

БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ И ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛН

Димитров Г.Л.

*Димитров Георги Любомиров – кандидат технических наук, главный ассистент,
кафедра электроники,
Высшая военно-морская академия Н. Вапцарова, г. Варна, Республика Болгария*

Аннотация: идея плавной интеграции передачи информации и передачи энергии на основе микроволн в одной и той же системе привела к появлению новой области исследований, называемой связью с беспроводной передачей энергии (Wireless Powered Communications или WPC). Эксклюзивные исследования были проведены по разработке теории и методик, основанных на чрезвычайно богатой литературе по беспроводной связи, охватывающей разнообразные темы, такие как передача, распределение ресурсов, управление доступом к среде, сетевые протоколы и архитектуры. Несмотря на эти исследовательские усилия, трансформирование беспроводной передачи энергии из теории в практику сталкивается с множеством нерешенных проблем, связанных с такими вопросами, как мобильность, эффективность передачи энергии и безопасность. Кроме того, основные ограничения беспроводной передачи энергии остаются в значительной степени неизвестными. Недавние попытки решить эти открытые проблемы привели к появлению многочисленных новых направлений исследований в этой области. В этой статье представлены несколько перспективных тенденций. С практической точки зрения использование антенн с обратным рассеянием может поддерживать передачу энергии для пассивных устройств с низкой сложностью, конструкция колющих волновых форм может улучшить эффективность, а аналоговая пространственная развязка предлагается для решения трансфера энергии совместно с трансфера информации в непосредственной близости. С теоретической точки зрения фундаментальный предел беспроводной передачи энергии можно количественно оценить, используя результаты по сверхнаправленности, и предел может быть улучшен за счет развертывания широкомасштабных распределенных антенных массивов. Обсуждаются конкретные исследовательские проблемы вдоль таких тенденций, решения которых могут привести к значительным улучшениям беспроводного питания.

Ключевые слова: беспроводная передача информации, беспроводная передача энергии, радиочастотные волны, MIMO, RFID.

УДК 621.391, 621.396

1. Введение

Идея беспроводной передачи энергии с использованием радиочастотных волн может быть прослежена до амбициозного проекта Тауер в Барселоне более 100 лет назад. Несмотря на первоначальный провал, вызванный достижениями в области микроволновых технологий, последние годы стали свидетелями огромного развития передачи микроволновой энергии (ПМЭ) и ее успешного применения в коммерческих системах, таких как радиочастотная идентификация - RFID [1]. Возможность вырезать «провода» (т.к. кабели для подзарядки мобильных устройств) в дополнение к привлекательным характеристикам полностью контролируемой мощности энергии позиционировала ПМЭ как многообещающее решение для питания энергоемких и низкоскоростных беспроводных сетей. Интеграция ПМЭ и беспроводных коммуникаций открыла новую и захватывающую исследовательскую область, называемую сетью с беспроводной передачей энергии (СБПЭ- WPC) [2, 3]. Из-за высокого ослабления беспроводного распространения СБПЭ до сих пор в основном использовался в небольших беспроводных сетях с узлами малой мощности, такими как RFID и сенсоры. Однако, с развитием сотовой сети в пятом поколении (5G), новые появляющиеся беспроводные технологии, такие как небольшие сотовые сети и массивный множественный входной мультивыход (MIMO), могут значительно сократить потери на распространение за счет сокращения связи расстояний и дисперсии сигнала. В то же время ожидается, что потребление энергии беспроводными устройствами будет постоянно снижаться. Поэтому прогнозируется, что СБПЭ станет незаменимым строительным блоком для многих коммерческих и промышленных беспроводных систем в будущем, включая будущие системы «Интернет вещей» (Internet of Things - IoT), беспроводные сенсорные сети, сети RFID и небольшие сотовые сети [2, 3]. В настоящее время СБПЭ является одной из самых активных областей в беспроводной связи, где проводятся обширные исследования по фундаментальным ограничениям БПЭ, технологиям передачи, распределению ресурсов, сетевым архитекторам и среднему контролю доступа.

