расстоянии, сигнал с передающей антенны был принят приемной, показанный на рисунке 60.

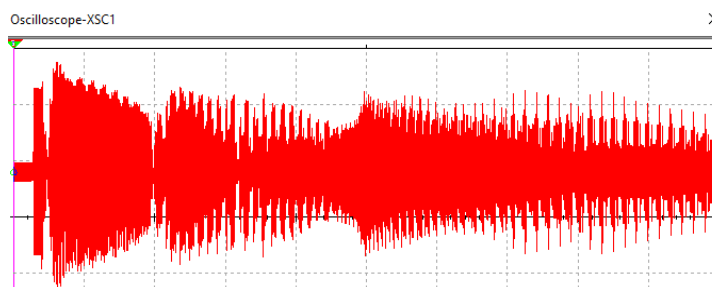


Рисунок 60 - Выходной сигнал на антенне РПДУ

Картина полученного информационного сигнала отображалась на экране. Было отмечено в ходе испытаний, что чем ближе антенны находятся относительно друг друга, тем выше по амплитуде принятый сигнал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, магнитоиндуктивная связь является многообещающим методом подводной передачи полезных данных. Она обладает существенными плюсами: на нее не влияют большие задержки распространения, многолучевое распространение.

Перспективные особенности подводной МИ-связи могут способствовать созданию новых эффективных направлений их применения и способствовать развитию различных способов организации каналов ближнепольной связи в водной среде.

Характерными недостатками систем МИ-связи являются - узкая полоса пропускания сигнала, ограниченная дальность его передачи и высокая чувствительность катушки; на рассмотрение этих фундаментальных вопросов необходимо сосредоточить внимание для развития и применения подводной связи с использованием МИ-метода.

При проектировании магнитных антенн нужно учесть, что они должны работать на низких частотах в морской воде из-за затухания и наведенных вихревых токов, создающих вторичное поле в проводящей среде. Также при производстве расчетов было установлено, что в МИ-каналах связи дальность передачи меньше, чем длина волны.

Подводя итог, считаю необходимым развивать в России проекты, направленные на разработку новейших систем связи. Именно эта отрасль станет основополагающей в развитии экономики, поднятии научного престижа нашей страны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.Н. Бабицкий, Б.А. Беляев, Н.М. Боев, Р.Г. Галлеев. Передатчики ближнепольных магнитных систем связи // "Издательство Радиотехника": научно-техническая литература. 2017. № 2. С. 111-114. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20309/> (дата обращения: 25.10.2020).
2. В.И. Хомич. Ферритовые антенны. М. Энергия. 1969. 96 с. с ил.
3. В.И. Хомич. Ферритовые антенны. М. Энергия. 1989. 95 с. с ил.
4. Мобильный радиокomплекc беспроводной подводной связи *IVA S/W* // *IVA Technologies* - российская компания-производитель высокотехнологичного ИТ-оборудования и программного обеспечения, выпускаемого ГК «ХайТэк». URL: [https:// iva-tech.ru/catalog/product-iva-s-w/](https://iva-tech.ru/catalog/product-iva-s-w/) (дата обращения: 18.11.2020).
5. Системы многоабонентной электромагнитной связи и управления биообъектами в электропроводящих средах. Рублёв В.П.; научный руководитель В.И. Короченцев. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук № 61:07-5/3327. Владивосток: ДВГТУ, 2007. 173 с.
6. Шибков А.Н. Электромагнитные системы информационного обеспечения подводных инженерно-технических работ. Теория и эксперимент. Владивосток: Дальнаука - 2005, 231 с.
7. I. Akyildiz, «Realizing underwater communication through magnetic induction», IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 11, pp. 42–48, November 2015.
8. H. Guo, Z. Sun, and P. Wang. Multiple frequency band channel modeling and analysis for magnetic induction communication in practical underwater environments. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 66, no. 8, pp. 6619-6632, Aug. 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7842558/>. - 19.06.2020.

