

Низкочастотные магнитоэлектрические антенны: обзор

В. С. Комаров✉, В. С. Леонтьев, И. Ю. Марков, М. И. Бичурин

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,
Великий Новгород, Россия

✉ Vyacheslav.Komarov@novsu.ru

Аннотация.

Цель работы: Представить систематический обзор современного состояния низкочастотных магнитоэлектрических (МЭ) антенн, включая анализ принципов работы, эволюции конструктивных решений и перспектив развития.

Материалы и методы: Проведен анализ научных публикаций, посвященных МЭ-антеннам. Использованы методы сравнительного анализа и обобщения для выявления ключевых тенденций.

Результаты: Рассмотрены базовые принципы работы МЭ-антенн и механизм их излучения, обусловленный совместным вкладом электрического и магнитного диполей. Проанализированы конструктивные методы повышения эффективности излучения: гибридные магнитомеханоэлектрические (ММЭ) антенны с колеблющимся магнитом и структуры Розен-типа. Исследованы способы расширения функциональности, включая увеличение скорости передачи данных (до 2 кбит/с), отказ от внешнего поля подмагничивания (антенны без внешнего подмагничивания) и применение антенных решеток для управления полосой пропускания и чувствительностью. Отдельное внимание уделено материаловедческому подходу к оптимизации пьезоэлектриков, позволяющему одновременно достигать высокой пьезоактивности и механической добротности (на примере пьезокерамики на основе твердого раствора $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Zr}_{0.49}\text{Ti}_{0.51})\text{O}_3$).

Заключение: Показано, что технология низкочастотных МЭ-антенн стремительно развивается: от базовых прототипов до сложных гибридных структур, высокоскоростных излучателей, автономных антенн без внешнего подмагничивания и антенных решеток. Выделены ключевые направления дальнейших исследований: гибридизация источников излучения, структурная оптимизация, создание материалов с улучшенными свойствами, а также решение проблем дальности связи, интеграции и стандартизации. Обозначены перспективные области применения: подводная и подземная связь, биомедицина, оборона и навигация.

Ключевые слова: низкочастотная связь, очень низкие частоты, магнитоэлектрическая антенна, магнитоэлектрический эффект, пьезоэлектрик, магнитострикция, Метглас, ЦТС, Terfenol-D, подводная связь

Для цитирования: Низкочастотные магнитоэлектрические антенны: обзор / В. С. Комаров, В. С. Леонтьев, И. Ю. Марков, М. И. Бичурин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 7. С. 15–33. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-7-15-33.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-15-20044, <https://rscf.ru/project/24-15-20044/>.

Review article

Low-Frequency Magnetoelectric Antennas: A Review

V. S. Komarov✉, V. S. Leontiev, I. Yu. Markov, M. I. Bichurin

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

✉ Vyacheslav.Komarov@novsu.ru

Abstract.

Purpose of the work. To provide a systematic review of the current state of low-frequency magnetoelectric (ME) antennas, including analysis of operating principles, design evolution, and development prospects.

Materials and methods. An analysis of scientific publications on ME antennas was carried out. Comparative analysis and generalization methods were used to identify key trends.

Results. The basic operating principles of ME antennas and their radiation mechanism, resulting from the combined contribution of electric and magnetic dipoles, are considered. Design methods for improving radiation efficiency are analyzed: hybrid magneto-mechano-electric (MME) antennas with an oscillating magnet and Rosen-type structures. Ways to expand functionality are studied, including increasing data transmission rates (up to 2 kbps), eliminating the external bias field (bias-free antennas), and using antenna arrays to control bandwidth and sensitivity. Special attention is paid to the materials science approach to optimizing piezo-electrics, which makes it possible to simultaneously achieve high piezoelectric activity and mechanical quality factor (using the example of piezoceramics based on the solid solution $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.49}\text{Ti}_{0.51})\text{O}_3$).

Conclusion. It is shown that the technology of low-frequency ME antennas is developing rapidly: from basic prototypes to complex hybrid structures, high-speed emitters, autonomous bias-free antennas, and antenna arrays. Key directions for further research are identified: hybridization of radiation sources, structural optimization, creation of materials with improved properties, as well as solving problems of communication range, integration, and standardization. Promising application areas are outlined: underwater and underground communications, biomedicine, defense, and navigation.

Keywords: low-frequency communication, very low frequencies, magnetoelectric antenna, magnetoelectric effect, piezoelectric, magnetostriction, Metglas, PZT, Terfenol-D, underwater communication

For citation: Low-Frequency Magnetoelectric Antennas: A Review / V. S. Komarov, V. S. Leontiev, I. Yu. Markov, M. I. Bichurin// LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 7. P. 15–33. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-7-15-33.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-15-20044, <https://rscf.ru/project/24-15-20044/>.

Введение. Развитие радиосвязи с самого начала было сопряжено с необходимостью преодоления ограничений, накладываемых физическими принципами излучения электромагнитных волн. Одной из важнейших задач стало теоретическое описание пределов возможностей электрически малых антенн. В 1948 г. Чу Л. Дж. [1] вывел фундаментальное соотношение, известное как предел Чу–Харрингтона, согласно которому для антенны, помещенной в сферу радиусом a , нижняя граница ее радиационной добротности Q обратно пропорциональна $(ka)^3$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны; a – радиус минимальной сферы, окружающей антенну [2], [3]. Это означает, что при уменьшении электрических размеров антенны ее способность к эффективному излучению катастрофически падает, что ведет к необходимости использования громоздких структур и колоссальных мощностей.

Данная проблема наиболее остро стоит в диапазоне очень низких частот (ОНЧ, 3...30 кГц), который имеет огромное значение для связи с подводными лодками, а также для подземной и дальней навигационной связи благодаря способности этих волн проникать в толщу морской воды и грунта. Длина волны в этом диапазоне составляет

десятки километров, поэтому даже электрически малая антенна должна иметь гигантские размеры. Ярчайшим примером служит передатчик «Катлер» (ВМС США) на частоте 24 кГц, представляющий собой систему мачт, занимающую территорию в тысячи акров и потребляющую 1.8 МВт мощности [4].

Еще более масштабные проекты разрабатывались для связи на сверхнизких частотах (СНЧ). Проект ВМС США «Sanguine», впервые обнародованный в 1968 г., предполагал создание передатчика мощностью 800 МВт, занимающего площадь, сравнимую с территорией Бельгии и Нидерландов. Позднее он был реализован в усеченном виде как проект «ELF» (1989) мощностью 5 МВт на частоте 76 Гц. Его российский аналог «ZEVS» работает на частоте 82 Гц и, по некоторым данным, является еще более мощным [5]–[7].

Таким образом, целью данного обзора служит систематический анализ низкочастотных магнитоэлектрических антенн – от базового доказательства концепции до создания специализированных структур с заданными характеристиками. В статье рассматриваются такие ключевые этапы развития, как миниатюризация и механизмы излучения, использование механических колебаний

магнита для увеличения выходной мощности, переход к структурам Розен-типа для повышения скорости передачи данных, отказ от внешнего поля подмагничивания и использование антенных решеток для управления полосой пропускания и чувствительностью.

Базовые принципы работы и механизм излучения магнитоэлектрических антенн. В ответ на ограничения, накладываемые пределом Чу–Харрингтона, в последнее десятилетие активно развивается концепция механических антенн, которые генерируют электромагнитные волны не за счет колебаний электронов в проводнике, а посредством механического движения зарядов или магнитных моментов [8]. Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) в 2015 г. инициировало программу «Механическая антенна» (АМЕВА), направленную на создание компактных передатчиков для подводной и подземной связи. Программа была разделена на две технологические области: 1 – для сверхнизких и очень низких частот (0.1...1 кГц) с целью передачи сигнала на 100 м под водой и 600 м под землей, и 2 – для очень низких частот (10...30 кГц), ориентированную на дальнюю связь (более 150 км) и передачу голоса (более 100 км) [9], [10].

Одним из наиболее перспективных типов механических антенн стали магнитоэлектрические антенны. В статье коллектива авторов под руководством Куньжэна Дуна [11] рассматривается новая конструкция системы связи в диапазоне ОНЧ, основанная на паре МЭ-антенн, работающих на принципе акустического возбуждения. В отличие от традиционных подходов, предлагаемые антенны используют не электромагнитный, а электромеханический резонанс акустических колебаний, что позволяет уменьшить размеры антенны на один-два порядка по сравнению с длиной волны за счет того, что скорость звука значительно ниже скорости света. Таким образом достигается миниатюризация и потенциально низкое энергопотребление [12], [13].

В [11] описана конструкция антенны, которая представляет собой многослойную структуру, показанную на рис. 1.

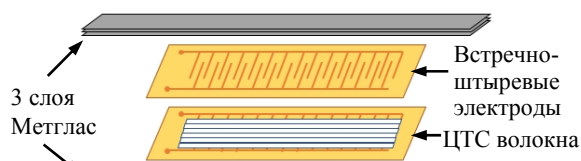


Рис. 1. Конструкция МЭ-антенны [11]

Fig. 1. ME antenna design [11]

Пьезоэлектрический элемент выполнен из пяти полосок керамики ЦТС-5А длиной 40 мм и шириной 2 мм, вырезанных из пластины толщиной 180 мкм. На них с обеих сторон наклеены гибкие печатные платы с встречно-штыревыми электродами (шаг 1 мм, ширина электродов 150 мкм). После этого при приложении напряжения 1.9 кВ/мм к сердечнику симметрично ламинируются три слоя магнитоэлектрического аморфного сплава Метглас толщиной 21 мкм, размером 100 × 9 мм. Готовая антенна имеет габариты 100 × 9 × 0.366 мм и общий объем всего 0.33 см³. Для работы на одной частоте передатчика и приемника была проведена настройка на электромеханический резонанс 23.95 кГц и использованы постоянные магниты для создания поля смещения 7.5 Э, обеспечивающего максимальный МЭ-коэффициент. Чувствительность приемной части МЭ-антенны была определена при воздействии переменного магнитного поля 5.62 нТл на резонансной частоте; выходное напряжение составило 215 мкВ, что соответствует чувствительности $3.8 \cdot 10^4$ В/Тл. Минимальный обнаруживаемый сигнал достиг 136 фТл, а спектральная плотность магнитного шума – 260 фТл/√Гц [11].

Важной частью работы [11] служит теоретическое и экспериментальное исследование механизма излучения МЭ-антенны. Структура представляет собой взаимосвязь электрического и магнитного диполей: пьезоэлектрические слои создают осциллирующий электрический диполь, а магнитоэлектрические – магнитный диполь. Для проверки этой гипотезы были измерены диаграммы направленности в ближней зоне на расстоянии 1 м от передатчика при разных ориентациях приемной петли. На плоскостях YZ и XZ радиальная компонента достигает максимума при $\theta = 0$ и минимума при $\theta = 90$, где θ – полярный угол, а полярная компонента ведет себя противоположным образом, что соответствует излучению магнитного диполя. На плоскости XY азимутальная компонента магнитного поля H_ϕ оказалась постоянной по всем направлениям, что характерно для электрического диполя. Таким образом, подтверждается, что излучение магнитоэлектрической антенны действительно обусловлено совместным вкладом обоих типов диполей [14].

Экспериментальные исследования системы связи [11] проводились с использованием установки, блок-схема которой представлена на рис. 2.

