

Технологии беспроводной зарядки.

Часть 2. Стандарты и их реализация

В первой части статьи (БТ №3'2017) были рассмотрены основные технологии беспроводной зарядки, а именно — индуктивная связь, магнитно-резонансная связь и радиочастотное / микроволновое излучение, от фундаментальных принципов до конкретного применения. В данном материале подробно рассмотрены спецификации ведущих международных стандартов беспроводной зарядки и существующие их реализации для четырех различных типов сетей, а именно WPCN с H-AP, WPCN с выделенной E-AP, ретрансляционной WPCN с H-AP и WPCN с мультиантенной E-AP. Исследованы стратегии планирования статического зарядного устройства и развертывания беспроводных зарядных устройств.

Сяо Лу (Xiao Lu)

Пинг Ванг (Ping Wang)

Дусит Ниято (Dusit Niyato)

Донг Ин Ким (Dong In Kim)

Чжу Хан (Zhu Han)

Перевод: Алексей Гречишников

Международные стандарты

К настоящему времени разработаны различные стандарты беспроводной зарядки (БЗ). Среди них Qi и A4WP — два ведущих стандарта, получившие наибольшее распространение и поддерживаемые крупными производителями смартфонов.

Qi

Qi (произносится как «ци», в честь термина восточной философии. — *Прим. перев.*) — международный стандарт БЗ, разработанный Консорциумом беспроводной электромагнитной энергии (Wireless Power Consortium, WPC). Типичная схема Qi-подобной системы БЗ показана на рис. 9а. Стандартом Qi предусмотрена совместная работа по беспроводной передаче мощности и информационному взаимодействию между беспроводной зарядной станцией и заряжаемым устройством. Qi позволяет зарядному устройству (ЗУ) контролировать процедуру зарядки. Qi-совместимое ЗУ способно регулировать плотность передаваемой мощности в соответствии с запросом заряжаемого устройства.

Qi использует технику передачи энергии посредством магнитной индукции и пригоден для работы на расстоянии до 4 см. Для ЗУ стандарта Qi определены две категории, а именно:

- устройства низкой мощности, которые используются для передачи до 5 Вт при рабочей частоте от 110 до 205 кГц;
- устройства средней мощности, передающие до 120 Вт на частотах от 80 до 300 кГц.

Как правило, зарядная станция системы Qi представляет собой плоскую конструкцию. Заряжаемые мобильные устройства просто кладутся на ее поверхность. Как отмечалось ранее, качество индуктивной связи является решающим фактором эффективности индуктивной зарядки. Для обеспечения наилучших условий зарядки необходимо строгое позиционирование заряжаемого устройства относительно

ЗУ. Стандартом Qi предусмотрено три разных способа такого размещения:

- Направляемое (принудительное) позиционирование, схема которого показана на рис. 10а. При данном типе позиционирования возможна зарядка «один к одному», т. е. ЗУ может обслуживать только одного потребителя. При этом в конструкции ЗУ предусмотрена система автоматического выравнивания для обеспечения наилучшего взаимного расположения устройств. Для этого в ЗУ системы Qi используются магниты, при помощи которых мобильное устройство направляется в фиксированное местоположение. Преимущество этого подхода — простота, однако в этом случае требуется наличие в ЗУ магнитных вставок, что вызывает потери энергии индукции (и, следовательно, рост температуры устройств).
- Свободное позиционирование с перемещаемой катушкой зарядника (рис. 10б). Как правило, при таком типе выравнивания зарядка также осуществляется по схеме «один к одному». Характерной особенностью устройств данного типа является способность определять местоположение заряжаемого устройства. Такой подход требует наличия в заряднике механического привода перемещения катушки зарядника для точного ее позиционирования, обеспечивающего условия наилучшего магнитного сцепления устройств. Привод может быть построен с применением индуктивных или емкостных систем. Реализация этого подхода выравнивания проста, если зарядная площадка предназначена для размещения только одного устройства. Однако подвижные механические компоненты, как правило, делают системы менее надежными. Кроме того, для зарядки нескольких устройств управление двигателем для нескольких первичных катушек может быть сложным и дорогостоящим.