9. A. Kulkarni, «Optical filter enabled continuous disinfection of hospital rooms using multi-sensor feedback aided light source», *Procedia Computer Science*, vol. 125, pp. 459–467, 2018.
10. V. Kumar, D. N. Sandeep, «Multi-hop communication based optimal clustering in hexagon and voronoi cell structured wsns», *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Accepted for publication, 2018.
11. 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. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8739834/>. - 19.06.2020.
12. Z. Sun and I. F. Akyildiz. Underground wireless communication using magnetic induction. In *Proc. IEEE ICC*, Dresden, Germany, Jun. 2009, pp. 1-5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5452976/>. - 19.06.2020.
13. B. Gulbahar and O.B. Akan. A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 9, pp. 3326-3334, Sept. 2012. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6241393/>. - 19.06.2020.
14. B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, pp. 1819-1825, Jul. 2009. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5175611/>. - 19.06.2020.
15. Binbin Chai, Xin Zhang, Jinhong Wang. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea. 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) Year: 2018 Conference Paper Publisher: IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8559464/>. - 19.06.2016.
16. Comsol Multiphysics [computer software] (2020). [Online]. Available: URL: <https://www.comsol.com/>. - 19.06.2020.
17. D. Ahn and S. Hong. A transmitter or a receiver consisting of two strongly coupled resonators for enhanced resonant coupling in wireless power transfer. *IEEE*

Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 3, pp. 1193- 1203, Mar. 2013. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6494613/>. - 19.06.2020.

18. F. Akyildiz, P. Wang, and Z. Sun. Realizing underwater communication through magnetic induction. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 11, pp. 42-48, Nov. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7321970/>. -19.06.2020.

19. G. Foschini and M. Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998. URL: <http://www.ee.columbia.edu/~jiantan/E6909/foschini-andgans.pdf/>. - 19.06.2020.

20. G. G. Raleigh and J. M. Cioffi. Spatio-temporal coding for wireless communication. *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 3, pp. 357-366, Mar. 1998. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/662641/>. - 19.06.2020.

21. H. C. Jing and Y. E. Wang. Capacity performance of an inductively coupled near field communication system. In *Proc. Antennas and Propag. Int. Symp. Dig.*, San Diego, CA, Jul. 2008, pp. 1-4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4619268/>. - 19.06.2020.

22. H. Guo and Z. Sun. Full-duplex metamaterial-enabled magnetic induction networks in extreme environments. In *Proc. IEEE INFOCOM*, Honolulu, HI, USA, Apr. 2018, pp. 558-566. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8486205/>. - 19.06.2020.

23. H. Guo and Z. Sun. Increasing the capacity of magnetic induction communication using MIMO coil-array. In *Proc. IEEE GLOBECOM*, Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7841893/>. - 19.06.2020.

24. H. Guo, Z. Sun, and C. Zhou. Practical design and implementation of metamaterial-enhanced magnetic induction communication. *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17 213-17 229, Jun. 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7956145/>. - 19.06.2020.

25. H. Guo, Z. Sun, and P. Wang. Channel modeling of MI underwater communication using tri-directional coil antenna. In Proc. IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7417399/>. - 19.06.2020.
26. H. Guo, Z. Sun, J. Sun, and N. M. Litchinitser. M₂I: Channel modeling for metamaterial-enhanced magnetic induction communications. IEEE Trans. Antenna Propag., vol. 63, no. 11, pp. 5072-5087, Nov. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7272068/>. - 19.06.2020.
27. H. J. Kim, J. Park, K. S. Oh, J. P. Choi, J. E. Jang, and J. W. Choi. Near-field magnetic induction MIMO communication using heterogeneous multipole loop antenna array for higher data rate transmission. IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 64, no. 5, pp. 1952-1962, May 2016. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7428884/>. - 19.06.2020.
28. H. Nguyen, J. I. Agbinya, and J. Devlin. FPGA-based implementation of multiple modes in near field inductive communication using frequency splitting and MIMO configuration. IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 62, no. 1, pp. 302-310, Jan. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6918550/>. - 19.06.2020.
29. H. Sampath, P. Stoica, and A. Paulraj. Generalized linear precoder and decoder design for MIMO channels using the weighted MMSE criterion. IEEE Trans. Commun., vol. 49, no. 12, pp. 2198-2206, Dec. 2001. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/974266/>. - 19.06.2020.
30. H. Zhou, Y. Li, and T. Jiang. Sea clutter distribution modeling: Akernel density estimation approach. In Proc. WCSP. Hangzhou, China, Oct. 2018, pp. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8555876/>. - 19.06.2020.
31. Hongzhi Guo, Zhi Sun. Demo abstract: Prototyping M₂I communication system for underground and underwater networks. In Proc. IEEE INFOCOM Poster/Demo, Atlanta, GA, USA, May 2017, pp. 962-963. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8116511/>. - 19.06.2020.
32. I.S. Bogie. Conduction and magnetic signalling in the sea a background review. Radio and Electron. Engineer, vol. 42, no. 10, Oct. 1972, pp. 447-452. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5268359/>. - 19.06.2020.