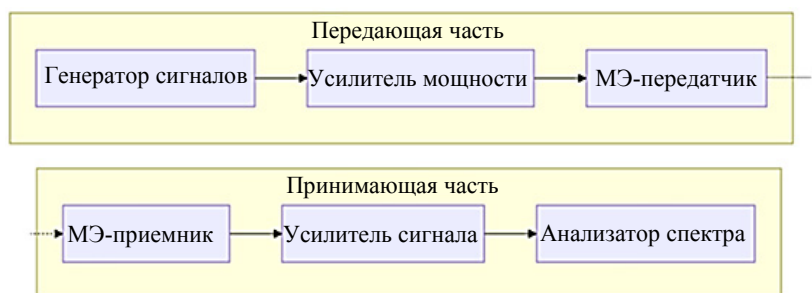


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для исследования характеристик МЭ-антенн в составе системы связи ОНЧ-диапазона [11]
Fig. 2. Block diagram of the experimental setup for studying the characteristics of ME antennas as part of a VLF communication system [11]

Авторы экспериментально подтвердили совпадение измеренных значений магнитного поля с предсказанными теоретически по модели диполей. Расхождение на малых расстояниях (менее 0.1 м) объясняется конечными размерами антенны. В текущей конфигурации дальность связи ограничена примерно 100 м, что соответствует ближней зоне, однако авторы отмечают, что это уже можно использовать для защищенной связи на коротких дистанциях благодаря быстрому спаду поля ($\sim 1/r^3$), r – расстояние от передатчика. Для увеличения дальности предлагается использовать антенные решетки, что, согласно гипотезе, увеличит дальность до 2.5...12 км при увеличении количества ЦТС в 100 раз. Кроме того, в качестве приемника могут применяться сверхчувствительные поисковые катушки с уровнем шума в несколько единиц $\text{фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$, что также расширяет возможности системы [15], [16]. Отдельный раздел [11] посвящен прямой модуляции антенны. Благодаря нелинейной зависимости деформации от намагниченности в магнитоэлектрических материалах [17], модуляцию можно осуществлять непосредственно на антенне, подавая низкочастотный сигнал на дополнительную катушку вокруг передатчика, смешанный с несущей на частоте резонанса. Такой подход позволяет разделить информационную полосу сигнала и импедансную полосу антенны, определяемую ее высокой добротностью [18]. Авторы демонстрируют передачу сигнала со скоростью 100 Гц, в спектре принятого сигнала видны несущая 23.95 кГц и две боковые полосы 23.85 и 24.05 кГц. Отношение сигнал/шум для боковых полос составило 57 дБ на расстоянии 1 м и 29 дБ – на 16 м.

Конструктивные методы повышения эффективности излучения магнитоэлектрических антенн. Коллектив под руководством Яоцзиня Вана [19] предлагает усовершенство-

ванную конструкцию, основанную на магнито-механоэлектрическом (ММЭ) эффекте. Авторы подробно анализируют ограничения существующих решений. Например, механические антенны на вращающихся магнитах или электретах [20]–[23], хотя и позволяют уменьшить размеры, сталкиваются с проблемами низкой эффективности модуляции и малой полосы пропускания из-за инерционности механического привода [24]–[26]. Альтернативой служат акустически возбуждаемые антенны на пьезо- или магнитоэлектрических резонаторах [27], [28] – они значительно компактнее, но, как правило, уступают первым в мощности излучения. Таким образом, ни один из рассмотренных подходов не обеспечивает одновременно высокую мощность, широкую полосу и компактность, что и обусловило интерес к комплексным решениям, в частности к ММЭ-антеннам.

В [19] реализована именно такая комбинированная концепция: авторы разработали ММЭ антенну, которая представляет собой консольную балку из магнитоэлектрического композита ЦТС – Метглас, на свободный конец которой крепится постоянный магнит NdFeB рис. 3.

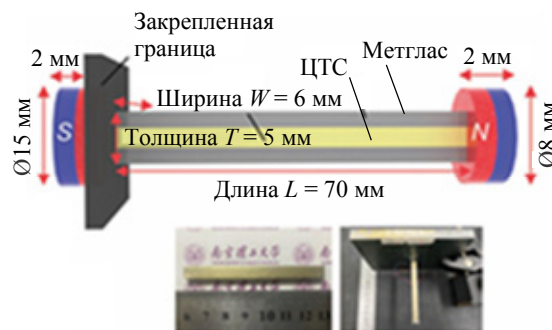


Рис. 3. Конструкция магнито-механоэлектрической антенны: схема МЭ-композиата, используемого в качестве антенны СНЧ-диапазона [19]

Fig. 3. Design of the magneto-mechano-electric antenna: schematic of the ME composite used as a VLF antenna [19]

Магнит создает оптимальное поле смещения (около 38 Э) [29], снижает резонансную частоту консоли [30] и, колеблясь, выступает дополнительным осциллирующим диполем [31]. В результате суммарное излучение складывается из вкладов магнитострикционных слоев композита и движущегося магнита, что дает значительное усиление поля.

В [19] конструкция была оптимизирована методами численного моделирования и эксперимента. Было установлено, что для достижения указанного поля смещения оптимален концевой магнит диаметром 8 и толщиной 2 мм. Ключевой результат – сравнение обычной МЭ-консоли и ММЭ-консоли с магнитом. На резонансной частоте (около 11.3 кГц) коэффициент обратной магнитоэлектрической связи для ММЭ-антенны достиг 46 Гс/В, что почти на 300 % выше, чем у МЭ-антенны без магнита (около 11.5 Гс/В); соответствующие данные представлены на рис. 4.

Этот результат показывает, что колеблющийся магнит, в отличие от пьезомагнитного слоя, не ограничен насыщением магнитострикции, что и обеспечивает дополнительное усиление излучения. Исследование диаграмм направленности в ближней зоне подтверждает двойственную природу излучения, представленной на рис. 5.

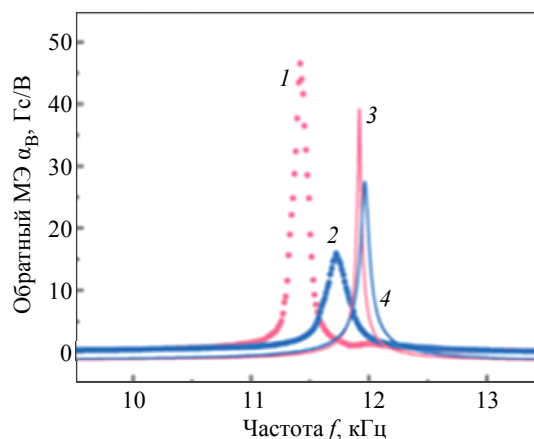


Рис. 4. Свойства обратного магнитоэлектрического эффекта в закрепленной МЭ-консоли и ММЭ-консоли: частотная зависимость динамического коэффициента обратной магнитоэлектрической связи: 1 – ММЭ-консоль (эксперимент); 2 – МЭ-консоль (эксперимент); 3 – теоретический расчет для ММЭ-консоли; 4 – теоретический расчет для МЭ-консоли. Экспериментальные данные обозначены точками [19]

Fig. 4. Properties of the converse magnetoelectric effect in the clamped ME cantilever and the MME cantilever: frequency dependence of the dynamic converse ME coefficient: 1 – MME cantilever (experiment); 2 – ME cantilever (experiment); 3 – theoretical calculation for the MME cantilever; 4 – theoretical calculation for the ME cantilever.

Experimental data are marked by dots [19]

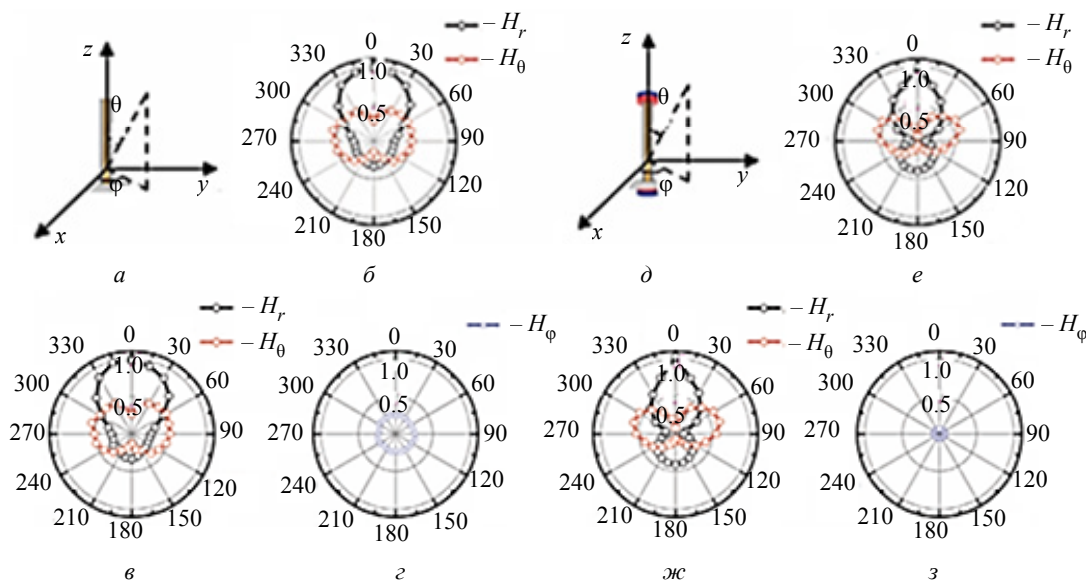


Рис. 5. Диаграммы направленности ближнего магнитного поля для консольных МЭ- и ММЭ-антенн: а–г – для МЭ-консоли; д–з – для ММЭ-консоли; а, д – представление антенны в виде диполя в сферической системе координат; б, е – диаграммы в плоскости YZ; в, ж – диаграммы в плоскости XZ; з, з – диаграммы в плоскости XY; H_r , H_θ , H_ϕ – радиальная, полярная и азимутальная компоненты магнитного поля соответственно; ϕ – азимутальный угол [19]

Fig. 5. Near-field magnetic field radiation patterns for cantilever ME and MME antennas: а–г – for the ME cantilever; д–з – for the MME cantilever; а, д – dipole representation of the antenna in spherical coordinates; б, е – patterns in the YZ-plane; в, ж – patterns in the XZ-plane; з, з – patterns in the XY-plane; H_r , H_θ , H_ϕ – the radial, polar, and azimuthal components of the magnetic field, respectively; ϕ – the azimuthal angle [19]

Для ММЭ-антенны наблюдается еще более выраженная асимметрия: излучение значительно усиливается в продольном направлении вблизи концевой магнита, что увеличивает коэффициент направленного действия антенны с 3 до 4 дБ. При этом компонента поля, создаваемая электрическим диполем, остается неизменной, что подтверждает, что колеблющийся магнит вносит вклад исключительно как магнитный диполь.

