

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИМО В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ РАЗНЫХ ПОКОЛЕНИЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-4-4-12

Manuscript received 26 November 2020;
Accepted 28 January 2021

Бакулин Михаил Германович,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, m.g.bakulin@gmail.com

Крейнделин Виталий Борисович,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, vitrkrend@gmail.com

Панкратов Денис Юрьевич,
 Московский технический университет связи и информатики,
 Москва, Россия, dpankr@mail.ru

Работа подготовлена на основе научных исследований, выполненных при финансовой поддержке Федерального агентства связи в рамках государственного контракта № ПЗЗ-1-26/13 "Развитие технологии МИМО для систем подвижной связи".

Ключевые слова: технология MIMO, Massive MIMO, 5G, IEEE, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax, 802.11be, Wi-Fi, технология Beamforming

Технология использования нескольких передающих и нескольких приемных антенн (Multiple Input Multiple Output, MIMO) широко используется в современных системах радиодоступа стандартов IEEE. Наблюдается тенденция увеличения числа антенн, что подтверждается также развитием технологии MIMO в системах мобильной связи стандартов 3GPP. Требования к современным системам радиосвязи постоянно возрастают. В условиях растущего дефицита радиочастотного спектра становится все более трудно обеспечить передачу больших объемов информации за счет расширения полосы частотных каналов. Поэтому является актуальным применение технологии MIMO для увеличения спектральной и энергетической эффективности систем связи. В системах 5G используется технология Massive MIMO, при использовании которой число антенн измеряется десятками и сотнями. Подробно рассмотрены характеристики различных вариантов технологии MIMO, реализованные в существующих стандартах 802.11n, 802.11ac, 802.11ax, а также в перспективном стандарте 802.11be (системы 6G). Рассмотрены технологии направленной передачи, пространственного мультиплексирования, выбора антенн, как частные случаи прекодирования. Показаны тенденции развития технологии MIMO в системах беспроводной связи.

Информация об авторах:

Бакулин Михаил Германович, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Крейнделин Виталий Борисович, профессор, д.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Панкратов Денис Юрьевич, доцент, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Для цитирования:

Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №4. С. 4-12.

For citation:

Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Yu. (2021) Application of MIMO technology in modern wireless communication systems of different generations. T-Comm, vol. 15, no.4, pp. 4-12. (in Russian)

Введение

Таблица 1

Параметры MSC для канала 40 МГц и 4 пространственных потоков (максимальные скорости передачи данных в стандарте 802.11n) [0, 0]

Индекс MSC	Вид модуляции	Скорость кодирования	Скорость передачи данных, Мбит/с
24	BP	1/2	60
25	QP	1/2	120
26	QP	3/4	180
27	16-QA	1/2	240
28	16-QA	3/4	360
29	64-QA	2/3	480
30	64-QA	3/4	540
31	64-QA	5/6	600

Технология передачи и приема данных с помощью нескольких передающих и нескольких приемных антенн (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) широко используется в современных системах беспроводной связи стандартов IEEE (Wi-Fi) для повышения пропускной способности [0, 0, 0, 0]. Стандарты Wi-Fi развиваются в течение 30 лет и обеспечивают беспроводную передачу данных [0, 0, 0]. Технология MIMO также развивается в системах мобильной связи стандартов 3GPP.

В системах мобильной связи стандартов 3GPP (например, LTE-Advanced) в релизе 11 [0] используется до 8 антенн, что позволяет базовой станции одновременно передавать до 8 пространственных потоков, в то время как в релизе 15 [0, 0, 0] возможно использование до 32 антенн на стороне базовой станции.

В процессе развития стандартов IEEE и 3GPP увеличивается число используемых в таких системах антенн и растут скорости передачи данных. Например, в стандарте 802.11n максимальная пропускная способность составляет 600 Мбит/с при использовании 4 антенн [0], а в стандарте 802.11ac [0] возможно достижение скорости передачи данных свыше 6 Гбит/с при использовании 8 антенн. В настоящей статье рассматриваются характеристики технологии MIMO в различных системах беспроводной связи.

1. Применение MIMO в стандарте 802.11n

В стандарте IEEE 802.11n были предложены спецификации для уровня управления доступом (Medium Access Control, MAC) и физического уровня для повышения пропускной способности систем радиодоступа [0]. В сети стандарта 802.11n используются станции с поддержкой функций режима высокой пропускной способности.

Некоторыми функциями физического уровня, которые отличают станции с поддержкой функций режима высокой пропускной способности от обычных станций, являются: использование нескольких антенн на передающей и приемной сторонах (MIMO); пространственное мультиплексирование; пространственное отображение (включая режим направленной передачи); пространственно-временное кодирование (Space-Time Coding, STC); кодирование с низкой плотностью (Low Density Parity Check, LDPC) и выбор антенн.

На физическом уровне стандарта 802.11n используется технология ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), с четырьмя пространственными потоками.

Индекс схем модуляции и кодирования (Modulation and Coding Schemes, MCS) – это значение, которое определяется видом модуляции и кодирования. В стандарте 802.11n несущие модулируются с использованием двоичной фазовой модуляции (BPSK), квадратурной фазовой модуляции (QPSK), 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (16-QAM) или 64-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (64-QAM). Также используется помехоустойчивое кодирование со скоростью кодирования 1/2, 2/3, 3/4 или 5/6 (см. табл. 1).

