УДК 621.396.

Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков

Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов

Исследовано влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов. Приведен алгоритм создания разреженных матриц, на основе которых строятся кодовые книги. Показано, что множественный доступ с разреженным кодом превосходит существующие методы доступа в помехозащищенности в канале с белым гауссовским шумом.

Ключевые слова: множественный доступ с разреженным кодом, SCMA, OFDM, разреженные матрицы, кодовые книги, алгоритм распространения доверия, MPA, 5G.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-65-69

Сети мобильной связи постоянно развиваются, увеличиваются объем передаваемого трафика и количество подключаемых устройств. По этой причине технологии, обеспечивающие беспроводную связь, устаревают и перестают справляться с сетевой нагрузкой, и на смену им приходят новые поколения стандартов, описывающие технические аспекты работы систем связи. Сейчас для передачи мобильного трафика используются сети четвертого поколения LTE, в основе физического уровня которых лежит технология ортогонального частотного разделения абонентов, – OFDM.

В телекоммуникациях появляется новое направление – Интернет вещей, концепция которого предполагает подключение бытовых приборов и вещей к глобальной сети, что ведет к многократному увеличению нагрузки на системы связи. В первую очередь это касается гибкости распределения ресурсов и обслуживания большого количества подключенных устройств. Так, компания Ericson прогнозирует более 50 млрд подключений к 2020 году [1]. Кроме того, растет трафик и от ставших уже традиционными планшетов и мобильных телефонов. Сети LTE не смогут справиться с такой нагрузкой, поэтому уже сейчас идет работа над стандартом связи нового, пятого, поколения.

Для решения стоящих проблем физический уровень новых сетей должен основываться на методе доступа, более эффективно использующем частотно-временные ресурсы и поддерживающем большее количество подключений по сравнению с OFDMA.

Сейчас появилось новое направление методов, получивших общее название «неортогональные методы доступа». Под неортогональностью имеется в виду тот факт, что пользователи передают данные одновременно и в одной полосе частот. К этим методам относится и рассматриваемый в данной статье множественный доступ с разреженным кодом SCMA (Sparse Code Multiple Access).

SCMA включает подходы OFDMA – передача данных ведется на ортогональных поднесущих, формируемых с помощью обратного быстрого преобразования Фурье. SCMA также использует подходы кодов с низкой плотностью проверок на четность

LDPC – для распределения пользователей по поднесущим используются разреженные матрицы, а для детектирования символов – вероятностные алгоритмы, основанные на алгоритме MPA (Message Passing Algorithm), применяемом для декодирования LDPC кодов [2].

Характеристики SCMA полностью определяются кодовыми книгами, которые построены на формирующих разреженных матрицах. В данной статье рассмотрены алгоритмы формирования таких матриц и их влияние на работу системы связи с SCMA.

Модель системы связи с SCMA

На рис. 1 приведена схема формирования SCMA символов. Каждый слой (абонент) передает биты b_v , которые подверглись помехоустойчивому кодированию (ПК). Биты поступают на специальный SCMA кодер, который выполняет две функции. Во-первых, он обеспечивает распределение пользователей по поднесущим. Во-вторых, каждой группе бит пользователя он ставит в соответствие набор комплексных амплитуд, отображаемых на поднесущие, – квадратурная амплитудная модуляция. При этом каждый пользователь ведет передачу на нескольких поднесущих, т.е. применяется расширение. Сформированные таким образом комплексные амплитуды поднесущих поступают на блок формирования сигнала во временной области, например, классический OFDM, включающий блок обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) и добавление циклического префикса (ЦП). В то же время вместо схемы OFDM можно применить другие методы формирования поднесущих, например набор гребенчатых фильтров FBMC, также входящих в концепцию развития сетей пятого поколения [3].

Рис. 1. Схема формирования SCMA символов

Распределение пользователей по поднесущим ведется в соответствии с разреженной матрицей $\mathbf{B}$,

(пример такой матрицы приведен на рис. 2, а), которую можно также представить в виде двудольного графа (графа Таннера, рис. 2, б). Первая группа вершин (круги на графе, столбцы матрицы **B**) соответствует поднесущим, вторая группа (квадраты на графе, строки матрицы **B**) соответствует слоям. Ребра графа, соединяющие вершины, показывают на каких поднесущих ведет передачу каждый слой. Индекс $k = 1 \dots F$ соответствует поднесущим, индекс $v = 1 \dots V$ – слоям. Параметры dk и dv показывают, какое количество слоев передается на одной поднесущей, и наоборот, сколько поднесущих занимает один слой. При этом эти параметры связаны соотношением

$$dk = \frac{Vdv}{F}. \quad (1)$$

Рис. 2. Матрица для $V=6$, $F=4$ – а; соответствующий ей граф Таннера – б

На основе разреженной матрицы строится кодовая книга SCMA, содержащая значения комплексных амплитуд, модулирующих поднесущие. На рис. 3 приведен пример такой кодовой книги для матрицы **B**, рассмотренной выше. Общая кодовая книга **CB** состоит из кодовых книг слоев **CB_v**, которые в свою очередь состоят из кодовых слов **CW_{vm}**. Нулевые элементы кодовой книги обозначены белыми кубами.

