

НЕОРТОГОНАЛЬНЫЙ МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

Е.В. Кокорева, заведующий кафедрой «Системы мобильной связи» Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, к.т.н., доцент, elen.vik@gmail.com

УДК 621.396

Аннотация. Эволюция систем мобильной связи от 4G к 5G требует внедрения новых технологий, повышающих скорость передачи и абонентскую емкость, а также значительно уменьшающих задержку в канале. Статья посвящена обзору перспективных методов множественного доступа, применение которых позволяет повысить спектральную эффективность в 3-5 раз по сравнению с системами четвертого поколения.

Ключевые слова: множественный доступ; системы мобильной связи; 3GPP; 5G; NOMA; SCMA; N-OFDM; F-OFDM.

NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS IN 5G MOBILE COMMUNICATIONS

Elena Kokoreva, head of «Mobile systems department» of Siberian state university of telecommunications and information sciences, Ph. D, assistant professor.

Annotation. The evolution of mobile communications from 4G to 5G requires the introduction of new technologies that increase the transmission speed and subscriber capacity, as well as significantly reduce the delay in the channel. This article is a review of promising multiple access methods, the application of which allows to increase the spectral efficiency by 3-5 times in comparison with fourth generation systems.

Keywords: multiple access; mobile communications; 3GPP; 5G; NOMA; SCMA; N-OFDM; F-OFDM.

С развитием интернета вещей IoT (англ. Internet of Things) повышаются требования к инфокоммуникационным технологиям. Объем трафика в системах мобильной связи растет бурными темпами и возникает необходимость в увеличении пропускной способности каналов. С внедрением новых мобильных сервисов увеличивается число зарегистрированных абонентов и одновременно подключенных к сети устройств.

Стандарт 5G консорциума 3GPP определяет следующие характеристики систем нового поколения [1, 2]:

- скорость передачи не менее 10 Гбит/с;
- одновременное подключение до 100 млн устройств/км²;
- задержка в радиоканале не более 1 мс.

Для обеспечения заданных характеристик применяемая полоса частот должна иметь непрерывную ширину спектра 500-1000 МГц и занимать сантиметровый и/или миллиметровый диапазон электромагнитного спектра. В настоящее время рассматривается возможность выделения сетям 5G сетей диапазонов 24,25-27,5 ГГц и 37-43,5 ГГц для достижения пропускной способности 20 Гбит/с, хотя применение спектра частот ниже 6 ГГц уже согласовано Всемирной конференцией радиосвязи (ВКР) 2015 г., поскольку он обеспечивает хорошее радиопокрытие без высоких инвестиций (с меньшим количеством базовых станций), лучшее проникновение сквозь препятствия и является наилучшим вариантом для приложений, не требующих сверхвысоких скоростей.

Обеспечение спектральной эффективности достигается путем применения неортогональных сигналов FTN (англ. Faster-Than-Nyquist Signaling) и F-OFDM (англ. Fast Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) и неортогональных методов доступа, таких как NOMA (англ. Non-Orthogonal Multiple Access), SCMA (англ. Sparse Code Multiple Access). С их помощью спектральная эффективность систем пятого поколения может быть улучшена в 3-5 раз по сравнению с существующими системами мобильной связи четвертого поколения.

FTN сигналы были предложены сотрудником Bell Laboratories Д.Э. Мазо в 1975 г. [3]. Сигналы Мазо обрабатываются подобно OFDM (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), но передаются на неортогональных поднесущих. Если период базового сигнала составляет T , то у FTN сигнала период равен τT , где $\tau < 1$. Более высокая скорость модуляции сигнала увеличивает скорость передачи на Гц полосы (бит/с/Гц).

Fast-OFDM использует разнос частот в два раза меньший чем OFDM, повышая таким образом спектральную эффективность. При обработке сигналов используется тот факт, что если частоты разнесены на расстояние кратное $1/2T$, то действительная часть комплексного коэффициента корреляции двух поднесущих равна нулю и сигналы на них можно считать ортогональными.

