Голографический MIMO в беспроводных сетях 6G

Сети 6G будут удовлетворять требованиям низкого энергопотребления, высокой пропускной способности, возможности массового подключения и низкой задержки. В общем, все как и в 5G, но только круче. :)

Однако, есть одна ключевая концептуальная технология, благодаря которой планируется дать еще больший буст беспроводным сетям. Речь пойдет о технологии голографического MIMO (HMIMOS - Holographic Multiple Input Multiple Output Surface). В статье мы расскажем про возможности этой технологии и то, с какими сложностями предстоит столкнуться при работе с HMIMO.

Введение

Будущие беспроводные сети должны удовлетворять растущим требованиям по спектральной и энергетической эффективности. В последнее время возрос интерес к технологии MIMO, которая предполагает оборудовать базовые станции большим количеством антенных решеток для обеспечения необходимой пропускной способности. Однако, задача по реализации большого количества базовых станций с несколькими сотнями остается трудноразрешимой из-за высокой стоимости изготовления и обслуживания массивных антенных систем. Кроме того существенно возрастает энергопотребление.

Для повышения эффективности беспроводной связи в данный момент интенсивно работают над:

- Антенными решетками, поддерживающими beamforming,
- Оптимизируют более эффективное использование спектра за счет адаптивной модуляции и кодирования.

Однако, в процессе оптимизации неучтенным остаётся фактор самой среды, в которой проходит процесс передачи данных. Кроме того, сама по себе среда зачастую оказывает негативный эффект на качество беспроводного соединения. Затухание сигнала ограничивает дальность связи между оконечными устройствами, в то время как многолучевое распространение является хорошо изученным фактором, благотворно влияющим на характеристики сигнала.

Возможное ухудшение сигнала в среде передачи - это одна из ключевых проблем миллиметрового диапазона и будущих терагерцовых (ТГц) коммуникаций.

Бороться с ослаблением сигнала при беспроводной передаче данных позволяет использование массива MIMO и трехмерного beamforming’а. Это осуществляется благодаря программному управлению диаграммой направленности. Однако, такие системы накладывают существенные ограничения мобильности и масштабируемости оборудования.

Важным фактом является то, что интеллектуальное управление распространением электромагнитных (ЭМ) волн возможно лишь на стороне базовой станции (или роутера). Так как большая часть приемников остается пассивными. В результате чего, беспроводная среда в целом не учитывает процессы, происходящие в ней, и модель канала связи все еще рассматривается как вероятностная среда без возможности полноценного управления программно-управляемыми методами.

Благодаря недавнему прорыву в производстве программируемых метаматериалов, реконфигурируемые интеллектуальные интерфейсы получили потенциал, необходимый для решения проблем, связанных с сетями 6G. Другими словами, появилась возможность создавать бесшовное соединение при размещении интерфейсных поверхностей на различных пассивных объектах - поверхности HMIMO.

Для лучшего понимания работы HMIMO, приведем краткое описание концепции оптических голограмм. Голография - это метод, который позволяет использовать ЭМ поле, обычно являющееся результатом рассеяния сигнала на каких-либо объектах, отслеживание его происходит на основе принципа интерференции ЭМ волн. Детектированный таким образом сигнал можно позже использовать для восстановления начальной формы сигнала на основе принципа дифракции ЭМ волны.

Голографические интерфейсы MIMO (HMIMOS) нацелены на выход за пределы обычного MIMO, основываясь на низкой стоимости, малом размере, весе и низком энергопотреблении аппаратной части, что приводит к трансформации беспроводной среды в единую программируемую систему. В этой статье мы рассмотрим различные архитектуры HMIMOS, их основные функциональные возможности, обсудим рассматриваемые в настоящее время возможности их применения и проблемы этой технологии.

Модели HMIMOS

В этой части мы рассмотрим доступные на данный момент аппаратные архитектуры, методологии производства и режимы работы систем HMIMOS, которые делают их интеграцию в работу беспроводных систем более гибкой.