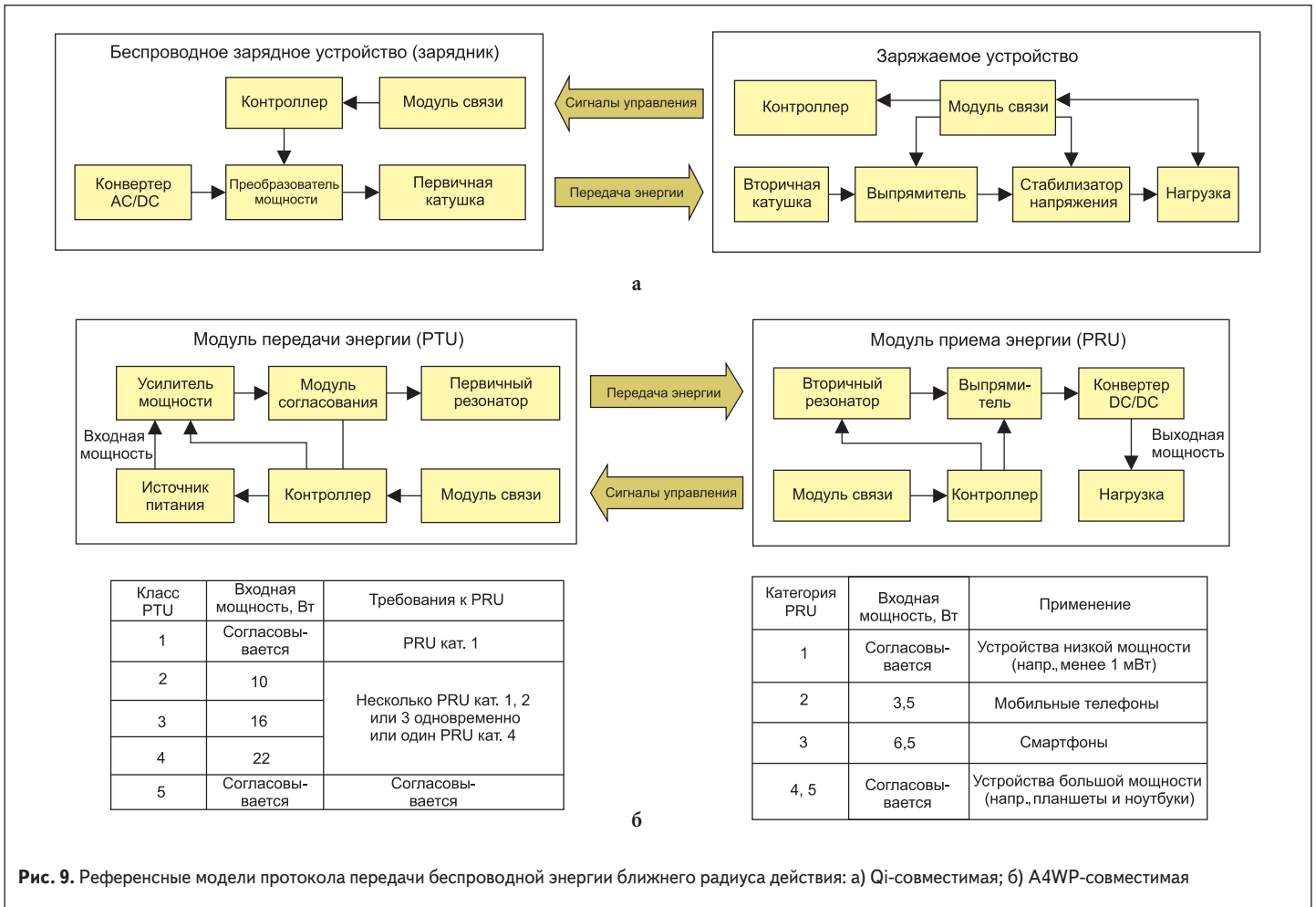


Рис. 9. Референсные модели протокола передачи беспроводной энергии ближнего радиуса действия: а) Qi-совместимая; б) A4WP-совместимая

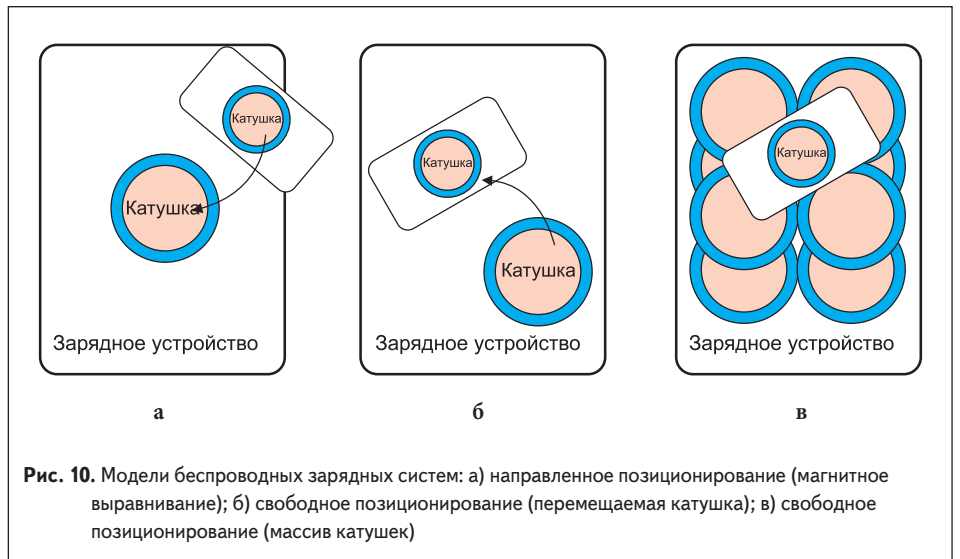
- Системы свободного позиционирования с массивом первичных катушек (рис. 10в) позволяют осуществлять зарядку нескольких устройств вне зависимости от их положения на заряднике. В спецификации Qi используется принцип «вертикального потока», при котором рабочей является вся поверхность ЗУ для передачи мощности без каких-либо ограничений на ориентацию вторичной катушки. Например, этот подход со свободным позиционированием может применяться на основе трехслойной структуры массива катушек. По сравнению с вышеупомянутыми двумя подходами, этот метод выравнивания предлагает больше удобства для пользователя за счет более дорогостоящей и сложной катушечной структуры и электронных систем управления.
- Qi-совместимая модель БЗ поддерживает внутрислойную связь. Протокол связи и управления Qi предусматривает регулировку выходной мощности зарядника для удовлетворения требований ЗУ и прекращение передачи мощности при завершении зарядки. Протокол работает следующим образом:
- Старт. Зарядник определяет присутствие потенциального устройства для зарядки.
 - Пинг. Заряжаемое устройство посылает информацию о величине принимаемого сигнала; зарядник определяет, что ему послан данный информационный пакет.
 - Идентификация и конфигурация. Заряжаемое устройство передает свой идентификатор

- и требования по энергорежиму зарядки; зарядник конфигурирует режим передачи, который удовлетворяет данным требованиям.
- Передача энергии. Заряжаемое устройство передает управляющие данные, на основе которых зарядник начинает процесс передачи энергии.

