

"Radio" is monthly publication on audio, video, computers, home electronics and telecommunication

12+

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

АНО «РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «РАДИО»

Зарегистрирован Министерством печати и информации РФ 01 июля 1992 г.

Регистрационный ПИ № ФС77-82030

Главный редактор В. К. ЧУДНОВ

Редакционная коллегия:

А. В. ГОЛЫШКО, А. Н. КОРОТОНОШКО, К. В. МУСАТОВ,  
И. А. НЕЧАЕВ (зам. гл. редактора), Л. В. МИХАЛЕВСКИЙ,  
С. Л. МИШЕНКОВ

Выпускающий редактор: С. Н. ГЛИБИН

Обложка: В. М. МУСЯКА

Вёрстка: Е. А. ГЕРАСИМОВА

Корректор: Т. А. ВАСИЛЬЕВА

Адрес редакции: 129090, Москва, Протопоповский пер., 25, к. Б

Тел.: (495) 607-31-18.

E-mail: [ref@radio.ru](mailto:ref@radio.ru)

Приём статей — e-mail: [mail@radio.ru](mailto:mail@radio.ru)

Отдел рекламы — (495) 607-31-18; e-mail: [advert@radio.ru](mailto:advert@radio.ru)

Распространение — (495) 607-31-18; e-mail: [sale@radio.ru](mailto:sale@radio.ru)

Подписка и продажа — (495) 607-87-39

Бухгалтерия — (495) 607-87-39

Наши платёжные реквизиты:

получатель — АНО "Редакция журнала "Радио", ИНН 7708187140,  
р/сч. 40703810538090108833

Банк получателя — ПАО Сбербанк г. Москва

корр. счёт 3010181040000000225 БИК 044525225

Подписано к печати 22.11.2024 г. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Объём 8 физ. печ. л., 4 бум. л., 10,5 уч.-изд. л.

В розницу — цена договорная.

Подписной индекс:

Официальный каталог ПОЧТА РОССИИ — П4014;

КАТАЛОГ РОССИЙСКОЙ ПРЕССЫ — 89032.

За содержание рекламного объявления ответственность несёт редакция.

За оригинальность и содержание статьи ответственность несёт автор.

Редакция не несёт ответственности за возможные негативные последствия использования опубликованных материалов, но принимает меры по исключению ошибок и опечаток.

В случае приёма рукописи к публикации редакция ставит об этом в известность автора. При этом редакция получает исключительное право на распространение принятого произведения, включая его публикации в журнале «Радио», на интернет-страницах журнала или иным образом.

Авторское вознаграждение (гонорар) выплачивается в течение двух месяцев после первой публикации в размере, определяемом внутренним справочником тарифов.

По истечении одного года с момента первой публикации автор имеет право опубликовать авторский вариант своего произведения в другом месте без предварительного письменного согласия редакции.

В перепику редакция не вступает. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

© Радио®, 1924—2024. Воспроизведение материалов журнала «Радио», их коммерческое использование в любом виде, полностью или частично, допускается только с письменного разрешения редакции.

Отпечатано в ОАО «Подольская фабрика офсетной печати»

142100, Моск. обл., г. Подольск, Революционный проспект, д. 80/42.

Зак. 03976-24 .

**Dr.Web**  Компьютерная сеть редакции журнала «Радио» находится под защитой Dr.Web — антивирусных продуктов российского разработчика средств информационной безопасности — компании «Доктор Веб».

[www.drweb.com](http://www.drweb.com)  
Бесплатный номер службы поддержки в России:  
8-800-333-79-32

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА — КОМПАНИЯ «РИНЕТ»

**▶ RINET ▶**  
БЛИЖЕ К ЛЮДЯМ

Телефон: +7(495)981-4571  
E-mail: [info@rinet.ru](mailto:info@rinet.ru)  
Сайт: [www.rinet.ru](http://www.rinet.ru)

## Антенные решения 6G

А. ГОЛЫШКО, канд. техн. наук, г. Москва

*"Вы не должны делать вещи по-другому только потому, что они разные. Они должны быть... лучше".*

Илон Маск

Сети мобильной связи шестого поколения (6G) призваны существенно расширить возможности по обмену информацией, о чём уже рассказывалось на страницах журнала. Соответственно технологии, на которых будут основываться сети 6G, будут работать в новых диапазонах радиочастот (речь уже идёт о терагерцах), а приёмопередающее оборудование будет содержать множество инновационных решений. И не в последнюю очередь это касается антенного хозяйства.