Классификация, основанная на энергопотреблении

Активные HMIMOS

Для реализации реконфигурируемой беспроводной среды, голографические интерфейсы MIMO могут служить передатчиком, приемником или отражателем. Термин "активный" используется в том случае, когда интерфейс HMIMO выполняет роль приемопередатчика и в него включаются радиочастотные схемы и устройства для обработки сигнала. С другой стороны, активные HMIMO являются естественной эволюцией массивов MIMO, размещая всё большее количество программно контролируемых антенных элементов на двумерной поверхности конечного размера. Когда за счет размещения большего количества элементов на поверхности уменьшается пространство между ними, активные HMIMOS также называют Большой Интеллектуальной Поверхностью (LIS, Large Intelligent Surface).

Практическим применением активных HMIMOS может быть компактная интеграция множества крошечных антенных элементов с реконфигурируемыми беспроводными сетями, тем самым увеличивая антенную апертуру. Эти структуры могут использоваться для передачи и приёма сигналов, используя всю поверхность антенны по принципу голограммы.

Другая реализация активных HMIMOS основывается на дискретных фотонных антенных решётках, которые объединяют активные оптоэлектронные детекторы, преобразователи и модуляторы для передачи, приёма и преобразования оптических или радиочастотных сигналов.

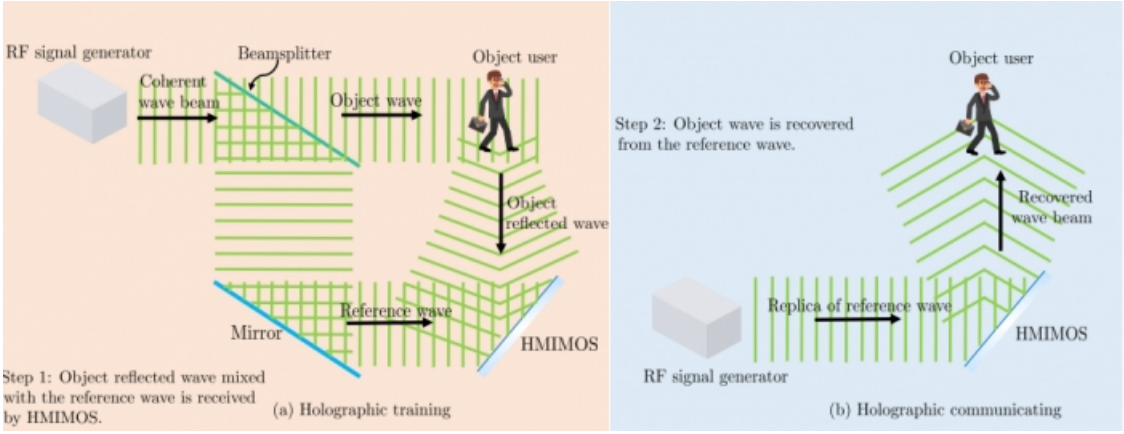
Пассивные HMIMOS

Пассивные интерфейсы HMIMO также известны как Реконфигурируемая Интеллектуальная Поверхность (RIS) или Интеллектуальная Отражающая Поверхность (IRS), действуют как пассивное металлическое зеркало или "волновой коллектор" и могут быть "запрограммированы" для изменения направления падающего электромагнитного поля. Если сравнивать с активной реализацией, пассивные HMIMOS обычно состоят из дешёвых пассивных элементов, которые не требуют выделенных источников питания.

Электронная составляющая таких интерфейсов может питаться от энергии приемника излучения, делая их энергетически независимыми. В независимости от того, как конкретно реализуется технология, пассивные HMIMOS остаются привлекательными с точки зрения энергопотребления, так как они могут формировать радиоволны и передавать входящий сигнал без использования усилителя мощности и сложной обработки сигналов.

Более того, пассивные HMIMOS могут работать в полном дуплексном режиме без значительных помех или повышенного уровня шума, требуя при этом только низкоскоростного канала управления или транзитного канала.

И, в заключение отметим, что пассивные структуры HMIMO могут быть легко интегрированы в существующую беспроводную среду благодаря их низким стоимости и энергопотреблению. Они даже могут быть размещены на фасадах зданий, в комнатах, натяжных потолках, корпусах ноутбуков или на одежде.



Два этапа в обучении голографических систем и связи с их помощью

Классификация, основанная на структуре оборудования

Смежные HMIMOS

Смежные HMIMOS предполагают интеграцию практически бесконечного числа элементов на ограниченной площади антенной поверхности для того, чтобы сформировать пространственно непрерывную апертуру приемопередатчика.