Сравнительный анализ эффективности излучения [19] показывает, что при одинаковой потребляемой мощности (до 500 мВт) ММЭ-антенна генерирует более сильное магнитное поле на расстоянии 20 см, чем свободный композит в продольно-поперечном режиме или простая МЭ-консоль. Скорость роста поля с увеличением мощности для ММЭ-антенны снижается медленнее, что дает потенциал для достижения более высокой мощности излучения. Для оценки реальной дальности связи авторы использовали высокочувствительный МЭ-сенсор в качестве приемника (рис. 6, а). Собранный сенсор на основе волокон ЦТС и Метглас продемонстрировал спектральную плотность магнитного шума $0.6 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ и сигнал 0.95 пТл на частоте 11.32 кГц . Измерения затухания поля с расстоянием показали, что на дистанции 5 м регистрируется поле $\approx 10^{-11} \text{ Тл}$, при этом экспериментальная кривая хорошо аппроксимируется законом спада квазистатического магнитного поля $1/r^3$. Теоретическое сравнение с обычным рамочным излучателем (петлей) тех же

габаритов и при той же входной мощности показало, что магнитное поле от ММЭ-антенны превышает поле рамочного излучателя более чем в 1000 раз. Расчетная эффективность ММЭ-антенны составила $4.8 \cdot 10^{-16}$, что примерно в 10^7 раз выше, чем у эквивалентной рамочной антенны, а коэффициент усиления достиг 149 дБ против 226 дБ у рамки.

В [19] авторы успешно передают аналоговый аудиосигнал без какой-либо модуляции, подавая усиленный сигнал звуковой частоты на ММЭ-антенну, представленную на рис. 6.

Далее исследована цифровая модуляция. Продемонстрирована амплитудная манипуляция (ASK) с битовым потоком 10 Гц. В спектре принятого сигнала наблюдаются несущая на частоте резонанса 11.3 кГц и две боковые полосы 23.85 и 24.05 кГц , а после демодуляции восстанавливается исходный битовый поток [19]. Однако авторы отмечают, что для ASK время нарастания и уменьшения сигнала ограничено высокой добротностью механической системы, что снижает максимально достижимую скорость передачи. В качестве более перспективного метода предлагается частотная манипуляция (FSK), которая лишена этого недостатка. Демонстрация FSK с двумя несущими частотами (11.22 и 11.42 кГц) также прошла успешно, спектр принятого сигнала показывает два четких пика, а исходный сигнал восстанавливается без ошибок. Это подтверждает совместимость ММЭ-антенны с различными схемами модуляции [32], [33].

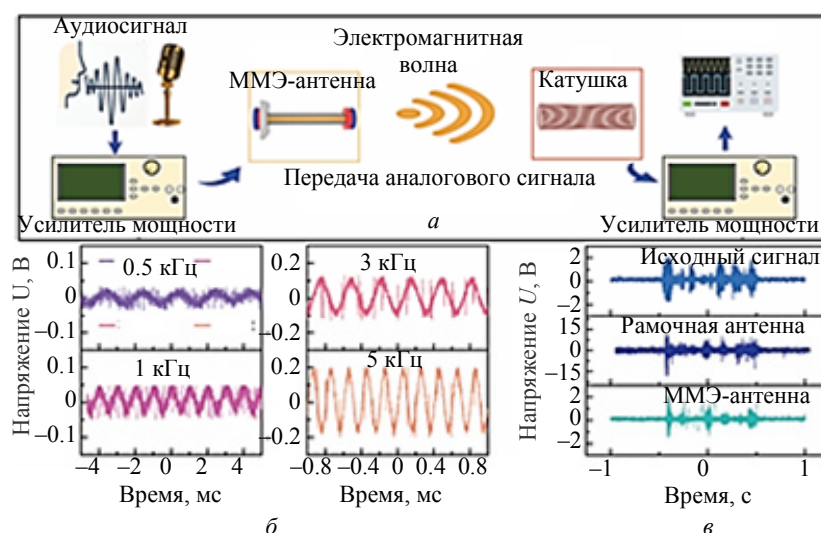


Рис. 6. Передача аналогового сигнала с использованием ММЭ-антенны с односторонним закреплением: а – схема экспериментальной установки; б – выходное напряжение приемника; в – сравнение принятого сигнала от ММЭ-антенны и рамочной антенны с исходным сигналом [19]

Fig. 6. Analog signal transmission using a clamped-free MME antenna: а – experimental setup; б – receiver output voltage; в – comparison of the received signal from the MME antenna and a loop antenna with the original signal [19]

Методы расширения функциональности.

В работе под руководством Яоцзиня Вана [34], поднимается проблема, ограничивающая развитие акустических МЭ-антенн – противоречие между интенсивностью излучения и скоростью передачи данных. Высокая механическая добротность, необходимая для усиления колебаний на частоте электромеханического резонанса и, следовательно, для получения сильного сигнала, неизбежно приводит к сужению резонансного пика [29]. Это узкополосность, которая традиционно ограничивает максимальную скорость модуляции, так как антенна не успевает отслеживать быстрые изменения амплитуды или частоты несущего сигнала. Предыдущие публикации, включая уже рассмотренные, демонстрировали либо высокую эффективность излучения, либо возможность модуляции, но скорость передачи данных в них оставалась относительно невысокой (до 100...200 Гц). Антенны Розен-типа, состоящие из пьезоэлектрического (ЦТС-4) и магнито-стрикционного (Terfenol-D) блоков, соединенных торцами встык, подробно рассмотрены в [34].

Ключевое отличие предложенной антенны от традиционных слоистых или консольных балок заключается в расположении и поляризации материалов. Антенна состоит из двух блоков: пьезоэлектрического (ЦТС-4) и пьезомагнитного (Terfenol-D), соединенных торцами встык. При подаче переменного напряжения в такой конструкции на резонансной частоте возникает резонансная мода деформации. В полуволновом режиме механическое напряжение максимально в центре композита (в области соединения) и спадает к краям, в то время как смещение, наоборот, максимально на свободных концах. Такое распределение позволяет минимизировать потери на передачу деформации через клеевые соединения, которые неизбежны в многослойных структурах, и эффективно

возбуждать магнитоупругие колебания во всем объеме магнито-стрикционного материала.

В [34] авторы разработали теоретическую модель для расчета обратного МЭ-коэффициента, который служит мерой интенсивности излучения. Экспериментальные измерения, проведенные при оптимальном поле смещения 450 Э, выявили два четких резонансных пика: на частотах 18.1 и 36.5 кГц. Максимальное значение обратного МЭ-коэффициента составило 1.65 Гс/В на частоте 18.1 кГц, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами. Выбор материалов также был оптимизирован: ЦТС-4 обеспечивает высокий пьезоэлектрический коэффициент d_{31} и механическую добротность, а Terfenol-D большой пьезомагнитный коэффициент q_{11} , что напрямую влияет на значение обратного МЭ-коэффициента. Исследование излучательных характеристик [34] показало, что созданное поле подчиняется закону спада магнитного диполя ($1/r^3$). На расстоянии 0.2 м при увеличении входной мощности наблюдается нелинейный рост индукции, стремящийся к насыщению, что связано с ограничениями намагниченности материала и нелинейными эффектами [12]. В ходе сравнительного анализа эффективности было установлено, что предложенная антенна превосходит по интенсивности излучения классическую рамочную антенну тех же габаритов на два порядка, а по эффективности излучения – на три порядка. Расчетная эффективность антенны Розен-типа составила $3.83 \cdot 10^{-18}$, что в 2330 раз выше, чем у рамки ($1.65 \cdot 10^{-21}$). Это доказывает, что структура Розен-типа позволяет сохранить высокую эффективность, характерную для резонансных магнитоэлектрических антенн.

Однако главным достижением [34] служит демонстрация рекордно высокой скорости передачи данных. Используя простейший вид модуляции –

Табл. 1. Сравнение характеристик механической антенны

Tab. 1. Comparison of mechanical antenna characteristics

Метод	Тип модуляции	Частота модулирующего сигнала, Гц	Магнитная индукция ΔB	Несущая частота, Гц	Входная электрическая мощность P_{in} , Вт	Ссылка
Антенна с вращающимся магнитом	–	–	800 фТл на 100 м	500	138	[17]
	ASK	107	0.1 мкТл на 1 м	440	0.35	[18]
	FSK	8	0.6 мкТл на 1 м	21	–	[19]
Акустическая резонансная антенна	ASK	100	10 фТл на 120 м	23 950	0.4	[5]
	FSK	200	...	35 500	–	[4]
	ASK и FSK	60	40 фТл на 6 м	33 230	1.2	[20]
	ASK	1000	3.8 нТл на 0.5 м	18 100	0.11	Данная работа

амплитудную, авторы успешно передали битовый поток с частотой модулирующего сигнала 1 кГц на несущей частоте 18.1 кГц.

Поскольку используется двоичная манипуляция, бодовая скорость 2 кбод соответствует битовой скорости 2 кбит/с. Это значение на порядок превосходит результаты, представленные в сравнительной табл. 1 для других акустических антенн (100...200 Гц) и тем более для вращающихся магнитов, модуляция которых крайне затруднена из-за инерционности. Например, в [35] показана высокая добротность пьезорезонатора.

Авторы подчеркивают, что выбранная скорость 2 кбод была ограничена условиями эксперимента для обеспечения низкой вероятности битовой ошибки, но потенциально антенна способна на еще более высокие показатели, особенно при использовании многоуровневых схем модуляции.

Если в предыдущих статьях решались проблемы миниатюризации, повышения эффективности и увеличения скорости передачи данных, то здесь авторы обращают внимание на критический недостаток, присущий всем классическим магнитоэлектрическим антеннам, – необходимость внешнего магнитного поля смещения. Традиционно для достижения максимального магнитоэлектрического коэффициента требуются либо постоянные магниты, либо катушки, что увеличивает габариты системы, вносит дополнительные источники шума и создает электромагнитные помехи. В данной статье предлагается решение этой проблемы за счет создания магнитоградиентного магнитоэлектрического композита [36]–[38], который работает без внешнего подмагничивания. Основная идея [38] заключается в использовании двух типов магнестрикционных слоев Метглас с разной магнитной жесткостью. Часть слоев оставляется в исходном («мягком») состоянии, а часть подвергается отжигу при различных температурах (от 400 до 500 °С), что придает им «жесткие» магнитные свойства [37]. Композит собирается по симметричной схеме: отожженный Метглас/неотожженный Метглас/пьезоэлектрик ЦТС/неотожженный Метглас/отожженный Метглас. Механизм возникновения встроенного поля представлен на рис. 7 и заключается в следующем: под действием внешнего поля магнитные моменты во всех слоях выстраиваются сонаправленно.

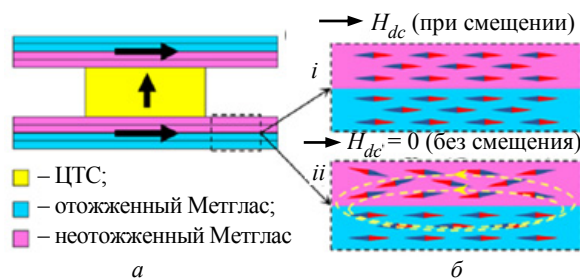


Рис. 7. Магнитоградиентный МЭ-композит для антенны без внешнего подмагничивания: *a* – схема L-T структуры (продольное намагничивание, поперечная поляризация); *б* – распределение магнитных моментов во внешнем поле i и после его снятия ii ; H_{dc} – постоянное магнитное поле (поле смещения) [38]

Fig. 7. Magneto-gradient ME composite for bias-free antenna: *a* – schematic of the L-T structure (longitudinally magnetized, transversely poled); *б* – magnetic moment distribution under external field i and after its removal ii , demonstrating the built-in bias field H_{dc} – permanent magnetic field [38]

Остаточная намагниченность отожженных слоев создает внутреннее поле, ориентирующее моменты «мягких» слоев, что обеспечивает МЭ-связь без внешнего поля.