A4WP

Стандарт A4WP разработан с целью снятия жестких ограничений на расстояние между

зарядкой и заряжающим устройством. Он предполагает создание большого электромагнитного поля с магнитно-резонансной связью. Для достижения пространственной свободы стандарт A4WP не требует точного выравнивания и даже позволяет значительное отдаление ЗУ от заряжаемого устройства. Максимальное расстояние, на котором возможна зарядка, увеличено до нескольких метров. Кроме того, одновременно могут заряжаться несколько устройств с различной потребностью в мощности. Еще одно преимущество A4WP перед Qi заключается



в том, что на рабочем ЗУ A4WP могут быть размещены посторонние предметы без какого-либо существенного неблагоприятного воздействия на процесс зарядки. Поэтому ЗУ A4WP может быть встроено в любой объект, что повышает гибкость развертывания системы БЗ.

На рис. 9б показана эталонная модель для БЗ, совместимой с A4WP. Устройство состоит из двух компонентов, а именно: блока передатчика энергии (Power Transmitter Unit, PTU) и блока приема энергии (Power Receiving Unit, PRU). Энергия передается из PTU в PRU, который контролируется протоколом управления зарядкой. Для контроля процесса зарядки используется система связи, по которой осуществляется обмен данными между PTU и PRU. Стандартом Industrial Scientific Medical (ISM) предусмотрена передача энергии на частотах диапазона 6,75 МГц. В отличие от Qi, в котором сигналы управления передаются на той же частоте, что и энергия для зарядки, для передачи сигналов управления в A4WP используется другой частотный диапазон — ISM 2,4 ГГц.

PTU или ЗУ стандарта A4WP состоит их трех основных модулей. Это блок резонатора и согласующие системы, блок преобразования энергии и блок сигнализации и управления. PTU может находиться в одном из следующих состояний:

- конфигурация, при которой PTU выполняет самопроверку;
- режим энергосбережения, при котором PTU периодически проверяет изменения импеданса первичного резонатора;
- режим низкого энергопотребления (PTU устанавливает соединение с одним или многими PRU);
- режим передачи энергии, который предназначен для передачи в соответствии с требованиями заряжаемых устройств;
- локальное состояние сбоя, которое случается, если с PTU происходят любые локальные неисправности, например перегрев;
- режим фиксированной глобальной ошибки, который наступает, если обнаружены несовместимые объекты, или при системных ошибках или других сбоях.

PRU или заряжаемое устройство стандарта A4WP PRU состоит из блока для приема и преобразования энергии и блока управления и связи. PRU имеет следующие функциональные состояния:

- нулевое, когда на PRU подается напряжение;
- загрузка, когда PRU устанавливает связь с PTU;
- на линии, когда связь установлена;
- обнаружена ошибка системы, когда имеется предупреждение о превышении напряжения, перегрузке по току или перегреве;
- критическая ошибка системы, при наступлении которой должно быть отключено питание.

Классы PTU и категории PRU представлены на рис. 9б (например, для передачи и приема энергии). Для зарядки устройств PRU определенного класса необходимо использовать только устройства PTU соответствующей категории.

Подобно стандарту Qi, в A4WP также используется установленный протокол связи для поддержки функций БЗ. Системы, совместимые

с A4WP, используют связь по протоколу Bluetooth (Bluetooth Low Energy, BLE) для контроля уровней мощности, идентификации допустимых нагрузок и защиты от несовместимых устройств. Протокол связи A4WP состоит из трех этапов:

1. Обнаружение устройства. PRU, нуждающийся в зарядке, отправляет извещение, получив которое, PTU отвечает запросом на соединение. После получения запроса на соединение PRU прекращает отправку извещения, после чего устанавливается соединение между PTU и PRU.
2. Обмен информацией. PTU и PRU обмениваются между собой статическими и динамическими параметрами. Обмен происходит следующим образом. Сначала PTU принимает и считывает информацию о статических параметрах PRU, которые содержат его состояние. Затем PTU указывает свои возможности в статических параметрах PTU и отправляет их в PRU. PTU принимает и считывает динамические параметры PRU, которые включают в себя ток, напряжение, температуру и функциональный статус PRU. Затем PTU регистрируется блоком управления PRU как устройство зарядки.
3. Управляемая зарядка. Это состояние наступает, когда блоком управления PRU заданы установки режима зарядки, и PTU имеет достаточную мощность для удовлетворения требований PRU. Динамический параметр PRU периодически обновляется, чтобы информировать PTU об актуальном состоянии, что необходимо для согласования режимов PTU и PRU. Если обнаружена системная ошибка или устройство полностью заряжено, PRU отправляет в PTU тревожное оповещение. Передаваемый динамический параметр PRU описывает причину тревоги.

Реализация международных стандартов беспроводной зарядки

С установлением описанных выше международных стандартов БЗ были проведены работы по исследованиям прототипов устройств. Из-за простоты внедрения и раннего появления большинство существующих реализаций основаны на стандарте Qi. Далее мы рассмотрим эти аппаратные проекты.

На международном симпозиуме по биоэлектронике и биоинформатике (International Symposium on Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB), Тайвань, апрель 2014 г.) было предложено Qi-совместимое ЗУ для имплантируемых медицинских устройств. Это ЗУ содержит модуль связи BLE (Bluetooth с низким энергопотреблением), который позволяет осуществлять дистанционное управление и наблюдение за устройствами. В данной системе удаленно выполнялось управление модулем зарядки устройства, считывалось состояние батареи в реальном времени и общий статус системы. Было показано, что при работе с выходной мощностью 3 Вт прототип достигает максимальной эффективности около 75%.

В другом исследовании, представленном в октябре 2013 г. в Мадриде (Испания) на Международной конференции по исследованиям и применениям в области возоб-

новляемых источников энергии (International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA), была проведена оценка производительности двунаправленной БЗ между портативными устройствами в соответствии со спецификациями WPC Qi. При выходной мощности 2,5 Вт достигалась 70%-ная эффективность зарядки на расстоянии 2 мм.