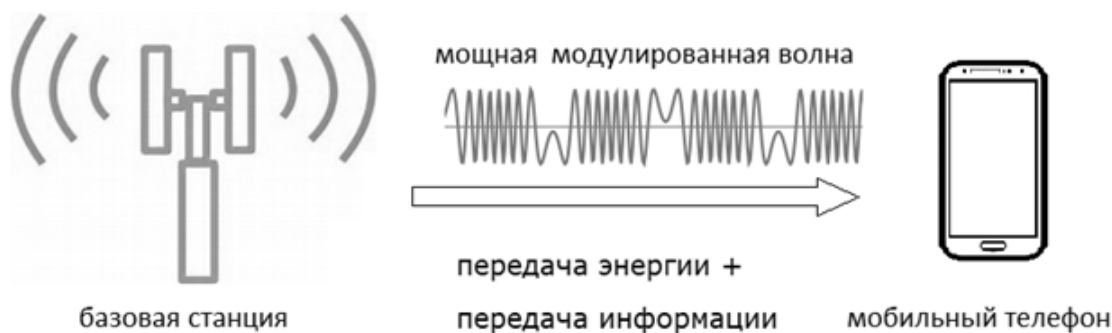


Рис.1. Система беспроводной передачи информации и передачи мощности

С быстрыми достижениями в разрешающих технологиях считается, что СБПЭ обладает потенциалом для питания устройств, превышающих маломощные датчики и теги (например, носимые вычислительные устройства или даже смартфоны [3]). Это сместило парадигму исследований СБПЭ с точки зрения энергоэффективности в настоящее время на основе более сложных показателей, таких как компромисс между энергопотреблением. Последние достижения по этим темам были рассмотрены в недавней теме в IEEE Communications Magazine [4]. В литературе существуют две типичные системные конфигурации для реализации СБПЭ: одна называется одновременной системой беспроводной передачи информации и передачи мощности (СБПИМ- SWIPT) [5], а другая - системой СБПЭ с автоматическим маяком (ПМ) [6], которые проиллюстрированы на рис. 1 и рис. 2. В системе SWIPT (рис. 1) базовая станция (БС) передает модулированную волну, из которой целевая мобильная станция собирает энергию и демодулирует информационные биты. Из-за обычно длинного расстояния пролета (например, более 100 м) от базовой станции до мобильного устройства, система SWIPT имеет низкую эффективность передачи мощности (ПМ) и подходит только для питания маломощных устройств, таких как датчики и RFID.



Рис. 2. Система беспроводной передачи информации и передачи мощности с поддержкой силового маяка

Недостатком может быть преодолен путем развертывания РВ, предназначенного для передачи мощности - РТ, в результате чего система СБПЭ с поддержкой ПМ (Power Beacon) (рис. 2). ПМ имеют низкую сложность и требуют только подключения к электрической сети и, следовательно, могут быть развернуты с высокой плотностью, что уменьшает диапазон передачи мощности и потери. Маяк может быть интегрирован с фемтосотой БС с обратным каналом для поддержки короткого диапазона СБПИМ для мобильных телефонов (рис. 2). Несмотря на быстрый прогресс с теоретической точки зрения, реализация СБПИМ по-прежнему сталкивается со многими проблемами. Попытки исследователей по преодолению теории и практики SWIPT привели к недавнему появлению новых тенденций исследований, касающихся различных аспектов технологии, таких как эффективность, сложность и безопасность. В этой статье изложим несколько перспективных тенденций и обсудим возможности

исследований по этим направлениям. „Backscatter“ СБПЭ или СБПЭ с обратным рассеянием: это оснащенные антеннами, беспроводные устройства низкой сложности с активными РЧ-компонентами, такими как RFID, способны принимать энергию от и передавать данные в БС. Представлены СБПЭ с обратным рассеянием и обсуждаются различные соответствующие исследовательские возможности, включая полную дуплексную связь, сетевые архитектуры, планирование и интеграцию обратного рассеяния в СБПЭ и ретродиагностического формирования луча. В обсуждении рассматриваются как системы с поддержкой SWIPT, так и с маяком - СБПЭ.

Экспериментальный вывод о связи между остротой сигнала и эффективностью энергосбережения открывает возможность повышения эффективности ПЭ системы СБПИМ за счет конструкции импульсных сигналов. Тем не менее, такие проекты должны сбалансировать скорость передачи информации (ИТ) и эффективность ПЭ, создавая ряд интересных исследовательских возможностей. Позже обсуждаются несколько вопросов как:

- Надежная конструкция осциллограммы для поддержания остроты сигнала при многоканальном распространении.
- Конструкция формы сигнала в соответствии с ограничениями пропускной способности и аппаратного обеспечения.
- Конструкция волновой формы, оптимизирующая обмен между скоростью ПИ и эффективностью ПЭ, называется компромиссом по обменному курсу. Обсуждение предполагает систему SWIPT.