Метод неортогонального множественного доступа NOMA считается одним из наиболее перспективных для применения в системах мобильной связи пятого поколения [2-4]. Данный метод предполагает обслуживание множества абонентов в одном частотном диапазоне без разделения по времени, что делает возможным одновременное подключение к сети большего количества пользователей, чем позволяет метод множественного доступа OFDMA (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), применяемый в сетях LTE (LTE-Advanced) и WiMAX (рис. 1).

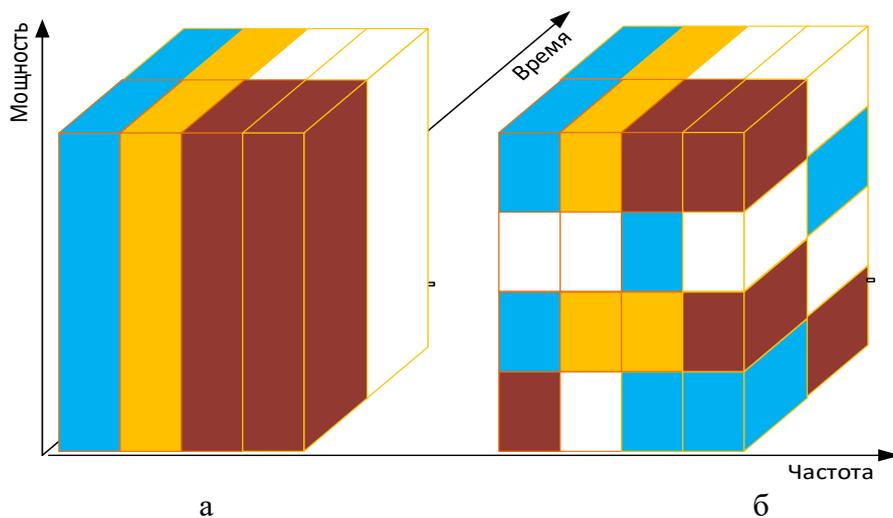


Рисунок 1

На рис. 1 различными цветами обозначены различные каналы от 1-го до 4-го.

Абонентские каналы размещаются в одном и том же частотно-временном ресурсе, но имеют различную предварительно заданную мощность сигнала, значение которой будет определять пропускную способность канала и его помехоустойчивость. Пользователю с меньшим отношением Сигнал/Шум SNR (англ. Signal-Noise Ratio) выделяется большая мощность излучения, а каналу с большим SNR – меньшая мощность. При этом суммарный излучаемый сигнал представляет собой суперпозицию всех абонентских сигналов с весами $\sqrt{P_j}$:

$$S(i) = \sum_{j=1}^J \sqrt{p_j} \cdot x_j(i), \quad (1)$$

где: p_j – парциальная мощность j -го абонентского канала, $x_j(i)$ – i -й блок информационных символов j -го абонента.

Мобильное устройство, получив суммарный сигнал, выделяет из него уровень мощности, предназначенный конкретно для этого абонента. Для этого в передатчике базовой станции применяется так называемое суперпозиционное кодирование (англ. superposition coding), а в приемнике – технология последовательного подавления помех SIC (англ. Successive Interference Cancellation).

Применение технологии NOMA совместно с SIC рассматривается на примере обслуживания двух абонентов.

Базовая станция формирует сигналы, наложенные друг на друга в частотно-временной области (рис. 2), отличающиеся уровнем мощности. При распределении ресурса мощности возможно применение алгоритма, изложенного в [4].

Сигнал первого абонента является более мощным по сравнению с сигналом второго абонента, поэтому их называют соответственно «сильный пользователь» SU (англ. Strong User) и «слабый пользователь» WU (англ. Weak User) [5, 6].