На Конференции по беспроводной передаче энергии (Wireless Power Transfer Conference, WPTC) в 2013 г. были представлены прототипы, построенные с использованием интегральных схем. В первом случае это была беспроводная система зарядки Qicompliant, включающая беспроводной передатчик мощности и приемник беспроводной мощности. В этих устройствах было применено архитектурное решение, использующее преобразователь мощности с полномоновым резонансным инвертором и полномоновым регулятором переменного напряжения. Системы прототипов были реализованы с использованием интегральных схем и дискретных компонентов. Экспериментальные результаты показали, что 70%-ная эффективность зарядки была достигнута при выходной мощности 5 Вт на дистанции зарядки в 5 мм. Еще в одном исследовании авторы представили конструкцию полностью интегрированного ЗУ для Li-ion батарей в соответствии со стандартом Qi. При постоянном токе была достигнута максимальная и средняя эффективность зарядки 83% и 79% соответственно.

Авторы публикаций в *Digital Signal Processing* (2013, Т. 23, № 4) и *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (2011, Т. 58) сосредоточили внимание на управлении выравниванием устройств БЗ, представив конструкцию блока управления и контроллера связи для управляемой позиционирующей платформы БЗ с одним приемником. Блок управления, используя для связи последовательный интерфейс, устанавливает значения времени отклика, данные, передаваемые между ЗУ и приемной парой, и рабочую частоту. Функция контроллера связи — инициация, управление и контроль процесса БЗ. Более того, авторы внесли дополнительные возможности обработки и хранения данных, чтобы адаптировать конструкцию с точки зрения времени отклика и размера передачи управляющих данных. Было показано, что данная реализация уменьшает сложность аппаратного дизайна и внутреннее энергопотребление как передатчика энергии, так и приемника. В. К. Жонг (W. X. Zhong), К. Лиу (X. Liu) и С. Ю. Р. Хью (S. Y. R. Hui) представили конструкцию, основанную на однослойной обмотке, чтобы обеспечить одновременную загрузку нескольких устройств в режиме свободного позиционирования. В предлагаемом подходе использовалась математическая теория упаковки для локализации зарядового потока в закрытой зоне зарядки, что позволило свободно размещать заряжаемые устройства (то есть вторичные катушки). Измерения показали, что эффективность энергии в диапазоне 86–89% достижима для любого положения ЗУ.

В одном из докладов на Международной конференции по электропитанию и управлению движением (International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE/PEMC) в сентябре 2010 г. сравнивались четыре

различных метода преобразования мощности, а именно — управление напряжением, управление рабочим циклом, частотное управление и управление фазовым переключением для Qi-совместимых систем беспроводной передачи энергии. Эксперимент показал, что два подхода управления сдвигом фаз превосходят другие, хотя соответствующая схема является более дорогостоящей. С использованием управления фазовым переключением общая производительность системы в 72% была достигнута для беспроводной зарядки мощностью 5 Вт.

В таблице 5 производится сравнение актуальных систем БЗ по параметрам источника энергии, частоты и эффективной дистанции зарядки.

Стратегия развития статической беспроводной зарядки

Рассмотрим стратегии зарядки статических ЗУ, входящих в беспроводные системы связи (Wireless Powered Communication Networks, WPCN). В WPCN беспроводные устройства обмениваются данными, используя только энергию, полученную от беспроводных ЗУ. Как правило, в WPCN рассматриваются два типа беспроводных ЗУ. Первый тип (энергетическая точка доступа, E-AP) предназначен только для поставки беспроводной энергии. Второй может дополнительно поддерживать обмен данными и работать как точка доступа к данным (D-AP). Такой тип устройств называется гибридной точкой доступа (H-AP). Исследования технологии WPCN развиваются по двум основным

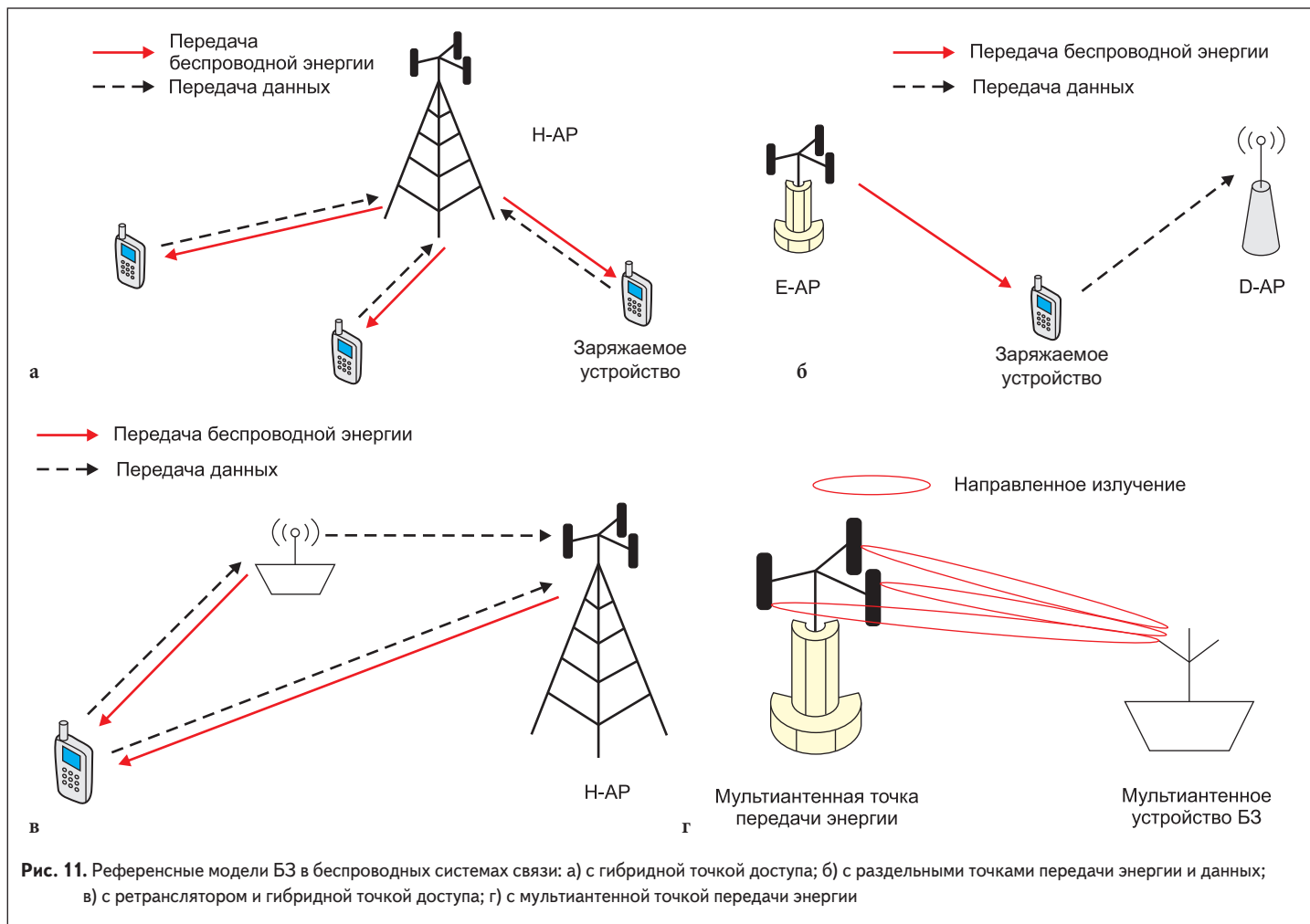
Таблица 5. Сравнительные характеристики различных систем беспроводной зарядки