33. J. Winters. On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 5, no. 5, pp. 871-878, Jun. 1987. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1146600/>. - 19.06.2020.
34. J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, and W.J. Stewart. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/798002/>. - 19.06.2020.
35. J.I. Agbinya and M. Masihpour. Power equations and capacity performance of magnetic induction body area network nodes. In *Proc. IB2Com, Malaga, Spain*, Dec. 2010, pp. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5723607/>. - 19.06.2020.
36. J.J. Sojdehei, P.N. Wrathall, and D.F. Dinn. Magneto-inductive (MI) communications. In *Proc. MTS/IEEE Oceans*, Nov. 2001, pp. 513-519. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/968775/>. - 19.06.2020.
37. J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1244790/>. - 19.06.2020.
38. L. Erdogan and J. F. Bousquet. Dynamic bandwidth extension of coil for underwater magneto-inductive communication. In *Proc. IEEE APSURSI, Memphis, TN, USA*, Jul. 2014, pp. 1576-1577. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6905114/>. - 19.06.2020.
39. L. Solymar, I. R. Young, T. Floume, and R. R. A. Syms. Thin-film magneto-inductive cables. *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, p. 055102, 2010. URL: https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-engineering/electrical-and-electronic-engineering/public/optical-and-semiconductor-devices/pubs/MI_flex_cable.pdf/. - 19.06.2020.
40. M. Dionigi and M. Mongiardo. Multi band resonators for wireless power transfer and near field magnetic communications. In *Proc. IEEE MTT-S, Kyoto, Japan*,

May 2012, pp. 61-64. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6215820/>. - 19.06.2020. [52]

41. M. Masihpour and J.I. Agbinya. Cooperative relay in near field magnetic induction: A new technology for embedded medical communication systems. In Proc. IB2Com, Malaga, Spain, Dec. 2010, pp. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5723612/>. - 19.06.2020.

42. M. Vu and A. Paulraj. MIMO wireless linear precoding. *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 86-105, Sept. 2007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4350229/>. - 19.06.2020. [57]

43. M.C. Domingo. Magnetic induction for underwater wireless communication networks. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 6, pp. 2929-2939, Jun. 2012. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6183466/>. - 19.06.2020.

44. M.O. Hasna and M.S. Alouini. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1244790/>. - 19.06.2020.

45. R. B. Gottula. Discrete-time implementation, antenna design, and MIMO for near-field magnetic induction communications. Ph.D. dissertation, Univ. Brigham Young, Provo, UT, USA, 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/318735578_Magnetic_induction_antenna_arrays_for_MIMO_and_multiple-frequency_communication_systems/. - 19.06.2020.

46. R. Wang, M. Tao, and Z. Xiang. Nonlinear precoding design for MIMO amplify-and-forward two-way relay systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 9, pp. 3984-3995, Nov. 2012. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6259919/>. - 19.06.2020.

47. S. Kisseleff, B. Sackenreuter, I. F. Akyildiz, and W. Gerstacker. On capacity of active relaying in magnetic induction based wireless underground sensor networks. In Proc. IEEE ICC, London, UK, Jun. 2015, pp. 6541-6546. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7249367/>. - 19.06.2020.

48. S. Kisseleff, I.F. Akyildiz, and W. Gerstacker. Disaster detection in magnetic induction based wireless sensor networks with limited feedback. In Proc. IFIP WD, Nov. 2014, pp. 1-7. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7020824/>. - 19.06.2020.
49. S. Kisseleff, I.F. Akyildiz, and W. Gerstacker. Interference polarization in magnetic induction based wireless underground sensor networks. In Proc. IEEE PIMRC, London, UK, Sept. 2013, pp. 71-75. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6707839/>. - 19.06.2020.
50. S. Kisseleff, W. Gerstacker, R. Schober, Z. Sun, and I.F. Akyildiz. Channel capacity of magnetic induction based wireless underground sensor networks under practical constraints. In Proc. IEEE WCNC, Shanghai, China, Apr. 2013, pp. 2603-2608. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6554972/>. - 19.06.2020.
51. S. Li, Y. Sun, and W. Shi. Capacity of magnetic-induction MIMO communication for wireless underground sensor networks. Int. J. of Distrib. Sensor Netw., vol. 11, no. 10, p. 426324, Oct. 2015. URL: <https://www.scilit.net/article/9f3937ba839868684bbaf4d47c1cb41/>. - 19.06.2020.
52. Sana Ramadan. Underwater communication through magnetic induction (mi). Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science at Dalhousie University Halifax, Nova Scotia October 2017. URL: <https://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/73429/Sana-Ramadan-MASc-ECED-October-2017.pdf?sequence=1/>. - 19.06.2016.
53. Sana Ramadan. Underwater communication through magnetic induction (MI). Dalhousie University. Halifax, Nova Scotia. 2017.
54. Soham Desai, Vaishnendr D Sudev, Xin Tan, Pu Wang, Zhi Sun. Enabling Underwater Acoustic Cooperative MIMO Systems by Metamaterial-Enhanced Magnetic Induction. 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8885489/>. - 19.06.2016.
55. T. L. Marzetta and B. M. Hochwald. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading. IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45,