Технология выбора антенн

Технология выбора антенн относится к разновидности прекодирования, когда данные передаются с помощью подмножества антенн (меньше общего числа антенн), выбранных с помощью определенных критериев (например, максимальная пропускная способность системы MIMO).

Для технологии выбора антенн требуется информация о канале (Channel State Information, CSI), которая оценивается с помощью пилот-сигналов. Технология выбора антенн в стандарте 802.11n поддерживает до 8 антенн и до четырех радиочастотных цепей (РЧ-цепей). Принципы работы технологии выбора антенн подробно описаны в документе [0].

Блок-схема передающей части

Упрощенная блок-схема передающей части для одного пространственного потока представлена на Рис. 1. Блок отображения сигнального созвездия отображает последовательность битов в каждом пространственном потоке в точки сигнального созвездия (комплексные информационные символы). Блок обратного дискретного преобразования Фурье (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT) преобразует вектор информационных символов из частотной во временную область. Блок добавления циклического сдвига (Cyclic Shift Diversity, CSD) обеспечивает добавление циклических сдвигов для предотвращения непреднамеренного формирования лучей диаграммы направленности (во избежание излучения в нежелательном направлении).

Блок отображения потоков (используется для нескольких пространственных потоков) отображает пространственно-временные потоки на РЧ-цепи для передачи. При прямом отображении информационные символы из каждого пространственно-временного потока отображаются непосредственно на РЧ-цепи (отображение один к одному). При пространственном распределении векторы информационных символов из всех пространственно-временных потоков распределяются для всех РЧ-цепей с помощью умножения на особые матрицы. Режим направленной передачи (Beamforming) подобен пространственному распределению потоков, но все передаваемые символы распределяются на все антенны.

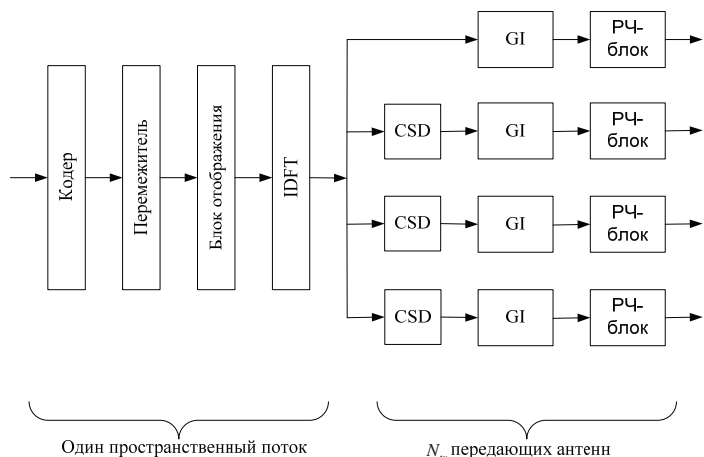


Рис. 1. Структурная схема передатчика для одного пространственного потока и N_{tx} передающих антенн.

Технология STC

Режим STC используется для повышения помехоустойчивости и применяется только в тех случаях, когда число пространственно-временных потоков больше, чем число пространственных потоков, т.е. $N_{STS} > N_{SS}$ [0, 0]. В этом случае N_{SS} потоков отображается в N_{STS} потоков, которые передаются с помощью N_{TX} РЧ-блоков. В качестве STC-кодов используются блочные коды, вид которых указывается в специальном сигнальном поле.

Когда используется режим STC, на вход STC-кодера поступает последовательность комплексных информационных символов, обозначенных в стандарте для каждой поднесущей как $d_{i,n}$, $i=1,...,N_{SS}$. Для каждой поднесущей и i -го символа на выходе STC-кодера образуется два символа $d_{i,2n}$ и $d_{i,2n+1}$ для четных и нечетных временных интервалов, соответственно, при этом $i=1,...,N_{STS}$.

Пространственное мультиплексирование

Рассмотрим технологию отображения пространственных потоков на РЧ-цепи, к которой относится технология пространственного мультиплексирования. На передающей части вектор выходных сигналов блока отображения сигнального созвездия распределяется между всеми РЧ-цепями. Этот режим может применяться, когда число РЧ-цепей для передачи больше, чем число пространственно-временных потоков, т.е. когда $N_{STS} < N_{TX}$.

Отображение потоков на РЧ-цепи подразумевает распределение пространственных потоков между антеннами и является частным случаем прекодирования. В стандарте 802.11n в этом режиме предусмотрены следующие виды отображений [0]: прямое отображение, косвенное отображение, пространственное расширение и режим направленной передачи (Beamforming).