Напомним, что сети 6G будут предназначены для передачи "голографии высокой точности", в которой голографическое присутствие позволит удалённым пользователям присутствовать в визуализированном пространстве.

Логичным развитием идеи передачи голографического изображения станет тактильный Интернет, когда различные сенсорные ощущения могут быть объединены с голограммами.

Мобильные граничные вычисления (MEC — Mobile Edge Computing) уже сейчас начинают развёртывание как часть сетей 5G, но эта технология продолжит своё развитие и в сетях 6G. Когда пользователь запрашивает какую-либо услугу, критичную к малой задержке сигнала, вычислительная сеть может направить её на ближайший кластер граничных вычислений. Примеры таких услуг (задач) — рендеринг дополненной (AR)/виртуальной (VR) реальности, автономное вождение и связь голографического типа. Для приложений с интенсивными расчётами и из-за необходимости балансировки нагрузки может быть задействовано множество периферийных вычислительных кластеров, но их вычислительные ресурсы должны быть скоординированы.

Хотя внутричиповые, межчиповые и межплатные коммуникации в настоящее время осуществляются через проводные соединения, эти соединения становятся узким местом, когда скорости передачи данных превышают 100...1000 Гбит/с. По этой причине выдвигаются предложения использовать либо оптические, либо терагерцовые беспроводные соединения для замены проводных в межчиповом взаимодействии. Развитие подобных наносетей — ещё одно перспективное направление для технологии 6G. Важными критериями для таких сетей, помимо скорости передачи данных, являются энергоэффективность (которая должна учитывать требования к возможной обработке на стороне приёмника сигнала), надёжность и задержка сигнала.

В итоге 6G расширит возможности человеческого общения, станет новой формой межмашинного взаимодействия и откроет новое уникальное поколение беспроводных сетей с поддержкой всеобщего интеллекта. Но для всего этого будут нужны соответствующие пропускные способности всех сетевых элементов.

Несмотря на бурную революцию в беспроводных технологиях, радиоинженеры давно приближаются к практиче-

ским пределам эффективности передачи информации. На частотах 5G и 6G длина волны крайне мала по сравнению с размерами зданий, транспортных средств, холмов, деревьев или дождя. Волны большей длины преломляются на таких препятствиях или проходят сквозь них, в то время как сигналы более высокой частоты поглощаются, отражаются или рассеиваются. По сути, на таких частотах можно рассчитывать только на распространение сигнала в пределах прямой видимости.

Возможно, наиболее перспективным решением на данный момент является использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (RIS — Reconfigurable Intelligent Surfaces), выполненных из так называемых метаматериалов (материалов с повторяющейся структурой элементов). RIS, ещё называемые интеллектуальными отражающими поверхностями (IRS — Intelligent Reconfigurable Surfaces) или большими интеллектуальными поверхностями (LIS — Large Intelligent Surfaces), получили значительное развитие со стороны разработчиков и операторов мобильной связи из-за их потенциала для увеличения пропускной способности и расширения зон покрытия за счёт интеллектуальной реконфигурации среды распространения сигналов мобильных сетей связи новых поколений.

