

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-100-108



Исследование корреляционных свойств сигналообразующих последовательностей в целях оптимизации характеристик канала случайного доступа 5G NR

Иван Андреевич Бабанов, ivan.babanov@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: В статье исследованы корреляционные свойства сигналообразующих последовательностей, которые могут быть положены в основу методики оптимизации канала случайного доступа. Идея основана на выборе корней для построения преамбул случайного доступа, вероятность детектирования которых выше, чем выбранных классическим способом корней. Приводятся результаты имитационного моделирования на всем множестве преамбул длиной 839 отсчетов. Показано, что с ростом количества одновременно передаваемых преамбул возрастает разброс возможных значений коэффициента корреляции, что прямо влияет на успешность детектирования. Сделан вывод о возможности оптимизации характеристик канала случайного доступа, как с точки зрения конфигурации его ресурсов, так и рационального выбора корней сигналообразующих преамбул.

Ключевые слова: 5G NR, LTE, параметры радиоканала, преамбула случайного доступа

Ссылка для цитирования: Бабанов И.А. Исследование корреляционных свойств сигналообразующих последовательностей в целях оптимизации характеристик канала случайного доступа 5G NR // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 4. С. 100–108. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-100-108

Correlation Properties Investigation of Signaling Sequences to Optimize the 5G NR Random Access Channel Characteristics

Ivan Babanov, ivan.babanov@gmail.com

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The article describes a random access channel optimization technique based on the choice of roots for constructing random access preambles, the detection probability of which is higher than the roots selected in the classical way according. The results of simulation modeling are presented for the entire set of preambles 839 samples long. It is shown that with an increase in the number of simultaneously transmitted preambles, the spread of possible values of the correlation coefficient increases, which directly affects the success of detection. The conclusion is made about the possibility of optimizing the characteristics of the random access channel, both in terms of the configuration of the random access channel resources and based on the rational choice of the roots of the signal-forming preambles.

Keywords: 5G NR, LTE, radio signal parameters, mobile network

For citation: Babanov I. Correlation Properties Investigation of Signaling Sequences to Optimize the 5G NR Random Access Channel Characteristics. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(4):100–108. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-100-108

1. Введение

Современный стандарт мобильной связи 5G NR [1] является эволюционным развитием предыдущего стандарта сетей 4-го поколения LTE [1] и во многом переиспользует структуру физических радиоканалов, имеющуюся в LTE и более ранних технологиях. Новый стандарт призван улучшить сети 4-го поколения в части пропускной способности и гибкости настройки радиоканалов. Развитие осуществляется по трем направлениям: широкополосная мобильная связь MBW (*аббр. от англ. Mobile Broadband*), сверхнадежная межмашинная связь с низкими задержками URLLC (*аббр. от англ. Ultra-Reliable Low Latency Communications*) и массивный межмашинный обмен mMTC (*аббр. от англ. Massive Machine-Type Communications*) [1].

Планируется, что с точки зрения MBW стандарт позволит обеспечить скорости до 1 Gb и выше. Направление URLLC должно открыть возможности по управлению техническими системами, критическими к задержке, которая должна составлять ≤ 1 мс. Третье направление – mMTC, ориентировано на возможность работы огромного количества беспроводных устройств Интернета вещей.

Проблема оптимизации параметров канала случайного доступа встает все острее с каждым последующим поколением систем мобильной связи. В первую очередь это вызвано постоянно ожесточающимися временными характеристиками новых сервисов. Если стандарт 3G предполагал в основном только широкополосный доступ для базовых приложений, то в стандарте 4-го поколения уже специфицирована дополнительная функциональность под названием «быстрое планирование TTI» (*аббр. от англ. Short TTI Scheduling*) [2]. Данный метод предполагает уменьшение времени получения ответа от сети до 2 мс по сравнению с базовым значением ~ 20 мс в «классическом» варианте развертывания LTE. В стандарте 5-го поколения сверхбыстрые коммуникации уже являются обязательной частью системы, что актуализирует задачи уменьшения задержек.

Целью исследования является оптимизация настройки параметров физического канала случайного доступа (PRACH, *аббр. от англ. Physical Random Access Channel*). Предлагаемая методика позволит улучшить характеристики производительности канала PRACH, что, в свою очередь, должно благоприятно отразиться на показателях качества обслуживания (*от англ. Quality Of Service*) всей системы. Основным показателем качества в данном канале является время установления соединения с сетью и, как следствие этого, время, потраченное пользователем на доступ к сервису сети.