Эксперименты [38] подтвердили работоспособность этого подхода. Наилучшие результаты были достигнуты для композита с температурой отжига 450 °С. В отсутствие внешнего поля прямой МЭ-коэффициент на резонансной частоте достигает 10^7 В/см·Э, что составляет около 63 % от максимального значения, получаемого для неотожженного композита при оптимальном внешнем смещении 8 Э. Аналогично, для обратного магнитоэлектрического эффекта, критически важного для режима передачи, значение обратного магнитоэлектрического коэффициента при нулевом смещении составило 9 Гс/В на резонансе, что соответствует 33 % от максимума. Приемник на основе такого же магнитоградиентного композита также был охарактеризован. При возбуждении полем 100 нТл на резонансной частоте 17.9 кГц было получено отношение сигнал/шум 54 дБ, что соответствует чувствительности $1.13 \cdot 10^4$ В/Тл и пределу обнаружения 0.5 нТл, показанному на рис. 8.

Эффективность излучения передатчика в режиме без внешнего подмагничивания оценена в $4.96 \cdot 10^{-17}$. Авторами [38] была разработана и экспериментально исследована полнодуплексная система связи на основе пары антенн без внешнего подмагничивания, выполняющих функции передатчика и приемника. Ключевым элементом конструкции стало согласование импедансных

характеристик: резонансная частота передатчика (соответствующая максимуму импеданса) была приведена в соответствие с антирезонансной частотой приемника (минимум импеданса), что

обеспечило максимизацию выходного сигнала системы [38]. Измерения показали, что при потребляемой мощности 200 мВт (напряжение 3.5 В) создаваемое магнитное поле спадает с рас-

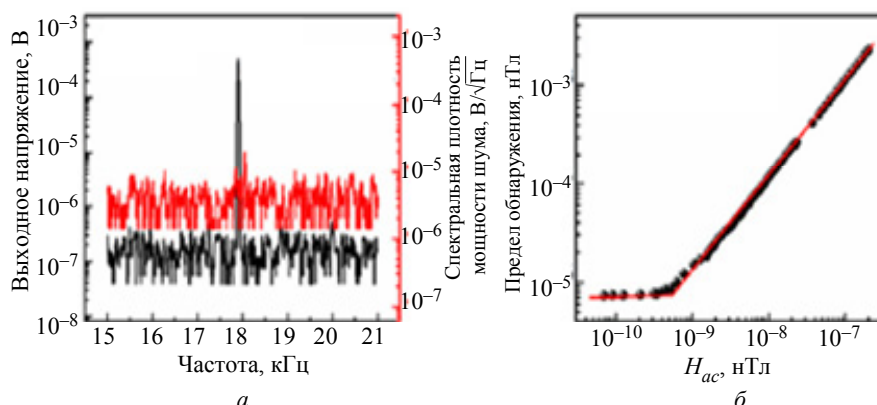


Рис. 8. Характеристики МЭ-приемника без внешнего подмагничивания: *a* – спектр выходного напряжения и спектральная плотность мощности шума при амплитуде переменного магнитного поля $H_{ac} = 100$ нТл; *б* – предел обнаружения в зависимости от H_{ac} . Отношение сигнал/шум составляет 54 дБ.

Предел обнаружения на резонансной частоте 17.9 кГц ≈ 0.5 нТл [38]
 Fig. 8. Characteristics of the bias free ME receiver: *a* – output voltage spectrum and noise power spectral density at an alternating magnetic field amplitude $H_{ac} = 100$ nT; *б* – limit of detection versus H_{ac} . The signal-to-noise ratio is 54 dB.

The limit of detection at the resonance frequency of 17.9 kHz is ≈ 0.5 nT [38]

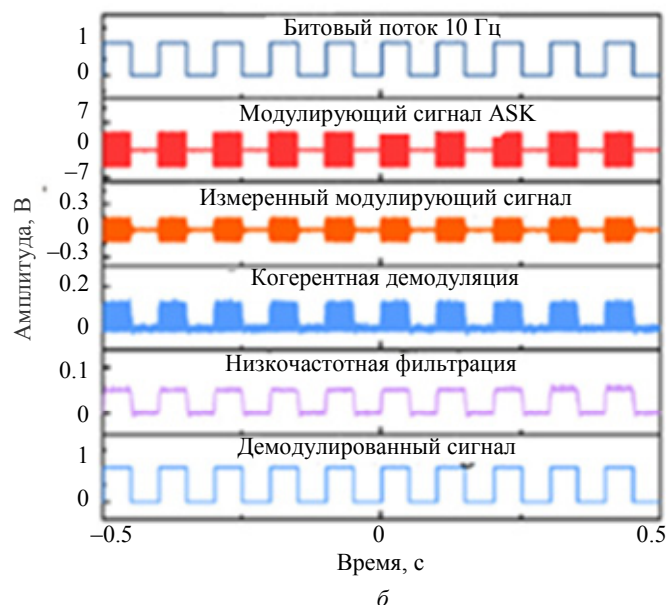


Рис. 9. Демонстрация работы МЭ-системы связи на основе антенн без смещения: *a* – схема соединения передатчика и приемника; *б* – спектр сигнала на различных этапах передачи [38]

Fig. 9. Demonstration of the ME communication system operation based on bias-free antennas: *a* – schematic of the transmitter and receiver connection; *б* – signal spectrum at different transmission stages [38]

стоянием по закону, близкому к дипольному, и на дистанции 1.4 м регистрируется поле порядка 10^{-9} Тл. Как и в предыдущих публикациях, наблюдалось насыщение интенсивности излучения при увеличении напряжения, связанное с ограничениями магнитострикции. Наконец, была продемонстрирована возможность цифровой модуляции в такой системе. Используя амплитудную манипуляцию с несущей частотой 17.9 кГц, авторы успешно передали битовый поток с частотой 10 Гц, представленный на рис. 9.

Выбор относительно низкой скорости передачи обусловлен добротностью системы ($Q = 52$), которая лимитирует длительность фронтов сигнала при амплитудной манипуляции. Тем не менее успешная демодуляция и четкое различение логических уровней «0» и «1» подтверждают принципиальную возможность использования антенн без внешнего подмагничивания для передачи цифровых данных. В [39] предложен принципиально новый подход, заключающийся в использовании антенных решеток, а не в оптимизации одиночного излучателя. Это направлено на преодоление неотъемлемого ограничения резонансных МЭ-антенн – узкой полосы пропускания, обусловленной высокой добротностью. Последняя, будучи необходимой для эффективного излучения на резонансе, жестко ограничивает рабочий диапазон частот, что, по мнению авторов, критично для приложений, требующих заданной скорости передачи данных или работы в условиях нестабильности несущей.

В [39] предложено использовать антенную решетку из двух последовательно соединенных МЭ-антенн. Теоретический анализ показывает, что такое включение позволяет не просто суммировать выходные сигналы, но и качественно изменять параметры системы. Для двух идентичных антенн выходное напряжение удваивается, уровень шума и отношение сигнал/шум увеличиваются в $\sqrt{2}$ раз [40]. Еще более важно, что при близких резонансных частотах элементов результи-

рующая частотная характеристика антенной решетки расширяется, а ее максимум смещается в промежуточную область.

Для экспериментальной реализации [39] была выбрана трехслойная структура FeGa-ЦТС8-FeGa, работающая в продольно-поперечном режиме. Пьезоэлектрические пластины ЦТС8 имели длину 17...18 мм, ширину 10 мм и толщину 2 мм, а магнитострикционные слои FeGa – размеры $14 \times 10 \times 1$ мм. Антенны собирались в многослойную структуру с помощью эпоксидной смолы, вакуумировались для удаления пузырьков и кристаллизовались под давлением 2 МПа. Готовые элементы затем монтировались на печатную плату с зазором 3 мм для формирования массива. Всего было изготовлено три одиночные антенны (№ 1, 2, 3) и две решетки: № 4 (последовательное соединение антенн № 2 и 3 с близкими частотами) и № 5 (последовательное соединение антенн № 1, 3 с разнесенными частотами).

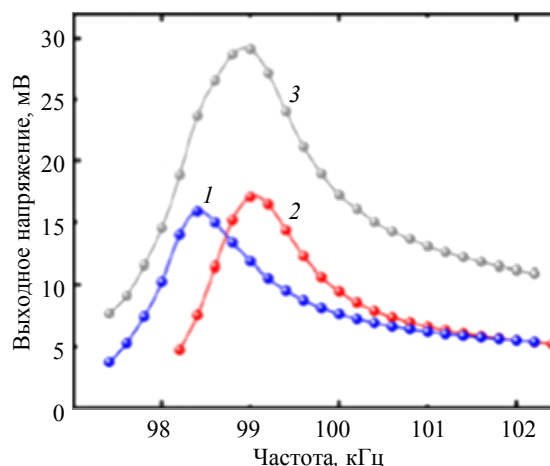


Рис. 10. Частотные характеристики выходного напряжения одиночных МЭ-антенн (№ 2, 3) и последовательной антенной решетки (№ 4): 1 – МЭ-антенна № 2; 2 – МЭ-антенна № 3; 3 – антенная решетка № 4 [39]

Fig. 10. Output voltage frequency characteristics of individual ME antennas (№ 2, 3) and the series antenna array (№ 4): 1 – ME antenna № 2; 2 – ME antenna № 3; 3 – antenna array № 4 [39]

Табл. 2. Характеристики многоканальной антенны и антенной решетки в последовательном режиме
Tab. 2. Characteristics of a multi-channel antenna and an antenna array in series mode

Характеристика МЭ-антенны	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4 (2 + 3)	№ 5 (1 + 3)
Резонансная частота, кГц	97.21	98.4	99.18	99.12	97.8/98.97
Полоса пропускания –3 дБ, кГц	96.7...98.12	98.12...99.15	98.71...99.63	98.2...99.6	96.49...99.65
Чувствительность, мВ/нТл	0.219	0.225	0.247	0.413	0.359; 0.355
Уровень шума, нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	71	77	78	103	101/102
Предел обнаружения, фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$	324.2	342.2	315.8	249.4	281.3/287.3

Измерение характеристик одиночных антенн [39] показало, что их резонансные частоты лежат в диапазоне 97...99 кГц (что соответствует верхней границе низкочастотного диапазона), чувствительность составляет от 0.219 до 0.247 мВ/нТ, а ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ – 0.92...1.42 кГц. Собственный уровень шума антенн находился на уровне $71...78$ нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что позволяло достичь предела обнаружения около 0.4...0.5 пТл, сравнительные характеристики представлены в табл. 2. Оптимальное поле смещения было определено как 13 Э. Результаты для массива № 4 (близкие частоты) представлены на рис. 10.