Система	Входная мощность, Вт	Частота	Эффективная дистанция зарядки, мм
RAVpower	7,5	110-205 кГц	8
Duracell Powermat	18	235-275 кГц	5
Energizer Qi	22	110-205 кГц	11
WiTricity WiT-2000M	12	6,78 МГц	20
UW Prototype	30	13,56 МГц	100
WiTricity WiT-3300	до 3300	85 кГц	150
MagMIMO	20	1 МГц	400

направлениям. Первое направление фокусируется исключительно на БЗ, то есть передача беспроводной энергии и передача информации осуществляются раздельно. Второе направление — исследование систем параллельной передачи энергии и данных (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT), в которых БЗ и передача информации осуществляются одновременно, что является компромиссным решением. Значительное число исследований SWIPT проводилось в различных контекстах, например в каналах «точка-точка», широко-вещательных каналах, релейных каналах, каналах с несколькими антеннами с аддитивным белым гауссовским шумом (Additive White Gaussian Noise, AWGN) или затухающим AWGN, альтернативных каналах и каналах прослушивания. Кроме того, производились исследования по применению SWIPT в распределенных системах. В данной статье мы рассмотрим случай, когда передача беспроводной энергии и передача информации осуществляются раздельно.

На рис. 11 представлены четыре основные модели WPCN, которые рассматриваются в доступных литературных источниках. Кратко их можно описать следующим образом:

- WPCN с H-AP — системная модель (рис. 11а), в которой H-AP используется для обеспечения нисходящей (от зарядной станции к заряжаемому устройству) связи для БЗ пользовательского устройства и приема информации от него.
- WPCN с выделенной E-AP (рис. 11б) — системная модель, в которой БЗ устройства осуществляется отдельно посредством E-AP (нисходящая связь), а прием информации от него — при помощи D-AP (восходящая связь от заряжаемого устройства к зарядной станции).
- Ретрансляционная WPCN с H-AP — системная модель (рис. 11в), в которой для облегчения передачи по восходящей связи от пользовательского устройства к H-AP используются ретрансляторы.



- WPCN с мультиантенной E-AP — системная модель (рис. 11г), в которой используется несколько антенн/катушек в E-AP для повышения эффективности зарядки путем пространственной ориентации энергетического пучка в направлении устройства. Здесь формирование луча энергии является преимущественной задачей, в то время как передача информации выполняется отдельно от процесса БЗ.

Следует отметить, что использование в WPCN полнодуплексных H-AP позволяет одновременно осуществлять беспроводную зарядку устройства и передачу информации от него. Напротив, полудуплексной H-AP требуется согласование между БЗ устройства и передачей информации от него, т. е. для передачи энергии и информации используются различные временные сегменты трафика. Кроме того, полнодуплексное устройство требует выделенной частотной полосы для БЗ, отличной от частотной полосы, используемой для передачи информации. Полудуплексные устройства работают с перекрытием частот, т. е. БЗ использует ту же частотную полосу, на которой передается информация.

Стратегия зарядки для H-AP

В системах WPCN с H-AP основной проблемой является выделение ресурсов для обеспечения максимально достижимой пропускной способности устройств БЗ.

В 2014 г. в *IEEE Transactions on Wireless Communications* был предложен протокол «сбор-передача». Он предусматривает первоначальный сбор информации о сетевых устройствах для накопления энергии от БЗ в нисходящей линии связи. Затем собранная энергия используется для передачи индивидуальной информации в H-AP по восходящей линии связи на основе множественного доступа с временным разделением (Time Division Multiple Access, TDMA). В этом протоколе авторы оптимизировали распределение времени для БЗ и сбора данных при использовании полудуплексной H-AP на основе информации о ширине канала в пользовательских устройствах и их средней скорости получения энергии. Обработывая исходные данные с применением методов выпуклой оптимизации, получают оптимальное распределение времени в выражениях замкнутой формы. Однако рассмотренная система обнаружила двойную проблему «далекий-близкий». Получается, что пользователи, находящиеся далеко от H-AP, получают меньше энергии, и в то же время им требуется больше энергии для передачи информации по восходящей линии. Для решения этой проблемы авторы предложили использовать метрику производительности, названную «единая пропускная способность» (common-throughput). Данная метрика ограничивает трафик, исходя из того, что всем сетевым устройствам присуща одинаковая пропускная способность, независимо от их местоположения (видимо, подразумевается, что «скорость движения эскадры определяется самым медленным кораблем». — *Прим. перев.*). Кроме того, был разработан итерационный алгоритм для решения проблемы максимизации общей пропускной способности.