Фундаментальными строительными блоками RIS являются метаповерхности (Metasurfaces), которые состоят из крошечных элементов с размерами меньше длины волны (субволнового масштаба), таких как патч-антенны, резонаторы или структуры из метаматериалов. Такие поверхности, иногда называемые умными стенами (smart walls), размещаются на поверхностях помещений или других конструкций. Их размер обычно варьируется от 100 см<sup>2</sup> до примерно 5 м<sup>2</sup> или более, в зависимости от частоты и других факторов. Метаповерхности можно запрограммировать на динамическое внесение изменений в радиоканал, реконфигурируя сигнал в реальном времени (по фазе, амплитуде, поляризации и направлению) в ответ на изменения в беспроводном канале. Можно считать, что это новое поколение повторителей, которое может сыграть большую роль в грядущей интеграции беспроводных наземных и спутниковых сетей.

Прототипы RIS демонстрируют большие перспективы в десятках лабораторий по всему миру. Сегодня сотни исследователей в Европе, Азии и США работают над применением RIS для создания программируемых и интеллектуальных беспроводных сред. Такие поставщики, как Huawei, Ericsson, NEC, Nokia, Samsung и ZTE, работают самостоятельно или в сотрудничестве с университетами. Крупные сетевые операторы, такие как NTT Docomo, Orange, China Mobile, China Telecom и BT, проводят существенные испытания RIS с целью усиления сигналов в самых проблемных диапазонах 5G и 6G.

Согласно определению Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI) RIS представляет собой новый тип системного узла, формируемый на основе технологии реконфигурируемой отражающей поверхности, где реакция поверхности на облучение сигнала может быть адаптирована к состоянию среды распространения с помощью управляющих воздействий на неё.

Технология RIS может превратить среду распространения сигнала в услугу, которая позволяет разработать множество новых вариантов использования этой технологии. К этим вариантам относятся улучшение ключевых показателей эффективности сетей мобильной связи для различных видов среды распространения сигнала, таких как покрытие и пропускная способность, а также запуск новых приложений, например, позиционирования и зондирования. Ожидается, что благодаря своим характеристикам RIS станет ключевой технологией в будущих беспроводных системах, включая 5G Advanced и 6G.

RIS рассматривается как новая технология для динамического и целенаправленного управления радиосигналами в пространстве между передатчиком и приёмником мобильной связи 6G, ослабляющая эффект многолучевого замирания. Это послужило основой для создания новых вариантов использования этой технологии, направленных на улучшение различных ключевых показателей производительности системы (KPI) и поддержку новых приложений и возможностей мобильных технологий доступа 5G и 6G. К этим показателям относятся улучшения ёмкости сети, покрытия сети, точности позиционирования, безопасности и устойчивости сети, а также поддержка услуг зондирования, беспроводной передачи энергии и возможностей обратного рассеяния.

Чтобы понять, как RIS улучшает сигнал, рассмотрим электромагнитную среду. Объекты на пути радиосигнала могут блокировать его, и эта проблема становится особенно серьёзной на более высоких частотах 5G, таких как диапазоны субмиллиметровых и миллиметровых волн от 24,25 ГГц до 52,6 ГГц. И будет только хуже, если коммуникационные компании продолжат реализацию планов по использованию субтерагерцового диапазона между 90 ГГц и 300 ГГц в сетях 6G. В сетях 4G и аналогичных низкочастотных диапазонах отражения от поверхностей могут фактически усилить принимаемый сигнал, так как отражённые сигналы объединяются. Однако при движении вверх по частоте подобные эффекты многолучевости становятся намного слабее или полностью исчезают. К тому же поверхности, которые кажутся "гладкими" для более длинноволнового сигнала, являются относительно "шероховатыми" для сигнала более коротковолнового. И вместо того, чтобы отражаться от такой поверхности, сигнал просто рассеивается.

Конечно, можно поставить ещё больше базовых станций, что, конечно, увеличит затраты. Однако, если отвлечься от затрат, умножить число базовых станций до бесконечности нельзя, ведь увеличение требуемого отношения сигнал/шум может угробить качество. Повторители или ретрансляторы также могут улучшить покрытие, но и здесь затраты могут быть непомерно высокими. С другой стороны, RIS обещает существенно лучшее покрытие при чуть более высокой стоимости. К тому же при неактивном RIS (без усилителей) этот узел может питаться только от батареи и небольшой солнечной панели, что будет выгодно при построении Интернета вещей.