Основной вопрос для СБПИМ или SWIPT: «Может ли скорость ПИ и эффективность ПЭ расти, упаковывая больше антенн в массив передачи?». Ответ отрицательный, как видно из недавних исследований по супер-директивам. Основываясь на результатах супернаправленности, не ограничивая количество передающих антенн, можно получить фундаментальный компромисс по энергопотреблению для СБПИМ.

Практические ограничения супер-директивного массива СБПИМ могут быть преодолены путем распределенного развертывания антенн. Результирующий крупномасштабный распределенный массив, называемый вездесущим массивом, не только поддерживает эффективный СБПИМ, но и предоставляет другие преимущества, такие как включение слепых каналов и гарантирование линий видимости при наличии рассеяния. Соответствующее обсуждение представлено с ориентацией на СБПИМ. Аналоговое пространственное развязывание ПЭ и ПИ для СБПЭ: в системе СБПЭ с поддержкой ПМ, мощности ПЭ и чистые ПИ-сигналы, принимаемые на мобильном устройстве, могут различаться на много порядков. Цифровка смешанных сигналов может привести к тому, что ПИ-сигнал будет полностью поврежден шумом квантования. Это мотивирует необходимость отделить два типа сигналов в аналоговой области, используя их пространственное разделение. Проектирование схем аналоговой развязки с использованием простых компонентов, таких как фазовращатели, является сложным.

2. Беспроводный трансфер энергии способом обратного рассеяния.

В системе связи обратного рассеяния, иллюстративной на фиг.3, мобильное устройство поглощает энергию от падающей синусоидальной волны, излучаемой передатчиком, а также модулирует и отражает часть волны назад к передатчику. Отражение волны обусловлено преднамеренной ошибкой между антенной и полным сопротивлением нагрузки. Изменение импеданса нагрузки приводит к тому, что коэффициент комплексного рассеяния изменяется после случайной последовательности, которая модулирует отраженную волну информационными битами (рис. 3). Коммуникация обратного рассеяния позволяет передатчику приводить в действие пассивный приемник, который не использует активные радиочастотные компоненты.

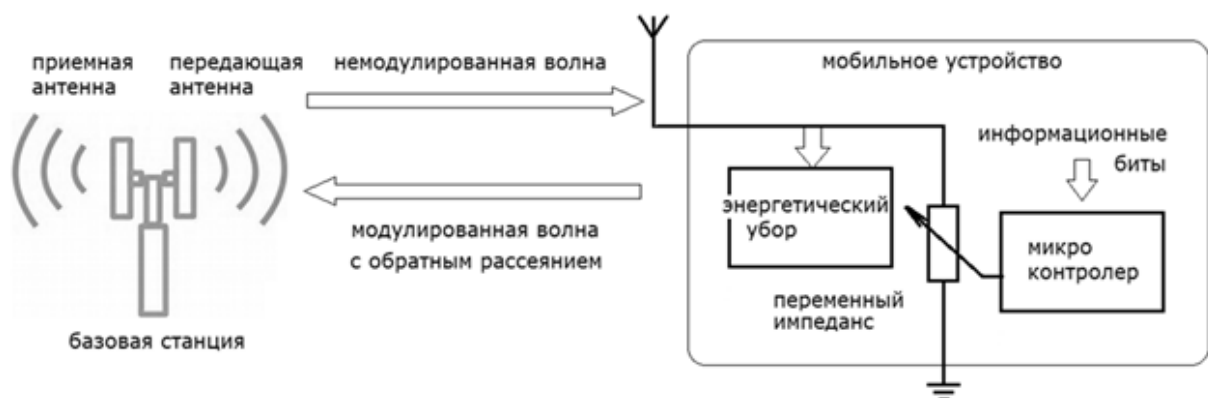


Рис. 3. Система беспроводной передачи информации и передачи мощности с обратным рассеянием

Этот уникальный вид связи получил значительный интерес в последние годы, главным образом благодаря его успешной реализации в пассивных системах радио идентификации - RFID и потенциальному использованию в других беспроводных устройствах с малой мощностью и малыми формфакторами, такими как датчики [7]. Две ключевые особенности коммуникационных систем обратного рассеяния различают их от условных.