Для лучшего понимания работы смежных поверхностей HMIMO и их моделей коммуникации, рассмотрим краткое описание работы концепции оптических голограмм. Голография - это метод, который позволяет использовать ЭМ поле, обычно являющееся результатом рассеяния сигнала на каких-либо объектах, отслеживание его происходит на основе принципа интерференции ЭМ волн. Детектированный таким образом сигнал можно позже использовать для восстановления начальной формы сигнала на основе принципа дифракции ЭМ волны. Стоит отметить, что беспроводная связь с использованием непрерывной апертуры передатчика вдохновлена оптической голографией, как показано на рисунке выше.

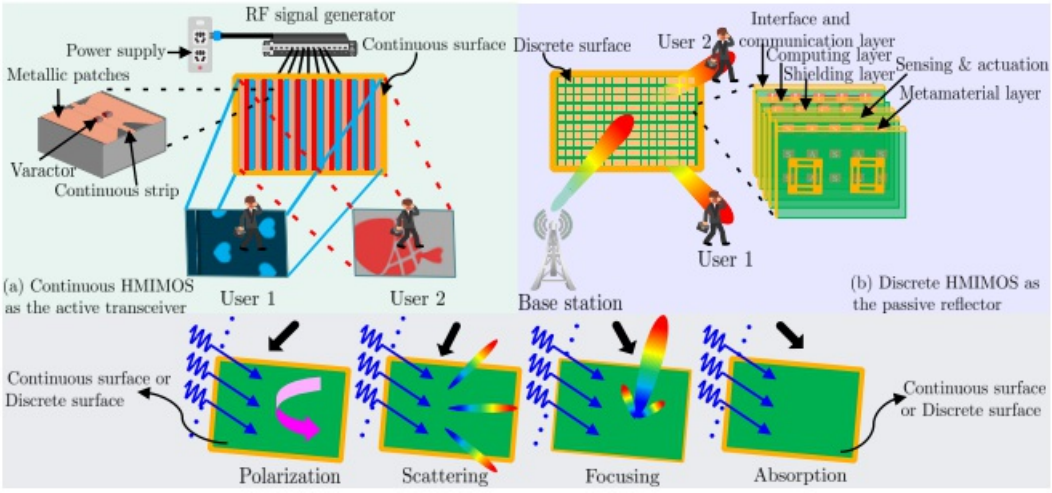
На этапе обучения используются сигналы, сгенерированные источником. Эти сигналы проходят через делитель, где делятся на направленную и опорную волну. Направленная (объектная) волна доходит до объекта, отражается от него, часть её смешивается с опорной волной, которая не попадает на объект, после чего результирующая волна подается на решетку HMIMO. На этапе передаваемый сигнал принимает желаемое направление и передается к объекту через пространственно непрерывную апертуру, образуемую HMIMOS.

Непрерывная апертура передатчика имеет преимущество перед Massive MIMO за счет бесконечно большого количества элементов, и потенциальные преимущества такого метода заключаются в возможности создания и детектирования ЭМ волн с произвольными частотными составляющими, без нежелательных боковых составляющих.

Дискретные HMIMOS

Дискретные HMIMOS обычно состоят из множества дискретных ячеек, сделанных из программно-настраиваемых метаматериалов. Способы изменения электромагнитных свойств ячеек варьируются от готовых электронных компонентов до жидких кристаллов, микроэлектромеханических систем или даже электромеханических переключателей. В общем использоваться по сути могут любые реконфигурируемые метаматериалы.

Данная структура существенно отличается от обычных антенных решёток MIMO. Один из вариантов дискретных поверхностей HMIMO основан на дискретных "мета-атомах", с электронным управлением характеристиками отражения. По сравнению со смежными HMIMOS, дискретные поверхности имеют некоторые существенные отличия с точки зрения реализации и аппаратного обеспечения, что будет описано далее.



Два режима работы систем HMIMO вместе с их реализацией и аппаратными структурами. Приведено схематичное представление функций HMIMOS: управление поляризацией, рассеянием, фокусировкой и поглощением ЭМ поля

Классификация, основанная на методах производства

Существуют различные методы изготовление HMIMO:

- электронно-лучевая литография на оптических частотах,

- фрезерование сфокусированным пучком ионов,
- интерференционная и наноимпринтная литография,
- прямая лазерная запись,
- процессы печати плат с помощью микроволн.