При прямом отображении используется диагональная матрица \mathbf{Q} , которая может являться единичной матрицей $\mathbf{Q}=\mathbf{I}$, или матрица \mathbf{Q} является матрицей CSD, в которой диагональные элементы матрицы представляют собой цик-

лические сдвиги во временной области, т.е. $[Q]_{i,i} = \exp(-j2\pi\Delta\tau_{CS}^i)$, где τ_{CS}^i , $i=1,...,N_{tx}$ представляет собой сдвиг во времени (CSD, применяемый для одной из N_{tx} РЧ-цепей. При косвенном отображении матрица \mathbf{Q} может быть произведением матрицы CSD и квадратной унитарной матрицы, такой как матрица Адамара или матрица Фурье [0].

В режиме пространственного мультиплексирования матрица \mathbf{Q} является произведением матрицы CSD и квадратной матрицы, образованной из ортогональных столбцов. Например, пространственное мультиплексирование может быть выполнено путем дублирования некоторых из N_{STS} потоков для формирования N_{tx} потоков по числу передающих антенн, причем каждый поток масштабируется с помощью нормирующего коэффициента $\sqrt{N_{STS}/N_{tx}}$. Пространственное мультиплексирование может быть выполнено с использованием, например, одной из следующих матриц, обозначенной в стандарте 802.11n как \mathbf{D} , умноженной слева на матрицу CSD, обозначенную в стандарте 802.11n как \mathbf{M}_{CSD} , и/или умноженной на любую квадратную унитарную матрицу. Тогда результирующая матрица пространственного отображения имеет вид $\mathbf{Q}=\mathbf{M}_{CSD} \cdot \mathbf{D}$, где матрица \mathbf{D} , например, для случая $N_{tx}=3$ РЧ-цепей и $N_{STS}=1$ имеет вид $\mathbf{D}=\frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$.

Технология направленной передачи (Beamforming)

Технология Beamforming также является частным случаем прекодирования и представляет собой технологию формирования лучей диаграммы направленности многоэлементной антенной системы ММО, при этом на передающей стороне в блоке формирования лучей (Beamformer) используется формирующая матрица \mathbf{Q} , которая позволяет улучшить характеристики приема на основе сведений о состоянии канала (CSI) между передатчиком и приемником, а на приемной стороне лучи обрабатываются в блоке обработки лучей (Beamformee).

Модель канала ММО подразумевает передачу вектора \mathbf{s} размера $N_{tx} \times 1$ для каждой поднесущей, при этом вектор принимаемых сигналов \mathbf{y} размера $N_{rx} \times 1$ для каждой поднесущей имеет вид:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta} \quad (1)$$

где \mathbf{H} – матрица канала ММО размера $N_{rx} \times N_{tx}$; $\boldsymbol{\eta}$ – аддитивный белый гауссовский шум в канале связи.

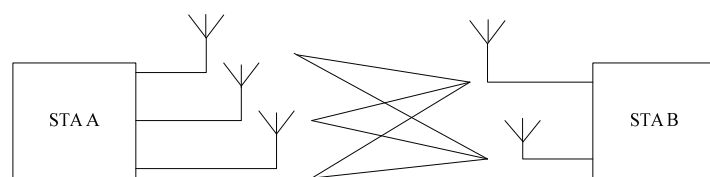


Рис. 2. Упрощенная модель системы ММО для конфигурации 3x2 в режиме Beamforming

Упрощенная модель системы ММО для конфигурации 3×2 в режиме Beamforming приведена на Рис. 2. Здесь передающая станция обозначена как STA A, а приемная станция обозначена как STA B. При использовании технологии Beamforming вектор \mathbf{s} в (1) заменяется на вектор $\mathbf{Q} \cdot \mathbf{s}$, при этом $N_{STC} \leq N_{tx}$ и матрица \mathbf{Q} имеет размер $N_{tx} \times N_{STC}$. В результате получим следующую модель [0]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta} \quad (2)$$

Формирующая матрица вычисляется заново или обновляется в зависимости от ситуации с помощью информации CSI. В результате измерений параметров канала ММО новая матрица \mathbf{Q} заменяет текущую формирующую матрицу для следующей передачи данных в режиме Beamforming. Существует несколько видов направленной передачи, которые определяются способом получения информации о матрице канала \mathbf{H} , при этом блок Beamformer может генерировать матрицу \mathbf{Q} или блок Beamformee может передавать по обратной связи блоку Beamformer информацию, необходимую для генерирования матрицы \mathbf{Q} .

При временном дуплексе для применения технологии Beamforming возможно использовании неявной обратной связи, когда для получения информации CSI используется свойство взаимности канала ММО: канал от передающей и приемной станции имеют одинаковые характеристики. При этом станция STA B передает пилот-сигнал, по которому станция STA A оценивает параметры канала ММО (в направлении от STA B к STA A) и формирует матрицу \mathbf{Q} для передачи данных для STA B в режиме Beamforming.

2. Применение технологии ММО в стандарте 802.11ac

В отличие от стандарта 802.11n, в стандарте 802.11ac используются станции с очень высокой пропускной способностью (Very High Throughput, VHT). Станция VHT – это станция стандарта 802.11n, дополнительно поддерживающая функции VHT, которые определены в дополнительных разделах объединенного стандарта IEEE 802.11.