2.1. Диада ММО каналов: реализация обратного рассеяния в системе ММО создает специальный класс каналов ММО, называемых **диада ММО-каналами**, которые захватывают составное замирание в прямом и обратном каналах [7]. В частности, немодулированная волна, излучаемая передатчиком, распространяется по прямому каналу ММО, модулируется и рассеивается приемником и наконец, распространяется через обратный канал ММО для достижения передатчика. В результате эффективный диадический канал может быть записан как произведение двух матриц – первая это канальная матрица восходящей линии связи, а другая - диагональная матрица, вычисленная из нисходящей канальной матрицы. Структура диадических ММО-каналов приводит к появлению новых моделей каналов в отличие от обычных и влияет на пропускную способность канала и схемы передачи, такие как пространственно-временное кодирование и мультиплексирование с разнесением мультиплексирования [7]

2.2. Компромиссы с обменом энергоресурсами: в системе связи обратного рассеяния есть две компромиссные коэффициенты. Первый возникает из рабочего цикла пассивного приемника, определенного как доля времени, в течение которого приемник передает информацию обратным рассеянием. Оставшееся время тратится на холостой ход и сбор энергии. Обращается внимание, что обратное рассеяние уменьшает собранную энергию, поскольку ее часть рассеивается. Тогда существует компромисс, в котором увеличение рабочего цикла уменьшает собранную энергию, но увеличивает скорость передачи информации и наоборот. Второй компромисс является результатом выбора размера модуляции. Для роста числа бит на символ требуется больший размер, который увеличивает средний коэффициент отражения и как результат, уменьшает среднюю собранную энергию, что дает соответствующий компромисс между энергопотреблением.

Связь обратного рассеяния представляет собой полезную базовую технику для проектирования мобильных устройств с малой потребляемой мощностью и низкой стоимостью, а также создание новых систем СБПЭ для обслуживания таких устройств.

3. Вопросы включенные взаимодействие и научно-исследовательские возможности

СБПЭ, опираясь на принцип обратной связи, называемым с обратным рассеянием - *backscatter*, является перспективным направлением исследований. Некоторые начальные исследования в этом направлении были продолжены в [8], где предложен метод оценки канала, специально разработанный для СБПЭ с обратным рассеянием. Тем не менее, область СБПЭ с включенным обратным рассеянием в значительной степени не обозначена. Несколько потенциальных возможностей исследования описываются следующим образом.

3.1. СБПЭ с полным дуплексным обратным рассеянием: стандартная система связи обратного рассеяния (фиг.3) поддерживает одновременную передачу по нисходящей линии немодулированной синусоидальной волны и восходящей линии передачи модулированного рассеянного сигнала. Одно интересное направление исследований - также модулировать указанную синусоидальную волну с информацией, поддерживая полнодуплексную ПИ-систему в сочетании с ПЭ. Основная проблема заключается в декодировании сигнала на БС, который был дважды модулирован с помощью информационных битов нисходящей линии связи и восходящей линии связи. Однако, используя предварительное знание информации нисходящей линии связи, БС может получить информацию восходящей линии связи. Это мотивирует разработку специальных схем модуляции и предварительного кодирования, чтобы облегчить декодирование двойного модулированного сигнала за счет использования хорошо известных методов, таких как кодирование Томлинсона-Харасимы.

3.2. Система беспроводной передачи информации и передачи мощности Backscatter-Enabled СБПЭ: реализация обратного рассеяния на мобильных устройствах снижает их энергопотребление и облегчает СБПЭ, и, таким образом, находит приложения в предстоящих сетях IoT или Sensor с МРТ. В сетях СБПЭ, мобильные устройства могут собирать энергию из части волны, передаваемой ПМ, и модулировать и рассеивать остаток до БС. Для проектирования таких сетей пропускная способность сети может быть максимизирована путем оптимизации различных конфигураций, включая параметры мобильных антенн обратного рассеяния (например, коэффициенты отражения, размер манипуляции и рабочий цикл) и средние компромиссы с коэффициентом энергопотребления для обратного рассеяния коммуникации.

3.3. Реверсивное преобразование с обратным рассеянием для СБПЭ: преобразование лучей с перенапряжением является простой технологией для БС с множеством антенн, чтобы автоматически направлять радиолучевой сигнал к целевому пользователю на основе сигнала, переданного пользователем и принимаемого на БС. Пучок формируется путем сопряжения фазы сигнала,