Рис. 3. Кодовая книга SCMA для $V=6$, $F=4$, $M=4$

В зависимости от значения бит, передаваемых на слое v , выбирается соответствующее им кодовое слово с индексом m_v (где $m_v = [1 \dots M]$, M – индекс модуляции кодового слоя). Символ SCMA формируется как суперпозиция всех V кодовых слов. Этот процесс иллюстрирует рис. 4, на котором изображен выбор кодовых слов и формирование итогового символа для конкретной битовой реализации.

Символьную скорость системы связи с SCMA можно определить как

$$R = V \log_2(M)$$

или в пересчете количества бит на поднесущую:

$$R = \frac{V \log_2(M)}{F}. \quad (2)$$

Рис. 4. Формирование SCMA символов по кодовой книге

Выбор конкретных значений амплитуд кодовых слов в значительной мере влияет на помехоустойчивость системы с SCMA. На каждой поднесущей в результате суперпозиции компонент кодовых слов формируется результирующее сигнальное созвездие, к которому можно предъявить ряд классических требований к созвездиям квадратурных сигналов, таких как максимизация евклидова расстояния между точками, нумерация в соответствии с кодом Грея, минимизация дисперсии модуля состояний и др. [3]. Такие же требования предъявляются и к сигнальным созвездиям, образованным разными элементами кодовых слов внутри кодовой книги каждого слоя. При этом эти сигнальные созвездия необходимо рассматривать сразу на dv поднесущих. Конечным критерием выбора значений комплексных амплитуд является минимизация вероятности битовой ошибки для системы связи с выбранной кодовой книгой.

Детектирование SCMA символов основано на алгоритме МРА, который в русскоязычных источниках называется алгоритмом распространения доверия. Этот алгоритм получил широкое распространение в практике декодирования LDPC кодов, т.к. существенно снижает вычислительные затраты по сравнению с классическими алгоритмами декодирования блочных кодов [3]. Алгоритм основан на пересчете вероятностей двунаправленной передачи сообщений на графе Таннера в течение нескольких итераций.

Более подробно вопросы формирования и обработки сигналов с SCMA рассмотрены в [4].

Разреженные матрицы SCMA

Параметры системы связи с SCMA, такие как количество слоев (пользователей), количество под-

несущих, помехоустойчивость и скорость передачи, полностью определяются формирующей разреженной матрицей и индексом модуляции M . Остановимся на требованиях, предъявляемых к матрицам, их свойствам и способам их формирования.

Как и в теории LDPC кодов, основным требованием к матрицам SCMA является отсутствие в соответствующих им графах циклов определенной кратности [5]. Цикл определяется как замкнутая последовательность ребер графа, начинающаяся и заканчивающаяся в одной вершине. Наименьшим возможным циклом является цикл кратности 4, именно такие циклы хуже всего влияют на исправляющие свойства LDPC кодов и помехоустойчивость SCMA. Граф с двумя циклами кратности 4, а также его матрица смежности приведены на рис. 5. Ребра первого цикла обозначены пунктирными, а второго – жирными линиями.

Рис. 5. Пример двух циклов кратности 4 в матрице SCMA – a ; в графе Таннера – b

Пример матрицы и графа Таннера без циклов кратности 4 приведен на рис. 2. Вывести аналитическое выражение, позволяющее оценить степень влияния подобных циклов на помехоустойчивость SCMA, не представляется возможным, поэтому авторы ограничиваются результатами, полученными в ходе имитационного моделирования, которые приведены ниже в соответствующем разделе.

Для формирования матриц можно использовать алгоритмы, применяемые при заполнении проверочных матриц LDPC кодов. Поскольку количество ортогональных поднесущих в современных системах связи редко превосходит нескольких тысяч (стандартом LTE определяется максимальное количество 2048 [6]), размер формирующей матрицы SCMA будет меньше проверочных матриц LDPC. По этой причине можно использовать алгоритм, предложенный Галлагером [5]. Общий вид такой матрицы B , полученной с помощью алгоритма Галлагера, можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{bmatrix},$$

где $B_0 \dots B_N$ – подматрицы. Элементы строки i подматрицы B_0 с индексами $(i-1) \cdot dv + 1 \dots i \cdot dv$ равны единицам, остальные элементы – нули, $i = 1 \dots F/dv$.