Физический уровень VHT обеспечивает обязательную поддержку значений ширины полосы частот канала 40 МГц и 80 МГц и опциональную поддержку ширины полосы частот канала 160 МГц. При этом поднесущие данных модулируются с использованием модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM. В стандарте 802.11ac в качестве помехоустойчивого кодирования используется сверточное кодирование или LDPC-кодирование со скоростями кодирования $1/2$, $2/3$, $3/4$ и $5/6$ [0].

В стандарте 802.11ac по сравнению со стандартом 802.11n используется более широкая полоса частот каналов, более высокая кратность модуляции, больше число пространственных потоков (антенн ММО) и многопользовательская (Multiuser, MU) технология ММО на нисходящей линии (Downlink, DL) с поддержкой до 8 антенн.

При ширине полосы частот канала 80 МГц и четырех пространственных потоках максимальная скорость передачи данных составляет 1733,3 Мбит / с, а при ширине полосы частот канала 160 МГц и четырех пространственных потоках максимальная скорость передачи данных составляет

3466,7 Мбит/с. Максимальное количество пространственных потоков увеличено с 4 (стандарт 802.11n) до 8 потоков (8 антенн). При ширине полосы частот канала 160 МГц и 8 пространственных потоках максимальная скорость передачи данных составляет 6933,3 Мбит/с.

Параметры схем модуляции и кодирования

Параметры для полного набора схем модуляции и кодирования (MCS) в стандарте 802.11ac, которые зависят от скорости передачи данных, приведены в документе [0]. Эти параметры зависят от скорости передачи данных и приведены для схем VHT-MCS с индексами от 0 до 9, числа пространственных потоков N_{ss} от 1 до 8 и ширины полосы частот канала 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц и 160 МГц (табл. 2) [0, 0].

Таблица 2

Параметры схем VHT-MSC для канала 160 МГц и 8 пространственных потоков (стандарт 802.11ac)

Индекс VHT-MSC	Вид модуляции	Скорость кодирования	Скорость передачи данных, Мбит/с
0	BPS	1/2	520
1	QPS	1/2	1040
2	QPS	3/4	1560
3	16-QAM	1/2	2080
4	16-QAM	3/4	3120
5	64-QAM	2/3	4160
6	64-QAM	3/4	4680
7	64-QAM	5/6	5200
8	256-QAM	3/4	6240
9	256-QAM	5/6	6933,3

Технологии направленной передачи (Beamforming)

Технология направленной передачи (Beamforming) в стандарте 802.11ac [0, 0] применяется в однопользовательском режиме SU-MIMO и в многопользовательском режиме MU-MIMO [0, 0, 0] на линии DL. Технология Beamforming реализуется в блоке формирования лучей диаграммы направленности (Beamformer) для управления передачей сигналов с использованием информации о состоянии канала с целью повышения пропускной способности системы ММО.

В режиме SU-MIMO при формировании лучей диаграммы направленности все передаваемые пространственно-временные потоки предназначены для приема одной станцией. В режиме MU-MIMO непересекающиеся подмножества передаваемых пространственно-временных потоков предназначены для приема разными станциями.

Для формирования лучей диаграммы направленности в режиме SU-MIMO формирующая матрица \mathbf{Q} может быть вычислена с помощью матрицы обратной связи формирования диаграммы лучей направленности \mathbf{V} , которая отправляется по обратному каналу в блок формирования лучей диаграммы направленности от блока обработки лучей приемной стороны.

Для формирования диаграммы направленности в режиме MU-MIMO вектор принимаемых сигналов для каждой поднесущей на входе u -го блока Beamformee может быть записан в виде (3), где вектор \mathbf{s} передаваемых сигналов имеет

размер $K_{us}N_{STS} \times 1$ для каждой поднесущей для всех блоков Beamformee K_{us} пользователей. При этом предполагается, что для каждого пользователя предназначено N_{STS} пространственных потоков, т.е. для u -го блока Beamformee предназначен вектор \mathbf{s} размера $N_{STS} \times 1$.

Для случая нескольких пользователей модель сигнала u -го пользователя на входе приемника с учетом применения технологии направленной передачи для одной поднесущей принимает следующий вид:

$$\mathbf{y}_u = \mathbf{H}_u \times [\mathbf{Q}_0, \mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_{K_{us}-1}] \times \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta} \quad (3)$$

где \mathbf{H}_u – матрица канала для u -го пользователя размерностью $N_{rx_u} \times N_{tx}$; N_{rx_u} – количество приемных антенн блока обработки лучей u -го пользователя; \mathbf{Q}_u – формирующая матрица для u -го пользователя размерностью $N_{tx} \times N_{STS_u}$, K_{us} – число пользователей, которые принимают потоки данных в многопользовательском режиме; $\boldsymbol{\eta}$ – вектор аддитивного шума в канале связи.

Формирующая матрица $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_0, \mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_{K_{us}-1}]$ в режиме MU-MIMO может быть определена для блока Beamformer с использованием матриц обратной связи (матрицы \mathbf{V}_u) для каждой поднесущей, получаемых из информации с приемной стороны от блока Beamformee u -го пользователя и информации об отношении сигнал/шум для каждой поднесущей от блока Beamformee u -го пользователя (SNR_u), где $u = 0, 1, \dots, K_{us} - 1$.