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности работают по принципу манипулирования волновым фронтом, который включает в себя изменение фазы, амплитуды и поляризации электромагнитных волн при их взаимодействии с поверхностью.

RIS функционирует как очень сложное зеркало, ориентацию и кривизну которого можно регулировать, чтобы сфокусировать и перенаправить сигнал в определённом направлении. Но вместо того, чтобы физически перемещать или изменять форму зеркала, электронным образом изменяется его поверхность, чтобы, к примеру, изменить фазу входящей электромагнитной волны. Изменяя фазу электромагнитных волн, RIS может регулировать направление распространения волн. Это обеспечивает точное формирование луча в выбранном направлении (Beamforming) и управление лучом, позволяя поверхности фокусировать сигналы на предполагаемый приёмник или подавлять сигналы (либо помехи) от нежелательных источников. Собственно, эта технология полностью аналогична технологии работы фазированной антенной решётки.

Элементы метаповерхности RIS способны независимо друг от друга управлять отражением, преломлением или поглощением входящих электромагнитных волн (конечно, с помощью внешних воздействий). Управляя этими параметрами с большой точностью, поверхность может перенаправлять или концентрировать волны в определённых направлениях или изменять их свойства в соответствии с целями связи или восприятия передаваемого контента.

Основное преимущество технологии RIS заключается в её адаптируемости. RIS может реагировать на изменения в беспроводной среде и требования к системе связи в режиме реального времени. Алгоритмы управления непрерывно анализируют входящие сигналы и соответствующим образом корректируют элементы метаповерхности, оптимизируя мощность, качество и покрытие сигнала.

Типовой узел RIS состоит из сотен или тысяч элементов метаматериала — элементарных ячеек. Каждая ячейка состоит из металлических и диэлектрических слоёв, а также одного или нескольких переключателей или других



настраиваемых компонентов. Типовая структура включает верхнюю металлическую накладку с переключателями, смещающий слой и металлический заземляющий слой, разделённые диэлектрическими подложками. Управляя смещением — напряжением между металлической накладкой и "землёй", вы можете включать и выключать каждую элементарную ячейку и, таким образом, контролировать, как каждая ячейка изменяет фазу и другие характеристики падающей волны. В результате волны интерферируют друг с другом.

Чтобы управлять направлением большей волны, отражающейся от всего RIS, все элементарные ячейки синхронизируются, чтобы создать модели конструктивной и деструктивной интерференции в больших отражённых волнах. Эта интерференционная картина преобразует падающий луч и направляет его в определённом направлении.

У RIS есть и другие полезные функции. В частности, даже без наличия усилителя RIS удаётся обеспечить значительное усиление — от 30 дБи до 40 дБи (относительно изотропного) в зависимости от размера поверхности и частоты. Коэффициент усиления антенны пропорционален площади её апертуры. Поскольку RIS имеет эквивалент многих антенных элементов, покрывающих большую площадь апертуры, она имеет более высокий коэффициент усиления по сравнению с обычной антенной.

Все многочисленные элементарные ячейки в RIS управляются логическим чипом, таким как программируемая пользователем вентиляционная матрица с микроконтроллером, который также хранит множество последовательностей кодирования, необходимых для динамической настройки RIS. Контроллер даёт соответствующие инструкции отдельным элементарным ячейкам, устанавливая их состояние. Наиболее распространённой схемой кодирования является простое двоичное кодирование, при котором контроллер включает и выключает переключатели каждой элементарной ячейки. Переключатели с элементарной ячейкой обычно представляют собой полупроводниковые устройства, такие как pIn-диоды или полевые транзисторы.

Важными факторами в RIS являются потребляемая мощность, скорость и гибкость, при этом узел управления обычно является одной из самых энергоёмких её частей. Достаточно эффективные на сегодня варианты реализации RIS потребляют от нескольких до дюжины ватт в состоянии переключения при реконфигурации. В состоянии простоя значительно меньше.