Данный показатель не является критичным в случае использования широкополосного доступа, но с внедрением новых сервисов, таких как ультранадежная передача со сверхнизкими задержками, данный показатель становится критичным. Также в случае внедрения массового межмашинного обмена показатель времени доступа к сервису также становится важным параметром, но уже с точки зрения переповторов процедуры, с учетом ограниченного энергетического ресурса мобильной станции. Так как принципы организации канала случайного доступа не изменились при переходе от LTE к 5G NR, то предложенная методика является применимой для обеих технологий.

PRACH-канал предназначен для передачи первого сообщения между UE (*аббр. от англ. User Equipment*) и eNB/gNB; в дальнейшем будем использовать термины базовая станция (БС) и мобильная станция (МС). Как указывалось выше, принцип взаимодействия между МС и БС по PRACH-каналу при переходе к 5G NR не изменился и заключается в отсылке специального сигнала, называемого преамбулой случайного доступа. PRACH-канал является однонаправленным и предназначен исключительно для передачи преамбулы от МС к БС.

Несмотря на то, что организация канала случайного доступа для систем 5G NR не изменилась по сравнению со стандартом LTE, в стандарте 5G NR возможности конфигурации канала были сильно расширены. Если для LTE предполагались только 2 варианта длины ZC-последовательностей в 837 и 139 символов, то для стандарта 5G NR введены дополнительные наборы длин последовательностей в 1151 и 571 символ. Также изменилось количество возможных форматов преамбулы. В LTE было определено 4 формата для FDD (*аббр. от англ. Feature Driven Development*, методология разработки программного обеспечения, принимающего за основу функциональность) и один формат для TDD (*аббр. от англ. Test-Driven Development*, техника разработки через тестирование). В стандарте они называются конфигурации 0-3 и конфигурация 4, соответственно. Для FDD преамбула могла занимать от одного до трех сабфреймов. В новом стандарте 5G NR сохранены конфигурации, использовавшиеся в FDD LTE. Вместо конфигурации 4 для преамбул на основе ZC-последовательности длиной 139 символов определено 9 возможных конфигураций преамбулы названных, соответственно, A1-A3, B1-B4 и C0, C2. Такие же конфигурации используются для ZC-последовательностей длиной 1151 и 571 элемент. Таким образом, количество возможных конфигураций преамбулы увеличилось с 5 до 31.

Конфигурация, используемая в PRACH-канале, заранее известна МС путем считывания системной информации, осуществляемой после сканирования эфира. Таким образом, набор преамбул становится известен как МС, так и БС. Поэтому при приеме радиосигнала PRACH-канала БС пытается в принятом сигнале обнаружить одну или несколько сконфигурированных преамбул. С точки зрения организации обмена сообщениями передаваемую преамбулу обычно называют RA (аббр. от англ. Random Access), а ответом на нее является сообщение RAR (аббр. от англ. Random Access Response), передаваемое по каналу PDCCH. В случае успешного обнаружения RA БС может определить удаленность МС и корректно выставить упреждение по времени и передать RAR по нисходящему каналу. Один из возможных сценариев случайного доступа приведен на рисунке 1.

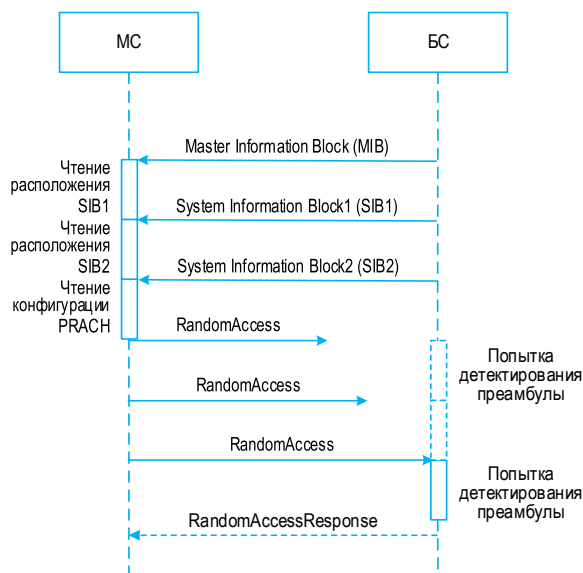


Рис. 1. Процедура случайного доступа

Fig. 1. Random Access Procedure

Как видно из рисунка 1, детектирование преамбулы происходит постоянно, но его успешность зависит от многих факторов. В первую очередь это мощность, с которой МС отправляет преамбулу. Начальное значение мощности и шаг ее увеличения передается в системной информации и известен МС до начала процедуры случайного доступа. Кроме этих двух параметров, определяется количество попыток, которые должна сделать МС, а также время ожидания между неуспешными попытками.