Матрица обратной связи в режиме направленной передачи (Beamforming)

Матрица обратной связи \mathbf{V}_u , формируемая в блоке Beamformee u -го пользователя для определенной поднесущей, представляется в сжатой форме с помощью информации об углах $\varphi(v)$ и $\psi(u)$, значения которых квантуются в соответствии со стандартом [0]. В блоке Beamformee генерируются матрицы для обратной связи с числом строк, равным числу пространственно-временных потоков N_{STS} . После получения информации о состоянии канала от приемной стороны на передающей стороне блок Beamformer восстанавливает матрицу \mathbf{V}_u .

В режиме MU-MIMO блок Beamformer может генерировать формирующую матрицу $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_0, \mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_{K_{us}-1}]$ с использованием информации \mathbf{V}_u и SNR_u для того, чтобы подавить взаимные помехи между участвующими в передаче потоков данными пользователями. Метод, используемый блоком Beamformer для вычисления формирующей матрицы \mathbf{Q} , выбирается изготовителем оборудования точки доступа самостоятельно.

3. Применение технологии MIMO в стандарте 802.11ax

Стандарт 802.11ax описывает физический уровень HE (High Efficiency, Высокая эффективность), в котором появляются следующие дополнительные возможности [0]. На физическом уровне максимальное количество пользователей, поддерживаемых для передачи в режиме MU-MIMO на нисходящей линии (DL), увеличивается до 8. Обеспечивается поддержка множественного доступа с ортогональным частотным разделением (OFDMA), а также режима MU-MIMO на нисходящей линии (UL).

Поднесущие физического уровня модулируются с использованием следующих видов модуляции: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM и 1024-QAM. При этом модуляция 1024-QAM введена дополнительно по сравнению со стандартом 802.11ac [0].

В режиме MU-MIMO на линии DL поддерживается до 8 пользователей, при этом каждый пользователь может иметь до 4 пространственных потоков с общим количеством пространственно-временных потоков не более 8. Станция должна поддерживать прием данных в режиме MU-MIMO на линии DL с числом пространственных потоков на пользователя не менее 4.

Режим MU-MIMO на линии UL позволяет нескольким станциям передавать данные точке доступа одновременно в одной и той же полосе частот. Ключевое отличие от режима SU-MIMO заключается в том, что в режиме MU-MIMO на линии UL передаваемые потоки поступают от нескольких станций.

В режиме MU-MIMO на линии UL максимальное число пространственных потоков на пользователя составляет 4. При этом общее число пространственных потоков (суммированных по всем пользователям) не превышает 8. Примеры параметров схем MSC для максимальной скорости передачи информации представлены в таблице 3 [0, 0].

Таблица 3

Параметры схем HE MSC для канала 160 МГц и 8 пространственных потоков [0, 0]

Индекс VHT-MSC	Вид модуляции	Скорость кодирования	Скорость передачи данных, Мбит/с
0	BPS	1/2	490
1	QPS	1/2	980
2	QPS	3/4	1470
3	16-QAM	1/2	1960
4	16-QAM	3/4	2940
5	64-QAM	2/3	3920
6	64-QAM	3/4	4410
7	64-QAM	5/6	4900
8	256-QAM	3/4	5880
9	256-QAM	5/6	6 533,3
10	1024-QA	3/4	7350
11	1024-QA	5/6	8 166,6

Следует отметить, что в стандартах 802.11n/ac/ax применяются такие виды прекодирования, как выбор антенн и технология Beamforming. Различные виды прекодирования широко применяются в стандартах 3GPP и в новом стандарте 802.11be.

4. Перспективы и проблемы применения технологии ММО в стандарте Wi-Fi 7

В стандарте IEEE 802.11be поддерживаются станции со сверхвысокой пропускной способностью. В работах [0, 0] был проведен достаточно полный обзор стандартизации систем 802.11be – следующего поколения Wi-Fi 7 после 802.11ax (Wi-Fi 6), в том числе, указаны цели и сроки стандартизации, новые функциональные возможности и проблемы реализации, а также результаты сравнительного анализа.

Для разработки новых стандартов Wi-Fi была создана рабочая группа 802.11be [0].

Цели, задачи и сроки разработки Wi-Fi 7

Для достижения целей, поставленных сообществом Wi-Fi, перед рабочей группой 802.11be ставятся следующие задачи – обеспечить добавление новых режимов работы, способных поддерживать максимальную пропускную способность не менее 30 Гбит/с. При этом планируется использование несущих частот в диапазоне от 1 до 7,125 ГГц, а также обеспечение обратной совместимости с устройствами предыдущих поколений [0].

Ожидается, что разработка стандарта 802.11be продлится пять лет и завершится в 2024 году. График работы включает выбор основных функций в 2020 году, выпуск версий проектов в 2021 – 2023 годах и сертификацию продукции в 2023 – 2024 годах [0, 0].

В Wi-Fi 7 планируется обязательное использование каналов шириной 160 МГц и опциональное использование каналов шириной 320 МГц, а также более эффективное использование несмежных полос радиочастотного спектра. Кроме того, продолжатся исследование наиболее эффективных подходов использования потенциально доступной полосы частот шириной порядка 1 ГГц в диапазоне 5,925-7,125 ГГц [0].