Чувствительность решетки выросла до 0.413 мВ/нТ, что более чем в 1.8 раза выше, чем у лучшей из одиночных антенн. Ширина полосы пропускания расширилась до 1.4 кГц по сравнению с 1.03 и 0.92 кГц у исходных элементов. Предел обнаружения снизился до 0.29 пТл. Резонансная частота массива (99.12 кГц) заняла промежуточное положение между частотами антенн № 2 (98.4 кГц) и № 3 (99.18 кГц), что полностью соответствует теоретическим предсказаниям. На этом массиве была успешно продемонстрирована амплитудная манипуляция с частотой модуляции 100 Гц: выходной сигнал решетки в состоянии «1» достигал 8.7 мВ против 5.14 и 5.17 мВ у одиночных антенн.

Массив № 5 (антенны с разнесенными частотами 97.21 и 99.18 кГц) продемонстрировал ярко выраженный двухдиапазонный характер (рис. 11).

На частотах 97.8 и 98.97 кГц чувствительность составила 0.359 и 0.355 мВ/нТ соответственно, что значительно выше исходных значений. Предел обнаружения в обоих диапазонах составил около 0.35 пТл. Такая двухчастотная антенна идеально подходит для частотной манипуляции, где логические «0» и «1» кодируются

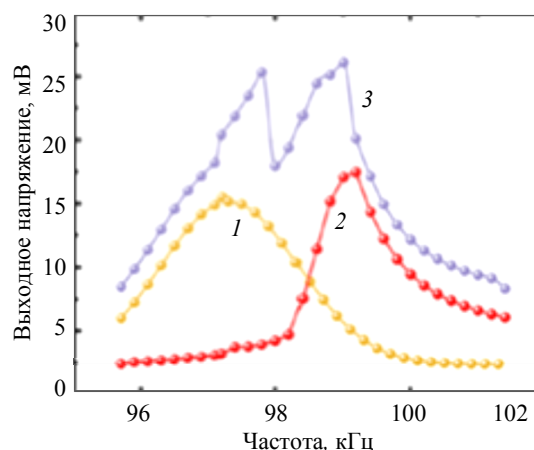


Рис. 11. Частотные характеристики выходного напряжения одиночных МЭ-антенн (№ 1, 3) и двухдиапазонной антенной решетки (№ 5): 1 – МЭ-антенна № 1; 2 – МЭ-антенна № 3; 3 – двухдиапазонная решетка № 5 [39]

Fig. 11. Output voltage frequency characteristics of individual ME antennas (№ 1, 3) and the dual-band antenna array (№ 5): 1 – ME antenna № 1; 2 – ME antenna № 3; 3 – dual-band array № 5 [39]

разными частотами. Авторы [39] это продемонстрировали, передав и приняв с помощью массива № 5 сигнал с частотной манипуляцией, модулированный последовательностью, соответствующей ASCII-коду «NPU» (01001110 10100000 01010101) с частотой манипуляции 100 Гц, показанной на рис. 12.

Вейвлет-анализ подтвердил переключение между частотами 97.8 и 98.97 кГц в соответствии с битовым потоком. Преимущество частотной манипуляции для подводной связи обусловлено практически идентичным затуханием близких частот в морской воде, что обеспечивает стабильность приема [22], [23]. Кроме того, высокая чувствительность антенной решетки позволяет либо увеличить дальность связи, либо уменьшить мощность передатчика.

Оптимизация композитной структуры.

В [41], выполненной под руководством Яоцзиня Вана, сделан важный шаг от оптимизации гео-



Рис. 12. Демонстрация работы магнитоэлектрической антенны, принимающей сигнал магнитного поля, содержащий информацию. ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь [39]

Fig. 12. Demonstration of the operation of a magnetoelectric antenna receiving a magnetic field signal containing information. FPGA – field-programmable gate array; DAC – digital-to-analog converter [39]

метрии и структуры к исследованию физических свойств материалов. Ключевая проблема, рассматриваемая авторами, – поиск пьезоэлектрика с параметрами, обеспечивающими наилучшие характеристики МЭ-антенны. В основе [41] лежит фундаментальное противоречие, сформулированное в теории Чу–Харрингтона: для традиционных электрических антенн существует обратная зависимость между эффективностью излучения и физическим размером, что делает миниатюризацию ОНЧ-передатчиков нетривиальной задачей [12]. Магнитоэлектрические антенны предлагают путь к ее решению, однако их характеристики, как подчеркивают авторы, определяются свойствами пьезоэлектрического слоя, чья деформация через обратный пьезоэффект управляет движением магнитострикционного материала. Ключевой параметр – обратный МЭ-коэффициент, влияющий на интенсивность излучения, требует одновременного обеспечения высокого пьезоэлектрического коэффициента (d_{33} , d_{31}) и высокой механической добротности. Сложность заключается в том, что для большинства пьезоэлектриков характерна обратная корреляция между этими величинами [42]–[44].

Авторы [41] предлагают теоретическую модель, связывающую обратный магнитоэлектрический коэффициент с параметрами пьезоэлектрика. Модель, выведенная из уравнений состояния и граничных условий для продольно-поперечного режима композита, показывает, что для увеличения обратного магнитоэлектрического коэффициента действительно необходимо стремиться к одновременному росту d_{31} и добротности. Руководствуясь этим выводом, исследователи синтезировали новый пьезоэлектрический материал на основе твердого раствора $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.49}\text{Ti}_{0.51})\text{O}_3$ (ПИН-ПМС-

ЦТС). Вводя различное содержание ПИН (от 2 до 8 мол. %), они обнаружили, что при концентрации $x = 0.04$ достигается оптимальное сочетание свойств: $d_{33} \approx 401$ пКл/Н (что соответствует $d_{31} \approx 193$ пКл/Н) и добротность ≈ 1510 . Это значительно превосходит показатели таких коммерческих материалов, как ЦТС-8 или ЦТС-5. Рост d_{33} объясняется нахождением состава в области морфотропной фазовой границы (МПГ) [41]. Высокая добротность достигается за счет дефектов, вносимых ионами In^{3+} и Mn^{2+} , которые, замещая Zr^{4+} и Ti^{4+} на В-позиции, образуют кислородные вакансии и дефектные диполи, «закрепляющие» движение доменных стенок и снижающие внутренние потери [42], [43].

Измерения подтвердили теорию: при оптимальном поле смещения 6–7 Э антенна на новом ПИН-ПМС-ЦТС показала обратный магнитоэлектрический коэффициент $1.78 \text{ Гс} \cdot \text{см/В}$ на частоте 17.9 кГц , что вдвое выше, чем у антенны на ЦТС-8 ($0.7 \text{ Гс} \cdot \text{см/В}$) [45]. Это доказывает синергетический эффект одновременного увеличения d_{31} и добротности. При одинаковой мощности новая антенна генерирует более сильное поле. Насыщение при высоких мощностях связано с нелинейностью магнитострикции и ограничением амплитуды колебаний магнитных доменов [46]. Измерения спада поля с расстоянием показали, что на дистанции 2.2 м поле составляет $\approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ Тл}$, экстраполяция позволяет ожидать поле выше 1 фТл на 100 м . Сравнение с эквивалентной рамочной антенной показало, что поле от МЭ-антенны выше более чем на четыре порядка.

Авторы [34] также провели сравнение характеристик различных типов механических антенн, представленных в табл. 3.

Табл. 3. Сравнение различных механических антенн для низкочастотной связи
Tab. 3. Comparison of various mechanical antennas for low-frequency communication

Метод	P_{in} , Вт	Объем, см^3	Магнитная индукция B	Частота, Гц	Скорость, бит/с	Ссылка
Антенна с вращающимся магнитом	–	58.5	0.6 мкТл на 1 м	22	8	[37]
	0.35	18.8	0.1 мкТл на 1 м	440	214	[38]
	43.9	3927	50 нТл на 10 м	30	0.2	[39]
Антенна с вращающимся электретом	–	–	1 фТл на 53 м	500	–	[40]
Пьезоэлектрическая антенна	–	18.9	–	35 500	> 400	[9]
	1.2	50.3	40 фТл на 6 м	33 230	100	[13]
МЭ-антенна	0.4	0.576	10 фТл на 120 м	23 700	> 200	[20]
	0.147	0.06	6 пТл на 5.5 м	22 230	2000	[18]
	0.6	0.96	0.5 нТл на 2.2 м	17 975	1200	Данная статья

Вращающиеся магниты [47], [48] и электреты [49] могут создавать сильное поле, но их объем велик, а модуляция затруднена из-за инерционности. Пьезоэлектрические антенны [27], [28] компактны, но уступают по полю. Предложенная магнитоэлектрическая антенна на основе ПИН-ПМС-ЦТС при компактном объеме (0.96 см^3) и потребляемой мощности 0.6 Вт обеспечивает поле 0.5 нТл на 2.2 м и демонстрирует битовую скорость 1200 бит/с, что ставит ее в ряд перспективных устройств для портативной ОНЧ-связи. Диаграммы направленности в ближней зоне подтвердили, что излучение в основном обусловлено осцилляциями магнитного диполя, со слабым вкладом электрического диполя от пьезофазы [50]. Для демонстрации практической применимости была собрана ОНЧ-система связи. С ее помощью успешно переданы аналоговый аудиосигнал (голос, музыка) и цифровой сигнал с использованием амплитудной манипуляции на несущей частоте 17.9 кГц. Принятый сигнал после фильтрации, усиления и детектирования был четко восстановлен.

Заключение и перспективы дальнейшего развития. Рассмотренные в данном обзоре публикации наглядно демонстрируют стремительную эволюцию низкочастотных магнитоэлектрических антенн – от доказательства концепции [11] до создания сложных гибридных структур [19], высокоскоростных излучателей на основе структур Розента [34], автономных антенн без смещения [38], антенных решеток с управляемой полосой пропускания [39] и, наконец, оптимизированных материалов [41]. Каждая из них вносит уникальный вклад в создание компактных, эффективных и многофункциональных устройств ОНЧ-диапазона.

Подводя итог, можно выделить несколько ключевых и наиболее востребованных направлений. Прежде всего, это гибридизация источников излучения, реализованная в ММЭ-антенне [19], где физическое колебание дополнительного магнита создает мощную магнитодипольную компоненту, не ограниченную насыщением магнитоэлектрики. Другим направлением является структурная оптимизация, примером которой служит антенна Розента [34], позволившая преодолеть компромисс между высокой добротностью и скоростью передачи данных, достигнув рекордной бодовой скорости в 2 кБд. Не менее важен отказ от внешнего подмагничивания, продемонстрированный в антеннах без смещения [38]; это направление – ключевое для достижения полной автономности и предельной миниатюризации.

Использование антенных решеток [39] открывает путь к гибкому управлению частотной характеристикой – расширению полосы для высокоскоростной ASK или созданию двухдиапазонных систем для помехоустойчивой FSK. Оптимизация композитной структуры на примере синтеза новой пьезокерамики ПИН-ПМС-ЦТС [41] показывает, что дальнейший скачок в эффективности невозможен без создания новых материалов, одновременно обладающих высокой пьезоактивностью и высокой механической добротностью.

Обращаясь к возможным областям применения низкочастотных магнитоэлектрических антенн, их уникальные свойства – миниатюрность, низкое энергопотребление и способность эффективно работать в проводящих средах – открывают широчайшие перспективы. Это подводная связь: коммуникации между автономными необитаемыми аппаратами, сетями датчиков, буями и водолазами [22]–[25]. В горном деле и геологоразведке – надежная связь в шахтах и тоннелях, зондирование земных недр [24], [26]. В биомедицине – беспроводные имплантируемые устройства для мониторинга и стимуляции, где критически важны малые размеры и отсутствие нагрева тканей [20]. Также очевиден интерес для оборонных технологий и навигации – скрытая связь, аварийные маяки, позиционирование в условиях отсутствия спутниковых сигналов.