no. 1, pp. 139-157, Jan. 1999. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/7c01/5fdcb506cd570c2691124c263186b2c51cb0.pdf> /. - 19.06.2020.

56. V.G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, no. 4, p. 509, 1968. URL: <https://ru.scribd.com/doc/306529292/The-Electrodynamics-of-Substances-with-Simultaneously-Negative-Values-of-ε-and-μ-by-Veselago/>. - 19.06.2020.

57. W. Q. Niu, J. X. Chu, W. Gu, and A. D. Shen. Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems. *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 60, no. 6, pp. 1670-1677, Jun. 2013. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6363491/>. - 19.06.2020.

58. W. Q. Niu, W. Gu, J. X. Chu, and A. D. Shen. Coupled-mode analysis of frequency splitting phenomena in CPT systems. *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 12, pp. 723-724, Jun. 2012. URL: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2012.0953/>. - 19.06.2020.

59. X. Tan, Z. Sun, and I. F. Akyildiz, “Wireless underground sensor networks: MI-based communication systems for underground applications,” *IEEE MAP*, vol. 57, no. 4, pp. 74-87, Aug. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7225093> - 19.06.2020.

60. Y. M. N. Tal and Y. Levron. Magnetic induction antenna arrays for MIMO and multiple-frequency communication systems. *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 75, pp. 155-167, 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/318735578_Magnetic_induction_antenna_arrays_for_MIMO_and_multiple-frequency_communication_systems/. - 19.06.2020.

61. Yuzhou Li, Shengnan Wang, Cheng Jin, Yu Zhang, Tao Jiang. A Survey of Underwater Magnetic Induction. *Communications: Fundamental Issues, Recent Advances, and Challenges IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3),2466-2487-2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8634811/>. - 19.06.2020.

62. Z. Sun and I. F. Akyildiz. Deployment algorithms for wireless underground sensor networks using magnetic induction. In Proc. IEEE GLOBECOM, Miami, FL, USA, Dec. 2010, pp. 1-5. GLOBECOM, San Diego, CA, USA, Dec. 2015, pp. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5683339/>. - 19.06.2020.
63. Z. Sun and I. F. Akyildiz. Distributed Cross-Layer Protocol Design for Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks. IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 7, pp. 2426-2435, Jul. 2010. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7065306/>. - 19.06.2020.
64. Z. Sun and I. F. Akyildiz. On capacity of magnetic induction-based wireless underground sensor networks. In Proc. IEEE INFOCOM, Orlando, FL, USA, Mar. 2012, pp. 370-378. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6195774/>. - 19.06.2020.
65. A.K. Sharma, S. Yadav, S.N. Dandu, V. Kumar, J. Sengupta, S.B. Dhok, and S. Kumar. Magnetic induction-based non-conventional media communications: A review. IEEE Sensors J., vol. 17, no. 4, Feb. 2017, pp. 926-940. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7784762/>. - 19.06.2020.
66. Z. Sun, I. F. Akyildiz, S. Kisseleff, and W. Gerstacker. Increasing the capacity of magnetic induction communications in RF-challenged environments. IEEE Trans. on Commun., vol. 61, no. 9, pp. 3943- 3952, Sept. 2013. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6567880/>. - 19.06.2020.
67. Z. Zhang, E. Liu, X. Qu, D. Liu, R. Wang, and F. Liu. Effective coverage for the connectivity of magnetic induction-based ad hoc networks. In Proc. IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, USA, Dec. 2015, pp. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7417653/>. - 19.06.2020.
68. A novel resonator for simultaneous wireless power transfer and near field magnetic communications. In Proc. IEEE MTT-S, Montreal, QC, Canada, Jun. 2012, pp. 1-3. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6259383/>. - 19.06.2020.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ	10
2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРАКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ВОДНОЙ СРЕДЕ.....	24
3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	35
4 ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ И ИХ ТЕСТИРОВАНИЕ	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	82