Повышение эффективности использования частотных диапазонов

После появления станций, работающих в нескольких диапазонах (например, 2,4, 5 и 6 ГГц), в стандарте 802.11be ставится цель более эффективного использования этих диапазонов с помощью следующих функций [0].

Для достижения пиковой пропускной способности разрабатывается функция агрегирования частотных полос в нескольких диапазонах для передачи или приема данных [0]. Для организации полнодуплексной связи и уменьшения задержек в системах Wi-Fi планируется использовать функцию одновременной передачи и приема в разных частотных полосах и каналах на линиях UL и DL [0].

Функция одновременной передачи и приема в одном частотном канале называется полнодуплексным режимом (Full Duplex) и ее планируется использовать в системах Wi-Fi [0].

Применение технологии ММО в Wi-Fi 7

В стандарте 802.11be планируется обеспечить 16 пространственных потоков с помощью усовершенствованной технологии ММО. В стандарте 802.11ac на стороне точки доступа обеспечивается до 8 пространственных потоков для 4 станций в режиме MU-MIMO на линии DL [0]. В стандарте 802.11ax на стороне точки доступа также обеспечивается до

8 пространственных потоков, но при этом поддерживается одновременная передача данных до 8 станций (по одному потоку на каждую) как в нисходящем, так и восходящем направлениях [0].

В стандарте 802.11be рассматривается возможность применения процедуры неявного оценивания параметров канала, которая основывается на передаваемых станциями пилот-сигналах и использует свойство взаимности каналов восходящей/нисходящей линий связи [0].

Координация множественного доступа систем MU-MIMO

В стандарте 802.11be планируется использовать координацию совместной работы соседних точек доступа для оптимизации использования доступных временных, частотных и пространственных ресурсов, что обеспечит улучшение характеристик системы Wi-Fi [0].

Совместная координация доступа позволяет нескольким точкам доступа синхронизировать передачу данных и использовать ортогональные временные/частотные ресурсы. Такое скоординированное использование ресурсов снижает вероятность коллизий по сравнению со сценариями, когда точки доступа используют несогласованные процедуры доступа к каналам на основе конкуренции [0]. Применение такого подхода позволит минимизировать задержки передачи небольших пакетов данных.

Координированное формирование лучей диаграммы направленности в режиме Beamforming подразумевает отсутствие излучения в направлении зоны действия соседней точки доступа с целью минимизации взаимных помех. В режиме направленной передачи точки доступа могут формировать диаграммы направленности антенн таким образом, чтобы минимизировать излучения в направлении не связанных с ними станций (относящихся к другим точкам доступа), т.е. в направлении этих устройств формируются нули диаграмм направленности.

Применение технологии Distributed MIMO (D-MIMO), которая является наиболее сложным решением с точки зрения координации в 802.11be, также позволит более эффективно использовать ресурсы системы Wi-Fi. В режиме D-MIMO точки доступа выполняют совместную передачу и/или прием данных от множества станций, повторно используя одни и те же временные/частотные ресурсы [0, 0]. По сравнению с системами Wi-Fi, в которых точки доступа осуществляют передачу и/или прием данных независимо, тесное взаимодействие между точками доступа в режиме D-MIMO позволит улучшить зону покрытия за счет минимизации помех между соседними точками доступа [0], [0].

Совместимость устройств 802.11be при работе в разных диапазонах

В стандарте 802.11be планируется в полной мере использовать полосу более 1 ГГц в диапазоне 6 ГГц [0]. Предполагается, что в этом диапазоне будут совместно работать системы стандартов 802.11ax и 802.11be, а также системы на основе стандартов 3GPP [0].

Для получения максимального теоретического выигрыша в пропускной способности (примерно в четыре раза) системы 802.11be по сравнению с системой 802.11ax потребуются дополнительные алгоритмы координации между точками доступа.

Кроме того, необходимо исследовать совместное использование устройств 802.11be и устройств предыдущих версий стандарта 802.11, выполняющих, например, доступ на основе конкуренции. Решение этих и других задач как раз и планируется завершить до 2024 года, когда будет закончена разработка нового стандарта 802.11be систем Wi-Fi 7.

Выводы

Стандарты Wi-Fi и 3GPP развиваются в течение нескольких десятков лет и используют технологии и режимы MIMO с целью повышения скоростей передачи данных таких систем. В 2019 году началась разработка стандарта Wi-Fi 7 (802.11be), основные функции которого с точки зрения технологии MIMO были рассмотрены в настоящей статье. Проведено сравнение Wi-Fi 7 (802.11be) с последним существующим стандартом Wi-Fi 6 (802.11ax).

Следует отметить, что технологии MIMO в стандартах Wi-Fi внедряются быстрее, благодаря более благоприятным условиям передачи по радиоканалу по сравнению с системами мобильной связи стандартов 3GPP. Это объясняется тем, что в системах Wi-Fi абоненты либо неподвижны, либо перемещаются со скоростью пешехода, в то время как в системах мобильной связи стандартов 3GPP абоненты перемещаются со скоростями 100 км/ч и выше. При высоких скоростях движения абонентов возникают быстрые замирания, которые ухудшают точность оценивания параметров канала связи, что приводит к затруднению использования технологии MIMO.