2. Генерация и детектирование преамбул

Для выполнения процедур случайного доступа и процедур переключения между БС мобильная станция должна сгенерировать 64 преамбулы [3]. Процедура генерации преамбулы циклична и выполняется в соответствии с параметрами, передаваемыми в системном информационном блоке БС (SIB, аббр. от англ. System Information Block).

RA сообщение, передаваемое по PRACH-каналу, состоит из одной или нескольких ZC-последовательностей в зависимости от используемой конфигурации канала случайного доступа. В начало сообщения добавляется циклический префикс (от англ. Cyclic Prefix) и завершается сообщение так называемым защитным интервалом (от англ. Guard Period).

Генерация ZC-последовательности осуществляется по формуле:

$$x_u(i) = e^{-j\frac{2\pi u i(i+1)}{L_{RA}}}, i = 0, 1 \dots, L_{RA}-1, \quad (1)$$

где L_{RA} – это длина ZC-последовательности; специфицированные длины последовательностей для стандартов LTE и 5G NR приведены в [3].

Для построения всех 64-х преамбул используется циклический сдвиг (ЦС) исходной ZC-последовательности. Величина сдвига – это один из параметров конфигурации канала RACH и зависит от размера обслуживаемого сектора: чем больше радиус сектора, тем значение ЦС между преамбулами, образованными от одного корня, должно быть больше. Это связано с тем, что во временной области при декодировании сигнала временная задержка при приеме представляет из себя как раз ЦС исходного сигнала. Таким образом, чтобы БС могла отличить преамбулу $P(N)$ от физически далеко расположенной МС от преамбулы $P(N+1)$ от МС, расположенной ближе, необходимо выбирать значение параметра ZeroCorrelationZoneConfig с ЦС больше, чем максимально возможное, привнесенное временной задержкой от максимально удаленной МС. Значения сдвига приведены в [3].

Таким образом, количество преамбул N , которое можно построить из образованной от одного корня ZC-последовательности, можно определить как:

$$N = \frac{L_{RA}}{N_{CS}}. \quad (2)$$

В случае, $N < 64$, и из одной ZC-последовательности нельзя построить все необходимые 64 преамбулы, то для построения недостающих преамбул используется ZC-последовательность, образованная от следующего корня, который выбирается в соответствии с таблицами 5.7.2–4, 6.3.3.1–3 [3, 4]. Кроме того, для успешного построения всех 64-х последовательностей в стандартах LTE и 5G NR определена величина ZeroCorrelationZoneConfig, которая также приведена в соответствующих таблицах в [3, 4] и определяет величину ЦС между соседними преамбулами, образованными от одного корня.

Для детектирования преамбулы на стороне БС выполняется операция по построению всех 64-х сконфигурированных преамбул. Стандартом 3GPP определен только передатчик, а конечная реализация приемника остается на усмотрение производи-

теля. Как правило, основным способом определения наличия заданной преамбулы в принятом сигнале является вычисление корреляции между принятым сигналом и искомой последовательностью.

Для вычисления коэффициента корреляции можно воспользоваться формулой Пирсона:

$$r_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (3)$$

При детектировании преамбулы следует учитывать, что на стороне БС заранее не известно удаление МС, а также возможный ЦС, вызванный временной задержкой при приеме сигнала.

Таким образом, количество преамбул, для которых надо вычислить корреляцию, можно определить по формуле:

$$N_{corr} = N_{RA}(N_{CS} - 1). \quad (4)$$

Вид корреляционной функции при детектировании преамбулы с используемым ЦС 4 приведен на рисунке 2.

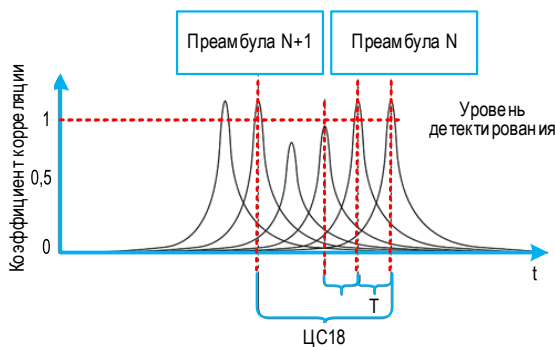


Рис. 2. Детектирование преамбулы с учетом временного сдвига

Fig. 2. Preamble Detection with Time Shift

Канал случайного доступа в системах мобильной связи спроектирован с возможностью одновременного выполнения процедуры несколькими устройствами. Данная возможность обеспечивается свойством CAZAC (аббр. от англ. Constant Amplitude Zero Autocorrelation) ZC-последовательностей. На рисунке 3 приведен вид ZC-последовательности на комплексной плоскости. Для примера используется последовательность длиной в 151 элемент.

