

*Яремчук И.В.,
магистрант, 2 курс,
направление обучения 11.04.03 Конструирование и технология
электронных средств,
кафедра электроники, радиотехники и систем связи,
институт приборостроения, автоматизации и информационных
технологий,
ОГУ имени И.С. Тургенева
Россия, г. Орёл*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ MASSIVE MIMO В АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ (5G)

***Аннотация:** В данной работе рассматривается одна из ключевых технологий современных телекоммуникаций — Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). Обосновывается необходимость перехода к многоэлементным антенным решеткам для обеспечения высокой пропускной способности сетей 5G. Описываются механизмы пространственного формирования луча и преимущества их использования перед традиционными архитектурами.*

***Ключевые слова:** Антенна, MIMO, преобразователь, частота, фазовый центр, частота, увеличение емкости.*

***Abstract:** This paper discusses one of the key technologies of modern telecommunications — Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). It substantiates the need to switch to multi-element antenna arrays to ensure high throughput of 5G networks. The mechanisms of spatial beamforming and the advantages of their use over traditional architectures are described.*

Keywords: *Antenna, MIMO, converter, frequency, phase center, frequency, increased capacity.*

Введение

Стремительный рост глобального мобильного трафика и появление концепции Интернета вещей (IoT) поставили перед инженерами задачу по кратному увеличению емкости сетей. Традиционные методы повышения эффективности, такие как расширение полосы частот или уплотнение малых сот, сталкиваются с физическими и экономическими ограничениями. В этих условиях на первый план выходят антенные системы сетей 5G, способные эффективно использовать ограниченный частотный ресурс.[1] Переход к диапазонам миллиметровых волн и внедрение технологии Massive MIMO стали фундаментом для достижения целевых показателей передачи данных, превышающих 10 Гбит/с.

Основная часть

1. Технологические основы Massive MIMO

Технология Massive MIMO представляет собой развитие концепции многоканальной передачи данных (MIMO). В отличие от систем LTE, где количество антенных портов на базовой станции обычно не превышало 8, системы Massive MIMO используют решетки с десятками и сотнями антенных элементов (например, 64T64R и более). Основное отличие заключается не только в количестве элементов, но и в когерентной работе всей системы. Это позволяет базовой станции одновременно обслуживать множество абонентов (MU-MIMO) в одном и том же частотно-временном ресурсе, разделяя их пространственно.

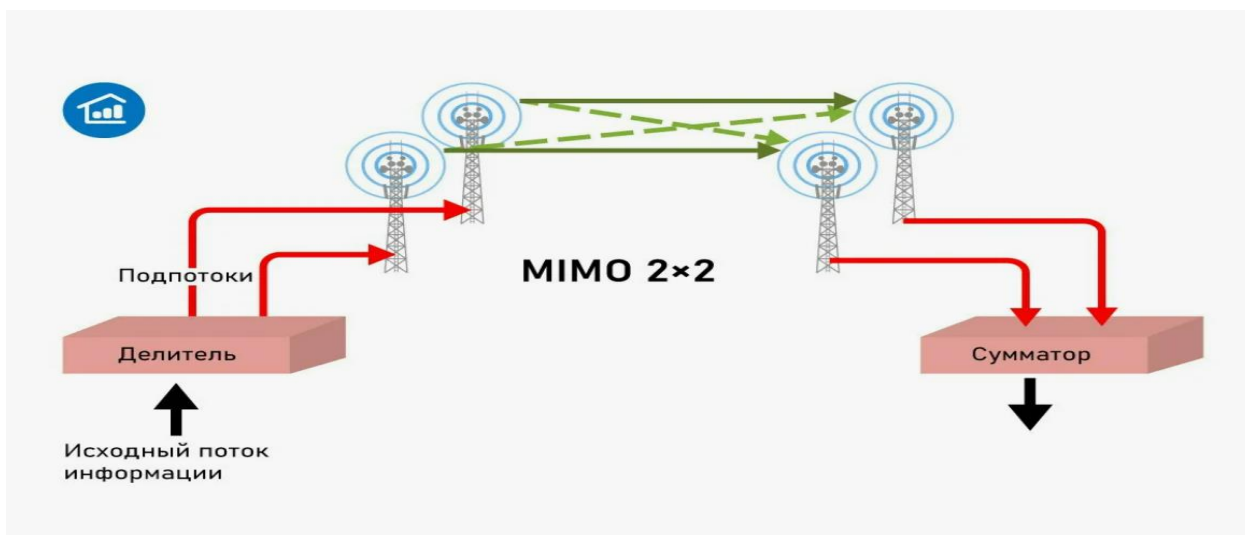


Рисунок 1. Представление технологии MIMO 2x2

2. Технологии формирования луча (Beamforming)

Ключевым инструментом реализации потенциала Massive MIMO является динамическое формирование луча (Beamforming).