Способность RIS динамически реконфигурироваться в зависимости от требований в реальном масштабе времени стала возможной благодаря программно-определяемому управлению (Software-Defined Control). Сложные алгоритмы и методы искусственного интеллекта используются для регулировки фазы и амплитуды отдельных

элементов метаповерхности для изменения поведения электромагнитных волн.

RIS могут сыграть ключевую роль в формировании будущего беспроводных сетей 6G, создавая то, что часто называют "умной радиосредой" (SRE — Smart Radio Environment). Концепция SRE предполагает преобразование пространства распространения в системах беспроводной связи в интеллектуальную и адаптивную среду. Эта среда может динамически оптимизировать характеристики беспроводного распространения для повышения производительности связи, покрытия, энергоэффективности и безопасности. Ожидается, что в сети 6G будут возможны гораздо более широкие сценарии использования, которые требуют беспрецедентного уровня управляемости средой передачи электромагнитных волн и адаптивности такого управления. RIS могут способствовать удовлетворению этих требований за счёт динамической настройки среды беспроводного распространения в соответствии с потребностями конкретных приложений, устройств или пользователей.

Инженеры могут определить лучшие позиции RIS, запланировав их при проектировании базовой станции. Это можно сделать и позже, выявив на карте покрытия области со слабым сигналом. Что касается размера поверхностей, это будет зависеть от частот (чем меньше частота, тем больше поверхность), а также от числа развёртываемых поверхностей.

Чтобы развернуть узлы RIS в реальной сети, необходимо определить: сколько потребуется узлов RIS, где они должны быть размещены и насколько большими должны быть поверхности. Однако планирование и установка узлов RIS — это только часть задачи. Чтобы узел RIS работал оптимально, он должен иметь конфигурацию, момент за моментом, соответствующую состоянию канала связи в момент использования узла. Наилучшая конфигурация требует точной и мгновенной оценки канала. Технические специалисты могут получить такую оценку, измерив импульсную характеристику канала (она позволяет определить связь входного и выходного сигналов и их спектров соответственно) между базовой станцией, RIS и пользователями.

Термин активный RIS используется, когда в поверхность встроены энергопотребляющие отражающие элементы RIS, включающие усилители и последовательные блоки обработки, изменяющие фазу отражаемых сигналов. С другой стороны, активные системы RIS представляют собой естественную эволюцию антенных систем Massive MIMO (метод пространственно-временной селекции сигналов), посредством размещения всё большего и большего числа управляемых программным обеспечением антенных элементов на двумерной (2D) поверхности конечного размера.

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности могут значительно повысить производительность

систем беспроводной связи, расширяя зону покрытия и повышая скорость передачи данных в сложных условиях и, главное, снижая относительную мощность электромагнитного излучения, прежде всего, в таких местах, как высотная городская застройка, здания и туннели. RIS может повысить производительность систем беспроводной связи, улучшая удельную мощность сигнала и уменьшая помехи в средах с препятствиями или блокировкой сигнала.

В помещениях реконфигурируемые интеллектуальные поверхности могут обеспечить единообразное и высококачественное беспроводное соединение, устраняя мёртвые зоны и повышая производительность устройств Wi-Fi и IoT.

RIS можно использовать для создания контролируемых зон связи, повышая безопасность и конфиденциальность беспроводных сетей за счёт ограничения распространения сигналов определёнными областями.

Оптимизируя пути прохождения сигналов и снижая потребность в высокой мощности передачи, RIS может способствовать созданию энергоэффективных беспроводных сетей.

Индустрия связи уже рекламирует зондирование, т. е. услуги высокоточной локализации, а также обнаружение объектов и распознавание положения как важную возможную функцию для сетей 6G. Высокоточная локализация пользователей способствует развитию эффективного управления беспроводными лучами. Зондирование также может быть предложено в качестве новой сетевой услуги для вертикальных отраслей, таких как умные фабрики и автономное вождение, где обнаружение людей или автомобилей можно использовать для картирования окружающей среды. Подобная возможность может быть использована для мониторинга в системах домашней безопасности. Большая апертура узлов RIS и, как следствие, высокое разрешение означают, что такие приложения будут не только возможны, но, возможно, даже рентабельны.