Подматрица B_0 для $F = 9$, $dv = 3$ приведена на рис. 6. Благодаря такой структуре матрицы, в ней отсутствуют циклы.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис. 6. Подматрица B_0 для $F = 9$, $dv = 3$

Подматрицы $B_1 \dots B_N$ формируются путем перестановок столбцов в подматрице B_0 . В результате перестановок в сформированных подматрицах должны отсутствовать циклы минимальной кратности. Проверка на циклы кратности 4 может быть произведена путем нахождения попарного скалярного произведения между всеми столбцами (проверку пройдут подматрицы, чье скалярное произведение не превышает 1). Подматрицы, содержащие циклы, отбрасываются. Подматрицы формируются до тех пор, пока количество строк результирующей матрицы не достигнет V . На рис. 7 приведена матрица B , получившаяся в результате выполнения алгоритма Галлагера для $F = 9$, $V = 12$, $dv = 3$, $dk = 4$.

B_0	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
B_1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
B_2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
B_3	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Рис. 7. Матрица B , полученная в результате выполнения алгоритма Галлагера для $F = 9$, $V = 12$, $dv = 3$, $dk = 4$

С помощью предложенного алгоритма можно формировать регулярные (количество единиц во всех столбцах одинаково) матрицы любой размерности F , однако при этом размерность V ограничена, с одной стороны, выражением (1). С другой стороны, вычислительная сложность алгоритма декодирования МРА пропорциональна M^{dk} [4]. При $M = 4$ нецелесообразно брать параметр dk выше 4. Кроме того, начиная с определенного отношения V к F (большое число пользователей при малом числе поднесущих), при больших значениях dv и dk (более 4) невозможно выполнить требование отсутствия циклов кратности 4.

Влияние формирующих матриц на помехоустойчивость системы связи с SCMA

На рис. 8 приведены зависимости коэффициента битовой ошибки (bit error rate, BER) от отношения энергии, приходящейся на бит к спектральной плотности мощности шума (E_b/N_0 , для системы связи с SCMA при $F = 4$, $V = 6$, $dv = 2$, $dk = 3$, при формирующей матрице с циклами кратности 4 (см. рис. 5) и без циклов (см. рис. 2). В качестве канала передачи при моделировании рассматривался канал с аддитивным белым гауссовским шумом.

При вероятности битовой ошибки 10^{-4} система SCMA с формирующей матрицей, в которой присутствуют циклы кратности 4, проигрывает системе без циклов порядка 2 дБ.

Рис. 8. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума для SCMA с формирующей матрицей с циклами кратности 4 и без циклов, $V = 4$, $F = 6$, $dv = 2$, $dk = 3$, $M = 4$, 8 итераций алгоритма МРА

На рис. 9 приведены зависимости коэффициента битовой ошибки от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума, полученные в результате имитационного моделирования для различных размерностей разреженных матриц.

Рис. 9. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума для различных V , F ; $dv = 2$, $dk = 3$, $M = 4$, 8 итераций алгоритма МРА

Как видно из рис. 9, увеличение размерности кодовой книги в 10 и 100 раз дает сопоставимую помехоустойчивость.

Рассмотрим три сценария распределения пользователей (V) по поднесущим (F) и соответствующие им зависимости вероятностей битовых ошибок и скорости передачи (рис. 10). Приведены зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал/шум (ОСШ), т.е. зависимость от нормированных значений энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума не позволит оценить эффект расширения спектра.

1. Количество пользователей совпадает с количеством поднесущих ($V = F$). При этом сценарий SCMA сводится к схеме OFDM-QAM если каждый пользователь занимает одну поднесущую ($dv = dk = 1$), или к схеме multicarrier (многочастотный, MC)

CDMA с QAM модуляцией [7] (если $dv = dk > 1$, т.е. присутствует расширение), притом помехоустойчивость и скорость в обоих случаях будет соответствовать помехоустойчивости OFDM-QAM при том же индексе модуляции поднесущей.

2. Количество пользователей меньше количества поднесущих ($V < F$). В этом случае SCMA схож со схемой многочастотного кодового разделения с квадратурной модуляцией поднесущих MC CDMA QAM [7] или схемой доступа с низкой плотностью сигнатур LDS, однако в отличие от MC CDMA для детектирования будет использоваться не набор корреляторов, а МРА-алгоритм. При этом помехоустойчивость будет превосходить, а скорость передачи уступать OFDM-QAM при том же индексе модуляции поднесущей.