Пусть существуют R_i передаваемых преамбул для $i \in [0, 1...63]$ и такой же набор преамбул D_j на стороне БС, которые она будет пытаться обнаружить в принятом сигнале. Тогда свойство CAZAC обеспечивает истинность формулы:

$$\sum_{i=0}^{63} \sum_{j=0}^{63} r(R_i, D_j) = 1 \quad \text{только для } j = i, \quad (5)$$

где R – одна из 64-х преамбул, передаваемая МС; D – одна из 64-х преамбул, которую БС пытается детек-

тировать; при этом наборы R и D состоят из одинаковых преамбул, а преамбула R_{i+1} получена путем ЦС преамбулы R_i .

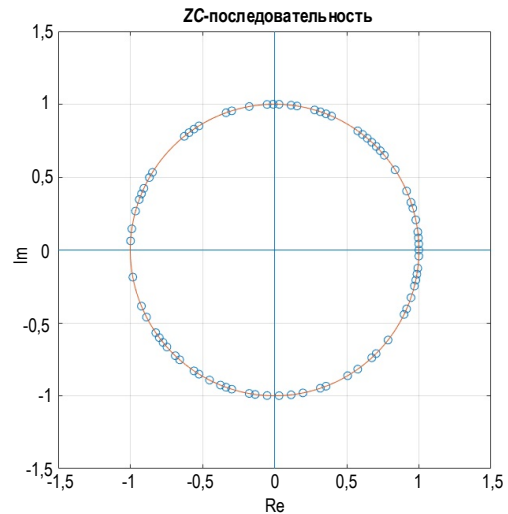


Рис. 3. Пример ZC-последовательности на комплексной плоскости

Fig. 3. ZC-Sequence Example on Complex Plane

То есть, при передаче одной ZC-последовательности $r(R_i, D_i) = 1$, а $r(R_i, D_{i-1}) = 0$, и аналогично для всех других i .

3. Пути оптимизации PRACH-канала

В научной литературе неоднократно рассматривались пути оптимизации и улучшения характеристики канала случайного доступа. Вот некоторые из них.

Во-первых, случайный доступ с ранним обнаружением коллизий. В [5] предлагается схема раннего обнаружения коллизий на первом шаге процедуры случайного доступа. Рекомендуется к использованию специальные преамбулы, которые состоят из тагированной особым образом ZC-последовательности с применением различных корневых чисел, соответственно. Предложенная схема позволяет быстрее, по сравнению с классической схемой процедуры случайного доступа, определять наличие коллизии и разрешать ее.

Во-вторых, увеличение пропускной способности канала случайного доступа. В [6] приводится детальное изучение возможностей приоритизации через разделение множества преамбул на неперекрывающиеся классы. Иначе говоря, предлагается, чтобы МС с различными потребностями с точки зрения временных характеристик использовали разные множества преамбул, благодаря чему БС сможет приоритизировать обслуживание наиболее важных устройств и тем самым улучшить характеристики канала случайного доступа для них.

В-третьих, уменьшение задержки в канале случайного доступа. В [7] описан метод самоорганизации со стороны БС в зависимости от нагрузки на

сеть. Предполагается, что БС сможет изменять настройки канала случайного доступа и при необходимости выделять под него больше ресурсов и уменьшать их количество в случае малой нагрузки на канал.

В-четвертых, исследование детектирования перегрузки канала случайного доступа приведено в [8]. Предложены методики детектирования для сценариев использования в рамках развертывания M2M сервисов.

В-пятых, методы организации гибридной процедуры случайного доступа приведены в [9, 10], где делается предположение, что в сценариях M2M организованный классически канал случайного доступа может быть перегружен. Предлагается гибридная процедура случайного доступа и приводятся обоснования, почему ее использование решает данную проблему.

В-шестых, использование канала случайного доступа для передачи информации на раннем этапе подключения. В [11] предлагается использовать канал случайного доступа для передачи информации вместе с преамбулой. Такие сценарии в основном ориентированы на M2M-сегмент устройств и подразумевают, что им нет необходимости выполнять полную процедуру подключения к сети, если объем данных невелик и может быть передан в рамках процедуры случайного доступа. Приводятся примеры, что это позволяет существенно снизить нагрузку на сеть, особенно в сценариях развертывания сетей 5-го поколения.