Несмотря на прогресс, существует ряд серьезных проблем. Главной из них остается дальность связи: текущая дальность в сотни метров достаточна для локальных применений, но для глобальных систем требуется ее увеличение до единиц и десятков километров. Пути решения видятся в масштабировании – использовании антенных решеток [39], создании более мощных композитов на основе новых материалов [41] и применении сверхчувствительных приемников. Не менее важна проблема интеграции и упаковки: необходима разработка надежных методов герметизации и корпусирования, защищающих чувствительные элементы от агрессивных внешних воздействий (высокое давление, влага, коррозия) без ухудшения характеристик.

Повышение скорости передачи данных также остается актуальным. Хотя достигнутая скорость в 2 кбит/с [34] – это значительное достижение, для передачи телеметрии в реальном времени или потокового видео требуются скорости на порядки выше. Это требует разработки более сложных схем модуляции (многоуровневая ASK, QAM) и

создания материалов с еще более высокой добротностью и широкой эффективной полосой. Энергоэффективность – это сквозная проблема для всех автономных устройств с батарейным питанием. Наконец, для перехода от лабораторных прототипов к промышленным изделиям необходима стандартизация технологий производства и разработка унифицированных методов тестирования и сертификации, обеспечивающих воспроизводимость и надежность. Решение этих комплексных проблем будет определять вектор дальнейших исследований и в конечном итоге приведет к широкому внедрению низкочастотных магнитоэлектрических антенн в критически важных областях.

Примечание. Источники [1] (Chu L. J., 1948) и [2] (Harrington R. F., 1960) являются классическими фундаментальными работами, в которых впервые сформулированы пределы Чу и Чу–Харрингтона для электрически малых антенн. Они содержат уникальные теоретические выкладки и не имеют аналогов в более поздних публикациях. Последующие исследования (например, [3] McLean J. S., 1996) лишь уточняют и подтверждают эти фундаментальные результаты, но не заменяют их. В связи с этим указанные источники сохранены в списке литературы как первоисточники ключевых понятий, используемых в настоящем обзоре.

Список литературы

1. Chu L. J. Physical limitations of omni-directional antennas // J. Appl. Phys. 1948. Vol. 19, no. 12. P. 1163–1175. doi: 10.1063/1.1715038.
2. Harrington R. F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency // J. Res. Nat. Bur. Stand. 1960. Vol. 64. P. 1–12. doi: 10.6028/JRES.064D.003.
3. McLean J. S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas // IEEE Trans. Antennas Propag. 1996. Vol. 44, no. 5. P. 672–676. doi: 10.1109/8.496253.
4. Hansen P., Rodriguez D. High power VLF/LF transmitting antennas – Wheeler's circuit approximations applied to power limitations // Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Chicago, IL, USA: IEEE, 2012. P. 1–2. doi: 10.1109/APS.2012.6349113.
5. Generation of artificial ULF/ELF electromagnetic emission in the ionosphere by horizontal ground-based current system / E. N. Fedorov, N. G. Mazur, V. A. Pilipenko, V. V. Vakhnina // J. Geophys. Res. Space Physics. 2021. Vol. 128, no. 12. Art. e2023JA031590. doi: 10.1029/2023JA031590.
6. Fedorov E. N., Mazur N. G., Pilipenko V. A. Electromagnetic field in the upper ionosphere from horizontal ELF ground-based transmitter of finite length // Radiophys. Quantum El. 2023. Vol. 65. P. 635–648. doi: 10.1007/s11141-023-10245-z.
7. Babu T. P. S., Kumar S. S. Underwater communications // 2015 IEEE Underwater Technol. (UT). Chennai: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/UT.2015.7108234.
8. Performance of electrically small conventional and mechanical antennas / J. A. Bickford, A. E. Duwel, M. S. Weinberg, R. S. McNabb, D. K. Freeman, P. A. Ward // IEEE Trans. Antennas Propag. 2019. Vol. 67, no. 4. P. 2209–2223. doi: 10.1109/TAP.2019.2893329.
9. Research on mechanism and key technology of mechanical antenna for a low-frequency transmission / Q. Zhou, Fu Q. Yao, W. Shi, Zh. Y. Hao, H. Zheng, B. Liu, P. F. He // Scientia Sinica Technologica. 2020. Vol. 50, no. 1. P. 69–84. doi: 10.1360/SST-2019-0118.
10. Prasad M. N. S., Huang Y., Wang Y. E. Going beyond Chu–Harrington limit: ULF radiation with a spinning

magnet array // 32nd General Assembly and Scientific Symp. of the Intern. Union of Radio Science (URSI GASS). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2017. P. 1–3. doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105322.

11. A Portable Very Low Frequency (VLF) communication system based on acoustically actuated magnetoelectric antennas / C. Dong, Y. He, M. Li, Ch. Tu, Zh. Chu, X. Liang, H. Chen, Yu. Wei, M. Zaeimbashi, X. Wang, H. Lin, Yu. Gao, N. X. Sun // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2020. Vol. 19, no. 3. P. 398–402. doi: 10.1109/LAWP.2020.2968604.
12. Domann J. P., Carman G. P. Strain powered antennas // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121, no. 4. Art. 044905. doi: 10.1063/1.4975030.
13. Future antenna miniaturization mechanism: Magnetoelectric antennas / H. Lin, M. Zaeimbashi, N. Sun, X. Liang, H. Chen, C. Dong, A. Matyushov, X. Wang, Y. Guo, Y. Gao, N.-X. Sun // 2018 IEEE/MTT-S Intern. Microw. Symp. – IMS. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018. P. 220–223. doi: 10.1109/MWSYM.2018.8439678.
14. Wangsness R. K. Electromagnetic Fields. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1986. 587 p.
15. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity / R. Pellicer-Guridi, M. W. Vogel, D. C. Reutens, V. Vegh // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 2269–2280. doi: 10.1038/s41598-017-02099-z.
16. Séran H. C., Ferreau P. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research // Rev. Sci. Instrum. 2005. Vol. 76, no. 4. P. 044502. doi: 10.1063/1.1884026.
17. Nonlinear magnetoelectric response of a Metglas/piezofiber laminate to a high-frequency bipolar AC magnetic field / Y. Wang, Y. Shen, J. Gao, M. Li, J. Li, D. Viehland // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102, no. 10. P. 102905. doi: 10.1063/1.4795307.
18. Srivastava S., Adams J. J. Analysis of a direct antenna modulation transmitter for wideband OOK with a narrowband antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. 2017. Vol. 65, no. 10. P. 4971–4979. doi: 10.1109/TAP.2017.2734063.

19. Magneto-mechano-electric antenna for portable VLF transmission / H. Wu, T. Jiang, Zh. Liu, Sh. Fu, J. Cheng, H. You, J. Jiao, M. Bichurin, O. Sokolov, S. Ivanov, Y. Wang // *Adv. Electron. Mater.* 2023. Vol. 9, no. 7. P. 2300096. doi: 10.1002/aelm.202300096.
20. Experimental generation of ELF radio signals using a rotating magnet / H. C. Burch, A. Garraud, M. F. Mitchell, R. C. Moore, D. P. Arnold // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018. Vol. 66, no. 11. P. 6265–6272. doi: 10.1109/TAP.2018.2869205.
21. Fawole O. C., Tabib-Azar M. An electromechanically modulated permanent magnet antenna for wireless communication in harsh electromagnetic environments // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. Vol. 65, no. 12. P. 6927–6936. doi: 10.1109/TAP.2017.2761555.
22. Low frequency mechanical antennas: Electrically short transmitters from mechanically-actuated dielectrics / J. A. Bickford, R. S. McNabb, P. A. Ward, D. K. Freeman, M. S. Weinberg // 2017 IEEE Intern. Symp. Antennas Propag. San Diego, CA, USA: IEEE, 2017. P. 1475–1476. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072780.
23. Spinning magnet antenna for VLF transmitting / S. Selvin, M. N. S. Prasad, Y. Huang, E. Wang // 2017 IEEE Intern. Symp. Antennas Propag. San Diego, CA, USA: IEEE, 2017. P. 1477–1478. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072781.
24. Ultra-compact mechanical antennas / H. Chen, X. Liang, C. Dong, Y. He, N. Sun, M. Zaeimbashi, Y. He, Y. Gao, P. V. Parimi, H. Lin, N.-X. Sun // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 117. Art. 170501. doi: 10.1063/5.0025362.
25. Energy-efficient ULF/VLF transmitters based on mechanically-rotating dipoles / A. Madanayake, S. Choi, M. Tarek, S. Dharmasena, S. Mandal, J. Glickstein, A. Sehirlioglu // *Moratuwa Engin. Research Conf. (MERCon)*. Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, 2017. P. 230–235. doi: 10.1109/MERCon.2017.7980487.
26. Magnetic pendulum array for ULF/ELF transmission / S. Prasad M. N., R. U. Tok, F. Fereidoony, Y. E. Wang, R. Zhu, A. Propst, S. Bland // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. Art. 13220. doi: 10.1038/s41598-019-49341-4.
27. Acoustically driven electromagnetic radiating elements / A. E. Hassanien, M. Breen, M. H. Li, S. Gong // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Art. 17006. doi: 10.1038/s41598-020-73973-6.
28. Ultra-compact dual-band smart NEMS magneto-electric antennas for simultaneous wireless energy harvesting and magnetic field sensing / M. Zaeimbashi, M. Nasrollahpour, A. Khalifa, A. Romano, X. Liang, H. Chen, N. Sun, A. Matyushov, H. Lin, C. Dong, Z. Xu, A. Mittal, I. Martos-Repath, G. Jha, N. Mirchandani, D. Das, M. Onabajo, A. Shrivastava, S. Cash, N. X. Sun // *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12. Art. 3141. doi: 10.1038/s41467-021-23256-z.
29. An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor / Y. Wang, D. Gray, D. Berry, J. Gao, M. Li, J. Li, D. Viehland // *Advanced Materials*. 2011. Vol. 23, no. 35. P. 4111–4114. doi: 10.1002/adma.201100773.
30. High power magnetic field energy harvesting through amplified magneto-mechanical vibration / M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Lee, J. Chun, D. Maurya, G. T. Hwang, J. Ryu, Sh. Priya // *Advanced Energy Materials*. 2018. Vol. 8, no. 16. Art. 1703313. doi: 10.1002/aenm.201703313.
31. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / Ce-Wen Nan, M. I. Bichurin, Shuxiang Dong, D. Viehland, G. Srinivasan // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103, no. 3. Art. 031101. doi: 10.1063/1.2836410.
32. Henthorn S., Ford K. L., O'Farrell T. Direct antenna modulation for high-order phase shift keying // *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 2019. Vol. 68, no. 1. P. 111–120. doi: 10.1109/TAP.2019.2935136.
33. Schab K., Huang D., Adams J. J. Pulse characteristics of a direct antenna modulation transmitter // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 20213–30219. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902365.
34. Ultra-high baud rate VLF magnetoelectric antenna based on Rosen-type composite / J. Cheng, J. Jiao, Sh. Fu, T. Jiang, H. Wu, Ze Fang, Zh. Yuan, H. You, O. Sokolov, S. Ivanov, M. Bichurin, Y. Wang // *Appl. Phys. Lett.* 2023. Vol. 123, no. 7. P. 072903. doi: 10.1063/5.0167170.
35. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter / M. A. Kemp, M. Franzi, A. Haase, E. Jongewaard, M. T. Whittaker, M. Kirkpatrick, R. Sparr // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10, no. 1. Art. 1715. doi: 10.1038/s41467-019-09680-2.
36. Bias-free very low frequency magnetoelectric antenna / Sh. Fu, J. Cheng, T. Jiang, H. Wu, Ze Fang, J. Jiao, O. Sokolov, S. Ivanov, M. Bichurin, Ya. Wang // *Appl. Phys. Lett.* 2023. Vol. 122, no. 26. Art. 262901. doi: 10.1063/5.0158020.
37. Vázquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. Vol. 29, no. 4. P. 939–949. doi: 10.1088/0022-3727/29/4/001.
38. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites / M. I. Bichurin, D. A. Filippov, V. M. Petrov, V. M. Laletsin, N. Padubnaya, G. Srinivasan // *Phys. Rev. B*. 2003. Vol. 68, no. 13. P. 132408. doi: 10.1103/PhysRevB.68.132408.
39. Dual magnetoelectric antenna array with enhanced bandwidth and sensitivity for low-frequency communications / Y. Wang, E. Song, G. Zi, Yu. Wang, Sh. Zhao, Zh. Ma // *J. Appl. Phys.* 2024. Vol. 136, no. 18. Art. 184501. doi: 10.1063/5.0238974.
40. Magnetic-field sensitivity enhancement by magnetoelectric sensor arrays / Z. Xing, J. Zhai, J. Gao, J. Li, D. Viehland // *IEEE Electron Device Lett.* 2009. Vol. 30, no. 5. P. 445–447. doi: 10.1109/LED.2009.2015342.
41. Ultrahigh piezoelectricity in ferroelectric ceramics by design / F. Li, D. Lin, Z. Chen, Zh. Cheng, J. Wang, Ch. Li, Zh. Xu, Q. Huang, X. Liao, L.-Q. Chen, T. R. Shrout, Sh. Zhang // *Nat. Mater.* 2018. Vol. 17. P. 349–354. doi: 10.1038/s41563-018-0034-4.
42. High-electromechanical performance for high-power piezoelectric applications: Fundamental, progress, and perspective / L. Chen, H. Liu, H. Qi, J. Chen // *Prog. Mater. Sci.* 2022. Vol. 127. Art. 100944. doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.100944.