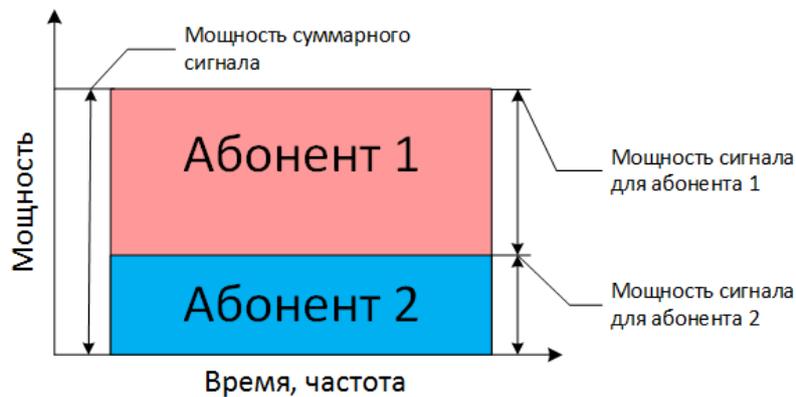


Рисунок 2

Сильный пользователь воспринимает сигнал WU в виде помехи и декодирует предназначенную ему информацию без применения метода SIC. В свою очередь слабый пользователь применяет технологию SIC прежде чем декодировать предназначенную ему информацию. Он вычитает из полученного суммарного сигнала информацию абонента 1 и только после этого становится возможным декодирование сигнала WU. Этот процесс проиллюстрирован на рис. 3.

Таким образом на приемной стороне происходит детектирование методом последовательного подавления помех SIC: в первую очередь декодируется сигнал в канале с самой сильной энергетикой, полученное значение вычитается из суммарного сигнала и следующий по уровню мощности сигнал становится доступным для декодирования. Эти действия повторяются для всех переданных сигналов по порядку убывания энергетике.

Несмотря на сильное влияние присущей неортогональным методам множественного доступа межканальной интерференции метод NOMA обладает набором преимуществ, благодаря которым консорциум 3GPP выбрал данную технологию для применения в системах мобильной связи 5G.

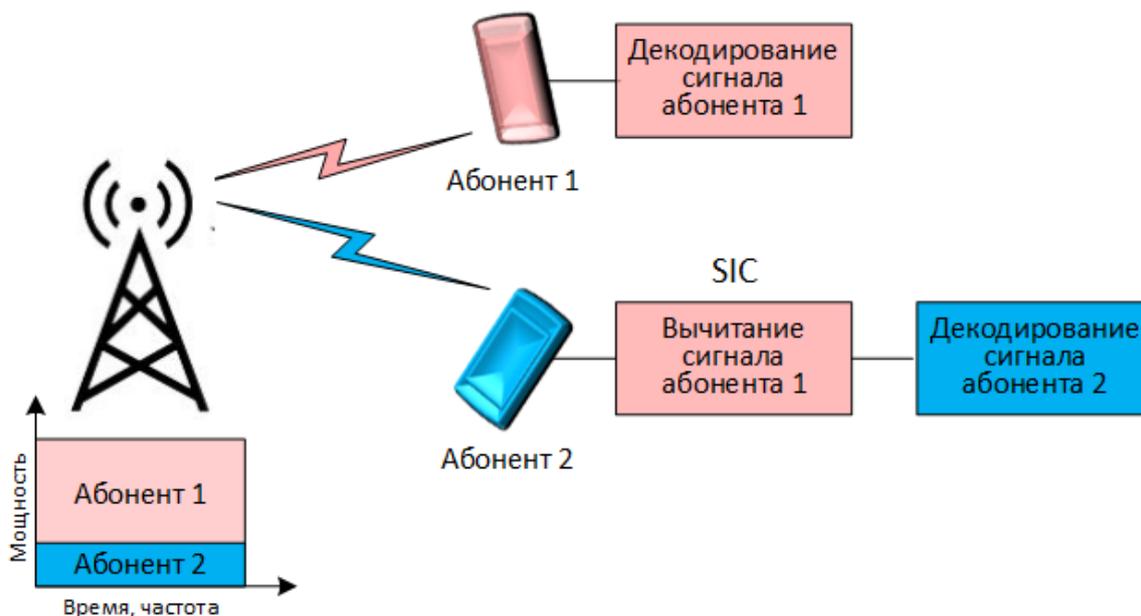


Рисунок 3

По сравнению с технологиями, основанными на применении ортогонального множественного доступа, NOMA предлагает абонентам следующие преимущества.

