

Антенная система на основе линзы Ротмана

для сбора свободной энергии 5G на частоте 28 ГГц

Используя инновационную топологию, сочетающую печатные антенны типа ректенна, линзы Ротмана и диоды, исследователи разработали систему для сбора свободной радиочастотной энергии в спектре 5G 28 ГГц.

Билл Швебер (Bill Schweber)

Перевод: Владимир Рентюк

При развитии технологии связи пятого поколения, получившей название 5G New Radio, или 5G, следует учитывать, что приложения, даже не относящиеся непосредственно к 5G, будут искать способы использовать соответствующие технологические достижения и излучаемую базовыми станциями энергию в качестве свободной энергии (англ. — energy harvesting, подразумевает использование из окружающего пространства генерируемой теми или иными источниками энергии, в том числе и по прямому назначению). Именно это для эффективного улавливания и выпрямления некоторой части излучаемой в окружающее пространство энергии в диапазоне 28 ГГц от базовых станций 5G сделала команда из Технологического института Джорджии (Georgia Institute of Technology, Georgia Tech). Для данной цели сотрудники института использовали инновационную комбинацию антенны и силовой выпрямительной части. Такое решение хорошо подходит для целого ряда небольших малопотребляющих приложений, таких как устройства «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT), поскольку сокращает, а иногда и устраняет потребность в батареях.

Идея такой антенны (называемой «ректенна») не нова. Однако создать ректенну (англ. rectenna, от *rectifying antenna* — устройство, представляющее собой нелинейную антенну, предназначенную для преобразования энергии поля падающей на нее электромагнитной волны в энергию постоянного тока, в технической литературе часто называется «антенна со встроенным выпрямителем», или «антенна-выпрямитель»), хорошо работающую на частоте 28 ГГц, — трудная задача, связанная с рядом сложных технических проблем и компромиссов. С одной стороны, для захвата значительного количества высокочастотной энергии желательно иметь антенну большего размера с высоким коэффициентом усиления, что приводит к высоким потерям

распространения на таких высоких частотах, как 28 ГГц, но подобные антенны имеют узкую диаграмму направленности и, соответственно, ограничены в захвате энергии.

Как вариант можно использовать антенную решетку, представляющую собой некий базовый массив небольших антенных элементов, каждый из которых функционирует как ректенна, а затем комбинировать их выходы постоянного тока. Однако данный подход не увеличивает чувствительности (наименьшую мощность, в оригинале для этого введен термин «turn-on sensitivity», буквально — «чувствительность включения», поскольку имеется в виду мощность, необходимая для создания напряжения, достаточного для открытия выпрямительных диодов сумматора напряжения постоянного тока, далее по тексту будет использоваться термин «чувствительность» именно в этой интерпретации) всей ректенной системы, и таким образом, его порог полезного функционирования ограничен.

Для того чтобы не обходиться компромиссом между диаграммой ректенны и чувствительностью, а также преодолеть некоторые другие ограничения, команда Университета Джорджии разработала уникальную версию линзы Ротмана, расположенную между антеннами и выпрямителями. Эта линза сама по себе хорошо известна. Она была представлена Уолтером Ротманом (Walter Rotman) уже в далеких 1960-х годах, но до сих пор является одним из наиболее распространенных и экономичных решений для систем формирования диаграммы направленности [1–4].

Линза позволяет формировать несколько лучей диаграммы направленности без переключателей или фазовращателей. Проще говоря, порты луча расположены так, что на портах антенны достигаются постоянные фазовые сдвиги, когда на антенные элементы подается питание с фазами, которые линейно изменяются по строке матрицы. В результате он ведет себя так же, как фазированная решетка [5]. Как известно, одно из важных свойств этой линзы

состоит в том, что, хотя она дает множество подключенных портов с волновым сопротивлением 50 Ом, они изолированы и не оказывают влияния на потери или коэффициент шума при приеме по соседним лучам диаграммы направленности.