В более поздней работе (*IEEE Transactions on Communications*, 2014, vol. 62, № 10) описанная методика была расширена теми же авторами для использования полнодуплексной H-AP. Чтобы решить проблему максимизации в рассматриваемой сети, они совместно оптимизировали распределение мощности и распределение времени в H-AP в нисходящей линии связи, а также распределение времени для пользователей в восходящей линии связи. Показано, что проблема может быть выпуклой и невыпуклой в случае, соответственно, завершенного или незавершенного прекращения самоинтерференции. Соответственно, авторы получили оптимальные и субоптимальные решения для объединенного распределения времени и мощности. Было обнаружено, что пользователи с худшими каналами связи и/или меньшими весовыми коэффициентами должны получать больше мощности зарядки в единицу времени. Результаты моделирования показали, что система с полнодуплексным H-AP превосходит систему полудуплексных в тех случаях, когда самоинтерференция может быть эффективно устранена. Отметим, что в указанных работах рассматривались пользовательские устройства с детерминированным местоположением.

В дальнейшем исследователями использовался другой подход для анализа производительности случайно расположенных устройств путем применения методов стохастической геометрии. В целях достижения максимальной пропускной способности системы они разработали комплексную структуру для оптимизации мощности передачи восходящей линии связи, а также временного разделения между передачей энергии зарядки в нисходящей линии связи и передачей информации в восходящей линии связи. Предлагаемая структура, по замыслу авторов, обеспечивает повышенную вероятность успешной передачи информации. Кроме того, проблемы оптимизации пространственной пропускной способности были решены как для устройств с внутренней батареей, так и для безбатарейных устройств. Численные результаты показывают влияние емкости аккумулятора на пропускную способность системы.

Вместо оптимизации многопользовательского планирования X. Табассум (H. Tabassum), E. Хуссейн (E. Hossain), M. Хуссейн (M. Hossain) и Д. Ким (D. Kim) провели анализ эффективности современных «жадных» и циклических схем планирования применительно к работе протокола «сбор-затем-передача-данных». Были найдены решения в окончательном виде для минимальной вероятности отключения питания. Затем авторы модифицировали анализируемые схемы для улучшения спектральной эффективности по данному каналу восходящей линии связи с нулевой вероятностью отключения питания. Было продемонстрировано преимущество модифицированных алгоритмов распределения энергии для пользовательских устройств. Однако это исследование рассматривало только одну ячейку и игнорировало влияние накопленной радиочастотной энергии в соседних ячейках.

В дальнейшем, в отличие от упомянутых выше исследований, рассматривалась системная модель с использованием нескольких антенн в H-AP.

Мультиантенная H-AP может контролировать скорость передачи энергии на разные устройства посредством учета весовых коэффициентов при формировании энергетических пучков. Чтобы избежать накапливающейся проблемы «близкий-дальний», авторы предложили использовать невыпуклую задачу для следующих параметров: оптимизация распределения времени, формирование луча энергии нисходящей линии связи, совместное использование и распределение мощности для передачи данных по восходящей линии связи и передачи энергии по нисходящей линии связи. Задача может быть оптимально решена с использованием двухэтапного алгоритма, то есть для получения оптимального формирования луча энергии нисходящей линии связи и распределения времени. Кроме того, были введены два субоптимальных проекта для уменьшения сложности предлагаемого алгоритма. Выяснилось, что эффективность предлагаемых субоптимальных решений приближается к эффективности оптимального решения для случаев минимальной и максимальной пропускной способности. Был разработан протокол покадровой передачи в массивной системе MIMO в условиях неполной информации о состоянии канала (Channel State Information, CSI). В соответствии с протоколом каждый временной интервал делится на разные фазы. Точка доступа сначала оценивает каналы нисходящей линии связи, анализируя серию тестовых сигналов, отправленных устройствами по восходящей линии связи. Затем радиочастотная энергия передается на все устройства. После чего, используя собранную энергию, устройства передают индивидуальную информацию точке доступа. Схема максимизирует минимальную скорость между всеми устройствами за счет оптимизации распределения времени и энергии. Исследователями была введена метрика, называемая «коэффициентом усиления массива MIMO», которая определяется как асимптотическая скорость восходящей линии связи, нормированная логарифмом числа антенн в точке доступа. Было показано, что предлагаемая схема передачи является оптимальной со ссылкой на предлагаемую метрику. Более того, наилучшее решение может быть гарантированно найдено путем асимптотического получения общей для всех устройств скорости.

Стратегии зарядки для выделенной точки передачи энергии

Для WPCN с выделенной E-AP основное внимание уделяется контролю мощности беспроводной зарядной станции E-AP для достижения оптимальных результатов.

В некоторых исследованиях по данной теме рассматривался протокол «сбор-затем-передача-данных» и была разработана структура для передачи энергии и данных с балансировкой продолжительности времени между сбором энергии и передачей информации, с учетом характеристик канала связи.