3. Количество пользователей превосходит количество поднесущих ($V > F$). Такой сценарий наиболее интересен, т.к. число доступных пользователям ресурсов превосходит число ортогональных поднесущих, что особенно важно в условиях большого числа подключений. Скорость в таком сценарии будет превосходить, а помехоустойчивость уступать OFDM QAM при том же индексе модуляции поднесущей.

Рис. 10. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения сигнал шум для различных V , при $F = 24$, $M = 4$, 8 итераций алгоритма МРА

В зависимости от уровня помех и искажений в канале и сетевой нагрузки система может выбирать тот или иной сценарий, что обеспечивает большую гибкость и адаптивность по сравнению с системой OFDM, в которой необходимая помехоустойчивость и скорость регулируются только индексом модуляции.

Наконец, сравним помехоустойчивость систем связи с SCMA и OFDM-QAM при фиксированной скорости передачи (рис. 11). Параметры SCMA: $V = 6$, $F = 4$, $dv = 2$, $dk = 3$, $M = 4$, 8 итераций алгоритма МРА при детектировании, таким образом, согласно (2) скорость передачи составит 3 бита на поднесущую. Аналогичной по скорости является схема модуляции OFDM QAM-8.

Из рис. 11 видно, что система связи с SCMA при скорости передачи 3 бита на поднесущую и вероятности битовой ошибки 10^{-6} превосходит систе-

му с модуляцией OFDM QAM-8 по помехоустойчивости на 1,5 дБ.

Рис. 11. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума для SCMA $V=6$, $F=4$, $dv=2$, $dk=3$, $M=4$, 8 итераций алгоритма MPA и OFDM QAM-8

Заключение

Предложенный алгоритм формирования разреженных формирующих матриц SCMA позволяет на их основе создавать кодовые книги для необходимого числа абонентов и поднесущих.

При генерировании разреженных матриц необходимо следить за наличием циклов кратности 4, наличие которых в соответствующих матрицам графах Таннера может существенно снизить помехоустойчивость. Кроме этого, ограничения при формировании матриц вносят вычислительные затраты алгоритма детектирования MPA, которые экспоненциально зависят от веса строк и столбцов матриц.

Система связи, работающая с кодовыми книгами, построенными на основе разреженных матриц, может адаптивно подстраиваться под состояние канала, обеспечивая необходимую вероятность битовой ошибки, используя саму структуру кодовой книги. Количество пользователей может превосходить количество поднесущих, что является одним из ключевых достоинств SCMA, благодаря возможности в ограниченном частотном ресурсе обеспечить работу большего числа пользователей по сравнению с существующими системами связи. Также SCMA превосходит существующие системы с OFDM в помехоустойчивости. По этим причинам SCMA может лечь в основу физического уровня систем связи пятого поколения.

Литература

1. More than 50 billion connected devices. Ericsson White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.akosrs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf (дата обращения: 04.10.2016).

2. Nikopour H. Sparse code multiple access / H. Nikopour, H. Baligh. – Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on // IEEE. – 2013. – P. 332–336.

3. Дворкович В.П. Цифровые видеотелекоммуникационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, – 2012. – 1009 с.

4. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников, Р.Р. Абенов // Электросвязь. – 2016. – №10. – С. 56–61.

5. Gallager R. Low-density parity-check codes. – Cambridge; Massachusetts, 1963. – 90 p.

6. 3GPP TS 36.211, version 9.1.0, 3-rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Channels and Modulation. – 2010.

7. Nathan Y. Multi-carrier CDMA in indoor wireless radio networks / Y. Nathan, J.P. Linnartz, G. Fettweis // IEICE Transactions on Communications. – 1994. – Vol. 77, № 7. – P. 900–904.

8. Hoshyar R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel / R. Hoshyar, F.P. Wathan, R. Tafazolli // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2008. – Vol. 56, № 4. – P. 1616–1626

Покаместов Дмитрий Алексеевич

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа

Тел.: +7-952-809-43-75

Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

Демидов Анатолий Яковлевич

Канд. физ.-мат. наук, зав. каф. ТОР

Тел.: +7-913-840-36-28

Эл. почта: demidovay@tor.tusur.ru

Крюков Яков Владимирович

Аспирант каф. ТОР

Тел.: +7-913-104-44-06

Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

Pokamestov D.A., Demidov A.Ya. Kryukov Ya. V.

Forming matrix of sparse code multiple access

In the article are considered the telecommunication system with sparse code multiple access on physical layer. The algorithm to generate sparse matrix, which forming codebook is described. Basic parameters of matrix, that influence to performance of telecommunication system are considered. It was shown that the sparse code multiple access excels the other methods in the channel with a white Gaussian noise.

Keywords: sparse code multiple access, SCMA, OFDM, sparse matrix, codebooks, message passing algorithm, MPA, 5G.