Подрешетка

Команда Университета Джорджии, занятая в проекте, начала работу с антенной подрешетки. Затем было использовано несколько таких подрешеток, выпрямителей и сумматоров постоянного тока, чтобы продемонстрировать большой угловой охват и чувствительность. Среди множества точек передачи данных они показали способность сбора свободной энергии на расстоянии до 2,83 м в текущей конфигурации подрешетки, а прогнозируемая мощность постоянного тока составила около 6 мкВт на 180 м с эффективной изотропно излучаемой мощностью (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP*) 75 дБмВт. Кроме того, система имеет очень низкий профиль, что позволяет располагать ее на стенах, корпусах, кузовах автомобилей и других поверхностях.

Основываясь на подробном анализе количества и размера элементов подматрицы

* EIRP — это эквивалентная заменяющая мощность, излучающаяся изотропно, и означает «мощность, которую должна излучать гипотетическая изотропная антенна, чтобы получить тот же уровень сигнала в направлении максимального излучения данной антенны». — Прим. пер.

и доступных материалов, команда университета пришла к выводу, что комбинация подматрицы, состоящая из восьми антенн и шести портов луча, предлагает почти оптимальный компромисс между высоким коэффициентом усиления антенной решетки 5,95 дБ и общим углом 120° охвата при сохранении разумного количества антенн в решетке и портов луча. Антенна была выполнена в печатном виде на гибкой плакированной медью жидкокристаллической полимерной (Liquid Crystal Polymer, LCP — жидкокристаллический полимер, класс высококристаллических термопластов) подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,02$ по методу маскирования с помощью струйной печати с последующим травлением (рис. 1).

Общая система на основе линз

Общая архитектура системы (рис. 2) имеет восемь антенных подрешеток, прикрепленных к линзе Ротмана с одной стороны и обращенных к шести выпрямителям с противоположной стороны, где последовательная комбинация схемы выделения напряжения постоянного тока реализована с использованием диодов Шоттки MA4E2038 компании MACOM.

