

Введение

Беспроводная мобильная связь является одной из наиболее быстро развивающихся технологий в наши дни. Каждое новое поколение связи появляется примерно один раз в десять лет. На момент написания данной книги (2022–2023 гг.) широкое распространение во многих странах мира уже получили системы связи пятого поколения (5G), которые также непрерывно развиваются [11].

В последние несколько лет в сетях мобильной связи отмечается стремительный рост объемов и скоростей передачи данных (например, высококачественное видео, онлайн-игры и др.) при одновременном существенном снижении доли голосовой связи. При этом число абонентов (пользователей) и сам объем передаваемых данных очень быстро растут. Следует отметить, что серьезному увеличению числа абонентов в сети способствует быстрое развитие различных технологий Интернета вещей (Internet of Things — IoT) и технологий межмашинной связи M2M (Machine-To-Machine — M2M), что существенно повышает требования к емкости сети связи [12].

Эти обстоятельства приводят к ускорению развития сетей 5G. Взрывной рост объемов передачи данных и числа абонентов является также причиной проведения интенсивных исследований во всем мире (включая Россию), направленных на разработку новых систем связи, следующих за 5G (Beyond 5G — B5G), а также перспективных систем связи шестого поколения (6G).

Одной из важнейших технологий во всех поколениях систем мобильной связи является используемый метод разделения сигналов абонентов (т. е. метод доступа). В системах мобильной связи первого, второго, третьего и четвертого поколений (1G, 2G, 3G и 4G) использовались исключительно различные методы ортогонального множественного доступа (Orthogonal Multiple Access — OMA) [14].

Системы связи с ортогональным доступом основаны на принципах разделения во временной области, в частотной области

или кодовой области (или какой-либо их комбинации). Методы ОМА предполагают использование простых (с точки зрения вычислительной сложности) однопользовательских приемников. Однако число пользователей в системе ОМА жестко ограничено числом имеющихся ортогональных ресурсов (временных, частотных или кодовых). Поэтому для повышения емкости системы связи требуется увеличение числа таких ортогональных ресурсов. Кроме того, в системе ОМА требуется обеспечить высокую точность временной и частотной синхронизации, чтобы гарантировать сохранение ортогональности используемых ресурсов.

Поэтому возможности ортогонального доступа практически исчерпаны и дальнейшее улучшение качественных показателей систем связи оказывается возможным путем применения методов неортогонального множественного доступа (Non-Orthogonal Multiple Access — NOMA).

Технология NOMA, наряду с традиционными технологиями ОМА, постепенно находит применение в системах 5G. Кроме того, NOMA рассматривается как перспективная технология для будущих систем B5G (системы связи, следующие после систем 5G — Beyond 5G) и 6G. Это объясняется тем, что эта технология позволяет обслуживать сразу несколько пользователей, используя только один ортогональный ресурс (временной, частотный или кодовый).

Существующие разновидности технологии неортогонального доступа можно сгруппировать в виде двух направлений [16]. Первое направление — множественный доступ с разделением по мощности (Power Domain NOMA — PD-NOMA). В этом случае разделение сигналов пользователей, передаваемых в одном ортогональном ресурсе, осуществляется за счет использования разницы в их мощностях. Второе направление — множественный доступ с разделением по структуре сигнала [233, 234]. Здесь разделение сигналов пользователей основано на использовании специально выбранных кодовых последовательностей. Среди методов доступа по структуре сигнала к настоящему времени разработано много разновидностей, некоторые из которых рассматриваются в данной книге.

Следует обратить внимание еще на один аспект. Некоторые виды неортогонального доступа NOMA могут быть использованы совместно с традиционными методами ортогонального доступа ОМА. Например, PD-NOMA легко может быть скомбинирован с любым методом ОМА, когда сигналы нескольких пользовате-

лей с разными мощностями могут использовать один общий ортогональный ресурс. Такое совместное использование технологий NOMA и OMA позволяет эффективно использовать преимущества обеих этих технологий и получить более высокую емкость (что является критически важным при построении сетей Интернета вещей) и спектральную эффективность системы связи.

Различные методы неортогонального множественного доступа рассматриваются в рамках процесса международной стандартизации с целью их включения в существующие и перспективные стандарты систем мобильной связи 5G, B5G и 6G. В частности, рассматриваются следующие методы, предложенные в последние годы [233, 234]:

- множественный доступ кодовым разделением с прореженными последовательностями (Low Density Spreading Code Division Multiple Access — LDS-CDMA);
- множественный доступ с прореженным кодовым разделением (Sparse Code Multiple Access — SCMA);
- множественный доступ с разделением по перемежению (Interleave Division Multiple Access — IDMA);
- множественный доступ с разделением по шаблону (Pattern Domain Multiple Access — PDMA);
- многопользовательский общий доступ (Multi-User Shared Access — MUSA).