В других работах изучалась полнодуплексная система режимов, в которой сбор энергии и передача данных выполнялись по двум разделенным и изменяющимся во времени каналам. Предположив, что информация об обоих каналах заранее известна, а емкость

аккумулятора пользователя неограничена, авторы предложили эффективный алгоритм для получения оптимального распределения мощности. Было проведено численное моделирование различий в производительности между рассматриваемой системой и обычной системой со случайным коэффициентом сбора энергии с той же общей мощностью. Однако исследователями рассматривалась работа только одного устройства, и вопрос распределения мощности для нескольких устройств остается открытой проблемой.

В дальнейшем моделирование системы было расширено, и рассматривалось уже взаимодействие нескольких устройств и нескольких антенн, работающих в системе E-AP. Учитывая TDMA, проблема получения максимальной суммарной пропускной способности системы была сформулирована как невыпуклая оптимизационная задача, в которой должно учитываться как распределение времени, так и формирование луча энергии. Применялся метод полуопределенной релаксации, чтобы преобразовать проблему к выпуклой задаче по оптимизации, и была получена компактность, а также глобальная оптимальность полуопределенного релаксационного приближения. Кроме того, было разработано быстрое решение полузамкнутой формы, которое значительно снижает сложность реализации.

В дальнейших исследованиях предполагалось, что E-AP и устройства обращаются к одному и тому же каналу для БЗ и передачи информации в произвольные моменты времени. В системной модели рассматривалось управление мощностью нескольких E-AP с несколькими устройствами с беспроводным питанием. Авторы предложили стратегию управления мощностью для E-APs, чтобы свести к минимуму потребление энергии в соответствии с желаемым требованием уровня искажения на D-AP. Это потребление энергии зависит от количества информации, отправленной с устройства при наличии помех. Результаты моделирования характеризовали компромисс между преодолением влияния помех, количеством E-AP и уровнем их мощности.

Стратегии зарядки ретрансляционной модели с N-AP

Основная проблема в схеме с ретрансляционными WPCN заключается в разработке протокола работы, обеспечивающего координацию передачи данных и беспроводной зарядки для достижения максимальной пропускной способности.

В некоторых исследованиях были проанализированы различные стратегии взаимодействия ретрансляторов для повышения производительности сети. В 2015 г. был разработан протокол «сбор–затем–сотрудничество». В данном протоколе сперва происходит получение энергии пользовательским устройством от ретранслятора, а затем осуществляется передача информации в восходящем направлении. Для случая одиночного ретранслятора с ограниченной задержкой передачи авторы получили приведенную аппроксимированную формулу для вычисления средней пропускной способности системы в соответствии с предлагаемым про-

токолом в затухающем канале Рэля. Для случая нескольких ретрансляционных узлов была получена приблизительная пропускная способность системы в соответствии с предлагаемым протоколом с двумя различными схемами выбора ретранслятора. В результате моделирования было показано, что предложенный протокол превосходит протокол «сбор–затем–передача–данных» во всех рассмотренных случаях.

В дальнейшем было предложено два совместных протокола, а именно: энергетическое взаимодействие и двойное взаимодействие. Первый позволяет ретранслятору взаимодействовать с N-AP только для передачи энергии по нисходящей линии связи. Последний вместо этого позволяет ретранслятору сначала взаимодействовать с N-AP для передачи энергии по нисходящей линии связи, а затем служит для передачи информации по восходящей линии связи от пользовательского устройства. Авторы исследований сформулировали проблемы максимизации пропускной способности системы, объединив в своей разработке распределение мощности и распределение времени. Для обеих задач были получены оптимальные решения. Теоретический анализ показал, что для получения максимальной пропускной способности системы по протоколу энергетического сотрудничества стратегия заключается в том, чтобы позволить N-AP и ретранслятору постоянно работать в режиме максимальной передачи мощности независимо от оптимального распределения времени. Кроме того, как показало моделирование процесса, когда отношение сигнал/шум (SNR) велико, протокол энергетического взаимодействия показывает более высокую производительность, чем протокол двойного взаимодействия.

Стратегии зарядки для точки доступа к энергии с несколькими антеннами

Исследовательские усилия для мультиантенной E-AP, в основном, касаются разработки стратегии формирования диаграммы направленности и/или механизма обратной связи по CSI для повышения эффективности БЗ. Следует помнить, что стратегии в этой категории не учитывают вопросы, связанные с передачей информации.

Были исследованы мультиантенные системы на основе радиоионизации с задачей обеспечения максимального количества передаваемой энергии. В одном из исследований авторы разработали схему формирования адаптивного энергетического луча для системы MISO «точка–точка» с неполной обратной связью CSI. Рассматриваемая система работает по кадровому протоколу, который сначала осуществляет оценку приемником характеристик каналов через вводную, полученную от передатчика, а затем посылает полученные характеристики CSI обратно в передатчик. Затем энергия радиоионизации посылается передатчиком посредством направленного луча. Чтобы максимизировать собранную энергию, авторы использовали компромисс между продолжительностью оценки канала и продолжительностью передачи мощности, а также распределением мощности передачи. Сначала они получили оптимальные энергетические диаграммы направленности. Затем была получена оптимальная длина вводной для

передачи в режиме постоянной связи и длина вводной для работы в автономном режиме для случаев с вводной переменной и фиксированной длины, соответственно. Мощность передачи распределяется на основе оценки мощности канала и оптимальной длины вводной.

В другом исследовании рассматривалась двухточечная система формирования энергетического луча MIMO. Авторами была изучена оптимальная конфигурация входящего канала. Взаимодействуя с каналом, E-AP оценивает его состояние посредством специального обучающего сигнала обратной линии связи от пользовательского устройства. Исследование показало, что возможен компромисс между продолжительностью обучения и беспроводной передачей энергии в системе формирования энергетического луча. В частности, слишком короткая продолжительность обучения уменьшает точность оценки состояния канала и, следовательно, снижает коэффициент усиления луча энергии. С другой стороны, слишком длительная продолжительность обучения вызывает чрезмерное потребление энергии пользовательским устройством и, следовательно, уменьшает время для передачи энергии. Основываясь на этом компромиссе, авторы разработали оптимальную схему обучения, чтобы максимизировать чистую энергию пользовательского устройства, которая рассчитывается путем нормализации энергии, используемой для обучения каналов, с общей полученной энергией. Однако эта предлагаемая конструкция пригодна только для узкополосных каналов с плавным затуханием.