Кстати, RIS может обеспечить интеграцию спутников в сети 6G, уменьшая задержку и увеличивая скорость передачи данных для спутниковых услуг. Как правило, спутник потребляет много энергии и имеет большие антенны, чтобы компенсировать потери при распространении на большие расстояния, а также весьма скромные возможности мобильных устройств, расположенных на поверхности планеты. RIS может сыграть большую роль в минимизации этих ограничений и, возможно, даже в обеспечении прямой связи со спутника с пользователями 6G, к примеру, с теми, кто находится в помещении.

Хотя технология RIS обещает революционизировать беспроводную связь, для её широкого внедрения необходимо решить ряд проблем. Кроме того, учитывая потенциал RIS, важно изучить будущие направления и области развития в области RIS-технологий.

Одной из основных проблем технологии RIS является её стоимость. Разработка и развёртывание систем RIS могут быть дорогостоящими, особенно если учесть большое число отдельных элементов, необходимых для эффективного манипулирования волнами. Снижение затрат на производство и внедрение реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей будут иметь решающее значение для того, чтобы сделать эту технологию более доступной и практичной для широкого спектра применений.

Реализация технологии RIS предполагает использование сложных алгоритмов и систем управления. Сложность управления огромным числом отдельных элементов и оптимизация их поведения в режиме реального времени могут создать проблемы для интеграции в существующие беспроводные сети. Упрощение пользовательского интерфейса и механизмов контроля будет иметь важное значение для обеспечения эффективного развёртывания и управления RIS.

Будучи относительно новой и инновационной технологией, RIS может столкнуться с проблемами регулирования. Необходимо будет решить вопросы, связанные с использованием радиоспектра, лицензированием и стандартами безопасности, чтобы обеспечить соблюдение существую-

щих правил и избежать помех другим беспроводным системам. Сотрудничество между заинтересованными сторонами отрасли и регулируемыми органами будет необходимо для разработки чётких руководящих принципов внедрения RIS.

Обеспечение беспрепятственной интеграции систем RIS с существующей беспроводной инфраструктурой имеет решающее значение. Совместимость с различными протоколами связи и устройствами будет иметь важное значение для максимизации преимуществ RIS в реальных приложениях. Для облегчения взаимодействия должны быть разработаны отраслевые стандарты и протоколы для интеграции RIS.

Динамический характер RIS, который позволяет манипулировать электромагнитными волнами, создаёт потенциальные проблемы безопасности и конфиденциальности. Могут существовать уязвимости, связанные с перехватом сигнала, манипулированием или несанкционированным доступом. Для защиты сетей и данных с поддержкой RIS необходимо внедрить надёжные меры безопасности и протоколы шифрования.

Чтобы RIS была эффективной в крупномасштабных развёртываниях, таких как "умные" города или обширные внутренние помещения, она должна демонстрировать масштаби-

руемость. Решающее значение будет иметь обеспечение того, чтобы системы RIS могли эффективно охватывать большие территории без ущерба для производительности.

Подводя итог, можно сказать, что реконфигурируемые интеллектуальные поверхности способны произвести революцию в беспроводной связи за счёт интеллектуального управления электромагнитными волнами и средой их распространения. Благодаря своей способности адаптировать и оптимизировать беспроводную среду технология RIS обещает значительно улучшить производительность и надёжность беспроводных сетей в широком спектре приложений.

*По материалам*

<https://www.lastmile.su/journal/article/9727?ysclid=m0fco0q6gm916308548>,

<https://spectrum.ieee.org/meta-materials-could-solve-one-of-6gs-big-problems>,

<https://shalaginov.com/2024/04/23/ris-overview/>,

[https://dzen.ru/a/ZizgWHGX\\_QV6ecbY?ysclid=m0gdzji9h8135858086](https://dzen.ru/a/ZizgWHGX_QV6ecbY?ysclid=m0gdzji9h8135858086)