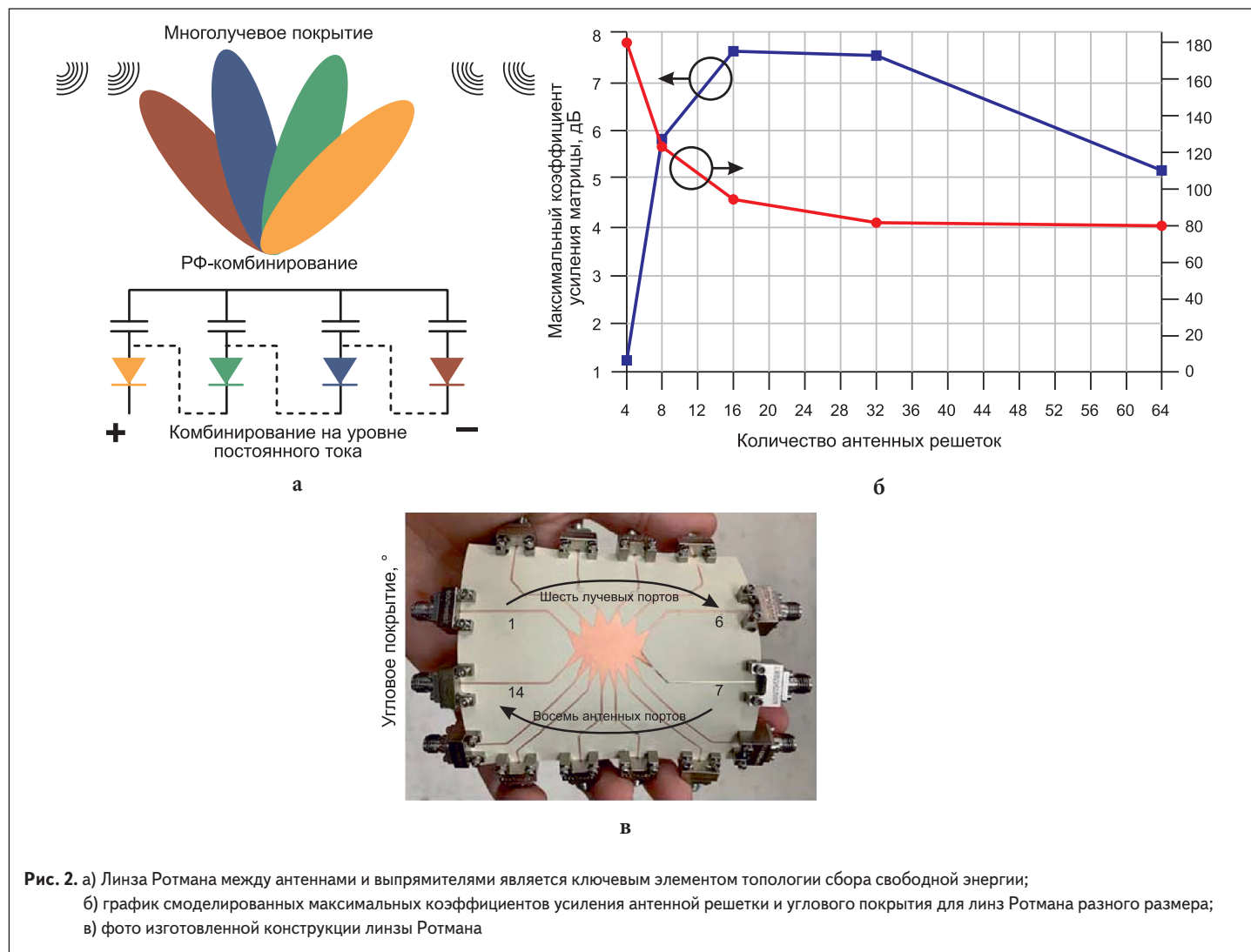
Ректенна на основе линзы Ротмана включается при значении не более -6 дБм/см², что, по словам ученых, весьма выгодно по сравнению с другими



Рис. 1. Конструкция антенны напечатана на гибкой, покрытой медью жидкокристаллической полимерной подложке с использованием метода маскирования с помощью струйной печати с последующим травлением

устройствами, информация о которых опубликована в литературе. Выходное напряжение ректенны также было измерено в ее рабочем диапазоне частот с системой, расположенной под тем же углом сбора, на расстоянии 25 см от рупорной антенны источника излучения в диапазоне частот 27,8–29,6 ГГц.

В конструкции сумматора постоянного тока было необходимо предусмотреть создание



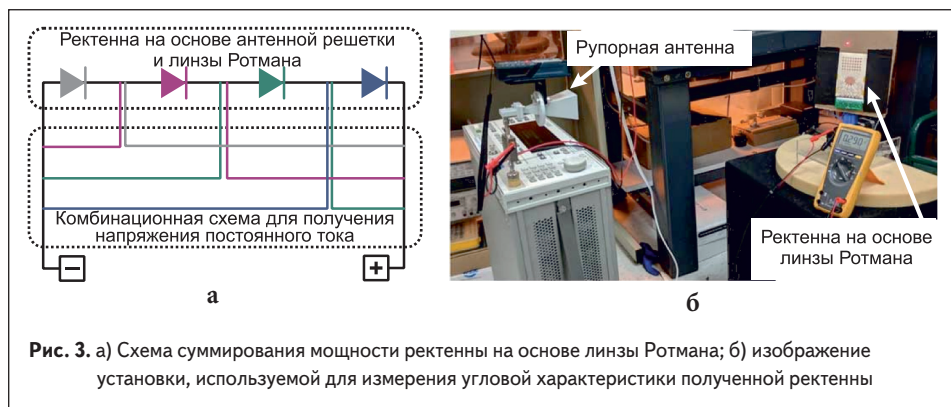


Рис. 3. а) Схема суммирования мощности ректенны на основе линзы Ротмана; б) изображение установки, используемой для измерения угловой характеристики полученной ректенны

пути тока с низким сопротивлением от всех выпрямителей, которые обеспечивали очень низкую или близкую к нулю ВЧ-мощность (рис. 3). Для этой цели использовались выпрямительные диоды 1SS384TE85LF компании Toshiba. Данная топология оптимальна, когда включен только один диод, чего можно достичь, если один доминирующий источник энергии облучает конкретную конструкцию с заданного направления.