Для указанных методов неортогонального доступа приведены структуры передаваемых сигналов, а также возможные методы приема таких сигналов.

Следует также отметить, что основной проблемой, препятствующей широкому использованию на практике неортогонального множественного доступа, является проблема высокой вычислительной сложности алгоритмов демодуляции. Исследования, посвященные поиску и практической реализации алгоритмов демодуляции для систем NOMA с приемлемой для реализации в системах 5G/6G вычислительной сложностью, интенсивно ведутся во всем мире, в том числе и в России.

В настоящее время известна и широко используется в различных системах связи технология многоантенной передачи и приема («много входов — много выходов», Multiple Input — Multiple Output — MIMO). Технология MIMO позволяет многократно увеличить спектральную эффективность системы связи по сравнению с традиционной технологией передачи и приема на

одну антенну. Поэтому представляется важным рассмотреть возможности такого совместного использования технологий ММО и NОМА, чтобы сохранились преимущества обеих технологий. Здесь нужно отметить, что проблема высокой вычислительной сложности алгоритмов демодуляции стоит более остро при совместном использовании технологий ММО и NОМА. Соответствующие исследования проводятся во многих странах, но пока проблема еще далека от своего решения.

Исследованиям технологии неортогонального доступа в последние годы в мире уделяется много внимания, выходит множество публикаций по этому вопросу. Несмотря на важность и очевидную перспективность данной темы, в настоящее время на русском языке отсутствуют книги, в которых бы содержалось систематическое изложение известных на сегодняшний день методов неортогонального множественного доступа. Имеются только весьма немногочисленные журнальные статьи и доклады на конференциях, посвященные отдельным аспектам применения технологии неортогонального доступа [165, 234, 235]. В настоящей книге предпринята попытка, конечно, не претендующая на полноту, устранить этот пробел.

Книга организована следующим образом. В **первой** главе приводятся общие сведения о системах мобильной связи 5G/6G. Кратко рассмотрена история поколений систем мобильной связи, описаны основные известные методы ортогонального множественного доступа ОМА (с частотным, временным и кодовым разделением, а также с ортогональным частотным мультиплексированием).

Во **второй** главе описаны основные сведения о неортогональном множественном доступе, приведена классификация различных методов неортогонального доступа. Рассмотрено использование идей кооперации и «справедливости», а также технологий полного дуплекса и искусственного интеллекта при построении систем мобильной связи с неортогональным множественным доступом.

В **третьей** главе рассмотрено представление системы неортогонального множественного доступа с общих позиций теории связи. Сделана попытка статистической идентификации систем множественного доступа. Приведены различные варианты обобщенной модели системы неортогонального множественного доступа NОМА, которые распространяются на большинство его разновидностей.

В четвертой главе описаны системы неортогонального множественного доступа с разделением по мощности PD-NOMA. Приведены алгоритмы распределения мощности между пользователями и алгоритмы демодуляции, а также рассмотрено использование принципа кооперации в системах связи, использующих технологию PD-NOMA. Рассмотрены также преимущества и недостатки PD-NOMA по сравнению системами NOMA с кодовым разделением.

В пятой главе описаны системы неортогонального множественного доступа со структурным разделением. Приведены, в частности, методы доступа, основанные на прореженном кодовом разделении пользователей SCMA, на разделении по перемежению IDMA, на разделении по шаблону PDMA и на общем доступе MUSA, а также на разделении сигналов с расширением спектра на основе последовательностей Велча WSMA.

В шестой главе рассмотрена проблема совместного использования технологий неортогонального множественного доступа NOMA и многоантенной передачи MIMO. Описаны модель системы связи, проблема группирования пользователей и различные варианты комбинирования указанных технологий.

В приложениях приведены дополнительные справочные материалы по современной теории матриц, а также по комплексным случайным величинам, векторам и матрицам.

Авторы выражают благодарность за поддержку в работе Киму Дмитрию Матвеевичу, Привезенцеву Антону Викторовичу, Гридину Герману Михайловичу, Потапович Светлане Алексеевне и Овсянниковой Елене Анатольевне.

В.В. Крейнделин благодарит свою супругу Светлану за неоценимую поддержку в написании этой книги.

Д.Ю. Панкратов благодарит свою супругу Евгению и детей за поддержку в написании книги.