принимаемого на каждой антенне, и повторной передачи сигнала после усиления. Таким образом, ретродиагностическое формирование луча не требует ни знания местоположения пользователя, ни какого-либо сложного алгоритма формирования луча. Существуют различные способы реализации фазового сопряжения без необходимости использования фазовращателей или цифровой сигнальной обработки [9]. Интересно интегрировать связь обратного рассеяния и ретродиагностическое формирование луча для реализации автоматической СБПИМ, поддерживающего быстрое отслеживание пучка. В такой конструкции БС периодически передает пилот-сигнал (например, непрерывную волну) и основываясь на обратных рассеянных сигналах, направляет ретродирекционные лучи в сторону множества пользователей. Благодаря их автоматическому управлению такие лучи способны отслеживать движения пользователей даже на высоких скоростях. Более того, автоматический SWIPT не требует обратной связи канала или информации о состоянии канала (CSI) на мобильных телефонах и таким образом, снижает их сложность. Одним из недостатков автоматической СБПИМ является то, что формирование ретро-ориентированного луча не обеспечивает гибкости по сравнению с рисунком луча и следовательно, неспособно избежать помех. Затем для автоматической СБПИМ множественный доступ с пространственным разделением должен опираться на крупномасштабную передающую матрицу или пространственное разделение большого пользователя для подавления многопользовательского вмешательства.

3.4. Планирование для обратного рассеяния СБПЭ: подача мобильной передачи по восходящей линии связи с помощью БПЭ нисходящей линии связи (например, для связи с обратным рассеянием) вызывает двойное (восходящее / нисходящее) ослабление, что приводит к серьезной почти полной проблеме в СБПЭ [2]. С одной стороны, мобильное устройство, расположенное далеко от БС, потребляет меньше энергии. С другой стороны, это требует больше энергии для ПИ восходящей линии связи, чтобы компенсировать серьезную потерю пути. Таким образом, мобильные устройства, расположенные рядом с БС, с большей вероятностью будут обслуживаться, если целью является просто максимизировать спектральную или энергоэффективность, не предоставляя или мало возможностей передачи для удаленных мобильных устройств. Поэтому, как разработать сложный многопользовательский алгоритм планирования, гарантирующий справедливость, является важной проблемой, которая должна быть решена.

4. Дизайн формы волны для СБПИМ

Типичная система БПЭ проиллюстрирована на фиг.4, в которой радиочастотная волна, излучаемая маяком, закрывается антенной на приемнике энергии и подается в схему выпрямления. Схема обычно состоит из одного диода и фильтра нижних частот, который преобразует радиочастотный сигнал обратно в энергию постоянного тока для хранения. Для реализации системы БПЭ одна из наиболее важных проблем для решения - как улучшить эффективность преобразования RF-DC. До сих пор основные усилия были направлены на разработку эффективных прямоугольников, каждая из которых включала антенну и выпрямитель. Однако общая эффективность преобразования RF-DC не только зависит от эффективности **Рек-тенна** (*rectenna*), но также тесно связана с входным сигналом, как описано ниже.

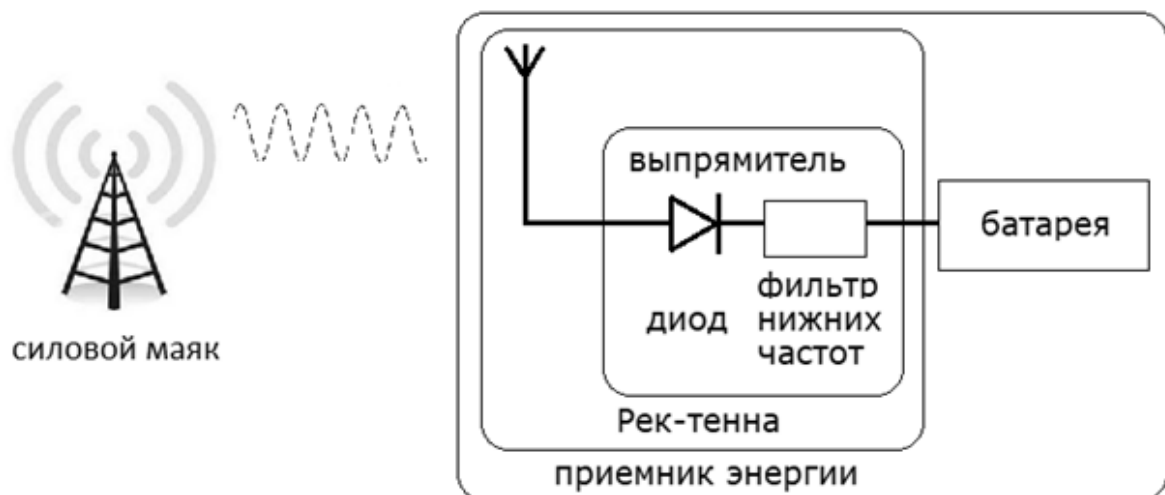


Рис. 4. СВЧ-система передачи энергии

При получении сигнала непрерывной волны с одной несущей в идеальном случае выходной прямой ток, пропорционален входной мощности из-за доминантного поведения диода второго порядка. Однако на практике из-за нелинейного поведения диода выходной ток зависит не только от средней входной мощности, но и от четвертого порядка входного сигнала, как:

$$y(t) = k_2 x^2(t) + k_4 x^4(t) \quad (1)$$

где $x(t)$ - входной сигнал, $y(t)$ - выходной ток, k_2 и k_4 - диод-специфические константы. Эта важная теоретическая основа вызвала рост исследовательских интересов в эффективном режиме волны. В частности, продемонстрировано, что использование мульти-синусоидального сигнала дает более высокий выходной ток по сравнению с сигналом с одной несущей с одинаковой средней мощностью передачи [10]. Это привело к выводу, что импульсные сигналы, то есть сигналы с высоким отношением пиковой мощности к средней мощности (PAPR), имеют тенденцию к повышению эффективности преобразования энергии. Увлечение разработкой СБПЭ -сообщества в значительной степени было недооценено в сообществе СБПИМ. Только в недавней работе [11], основываясь на этих последних результатах, сделан шаг вперед: оптимизировать дизайн мульти-синусоидальных волновых форм с несколькими передающими антеннами. Поскольку дизайн осциллограммы для БПЭ является вновь возникшей темой, все еще остается много важных проблем. В частности, можно идентифицировать следующие потенциальные возможности исследований.

4.1. Прочная конструкция волновой формы для БПЭ.

Для разработки формы волны мультисинхронных немодулированных сигналов для БПЭ фазовая синхронизация отдельных поднесущих необходима для получения очень остроконечного сигнала. Кроме того, могут быть воспроизведены амплитуды поднесущих и разделение частот для дальнейшего повышения производительности. Когда генерируемые сигналы радиочастотной энергии распространяются по беспроводной среде, случайные фазовые и амплитудные искажения будут искажать радиочастотный сигнал из-за многолучевого замирания. Поэтому крайне важно компенсировать такое случайное искажение в ПМ, которое, однако, требует точного статуса каналов - CSI. На практике получение точных статусов каналов для систем БПЭ может быть затруднено и накладывает дополнительные накладные расходы. Таким образом, вопрос о создании сигнального сигнала на основе только частичного статуса с гарантированной энергоэффективностью является проблемой, представляющей практический интерес.

4.2. Конструкция с ограниченной шириной полосы

Рассмотрим систему СБПЭ с поддержкой РВ. Сигнал CW с синхронной несущей, передаваемый РВ, эффективно использует нулевую полосу пропускания, в то время как косые сигналы, такие как мультиплексирование, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM) и сверхширокополосные (UWB) сигналы, имеют тенденцию занимать не- нулевую или даже большую полосу пропускания. Следовательно, улучшение эффективности преобразования энергии путем передачи импульсных сигналов происходит за счет расширения полосы пропускания. На практике широкополосный РВ, передача может быть недоступна по нескольким причинам. Во-первых, распределение спектра между РТ и ИТ заставляет первое вмешиваться в последнее. Во-вторых, широкополосная передача РВ налагает дополнительные требования к проектированию для схем сбора энергии (т.е. Широкополосных прямоугольников). Поэтому важно изучить оптимальную форму волны для максимизации эффективности преобразования энергии при ограничении полосы пропускания.

4.3. Конструкция формы волны для оптимальной компроматации энергопотребления: для приложений СБПИМ желательно использовать форму сигнала, которая эффективна как для ПЭ, так и для ПИ. Однако эти два объекта противоречат друг другу. С одной стороны, импульсные сигналы предпочтительнее с точки зрения повышения эффективности преобразования энергии. С другой стороны, импульсные сигналы сталкиваются с нелинейным искажением сигнала из-за ограниченного динамического диапазона практических усилителей мощности, что вызывает существенную потерю скорости информации. Таким образом, существует компромисс с коэффициентом энергопотребления в зависимости от остроты сигнала, что является тоже интересной задачей для исследования.