Обычно эти методы изготовления используются для получения двух типичных апертур: непрерывных или дискретных, как было показано выше.

Полученная структура мета-частиц использует энергию падающей электромагнитной волны для того, чтобы расширить частотный диапазон, тем самым добиваясь непрерывной апертуры и контролируемой фазы отражения. Это непрерывная монолитная металлическая структура, состоящая из бесконечного числа мета-частиц. Каждая мета-частица содержит две металлические трапециевидные пластины, центральную непрерывную полосу и варакторные диоды.

Независимо контролируя напряжение смещения варакторов, можно динамически изменять поверхностное сопротивление непрерывных HMIMOS, что позволяет манипулировать фазой отражения, амплитудными состояниями и распределением фаз в широком частотном диапазоне. Следует отметить, что эта картина поверхностного сопротивления является картой голограммы и формируется непосредственно из распределения полей опорной и отраженной волн, как было описано выше. Благодаря использованию интеллектуальных алгоритмов происходит управление формированием луча диаграммы с использованием принципа голограммы.

Пока HMIMO находятся на стадии идеи, в мире ведутся работы по прототипированию различных вариантов этой технологии. Дискретные HMIMOS были разработаны стартапом "Greenerwave" и показали основную целесообразность и эффективность концепции HMIMO с использованием антенн с поверхностями из метаматериалов. Другая компания, "Pivotalcommware", с инвестициями Билла Гейтса, разрабатывает коммерческие смежные HMIMOS, основанные на дешёвых смежных метаповерхностях, что также проверяет концепцию HMIMOS и продвигает голографические технологии. Дальнейшее прототипирование систем HMIMO крайне желательно как для доказательства эффективности концепции формирования луча с помощью голографических технологий, так и для обнаружения потенциальных проблем, которые нуждаются в исследовании.

Классификация по режимам работы

Обычно выделяют четыре режима работы HMIMOS:

- непрерывные HMIMO как активные приёмопередатчики;
- дискретные HMIMO как пассивные отражатели;
- дискретные HMIMO как активные приёмопередатчики;
- смежные HMIMO как пассивные отражатели.

Функциональность, характеристики и применение в связи

Различные методы производства систем HMIMOS приводят к разнообразию функциональных возможностей и характеристик, при этом большинство из них будут очень актуальны для систем 6G, например, для обеспечения пропускной способности порядка Тбит/сек. В этом разделе мы рассмотрим ключевые функции и характеристики и обсудим различные варианты их применения в беспроводной связи.

Функциональность

Интеллектуальные поверхности могут поддерживать широкий спектр ЭМ взаимодействий, здесь и далее называемых функциональностью. Исходя из программируемых функций и того, на основе какой структуры (дискретные или непрерывные элементы) они основаны, в HMIMOS выделяют четыре основных типа функциональностей:

- F1: Поляризация ЭМ поля, которая ссылается на реконфигурируемые настройки осцилляции волн электрического и магнитных полей.
- F2: Рассеяние ЭМ поля заключается в перенаправлении падающей волны (с заданным направлением падения) в одно или несколько желаемых направлений.
- F3: Карандашная фокусировка, которая имеет место в том случае, когда HMIMOS действует как линза для фокусировки ЭМ волны в заданной точке ближнего или дальнего поля. Коллимация (т.е. обратная функциональность) также относится к этому режиму формирования луча.
- F4: Поглощение ЭМ поля. Поглощается минимальная мощность входящего ЭМ поля отраженной и/или преломленной волны.