В дальнейших работах рассматривались более сложные широкополосные каналы с различным затуханием по частотам, применение которых обеспечивает более эффективную передачу энергии за счет дополнительного усиления по разным частотам, по сравнению с его узкополосным аналогом. Для достижения оптимальных результатов как разнесения, так и усиления луча авторы ввели двухэтапную схему формирования канала. На первом этапе E-AP выбирает набор поддиапазонов с наибольшим усилением суммарной мощности антенны посредством пилот-сигналов, отправленных с пользовательского устройства. Затем, во второй фазе, E-AP оценивает каналы MISO дополнительными пилот-сигналами выбранных на первом этапе поддиапазонов. Численные результаты показали, что предлагаемая схема способна оптимально сбалансировать достижимые коэффициенты частотного разнесения и усиления энергии. Авторы также получили конечное выражение количества собранной энергии на пользовательском устройстве в рамках предлагаемой двухфазной схемы обучения. Этот аналитический результат показывает, что количество собранной энергии сверху ограничено постоянной величиной, в то время как количество поддиапазонов приближается к бесконечности. Однако это исследование рассматривало только независимые каналы, оставив нерассмотренными случаи, когда каналы могут влиять друг на друга.

Более поздние исследовательские усилия были сосредоточены на системе с несколькими связанными друг с другом катушками. В частности, была спроектирована система зарядки

ближнего поля, называемая Mag-MIMO, которая выполняет беспроводную зарядку с помощью магнитного поля, без использования радиопередатчика. Авторы работы ввели схему оценки канала, основанную на измерении нагрузки, которую оказывает приемник на передатчик. Эта схема отличается от обычной системы связи, при которой передатчик с несколькими антеннами получает информацию о канале либо посредством обратной связи, либо путем использования обратных каналов путем прослушивания передач от приемника. Кроме того, авторы также разработали протокол, позволяющий Mag-MIMO обнаруживать присутствие устройства и быстро оценивать сопротивление нагрузки в соответствии с информацией, полученной по каналам обратной связи от приемника. Результаты экспериментов показали, что системы с MagMIMO потребляют сравнимую мощность с теми, которые используются в существующих беспроводных зарядных устройствах, таких как Powermat и Energizer Qi, обеспечивая при этом значительно большее расстояние зарядки.

Выводы

В этом разделе были рассмотрены стратегии беспроводной зарядки в четырех различных типах сетей, а именно WPCN с Н-АР, WPCN с выделенной Е-АР, ретрансляционной WPCN с Н-АР и WPCN с мультиантенной Е-АР.

Для WPCN с Н-АР стратегия зарядки заключается в использовании полудуплексной Н-АР для каналов SISO, MISO и MIMO; также возможно использование полнодуплексных Н-АР в каналах SISO. Изучение стратегии зарядки для

мультиантенных WPCN с полнодуплексным Н-АР может быть одним из будущих направлений исследований. Более того, в большинстве существующих работ рассматриваются схемы, основанные на TDMA. Однако было бы интересно проанализировать другие схемы множественного доступа, например OFDMA, для координации передачи информации о восходящей линии пользовательских устройств.

Для WPCN с выделенной Е-АР в существующей литературе были исследованы отдельные стратегии зарядки Е-АР для одного пользовательского устройства и нескольких пользователей с детерминированной БЗ. Однако эти стратегии применимы только к мелкомасштабным сетям с ограниченным количеством устройств. Стратегии зарядки для координации нескольких Е-АР в детерминированных каналах являются предметом для дальнейшего изучения. Кроме того, изучалась множественная стратегия зарядки Е-АР для нескольких пользовательских устройств в адаптируемых каналах. Для повышения эффективности использования спектра излучения в случае адаптируемой БЗ необходимо исследовать перспективные методы на основе ретрансляторов. Дополнительные исследования могут быть предприняты для анализа пропускной способности, возможностей системы, а также влияния интерференционных помех.

Для ретрансляционных WPCN были предложены сетевые протоколы для решения двух случаев, когда питание ретранслятора осуществляется от беспроводной сети и когда ретранслятор подключен к проводной сети.

По сравнению с первым, последний может дополнительно сотрудничать с Н-АР для осуществления БЗ по нисходящей линии связи для пользовательских устройств. Полнодуплексный ретранслятор и мультиантенный ретранслятор могут быть предметами дальнейшего изучения для ретрансляционных WPCN.

Для WPCN с мультиантенной Е-АР были изучены стратегии формирования энергетического луча для мультиантенной системы дальнего действия с каналом MISO и каналом MIMO. Однако в существующей литературе рассматривается только двухточечная зарядка. Формирование диаграммы направленности энергии для нескольких приемников энергии является ключевым вопросом, который необходимо изучить. Кроме того, недавно была изобретена система зарядки ближнего радиуса действия с несколькими катушками, которая комбинирует формирование энергетического луча и магнитного поля. Для подробного изучения эмпирических характеристик в различных условиях работы необходимо дальнейшее проведение исследований и подробный анализ экспериментальных данных.

Завершающие статьи цикла будут посвящены некоторым открытым направлениям исследований в области внедрения технологий БЗ, а также прогнозам по теме будущих сетевых приложений. ■

*Оригинал статьи опубликован в журнале
IEEE Communications Surveys & Tutorials
www.researchgate.net/publication/281273340*