В стандартах 3GPP используются и развиваются технологии MIMO, уже внедренные в системах Wi-Fi, с увеличением числа антенн и усложнением алгоритмов обработки сигналов [0, 0].

Литература

1. Foschini G. J. and Gans M. J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas // *Wireless Personal Communication*. Vol. 6. № 3. Mar. 1998. P. 311.
2. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 244 с.
3. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Martezza T.L. Massive MIMO for next generation wireless systems // *Communications Magazine*, IEEE. 2014. Vol. 52, issue: 2. P. 186-195.
4. Bakulin M. G., Kreindelin V. B. and Pankratov D. Y. Analysis of the capacity of MIMO channel in fading conditions // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-6.
5. IEEE 802.11n Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, 2009.
6. IEEE 802.11ac Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz, 2013.
7. IEEE 802.11ax Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11:

Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN, 2019.

8. 3GPP TS 36.871 v.11.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Downlink Multiple Input Multiple Output (MIMO) enhancement for LTE-Advanced (Release 11), 2011.

9. ETSI TS 136 201 V15.1.0 (2018-07) LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description (3GPP TS 36.201 version 15.1.0 Release 15), 2018.

10. 3GPP TS 36.211 V15.10.0 (2020-06) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 15), 2020.

11. Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э., Бен Режеб Т.Б.К. Эффективность методов обработки сигналов в системах MU-MIMO высоких порядков // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2016. Том 10. №12. С. 24-30.

12. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications // *IEEE JSAC*, Vol. 16, № 8, Oct. 1998. P. 1451–1458.

13. Spencer Q. H. et al. An Introduction to the Multi-User MIMO Downlink // *IEEE Commun. Mag.* Vol. 42. № 10. Oct. 2004. P. 60-67.

14. Wang F., Bialkowski M.E. Performance of Block Diagonalization Scheme for Downlink Multiuser MIMO System with Estimated Channel State Information // *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, 2011, № 4, pp. 82-87.

15. Hanzo Lajos and others, MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo-Tranceivers / Lajos Hanzo, Yosef (Jos) Akhtman, Li Wang, Ming Jiang. John Wiley & Sons, 2010. 692 p.

16. Eldad Perahia, Robert Stacey. Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac, 2nd Edition, UK, Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 445 p.

17. D. Lopez-Perez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin and K. Doppler. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax // *IEEE Communications Magazine*. Vol. 57. № 9, pp. 113-119, September 2019.

18. Telecom Advisory Services, LLC, “The Economic Value of Wi-Fi: A Global View (2018 and 2023)”, Aug. 2018.

19. Chen X. et al., “Discussions on the PHY features for EHT”, IEEE 802.11-18/1461r0, Sep. 2018.

20. Po-Kai, L. Cariou, R. Stacey, D. Bravo, A. Klein, and C. Cordeiro. Multi-link operation framework. IEEE 802.11-19/0773r1, Jul. 2019.

21. Xin Y. et al. Technical Report on Full Duplex for 802.11. IEEE 802.11-18/0498r6, Sep. 2018.

22. Hart B., Klover D., Myles A., Desai V., Monajemi P. and Taneja M. Recommended direction for EHT. IEEE 802.11-18/1549r0, Sep. 2018.

23. López-Pérez D., Kasslin M., Rantala E., Torkildson E., Galati L., and Garcia-Rodriguez A. Distributed MU-MIMO architecture design considerations. IEEE 802.11-18/1190r0, Jan. 2019.

24. Porat R. and Puducheri S. Constrained Distributed MU-MIMO. IEEE 802.11-18/1439r0, Sep. 2018.

25. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 280 с.

26. Pankratov D. and Stepanova A. Linear and Nonlinear Chebyshev Iterative Demodulation Algorithms for MIMO Systems with Large Number of Antennas // 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 2019. P. 307-312.

27. Kreindelin, D.Y. Pankratov, A.G. Stepanova. Chebyshev type nonlinear iterative demodulation algorithm for MIMO systems with large number of antennas // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 2020, 79(13). P. 1109-1119.

APPLICATION OF MIMO TECHNOLOGY IN MODERN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS OF DIFFERENT GENERATIONS

Mikhail G. Bakulin, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia, m.g.bakulin@gmail.com

Vitaly B. Kreyndelin, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia, vitkrend@gmail.com

Denis Y. Pankratov, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia, dpankr@mail.ru

Abstract

Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology is widely used in modern IEEE radio access systems. There is a tendency to increase the number of antennas, which is also confirmed by the development of MIMO technology in mobile communication systems of 3GPP standards. Requirements for modern radio communication systems are constantly increasing. As the radio frequency spectrum becomes increasingly scarce, it becomes increasingly difficult to transmit large amounts of information by expanding the frequency channel bandwidth. Therefore, the use of MIMO technology to increase the spectral and energy efficiency of communication systems is relevant. In 5G systems, Massive MIMO technology is used, when using which the number of antennas is measured in tens and hundreds. The characteristics of various versions of MIMO technology implemented in the existing standards 802.11n, 802.11ac, 802.11ax, as well as in the promising standard 802.11be (6G systems) are described in detail. Technologies of directional transmission, spatial multiplexing, selection of antennas as particular cases of precoding are considered. Trends of MIMO technology development in wireless communication systems are shown.