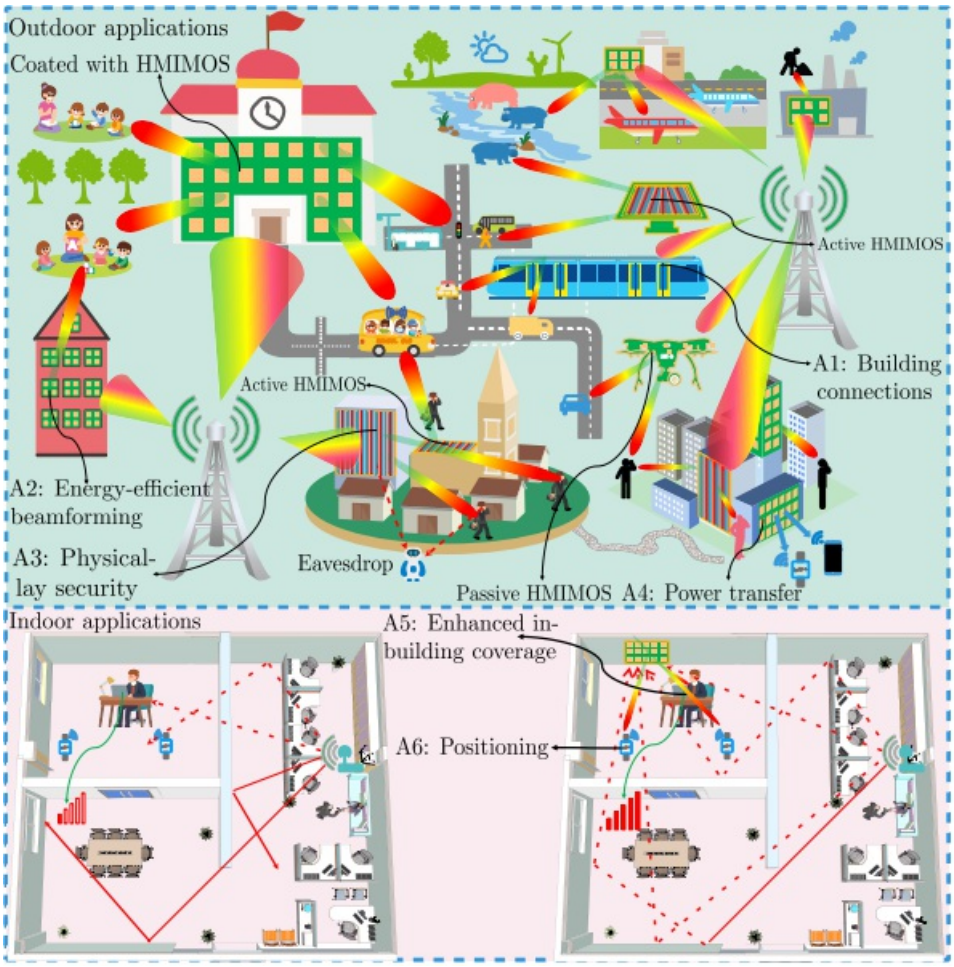
Характеристики

В сравнении с уже существующими технологиями, использующимися в беспроводных сетях, наиболее отличительные характеристики концепции HMIMO заключается в том, что она делает контролируемой окружающую среду, обеспечивая возможность полноценного формирования среды, контролируя ЭМ отклик элементов среды, распространенных по всей сети. Структуры HMIMOS обычно предназначены для работы в качестве источника сигнала или "волнового коллектора" с реконфигурируемыми характеристиками, особенно для сценариев, когда они используются в качестве пассивного отражателя с целью улучшения энергоэффективности. Фундаментальные характеристики систем HMIMO и их основные отличия от массивных MIMO и ретрансляционных мульти антенных систем заключаются в следующем:

- C1: HMIMOS могут быть практически пассивными. Одним из существенных достоинств пассивных HMIMOS является то, что они не требуют какого-либо выделенного источника энергии для обработки входящего ЭМ-поля, несущего информацию.
- C2: HMIMOS могут реализовать постоянную апертуру. Текущие исследования активно фокусируются на дешёвых методах для реализации пространственно-постоянной передающей и приёмной апертуре.
- C3: Тепловой шум практически отсутствует в HMIMOS. Пассивные HMIMO не требуют конвертации полученной волны для последующей её передачи. Вместо этого они реализуют аналоговую обработку непосредственно самой принимаемой ЭМ волны.
- C4: Элементы HMIMOS настраиваются программно. Существующие архитектуры метаповерхностей позволяют легко программировать все настройки составляющих их элементов.
- C5: HMIMOS могут получать отклик от всего спектра частот. Исходя из современных возможностей производства мета-материалов, реконфигурируемые системы могут использовать любую из доступных частот, от акустического спектра до терагерцовых частот светового спектра.
- C6: Более низкая задержка реализации. HMIMOS основаны на быстро перепрограммируемых мета-материалах, в то время как существующие системы массивных MIMO включают в себя архитектуры антенных решёток, лишённые данного преимущества.