5. Супер-директивный переход. Супер-директивность и транспорт

Направленность формирования луча в свободном пространстве определяет эффективность СБПЭ. Важно исследовать его фундаментальный предел, изучая крайность направленности, поскольку большее количество антенн упаковывается в массив с фиксированной длиной или площадью области. Это приводит к феномену, называемому супер-направленностью, который относится к направленности плотного массива, намного превышающего опорную матрицу (например, однородную линейную матрицу с полуволновым разделением антенн), которая в последнее время получила большое внимание в литературе. В контексте СБПИМ изучение сверхнаправленности приводит к новому и фундаментальному компромиссу в области энергопотребления, регулируемому направленностью.

Теоретически конечный размер апертуры массива не может ограничивать направленность и количество потоков данных пространственно мультиплексированным (или, что то же самое, числом

пространственных степеней свободы). Причина в том, что произвольная диаграмма направленности излучения может генерироваться апертурой любого заданного размера, если антенны, упакованные в отверстие, являются достаточно плотными. Однако реализация супернаправленности в практике недопустима из-за нескольких проблем [13]. Во-первых, учитывая массив, заключенный в пространство фиксированного объема, увеличение плотности антенны приводит к очень большим величинам и чрезвычайно быстрым фазовым вариациям в коэффициентах возбуждения элементов массива. Это приводит к большим и противоположно направленным токам в элементах. Тогда реальная супернаправленность требует чрезвычайно точных корректировок коэффициентов возбуждения антенны. Во-вторых, огромные изменения тока в сверхдифференцирующем массиве приводят к большому Q -коэффициенту, определяемому как отношение между сохраненной энергией и излучаемой энергией. Массив с большим Q -фактором имеет низкую эффективность, потому что большое количество энергии захватывается в исчезающем поле в окрестности массива, а не излучается как электромагнитные волны. Другим эффектом увеличения коэффициента Q является уменьшение полосы пропускания массива. Наконец, очень большие токи в элементах супер-директивных массивов приводят к резкому увеличению омических потерь, что приводит к резкому снижению эффективности массива. Омическую потерю можно уменьшить с помощью сверхпроводящего материала. В заключение невозможно достичь неограниченной направленности на практике, но можно добиться достаточного количества супернаправленности путем оптимизации конструкций передачи при практических ограничениях. Типичные ограничения включают в себя точность реализованной картины пучка, максимальные омические потери, максимальную реактивную (не радиационную) мощность и максимальную излучательную мощность.

Рассмотрим канал ММО с массивом передачи с неограниченными элементами и заключенным в сферу с фиксированным радиусом. Фундаментальный предел пропускной способности канала, достигаемый сверхдифференциацией, определяется количественно в [14] при ограничениях как на общую излучаемую, так и на реактивную мощности. Пространственные режимы, используемые для пространственного мультиплексирования, создаются путем разложения электромагнитного поля с использованием сферических гармонических функций. В [14] было обнаружено, что максимальное количество DoF пропорционально площади области массива. Еще один ключевой вывод заключается в том, что увеличение направленности позволяет возбуждать больше режимов по цене увеличения коэффициента Q и, соответственно, уменьшать пропускную способность. Это означает, что супернаправленность увеличивает пространственный DoF за счет спектрального DoF. Следовательно, усиление информационной способности супернаправленности конечно и может даже не быть большим.

С точки зрения ПИ результаты в [14] устанавливают связь, согласно которой возрастающая сверхдирективность увеличивает пространственный DF, но уменьшает ширину полосы, что является двумя ключевыми факторами, определяющими пропускную способность канала. С точки зрения ПЭ увеличение сверхправа подавляет пропагационные потери, но также снижает эффективность массива, которые оказывают противоположное влияние на КПД-ПЭ. Совместное рассмотрение вышеуказанных отношений свидетельствует о наличии нового и фундаментального компромисса в отношении энергоемкости, вызванного супернаправленностью. Оптимизация упомянутого коэффициента энергопотребления при различных практических ограничениях вводит новый набор проблем проектирования для высокоэффективного СБПИМ.

Для количественной оценки компромисса требуется суффикс пространственного DoF, полосы пропускания и эффективности РТ как функции сверхправа. На практике неизбежно возникает неточность в амплитудах и фазах коэффициентов возбуждения супер-директивного массива. Функции массива могут быть сконструированы таким образом, чтобы уменьшить чувствительность значений элементов до неточности. В качестве альтернативы, при ограниченных ошибках для коэффициентов возбуждения, алгоритмы супер-директивной передачи могут быть разработаны для оптимизации наихудшего случая СБПИМ - производительности. Компромисс между энергозатратами можно охарактеризовать с учетом эффектов сверхправки на эффективность передающей решетки и эффективности сбора энергии на приемнике. Это обеспечит сквозную эффективность для внедрения супер-директивного СБПИМ. Известно, что волны, имеющие большие PAPR, улучшают эффективность сбора энергии. Однако для таких сигналов требуется относительно большая полоса частот. Совместно рассматривая это соотношение, и что между супернаправлением и пропускной способностью необходимо разработать оптимальные формы сигналов для супер-директивного СБПИМ.