- **Пространственное мультиплексирование:** Благодаря большому числу фазовращателей антенна формирует узконаправленные «лучи» энергии в сторону конкретного пользователя. В то время как традиционная антенна излучает сигнал во всем секторе, Beamforming минимизирует рассеивание мощности в пустые зоны.

- **Снижение интерференции:** Узкая направленность лучей позволяет существенно снизить уровень межсимвольной и межабонентской интерференции. Базовая станция «нацеливает» передачу данных на абонента, подавляя излучение в направлениях, где могут находиться другие устройства, работающие на той же частоте.

3. Преимущества и технические вызовы

Внедрение антенных систем с Massive MIMO дает ряд стратегических преимуществ:

1. **Спектральная эффективность:** Возможность повторного использования частот внутри одной соты в разы увеличивает суммарную емкость сети.

2. **Энергоэффективность:** Фокусировка энергии на приемнике позволяет снизить общую мощность передатчика базовой станции при сохранении высокого качества покрытия.

Однако технология сопряжена с вызовами. К ним относятся высокая вычислительная сложность алгоритмов обработки сигналов в реальном времени, необходимость точной оценки состояния канала (CSI), а также теплоотвод в компактных активных антенных блоках (AAU).[2]

Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output — «множественный вход, множественный выход») — это технология, которая позволяет базовой станции сотовой связи передавать и принимать одновременно десятки сигналов по одному и тому же частотному каналу за счет использования огромного количества антенн.

Если классическая антенна сотовой связи «светит» сразу на весь район (сектор), то Massive MIMO работает гораздо точнее.

Основные составляющие этой технологии:

- **Огромное количество антенных элементов:** В отличие от обычных систем, где 2 или 4 антенны, в Massive MIMO на одной панели могут быть установлены десятки и даже сотни миниатюрных антенн.

- **Фокусировка сигнала (Beamforming):** Представь, что обычная антенна — это лампочка, которая освещает всю комнату. Massive MIMO — это группа мощных лазерных указок. Система «вычисляет», где находится твой смартфон, и направляет узкий луч связи именно к нему, не тратя энергию на пустое пространство.

- **Обслуживание многих людей одновременно:** Поскольку лучи очень узкие, базовая станция может направить один луч тебе, а другой —

человеку в паре метров от тебя, и эти сигналы не будут мешать друг другу, даже если вы используете одну и ту же частоту.[3]

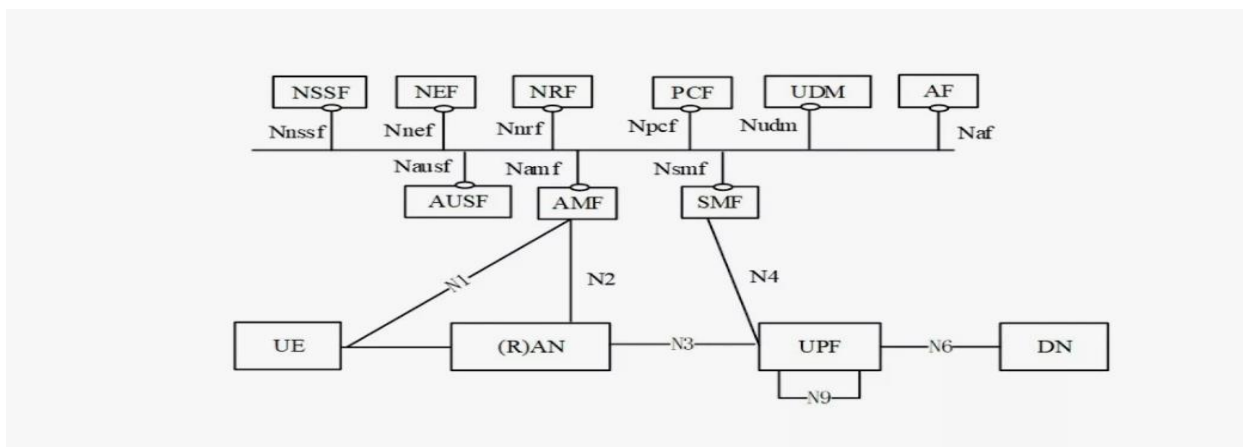


Рисунок 2. Представление архитектуры сетей 5G

Основные аспекты сетей 5G:

1. **Скорость:** Чем больше «антенн-каналов» работает одновременно, тем выше скорость интернета у каждого пользователя.
2. **Емкость:** Сеть не «ложится», когда в одном месте (например, на стадионе) собирается много людей.
3. **Стабильность:** Узконаправленный луч «пробивает» помехи лучше, чем рассеянный сигнал.