Применение в связи

Уникальные особенности систем HMIMO, обеспечивающие интеллектуальные и быстро реконфигурируемые беспроводную среду, делают их новым кандидатом на роль маломощных, высокопроизводительных и дешёвых беспроводных сетей 6G. Далее мы обсудим возможные применения систем HMIMO для наружных и внутренних условий.



Возможности применения HMIMOS в наружных и внутренних беспроводных сетях

Наружные применения

Рассмотрим дискретные пассивные HMIMOS как пример структуры из конечного числа элементов, предназначенных для передачи соответствующим образом сдвинутых по фазе сигналов пользователям, находящихся в различных условиях, будь то типичная городская застройка, торговые центры или аэропорты. Мы предположим, что HMIMOS это плоские структуры толщиной в несколько сантиметров и различного размера, которые могут быть легко размещены практически на всех окружающих объектах.

- A1: Установление связи. HMIMOS могут расширить покрытие базовых станций от наружных базовых станций до пользователей, особенно в тех случаях, когда отсутствует прямое соединение между пользователями и базовыми станциями, или когда соединение частично перекрыто препятствиями.
- A2: Энергоэффективный beamforming. HMIMOS способны перерабатывать окружающие ЭМ волны и фокусируют их, направляя к своим предполагаемым пользователям благодаря эффективной настройке каждого элемента. В таком случае, поверхности устанавливаются как ретрансляторы для передачи информации с помощью эффективно сформированного луча, компенсирующего ослабление сигнала от базовых станций или интерференционные помехи от соседних базовых станций.
- A3: Безопасность физического уровня. HMIMOS могут быть установлены для обеспечения безопасности физического уровня, чтобы компенсировать отражения от базовых станций, которые могут быть зафиксированы прослушивающими устройствами.
- A4: Беспроводная передача энергии. HMIMOS могут собирать окружающие ЭМ волны и направлять их к энергозатратным устройствам и датчикам систем IoT, обеспечивая при этом и передачу информации.

Внутренние применения

Беспроводная связь внутри помещений подвержена многолучевому распространению из-за большого количества рассеивателей и блокировок сигнала мебелью и стенами, а также загрязнению радиоканала из-за большой плотности электронных устройств на ограниченной площади. Таким образом, обеспечение широкого покрытия и высокой пропускной способности в помещениях является сложной задачей. Системы HMIMO обладают потенциалом быть очень полезными в закрытых

помещениях, используя возможности к реконфигурации электромагнитного окружения для различных целей.

- A5: Улучшенное покрытие внутри зданий. Как было описано ранее, помещения внутри могут быть покрыты поверхностями HMIMO для улучшения пропускной способности, предлагаемой существующими точками доступа Wi-Fi.
- A6: Высокоточное позиционирование внутри помещений. HMIMOS увеличивают потенциал для улучшения позиционирования внутри зданий, в случаях, когда существуют проблемы с системой GPS. Большие поверхности HMIMO создают большую, и, возможно, непрерывную апертуру, что позволяет улучшить покрытие существующего пространства и расширить пространственное разрешение.

Сложности реализации

В этом разделе мы представим некоторые из основных теоретических и практических проблем, возникающих при разработке систем HMIMO.

Фундаментальные ограничения

Естественно ожидать, что системы беспроводной связи, основанные на HMIMO, будут обладать свойствами, отличными от свойств уже существующих систем связи на основе мульти-антенных приемопередатчиков.

Напомним, что текущие системы связи работают в неконтролируемой беспроводной среде, в то время как системы, построенные на базе HMIMO смогут управлять конфигурацией окружающего их ЭМ поля. Этот факт приводит к необходимости создания новых математических методологий для характеристики физических каналов в системах, основанных на HMIMO, анализировать их емкость, которая будет увеличиваться по сравнению с заданным объёмом, а также требуется разрабатывать новые алгоритмы обработки сигналов и схемы сетей для осуществления связи.