6. Заключительные замечания

Проектирование эффективной системы СБПЭ намного сложнее, чем просто накладывающаяся система коммутации и беспроводной передачи энергии. Полная интеграция с ПЭ-и-ПИ требует перепроектирования системных и сетевых архитектур, методов для передачи и распределения ресурсов, протоколов для управления доступом к среде и оборудования приемопередатчика. Это создало широкий спектр исследовательских возможностей, которые способствуют быстрому расширению поля СБПЭ. В

этой статье обсуждены несколько интересных новых направлений исследований, которые могут сыграть ключевую роль в преобразовании СБПЭ из теории в практику. Они включают в себя использование антенн обратного рассеяния для реализации СБПЭ для устройств с низкой степенью сложности, конструкцию осциллограмм для повышения эффективности БПЭ и развязывание ПЭ и ПИ для решения их ближней задачи. Предел производительности СБПЭ, достигаемый при резком формировании луча, является фундаментальной проблемой. Эта статья вместе с другими в текущей теме предоставит обновленную «дорожную карту» зоны СБПЭ и предложит разнообразные и перспективные направления продвижения своей границы.

Список литературы

1. *Smith J.R.* Wirelessly Powered Sensor Networks and Computational RFID. Springer, 2013.
2. *Bi S., Ho C.K. and Zhang R.* Wireless Powered Communication: Opportunities and Challenges. *IEEE Commun. Mag.* Vol. 53. № 4, Apr. 2014. Pp. 117-25.
3. *Huang K. and Zhou X.* Cutting Last Wires for Mobile Communication by Microwave Power Transfer. *IEEE Commun. Mag.* Vol. 53, № 6, June 2015. Pp. 86-93.
4. *Yuen C. et al.* Feature Topic on Energy Harvesting Communications. *IEEE Commun. Mag.* Vol. 4 and 6, Apr. and June 2015.
5. *Zhang R. and Ho C.* MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE Trans. Wireless Commun.* Vol. 12. № 5, 2013. Pp. 1989-2001.
6. *Huang K. and Lau V.K.N.* Enabling Wireless Power Transfer in Cellular Networks: Architecture, Modelling and Deployment. *IEEE Trans. Wireless Commun.* Vol. 13. № 2, Feb. 2014. Pp. 902-12.
7. *Boyer C. and Roy S.* Backscatter Communication and RFID: Coding, Energy, and MIMO Analysis. *IEEE Trans. Wireless Commun.* Vol. 62, № 3, Mar. 2014. Pp. 770-85.
8. *Yang G., Ho C. and Guan Y.* Multi-Antenna Wireless Energy Transfer for Backscatter Communication Systems. *IEEE JSAC.* Vol. 33. № 12, Dec. 2015. Pp. 2974-87.
9. *Miyamoto R.Y. and Itoh T.* Retrodirective Arrays for Wireless Communications. *IEEE Microwave Mag.* Vol. 3. № 1, Mar. 2002. Pp. 71-79.
10. *Boaventura A. et al.* Boosting the Efficiency: Unconventional Waveform Design for Efficient Wireless Power Transfer. *IEEE Microwave Mag.* Vol. 16. № 3, Apr. 2015. Pp. 87-96.
11. *Clerckx B. et al.* Waveform Optimization for Wireless Power Transfer With Nonlinear Energy Harvester Modeling. *Proc. IEEE Int'l. Symp. Wireless Commun. Systems.* Brussels, Belgium, Aug. 2015.
12. *Zhu G. and Huang K.* Analog Spatial Decoupling for Tackling the Near-Far Problem in Wirelessly Powered Communications. Submitted to *IEEE ICC.* Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1510.09124/> (дата обращения: 20.11.2017).
13. *Balanis C.A.* Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley, 2012.
14. *Poon A.S.Y. and Tse D.N.C.* Does Super-Directivity Increase the Degrees of Freedom in Wireless Channels. *Proc. IEEE Int'l. Symp. Info. Theory.* Hong Kong, June 2015.