1) Спектральная эффективность NOMA является наивысшей среди методов множественного доступа благодаря применению технологии SIC при одновременном обслуживании множества пользователей в едином частотно-временном пространстве.

2) Применение NOMA вкуче с технологией MIMO увеличивает пропускную способность сети в 25-50 раз относительно систем 4G.

3) Поскольку нет временного разделения абонентских каналов NOMA позволяет снизить задержку передачи в радиointерфейсе до значений менее 1 мс, т.к. пользователь не должен ждать обслуживания, а может начать передачу в любой момент времени параллельно с другими пользователями.

4) NOMA обеспечивает высокие значения показателей качества обслуживания QoS, благодаря гибкому управлению мощностью абонентских каналов в условиях влияния помех в беспроводной среде передачи данных, а также изменения расстояния, скорости движения мобильных абонентов, сложных рельефов местности и атмосферных явлений.

Надо отметить, что для реализации данной технологии предстоит решить ряд значительных проблем, подробно описанных в [6], что не помешало включить NOMA в официальную документацию по разработке технологий для 5G.

Компанией Huawei был предложен другой метод множественного доступа, обеспечивающий высокую спектральную эффективность. Это множественный доступ на основе разреженных кодовых слов SCMA [7]. Данный метод представляет собой комбинацию технологий OFDMA и CDMA (англ. Code-Division Multiple Access).

Эффективность SCMA зависит от вида кодовых книг, которые построены на формирующих разреженных матрицах. Кодовые слова одной кодовой книги содержат нулевые элементы в одних и тех же позициях, но эти позиции различны для разных книг, что позволяет избежать коллизии при одновременной передаче данных несколькими абонентами [8]. Рисунок 4 иллюстрирует применение SCMA в упрощенном виде, белым цветом обозначены нулевые элементы кодовых книг.

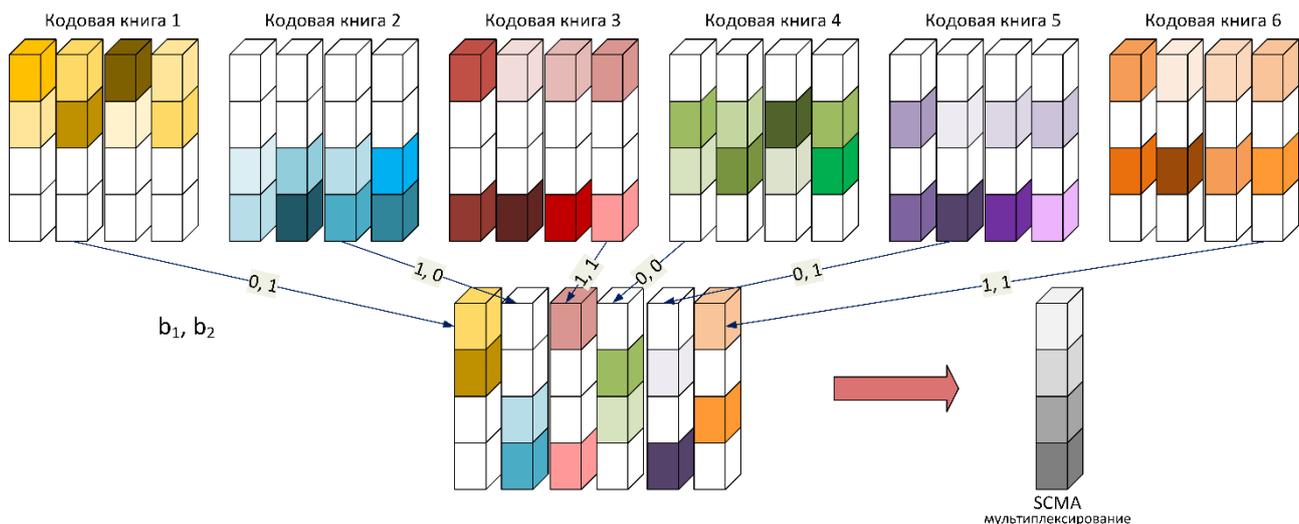


Рисунок 4

Кодирование в SCMA осуществляется путем преобразования бит входного потока в комплексное кодовое слово из многомерной кодовой книги с расширением спектра сигнала подобно CDMA. Каждому j -му пользователю назначается одна из имеющихся J кодовых книг, таким образом происходит одновременная передача до J информационных потоков. Символ SCMA представляет собой суперпозицию всех кодовых слов. Передача данных происходит на нескольких поднесущих по технологии OFDMA, формируемых с помощью обратного быстрого преобразования Фурье IFFT (англ. Inverse Fast Fourier Transform).