43. Defect engineering in lead zirconate titanate ferroelectric ceramic for enhanced electromechanical transducer efficiency / Zh. Li, H.-Ch. Thong, Y.-F. Zhang, Z. Xu, Zh. Zhou, Y.-X. Liu, Y.-Y.-Sh. Cheng, Sh.-H. Wang, Ch. Zhao, F. Chen, Ke Bi, B. Han, Ke Wang // *Adv. Funct. Mater.* 2020. Vol. 31, no. 1. Art. 2005012. doi: 10.1002/adfm.202005012.

44. Sb_2O_3 -modified lead zirconate titanate piezoelectric ceramics with enhanced piezoelectricity and low loss / X. Fei, X. Lin, Ch. Wang, W. Li, F. Yu, Ch. Yang, Sh. Huang // *J. Am. Ceram. Soc.* 2022. Vol. 106, no. 1. P. 501–512. doi: 10.1111/jace.18771.

45. Crafting very low frequency magnetoelectric antenna via piezoelectric and electromechanical synergic optimization strategy / Z. Fang, J. Jiao, H. Wu, T. Jiang, Sh. Fu, J. Cheng, O. Sokolov, S. Ivanov, M. Bichurin, F. Li, Y. Wang // *J. Materiomics.* 2025. Vol. 11, no. 3. Art. 100900. doi: 10.1016/j.mater.2024.05.010.

46. Nonlinear converse magnetoelectric effects in a ferromagnetic-piezoelectric bilayer / L. Y. Fetisov, D. V. Chashin, D. A. Burdin, D. V. Saveliev, N. A. Ekonomov, G. Srinivasan, Y. K. Fetisov // *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 113, no. 21. Art. 212901. doi: 10.1063/1.5054584.

47. Mechanical magnetic field generator for communication in the ULF range / H. Rezaei, V. Khilkevich, Sh. Yong, D. S. Stutts, D. Pommerenke // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020. Vol. 68, no. 3. P. 2332–2339. doi: 10.1109/TAP.2019.2955069.

48. A mechanical transmitter for undersea magnetic induction communication / Y. Liu, S. Gong, Q. Liu, M. Hou // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2021. Vol. 69, no. 10. P. 6391–6400. doi: 10.1109/TAP.2021.3070657.

49. Wang Ch., Cui Y., Wei M. Mechanically-rotating electret ULF/VLF antenna transmitter // 2019 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Sci. Meeting. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019. P. 1383–1384. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889212.

50. Experimental demonstration and operating principles of a multiferroic antenna / J. D. Schneider, J. P. Domann, M. K. Panduranga, S. Tiwari, P. Shirazi, Zh. (J.) Yao, C. Sennott, D. Shahan, S. Selvin, G. McKnight, W. Wall, R. N. Candler, Y. E. Wang, G. P. Carman // *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 126, no. 22. Art. 224104. doi: 10.1063/1.5126047.

Информация об авторах

Комаров Вячеслав Сергеевич – аспирант кафедры проектирования и технологии радиоаппаратуры, Новгородский гос. университет имени Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия.

E-mail: Vyacheslav.Komarov@novsu.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9043-3383>

Леонтьев Виктор Сергеевич – зав. лабораторией, Новгородский гос. университет имени Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия.

E-mail: viktorsergeevich.novsu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1313-1715>

Марков Иван Юрьевич – магистрант кафедры проектирования и технологии радиоаппаратуры, Новгородский гос. университет имени Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия.

E-mail: s247011@std.novsu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0918-5023>

Бичурин Мирза Имамович – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой проектирования и технологии радиоаппаратуры, Новгородский гос. университет имени Ярослава Мудрого. Заслуженный деятель науки РФ, заслуженный работник Высшей школы РФ, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия.

E-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0650-4712>

Вклад авторов:

Комаров В. С. – подготовка, поиск и анализ информации, концепция исследования.

Леонтьев В. С. – подготовка и редактирование материалов, методология подготовки исследования.

Марков И. Ю. – подготовка и проведение аналитических исследований, подготовка работы, анализ данных.

Бичурин М. И. – основная идея, подготовка введения и заключения, редактирование.

References

1. Chu L. J. Physical limitations of omni-directional antennas // *J. Appl. Phys.* 1948. Vol. 19, no. 12. P. 1163–1175. doi: 10.1063/1.1715038.
2. Harrington R. F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency // *J. Res. Nat. Bur. Stand.* 1960. Vol. 64. P. 1–12. doi: 10.6028/JRES.064D.003.
3. McLean J. S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1996. Vol. 44, no. 5. P. 672–676. doi: 10.1109/8.496253.
4. Hansen P., Rodriguez D. High power VLF/LF transmitting antennas – Wheeler's circuit approximations applied to power limitations // *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag.* Chicago, IL, USA: IEEE, 2012. P. 1–2. doi: 10.1109/APS.2012.6349113.
5. Generation of artificial ULF/ELF electromagnetic emission in the ionosphere by horizontal ground-based current system / E. N. Fedorov, N. G. Mazur, V. A. Piliipenko, V. V. Vakhnina // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021. Vol. 128, no. 12. Art. e2023JA031590. doi: 10.1029/2023JA031590.
6. Fedorov E. N., Mazur N. G., Piliipenko V. A. Electromagnetic field in the upper ionosphere from horizontal ELF ground-based transmitter of finite length // *Radiophys. Quantum El.* 2023. Vol. 65. P. 635–648. doi: 10.1007/s11141-023-10245-z.
7. Babu T. P. S., Kumar S. S. Underwater Communications // 2015 IEEE Underwater Technol. (UT). Chennai: IEEE, 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/UT.2015.7108234.
8. Performance of electrically small conventional and mechanical antennas / J. A. Bickford, A. E. Duwel, M. S. Weinberg, R. S. McNabb, D. K. Freeman, P. A. Ward // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019. Vol. 67, no. 4. P. 2209–2223. doi: 10.1109/TAP.2019.2893329.
9. Research on mechanism and key technology of mechanical antenna for a low-frequency transmission / Q. Zhou, Fu Q. Yao, W. Shi, Zh. Y. Hao, H. Zheng, B. Liu, P. F. He // *Scientia Sinica Technologica.* 2020. Vol. 50, no. 1. P. 69–84. doi: 10.1360/SST-2019-0118.
10. Prasad M. N. S., Huang Y., Wang Y. E. Going beyond Chu-Harrington limit: ULF radiation with a spinning magnet array // 32nd General Assembly and Scientific Symp. of the Intern. Union of Radio Science (URSI GASS). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2017. P. 1–3. doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105322.
11. A portable Very Low Frequency (VLF) communication system based on acoustically actuated magnetoelectric antennas / C. Dong, Y. He, M. Li, Ch. Tu, Zh. Chu, X. Liang, H. Chen, Yu. Wei, M. Zaeimbashi, X. Wang, H. Lin, Yu. Gao, N. X. Sun // *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2020. Vol. 19, no. 3. P. 398–402. doi: 10.1109/LAWP.2020.2968604.
12. Domann J. P., Carman G. P. Strain powered antennas // *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 121, no. 4. Art. 044905. doi: 10.1063/1.4975030.
13. Future antenna miniaturization mechanism: Magnetoelectric antennas / H. Lin, M. Zaeimbashi, N. Sun, X. Liang, H. Chen, C. Dong, A. Matyushov, X. Wang, Y. Guo, Y. Gao, N.-X. Sun // 2018 IEEE/MTT-S Intern. Microw. Symp. – IMS. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018. P. 220–223. doi: 10.1109/MWSYM.2018.8439678.
14. Wangsness R. K. Electromagnetic fields. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1986. 587 p.
15. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity / R. Pellicer-Guridi, M. W. Vogel, D. C. Reutens, V. Vegh // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 2269–2280. doi: 10.1038/s41598-017-02099-z.
16. Séran H. C., Fergeau P. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research // *Rev. Sci. Instrum.* 2005. Vol. 76, no. 4. P. 044502. doi: 10.1063/1.1884026.
17. Nonlinear magnetoelectric response of a Metglas/piezofiber laminate to a high-frequency bipolar AC magnetic field / Y. Wang, Y. Shen, J. Gao, M. Li, J. Li, D. Viehland // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, no. 10. P. 102905. doi: 10.1063/1.4795307.
18. Srivastava S., Adams J. J. Analysis of a direct antenna modulation transmitter for wideband OOK with a narrowband antenna // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. Vol. 65, no. 10. P. 4971–4979. doi: 10.1109/TAP.2017.2734063.
19. Magneto-mechano-electric antenna for portable VLF transmission / H. Wu, T. Jiang, Zh. Liu, Sh. Fu, J. Cheng, H. You, J. Jiao, M. Bichurin, O. Sokolov, S. Ivanov, Y. Wang // *Adv. Electron. Mater.* 2023. Vol. 9, no. 7. P. 2300096. doi: 10.1002/aelm.202300096.
20. Experimental generation of ELF radio signals using a rotating magnet / H. C. Burch, A. Garraud, M. F. Mitchell, R. C. Moore, D. P. Arnold // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018. Vol. 66, no. 11. P. 6265–6272. doi: 10.1109/TAP.2018.2869205.
21. Fawole O. C., Tabib-Azar M. An electromechanically modulated permanent magnet antenna for wireless communication in harsh electromagnetic environments // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. Vol. 65, no. 12. P. 6927–6936. doi: 10.1109/TAP.2017.2761555.
22. Low frequency mechanical antennas: Electrically short transmitters from mechanically-actuated dielectrics / J. A. Bickford, R. S. McNabb, P. A. Ward, D. K. Freeman, M. S. Weinberg // 2017 IEEE Intern. Symp. Antennas Propag. San Diego, CA, USA: IEEE, 2017. P. 1475–1476. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072780.
23. Spinning magnet antenna for VLF transmitting / S. Selvin, M. N. S. Prasad, Y. Huang, E. Wang // 2017 IEEE Intern. Symp. Antennas Propag. San Diego, CA, USA: IEEE, 2017. P. 1477–1478. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072781.
24. Ultra-compact mechanical antennas / H. Chen, X. Liang, C. Dong, Y. He, N. Sun, M. Zaeimbashi, Y. He, Y. Gao, P. V. Parimi, H. Lin, N.-X. Sun // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 117. Art. 170501. doi: 10.1063/5.0025362.
25. Energy-efficient ULF/VLF transmitters based on mechanically-rotating dipoles / A. Madanayake, S. Choi, M. Tarek, S. Dharmasena, S. Mandal, J. Glickstein, A. Sehirlioglu // Moratuwa Engin. Research Conf. (MERCon). Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, 2017. P. 230–235. doi: 10.1109/MERCon.2017.7980487.