На приведенной на рис. 3 упрощенной схеме ректенны показано всего четыре диода. Пути, по которым будет проходить ток для каждого случая, когда ВЧ-диод включается, а последовательно подключенные диоды выключены, выделены различными цветами. Сумматор напряжения постоянного тока был изготовлен на гибкой полиимидной каптоновой подложке толщиной 125 мкм и подключен к ректенне на основе линзы Ротмана через серию отдельных разъемов, что позволило сделать всю систему полностью гибкой как для применения, так и с точки зрения возможности ее изгиба. По сравнению с существующими конструкциями использованный сумматор напряжения постоянного тока содержит уменьшенное количество байпасных диодов и одновременно увеличивает угловое покрытие системы более чем на 30%.

Для проверки характеристик в условиях выпуклого и вогнутого изгиба ректенна на основе линзы Ротмана размещена на цилиндрах с разной кривизной и удалена на расстояние 70 см от передатчика, посылающего радиочастотный сигнал мощностью 25 дБмВт на частоте 28,5 ГГц (рис. 4). Напряжение было измерено с нагрузкой 1 кОм. Измерения были проведены для планарного и трех состояний изгиба по отношению к углу падения луча от источника.

График показывает превосходную согласованность и стабильность в способностях системы к приему и выпрямлению принятого радиочастотного сигнала, даже несмотря на то, что несколько подсистем, а именно антенные подрешетки, линза Ротмана и выпрямители, подвержены деформации в виде изгиба. По краям видно небольшое затухание, но в остальном система успешно «сопротивляется» изгибу. Это свойство делает предлагаемую ректенну подходящим решением для использования с носимыми устройствами, смартфонами и конформными сборщиками энергии 5G для узлов IoT.

Демонстрация ректенны на основе линзы Ротмана для сбора свободной энергии на больших расстояниях от источника проведена с использованием высокоэффективной антенной системы с конической рупорной антенной с усилением 19 дБи и диэлектрической линзой

из ПТФЭ диаметром 300 мм (что необходимо для формирования узкой диаграммы направленности), обеспечивающей дополнительное усиление в 10 дБ. При передаваемой мощности 25 дБм (соответствующей EIRP примерно 54 дБм) и плотности падающей мощности примерно -6 дБм/см² ректенна на основе линзы Ротмана в условиях холостого хода при выходном напряжении около 10 мВ показала довольно-таки большую дальность в 2,83 м. Исследователи считают, что это самая эффективная на сегодня демонстрация ректенны на частотах миллиметрового диапазона.

Данный проект был поддержан Исследовательской лабораторией BBC (Air Force Research Laboratory) и программой Emerging Frontiers in Research and Innovation (EFRI) Национального научного фонда США. Полная информация по проекту содержится в статье трех авторов с обманчиво незрчим названием «5G as a wireless power grid» («5G как беспроводная электросеть»), опубликованной в журнале Nature Scientific Reports [6]. ■