На приемной стороне сигнал будет определяться выражением:

$$y = \sum_{j=1}^J \text{diag}(h_j) \cdot x_j + n_0, \quad (2)$$

где: $h_j = (h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj})^T$ – вектор канальных коэффициентов j -го абонента; K – размерность кодового слова; $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj})^T$ – вектор кодового слова j -го абонента; n_0 – белый гауссовский шум с нулевым средним и стандартным отклонением δ_n [7].

Декодирование SCMA кодов осуществляется при помощи субоптимального итерационного алгоритма обмена сообщениями MPA (англ. Message Passing Algorithm).

Результаты, полученные в [7-9] показывают, что метод множественного доступа с разреженным кодом обладает наивысшей помехоустойчивостью из всех существующих методов. Кроме того, его применение позволит в 2,7 раз увеличить количество абонентов, подключенных к сети, и в несколько раз уменьшить задержку в радиointерфейсе по сравнению с системами мобильной связи LTE и LTE-Advanced.

Таким образом, можно видеть, что неортогональные сигналы также как неортогональные методы множественного доступа повышают спектральную эффективность систем мобильной связи и уменьшают задержку передачи данных, а также увеличивают количество обслуживаемых абонентов по сравнению с действующими системами 3G и 4G. Кроме того применение данных методов совместно с другими перспективными технологиями, такими как MIMO, поднимет обеспечение QoS на новый уровень.

Литература

1. Тихвинский В.О., Бочечка Г.С. Перспективы сетей 5G и требования к качеству их обслуживания // Электросвязь, 2014. – № 11. – С. 40-43.
2. Кокорева Е.В. Методы обеспечения спектральной эффективности в сетях мобильной связи пятого поколения // Материалы рос. науч.-техн. конф. – Новосибирск: СибГУТИ, 2017. – С. 560-565.
3. Тихвинский В.О. Возможности технологии 5G для создания сетей широкополосного беспроводного доступа в малых и средних населенных пунктах [Электронный ресурс] // Региональный семинар МСЭ для стран СНГ «Оптимальные решения по обеспечению широкополосного доступа в малых и средних населенных пунктах» г. Москва. 2015. – URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2015/02_Moscow/Session_3_Tikhvinskiy.pdf (дата обращения 09.07.2018)
4. Крюков Я.В., Демидов А.Я., Покаместов Д.А. Алгоритм расчета мощности каналов при неортогональном множественном доступе NOMA // Доклады ТУСУР, 2016, – № 4-19. – С. 91-94.
5. Saito Y., et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access // Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany 2013. – pp. 1-5.
6. S.M. Riazul Islam, Ming Zeng, Octavia A. Dobre NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency [Электронный ресурс] // IEEE 5G Tech Focus: Volume 1, Number 2, June 2017. – URL: <https://5g.ieee.org/tech-focus/june-2017/noma-in-5g-systems> (дата обращения 09.07.2018).
7. Климентьев В.П., Сергиенко А.Б. Оценка состояния канала связи по неортогональным пилот-сигналам в системе множественного доступа с разреженным кодированием // 69-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2016. – С. 29-33.
8. Крюков Я.В., Демидов А.Я., Покаместов Д.А. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов // доклады ТУСУРЮ, 2016, – № 3-19. – С.65-69.
9. Kelvin Au, Liqing Zhang, Hosein Nikopour, Eric Yi, Alireza Bayesteh, Usa Vilaipornsawai, Jianglei Ma, Peiying Zhu Uplink Contention Based SCMA for 5G Radio Access// IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). 2014. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.5495.pdf> (дата обращения 09.07.2018).