26. Magnetic pendulum array for ULF/ELF transmission / S. Prasad M. N., R. U. Tok, F. Fereidoony, Y. E. Wang, R. Zhu, A. Propst, S. Bland // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. Art. 13220. doi: 10.1038/s41598-019-49341-4.
27. Acoustically driven electromagnetic radiating elements / A. E. Hassanien, M. Breen, M. H. Li, S. Gong // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Art. 17006. doi: 10.1038/s41598-020-73973-6.
28. Ultra-compact dual-band smart NEMS magnetoelectric antennas for simultaneous wireless energy harvesting and magnetic field sensing / M. Zaeimbashi, M. Nasrollahpour, A. Khalifa, A. Romano, X. Liang, H. Chen, N. Sun, A. Matyushov, H. Lin, C. Dong, Z. Xu, A. Mittal, I. Martos-Repath, G. Jha, N. Mirchandani, D. Das, M. Onabajo, A. Shrivastava, S. Cash, N. X. Sun // *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12. Art. 3141. doi: 10.1038/s41467-021-23256-z.
29. An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor / Y. Wang, D. Gray, D. Berry, J. Gao, M. Li, J. Li, D. Viehland // *Advanced Materials.* 2011. Vol. 23, no. 35. P. 4111-4114. doi: 10.1002/adma.201100773.
30. High power magnetic field energy harvesting through amplified magneto-mechanical vibration / M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Lee, J. Chun, D. Maurya, G. T. Hwang, J. Ryu, Sh. Priya // *Advanced Energy Materials.* 2018. Vol. 8, no. 16. Art. 1703313. doi: 10.1002/aenm.201703313.
31. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / Ce-Wen Nan, M. I. Bichurin, Shuxiang Dong, D. Viehland, G. Srinivasan // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103, no. 3. Art. 031101. doi: 10.1063/1.2836410.
32. Henthorn S., Ford K. L., O'Farrell T. Direct antenna modulation for high-order phase shift keying // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* 2019. Vol. 68, no. 1. P. 111-120. doi: 10.1109/TAP.2019.2935136.
33. Schab K., Huang D., Adams J. J. Pulse characteristics of a direct antenna modulation transmitter // *IEEE Access.* 2019. Vol. 7. P. 20213-30219. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902365.
34. Ultra-high baud rate VLF magnetoelectric antenna based on Rosen-type composite / J. Cheng, J. Jiao, Sh. Fu, T. Jiang, H. Wu, Ze Fang, Zh. Yuan, H. You, O. Sokolov, S. Ivanov, M. Bichurin, Y. Wang // *Appl. Phys. Lett.* 2023. Vol. 123, no. 7. P. 072903. doi: 10.1063/5.0167170.
35. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter / M. A. Kemp, M. Franzi, A. Haase, E. Jongewaard, M. T. Whittaker, M. Kirkpatrick, R. Sparr // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10, no. 1. Art. 1715. doi: 10.1038/s41467-019-09680-2.
36. Bias-free very low frequency magnetoelectric antenna / Sh. Fu, J. Cheng, T. Jiang, H. Wu, Ze Fang, J. Jiao, O. Sokolov, S. Ivanov, M. Bichurin, Ya. Wang // *Appl. Phys. Lett.* 2023. Vol. 122, no. 26. Art. 262901. doi: 10.1063/5.0158020.
37. Vázquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. Vol. 29, no. 4. P. 939-949. doi: 10.1088/0022-3727/29/4/001.
38. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites / M. I. Bichurin, D. A. Filippov, V. M. Petrov, V. M. Laletsin, N. Padubnaya, G. Srinivasan // *Phys. Rev. B.* 2003. Vol. 68, no. 13. P. 132408. doi: 10.1103/PhysRevB.68.132408.
39. Dual magnetoelectric antenna array with enhanced bandwidth and sensitivity for low-frequency communications / Y. Wang, E. Song, G. Zi, Yu. Wang, Sh. Zhao, Zh. Ma // *J. Appl. Phys.* 2024. Vol. 136, no. 18. Art. 184501. doi: 10.1063/5.0238974.
40. Magnetic-field sensitivity enhancement by magnetoelectric sensor arrays / Z. Xing, J. Zhai, J. Gao, J. Li, D. Viehland // *IEEE Electron Device Lett.* 2009. Vol. 30, no. 5. P. 445-447. doi: 10.1109/LED.2009.2015342.
41. Ultrahigh piezoelectricity in ferroelectric ceramics by design / F. Li, D. Lin, Z. Chen, Zh. Cheng, J. Wang, Ch. Li, Zh. Xu, Q. Huang, X. Liao, L.-Q. Chen, T. R. Shrout, Sh. Zhang // *Nat. Mater.* 2018. Vol. 17. P. 349-354. doi: 10.1038/s41563-018-0034-4.
42. High-electromechanical performance for high-power piezoelectric applications: Fundamental, progress, and perspective / L. Chen, H. Liu, H. Qi, J. Chen // *Prog. Mater. Sci.* 2022. Vol. 127. Art. 100944. doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.100944.
43. Defect engineering in lead zirconate titanate ferroelectric ceramic for enhanced electromechanical transducer efficiency / Zh. Li, H.-Ch. Thong, Y.-F. Zhang, Z. Xu, Zh. Zhou, Y.-X. Liu, Y.-Y. Sh. Cheng, Sh.-H. Wang, Ch. Zhao, F. Chen, Ke Bi, B. Han, Ke Wang // *Adv. Funct. Mater.* 2020. Vol. 31, no. 1. Art. 2005012. doi: 10.1002/adfm.202005012.
44. Sb₂O₃-modified lead zirconate titanate piezoelectric ceramics with enhanced piezoelectricity and low loss / X. Fei, X. Lin, Ch. Wang, W. Li, F. Yu, Ch. Yang, Sh. Huang // *J. Am. Ceram. Soc.* 2022. Vol. 106, no. 1. P. 501-512. doi: 10.1111/jace.18771.
45. Crafting very low frequency magnetoelectric antenna via piezoelectric and electromechanical synergic optimization strategy / Z. Fang, J. Jiao, H. Wu, T. Jiang, Sh. Fu, J. Cheng, O. Sokolov, S. Ivanov, M. Bichurin, F. Li, Y. Wang // *J. Materiomics.* 2025. Vol. 11, no. 3. Art. 100900. doi: 10.1016/j.jmat.2024.05.010.
46. Nonlinear converse magnetoelectric effects in a ferromagnetic-piezoelectric bilayer / L. Y. Fetisov, D. V. Chashin, D. A. Burdin, D. V. Savelyev, N. A. Ekonomov, G. Srinivasan, Y. K. Fetisov // *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 113, no. 21. Art. 212901. doi: 10.1063/1.5054584.
47. Mechanical magnetic field generator for communication in the ULF range / H. Rezaei, V. Khilkevich, Sh. Yong, D. S. Stutts, D. Pommerenke // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020. Vol. 68, no. 3. P. 2332-2339. doi: 10.1109/TAP.2019.2955069.
48. A mechanical transmitter for undersea magnetic induction communication / Y. Liu, S. Gong, Q. Liu, M. Hou // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2021. Vol. 69, no. 10. P. 6391-6400. doi: 10.1109/TAP.2021.3070657.
49. Wang Ch., Cui Y., Wei M. Mechanically-rotating electret ULF/VLF antenna transmitter // 2019 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI

Radio Sci. Meeting. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019. P. 1383–1384. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889212.

50. Experimental demonstration and operating principles of a multiferroic antenna / J. D. Schneider, J. P. Domann, M. K. Panduranga, S. Tiwari, P. Shirazi,

Zh. (J.) Yao, C. Sennott, D. Shahan, S. Selvin, G. McKnight, W. Wall, R. N. Candler, Y. E. Wang, G. P. Carman // J. Appl. Phys. 2019. Vol. 126, no. 22. Art. 224104. doi: 10.1063/1.5126047.

Information about the authors

Vyacheslav S. Komarov – postgraduate student, Department of Design and Technology of Radio Equipment, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 41, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, 173003, Russia.

E-mail: Vyacheslav.Komarov@novsu.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9043-3383>

Viktor S. Leontiev – Head of the Laboratory, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 41, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, 173003, Russia.

E-mail: viktorsergeevich.novsu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1313-1715>

Ivan Yu. Markov – master's student of the Department of Design and Technology of Radio Equipment, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 41, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, 173003, Russia.

E-mail: s247011@std.novsu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0918-5023>

Mirza I. Bichurin – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Design and Technology of Radio Equipment, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. Honored Scientist of the Russian Federation, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation. 41, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, 173003, Russia.

E-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0650-4712>

Author contribution statement:

Komarov V. S. – conducted the study, performed literature search and data analysis, and developed the research concept.

Leontiev V. S. – conducted the study, performed manuscript editing, and established the research methodology.

Markov I. Yu. – prepared and performed analytical studies, conducted the study, and performed data analysis.

Bichurin M. I. – formulated the core concept of the study, prepared the introduction and conclusion, and performed manuscript editing.

Статья поступила в редакцию 23.03.2026; принята к публикации после рецензирования 17.05.2026; опубликована онлайн 28.09.2026.

Submitted 23.03.2026; accepted 17.05.2026; published online 28.09.2026.