Например, непрерывные HMIMOS используются для приема и передачи падающего на них ЭМ поля через непрерывную апертуру, используя концепцию голографии. В отличие от существующих систем MIMO, принцип работы HMIMOS может быть описан уравнением Френеля-Кирхгофа, основанном на принципе Гюйгенса-Френеля.

Расчет каналов HMIMO

Расчёт очень больших каналов MIMO в построенных на основе HMIMOS системах связи - еще одна критически важная задача, связанная с большим количеством различных ограничений. Большинство из существующих на данный момент подходов занимают достаточно большой период времени для обучения всех элементов системы HMIMO через отправку сигналов с базовой станции и приём сгенерированного отражения на устройстве пользователя.

Другой подход к обучению заключается в глубоком обучении на основе полученных данных с помощью виртуального формирования луча/отражения для расчета каналов и создания фазовой матрицы. Однако, этот режим требует большого количества данных для обучения и полностью задействует цифровую или гибридную архитектуру приемопередатчиков HMIMO, что, в свою очередь, приводит к усложнению аппаратной части и увеличению энергопотребления.

Канало-зависимый beamforming

Канало-зависимый beamforming широко рассмотрен в случае с массив-MIMO. Однако, канало-зависимое проектирование систем, основанных на HMIMO является очень сложной задачей, так как HMIMOS строятся из ячеек на базе метаматериалов, накладывающих жесткие ограничения по настройке.

Последние разработки систем HMIMO включают большое количество реконфигурируемых параметров, оптимальное решение для многих из которых является крайне нетривиальным. В случае с непрерывными HMIMO, интеллектуальное голографическое формирование луча нацелено на четкое определение и отслеживание отдельных устройств или их небольших кластеров, а также обеспечивать их высокоточным интеллектуальным радиоуправлением. Однако, самостоятельно оптимизируемый голографический beamforming очень сильно зависит от заданной апертуры, что не дает возможности использовать низкоуровневую модуляцию.

Проблемы оптимизации алгоритмов работы

Если рассматривать систему, основанную на HMIMO, состоящую из нескольких мульти-антенных

базовых станций, нескольких HMIMOS и множеством пользователей, каждый из которых оснащён одной или несколькими антеннами, то можно отметить несколько "подводных камней".

Централизованное управление системой HMIMO потребует передачи огромного количества служебной информации центральному контроллеру, что является недопустимым как с точки зрения вычислительных мощностей, так и с точки зрения потребления энергии и занятости канала передачи. Следовательно, необходимо разработать алгоритмы оптимального в плане энергопотребления распределения ресурсов и формирования луча. Дополнительными параметрами, которые усложняют оптимизацию сети, являются распределение мощности спектра, а также распределение пользователей по базовым станциям и системам HMIMOS. Естественно, чем больше HMIMOS будут включены в сеть, тем сложнее будет разработка алгоритмов оптимизации.

Заключение

В этой статье была описана концепция беспроводной связи HMIMOS, и, в частности:

- возможные аппаратные архитектуры;
- функциональные возможности и характеристики;
- возможные применения в системах связи.

Несомненно, что у данной технологии есть огромный потенциал в качестве ключевой технологии, обеспечивающей физический уровень будущих сетей 6G.

Технология HMIMO предлагает большие преимущества с точки зрения спектральной и энергоэффективности, создавая интеллектуальные реконфигурируемые беспроводные среды. Это снижает стоимость, размеры и энергопотребление сетевых устройств, обеспечивая повсеместное покрытие, как в помещениях, так и на открытых пространствах.

Благодаря своим достоинствам HMIMOS могут быть компактно и легко интегрированы в широкий спектр систем. Типичными "нишами" их использования являются:

- Расширение зоны покрытия;
- Обеспечение безопасности физического уровня;
- беспроводная передача энергии.

Тем не менее, для достижения полного потенциала технологии, нужно решить множество проблем. К их числу относятся реализация и моделирование метаповерхностей, анализ фундаментальных пределов беспроводной связи с множественными HMIMOS, реализация интеллектуально адаптируемой среды и оценка каналов пассивных поверхностей. Эти проблемы предоставляют для инженеров золотую жилу с новыми проблемами и задачами для решения.