Литература

1. Microwaves & RF. Rotman Lens' Electronic Beam Steering Aims At 5G Signals. www.mwrf.com/technologies/components/article/21848971/rotman-lens-electronic-beam-steering-aims-at-5g-signals
2. Rotman W., Turner R. F. Wide Angle Microwave Lens for Line Source Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. www.ieeexplore.ieee.org/document/1138114?arnumber=1138114
3. W. Rotman, U.S. Patent 3170158. Multiple Beam Radar Antenna System. www.patents.google.com/patent/US3170158A/en
4. Microwaves101. Rotman Lens. www.microwaves101.com/encyclopedias/rotman-lens
5. Phased Array Antennas. www.microwaves101.com/encyclopedias/phased-array-antennas
6. Eid A., Hester J. G. D., Tentzeris M. M. 5G as a wireless power grid. www.nature.com/articles/s41598-020-79500-x.pdf

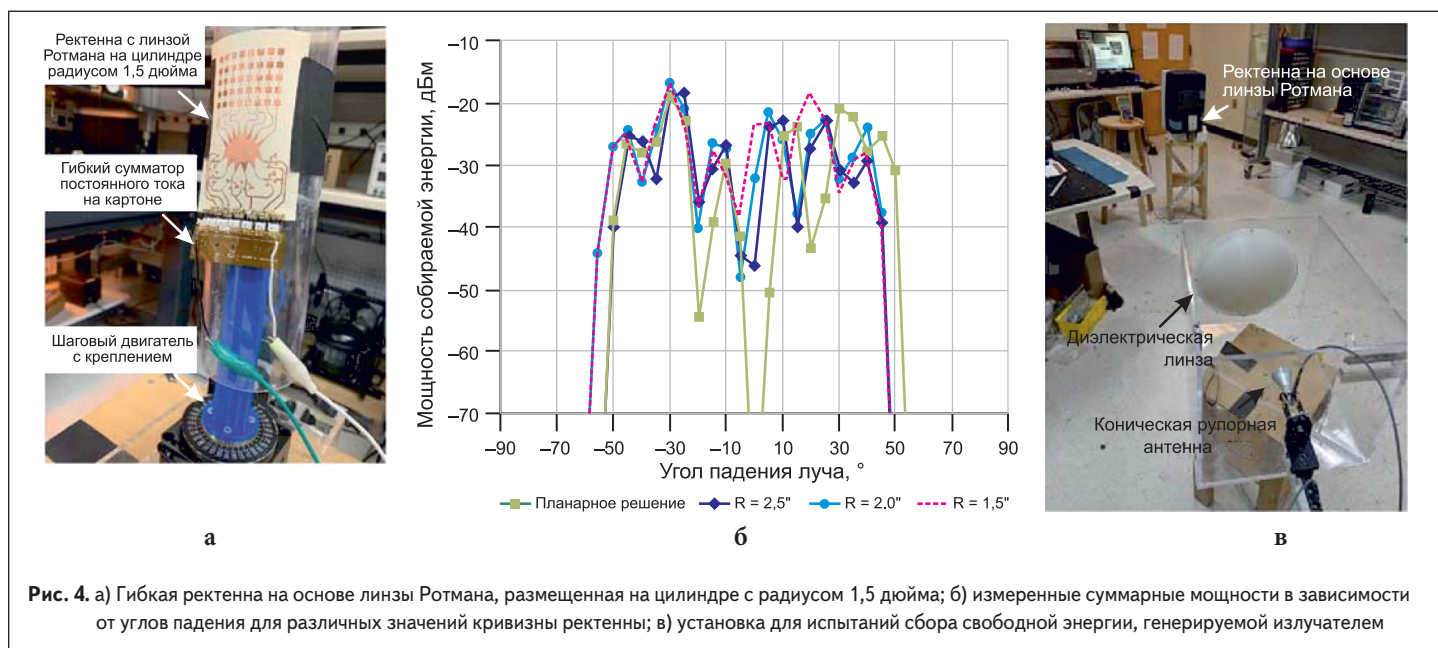


Рис. 4. а) Гибкая ректенна на основе линзы Ротмана, размещенная на цилиндре с радиусом 1,5 дюйма; б) измеренные суммарные мощности в зависимости от углов падения для различных значений кривизны ректенны; в) установка для испытаний сбора свободной энергии, генерируемой излучателем