Keywords: MIMO, Massive MIMO, 5G, IEEE, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax, 802.11be, Wi-Fi, Beamforming.

References

1. G. J. Foschini and M. J. Gans, (1998) "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas, *Wireless Personal Communication*. Vol. 6. No. 3, Mar. 1998. P. 311.
2. Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreindelin V.B. (2014). MIMO Technology: Principles and Algorithms. Moscow: Hotline - Telecom. 244 p.
3. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Martezza T.L. (2014) Massive MIMO for next generation wireless systems. *Communications Magazine, IEEE*. Vol. 52, issue: 2. P. 186-195.
4. M. G. Bakulin, V. B. Kreindelin and D. Y. Pankratov (2018) "Analysis of the capacity of MIMO channel in fading conditions," *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, 2018. P. 1-6.
5. IEEE 802.11n Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, 2009.
6. IEEE 802.11ac Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz, 2013.
7. IEEE 802.11ax Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN, 2019
8. 3GPP TS 36.871 v.11.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Downlink Multiple Input Multiple Output (MIMO) enhancement for LTE-Advanced (Release 11), 2011.
9. ETSI TS 136 201 V15.1.0 (2018-07) LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description (3GPP TS 36.201 version 15.1.0 Release 15), 2018
10. 3GPP TS 36.211 V15.10.0 (2020-06) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 15), 2020.
11. Kreyndelin V.B., Smirnov A.E., Ben Rejeb T.B.K. (2016) Efficiency of signal processing in multiuser large scale MIMO systems. *T-Comm*. Vol. 10. No.12. P. 24-30. (In Russian)

12. S. M. Alamouti (1998) "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", IEEE JSAC, Vol. 16, № 8, Oct. 1998. P. 1451-1458.
13. Q. H. Spencer et al. (2004) "An Introduction to the Multi-User MIMO Downlink" IEEE Commun. Mag., Vol. 42, № 10, Oct. 2004. P. 60-67.
14. Wang F., Bialkowski M.E. (2011) Performance of Block Diagonalization Scheme for Downlink Multiuser MIMO System with Estimated Channel State Information. Int. J. Communications, Network and System Sciences. No. 4. P. 82-87.
15. Hanzo Lajos et al. (2010), MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX: Coherent versus Non coherent and Cooperative Turbo-Tranceivers / Lajos Hanzo, Yosef (Jos) Akhtman, Li Wang, Ming Jiang. John Wiley & Sons. 692 p.
16. Eldad Perahia, Robert Stacey (2013), Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac, 2nd Edition, UK, Cambridge, Cambridge University Press. 445 p.
17. D. Lopez-Perez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin and K. Doppler (2019) "IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax," IEEE Communications Magazine. Vol. 57. No. 9. P. 113-119, September 2019.
18. Telecom Advisory Services, LLC, "The Economic Value of Wi-Fi: A Global View (2018 and 2023)", Aug. 2018.
19. X. Chen et al. (2018), "Discussions on the PHY features for EHT", IEEE 802.11-18/1461r0, Sep. 2018.
20. Po-Kai, L. Cariou, R. Stacey, D. Bravo, A. Klein, and C. Cordeiro (2019), "Multi-link operation framework", IEEE 802.11-19/0773r1, Jul. 2019.
21. Y. Xin et al. (2018) "Technical Report on Full Duplex for 802.11", IEEE 802.11-18/0498r6, Sep. 2018.
22. B. Hart, D. Klover, A. Myles, V. Desai, P. Monajemi, and M. Taneja (2018) "Recommended direction for EHT", IEEE 802.11-18/1549r0, Sep. 2018.
23. D. Lopez-Perez, M. Kasslin, E. Rantala, E. Torkildson, L. Galati, and A. Garcia-Rodriguez (2019) "Distributed MU-MIMO architecture design considerations", IEEE 802.11-18/1190r0, Jan. 2019.
24. R. Porat and S. Puducheri (2018) "Constrained Distributed MU-MIMO", IEEE 802.11-18/1439r0, Sep. 2018.
25. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Pankratov D.Y. (2014) Technologies in Radio Communication Systems on the Way to 5G. Moscow: Hotline - Telecom. 280 p.
26. D. Pankratov and A. Stepanova (2019) "Linear and Nonlinear Chebyshev Iterative Demodulation Algorithms for MIMO Systems with Large Number of Antennas," 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia. P. 307-312.
27. Kreindelin, D.Y. Pankratov, A.G. Stepanova (2020) "Chebyshev type nonlinear iterative demodulation algorithm for MIMO systems with large number of antennas" Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). No.79(13). P. 1109-1119.

Information about authors:

Mikhail G. Bakulin, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), PhD, associate Professor, Moscow, Russia

Vitaly B. Kreindelin, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Doctor of technical science, Professor, Moscow, Russia

Denis Y. Pankratov, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), PhD, associate Professor, Moscow, Russia