Технология Massive MIMO является фундаментом сетей 5G, так как она решает главную проблему современной связи — дефицит свободных радиочастот.

Основные преимущества этой технологии:

1. **Колоссальное увеличение емкости сети**
Это главное преимущество. Благодаря пространственному мультиплексированию (MU-MIMO), базовая станция может передавать данные нескольким десяткам пользователей одновременно на одной и той же частоте. В обычных сетях пользователи фактически «делят» между собой очередь на получение данных, а здесь они получают их параллельно.

2. Точечная направленность сигнала (Beamforming)

Вместо того чтобы излучать энергию во все стороны (засоряя эфир и тратя электричество), Massive MIMO формирует узкие лучи, направленные строго на конкретные смартфоны. Это позволяет:

- Улучшить качество связи на краях зоны покрытия.
- Стабильнее работать внутри зданий, так как мощный сфокусированный луч лучше преодолевает препятствия.

3. Высокая спектральная эффективность

Спектр (радиочастоты) стоит огромных денег и его мало. Massive MIMO позволяет передавать в десятки раз больше бит информации в расчете на 1 Гц полосы частот по сравнению с 4G (LTE). Это делает эксплуатацию сети гораздо выгоднее для оператора.

4. Энергоэффективность

Поскольку энергия не рассеивается по всему сектору, а доставляется «адресно», базовая станция может снижать общую мощность излучения. Это делает оборудование более экологичным и снижает затраты на электроэнергию.

5. Подавление помех (Интерференции)

Благодаря математической обработке сигналов на множестве антенн, система умеет «отсекать» шумы и отраженные сигналы, которые раньше мешали связи. Антенная решетка программно выстраивает диаграмму направленности так, чтобы минимизировать влияние соседних устройств друг на друга.

6. Улучшенная работа в uplink (от абонента к станции)

За счет большого числа приемных антенн на базовой станции, она способна «услышать» даже очень слабый сигнал от смартфона. Это особенно важно для экономии заряда батареи твоего телефона, так как ему не нужно работать на пределе мощности, чтобы «докричаться» до вышки. [4]

Это решение задачи «как передать больше данных, если свободных частот в радиоэфире почти не осталось». Мы просто начинаем использовать пространство более эффективно.

Пространственное мультиплексирование — это «магия» Massive MIMO, которая позволяет передавать разные потоки данных разным пользователям одновременно, используя один и тот же частотный ресурс.

Если в обычной связи данные передаются как радиовещание (один говорит — все слушают), то здесь это похоже на множество одновременных частных разговоров в одной комнате.

1. Разделение пространства на «слои»

В Massive MIMO каждый антенный элемент в решетке передает сигнал с небольшой задержкой (фазовым сдвигом). Благодаря математическим алгоритмам, эти сигналы накладываются друг на друга так, что в одной точке пространства они усиливаются, а в других — гасят друг друга. Таким образом формируются независимые **пространственные каналы** (лучи).

2. Матрица канала (CSI — Channel State Information)

Для работы мультиплексирования базовая станция должна «знать» всё о пути сигнала до каждого пользователя.

- Смартфоны отправляют специальные пилотные сигналы.
- Базовая станция анализирует, как эти сигналы отразились от стен, деревьев и людей.
- Создается сложная **матрица канала**, которая описывает уникальный «пространственный отпечаток» каждого абонента.

3. Прекодирование (Precoding)

Это самый важный этап. На основе матрицы канала базовая станция выполняет математическую операцию — **прекодирование**. Она заранее «смешивает» сигналы для разных пользователей таким образом, чтобы при достижении конкретного смартфона все «чужие» сигналы взаимоуничтожились, а «свой» сигнал восстановился в исходном виде. Это

позволяет передавать данные пользователям, которые находятся даже в паре метров друг от друга, без взаимных помех.

Список литературы:

1. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Высочин И. А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. — М.: Горячая линия - Телеком, 2021. — 320 с.
2. Marojevic, V. 5G Communication Systems: Simulation, Modeling, and Implementation. — Wiley-IEEE Press, 2022. — 450 с.
3. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. — М.: Горячая линия - Телеком, 2020. — 216 с.
4. Степутин А. Н., Николаев А. Д. «Архитектура активных антенных систем в сетях 5G». // Вестник связи. — 2023. — №4.