Также в [12] было проведено сравнительное исследование корреляционных свойств ZC-последовательностей и показана неоднородность взаимной корреляции преамбул, образованных от разных корней.

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициентов корреляции и ΔКК в зависимости от используемых корневых последовательностей

TABLE 1: Values of Correlation Coefficients and its Delta Depending on the Used Sequence Roots

ЦС	КК-1	ΔКК-1	КК-4	ΔКК-4	КК-16	ΔКК-16	КК-32	ΔКК-32	КК-56	ΔКК-56
15	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,1735	0	0,1700	0,0903
18	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,1735	0	0,1749	0,0910
22	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,1735	0	0,1644	0,0606
26	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,1735	0	0,1661	0,0452
32	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,2150	0,0872	0,1773	0,0794
38	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,2194	0,0787	0,1752	0,0677
46	1	0	0,4991	0	0,2478	0	0,2119	0,0288	0,1679	0,0636
59	1	0	0,4991	0	0,2822	0,0695	0,2145	0,0707	0,1792	0,0540
76	1	0	0,4991	0	0,2828	0,0563	0,2161	0,0559	0,1778	0,0846
93	1	0	0,4991	0	0,2835	0,0201	0,2251	0,0788	0,1787	0,0889
119	1	0	0,4991	0	0,2923	0,0694	0,2178	0,0784	0,1782	0,0832
167	1	0	0,4991	0	0,2918	0,0549	0,2182	0,0798	0,1739	0,0881
279	1	0	0,5211	0,0349	0,2898	0,0625	0,2200	0,0838	0,1706	0,1026
19	1	0	0,5164	0	0,2913	0,0427	0,2153	0,0729	0,1664	0,0899

В реальной сети часто возможна ситуация, когда несколько мобильных устройств отсылают преамбулу одновременно. Такое возможно, к примеру, на выходе из туннеля, когда абонентские терминалы почти одновременно обнаруживают наличие сети и пытаются выполнить подключение. В сценариях внедрения МТС подобная ситуация может сложиться, когда большое количество беспроводных датчиков, работая синхронно, будут так же осуществлять попытки передачи данных в одно время.

В таком случае совершенно логичным выглядит требование константной корреляции для любой из 837 конфигураций корневой последовательности для любой из 64-х построенных преамбул. Очевидно, что в случае передачи лишь одной преамбулы, на значение коэффициента корреляции (КК) будет влиять лишь уровень шума в радиоканале, а в случае идеального радиоканала и отсутствия шума этот коэффициент составит 1.

4. Исследование корреляционных свойств базовых последовательностей преамбул случайного доступа

Для исследования постоянства КК был проведен имитационный эксперимент в MATLAB с суммированием нескольких преамбул и его вычисления для каждой из них. Таким образом эмулировалась одновременная передача преамбулы несколькими абонентскими терминалами. Результаты приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что, как и ожидалось, КК для единичной передачи составляет 1. В случае увеличения количества передаваемых одновременно преамбул КК уменьшается, но для передачи четырех преамбул он остается практически постоянным.

В дальнейшем с ростом числа передаваемых одновременно преамбул КК становится не статичным, о чем говорит ненулевое значение дельты, представленное в соответствующем столбце. Под дельтой подразумевается разность между наибольшим и наименьшим значением КК, вычисленного для заданного количества одновременно передаваемых преамбул и величины ЦС. В таблице 1 приведены значения КК для каждого из возможных ЦС и для 4-х вариантов количества одновременно передаваемых преамбул. Также для каждой из конфигураций указано значение дельты коэффициента корреляции ($\Delta\text{КК}$). В этом случае $\Delta\text{КК}-N$ означает, что в столбце приведена разница между наименьшим и наибольшим значениями КК для N -одновременно передаваемых преамбул.

Следует отметить, что ожидаемое требование постоянной корреляции оказывается на практике недостижимо из-за свойств каналообразующей последовательности. Как видно из приведенных данных, существуют множества значений величины ЦС, в рамках которых значение КК константно, но эти области не покрывают ни множество возможных ЦС, ни одновременно передаваемых преамбул, даже с учетом их количества в реальной сети менее 64.

В данном расчете использовалось допущение, что ЦС, вносимый расстоянием между МС и БС, является постоянным. На практике такие случаи возможны, что схематично приведены на рисунке 4. Вариант, представленный на рисунке 4а, возможен в случае, например, выходящего из тоннеля поезда. Распределенное расположение (см. рисунок 4б) может наблюдаться, при конфигурации транспортного пути в виде железнодорожной или автомобильной магистрали.

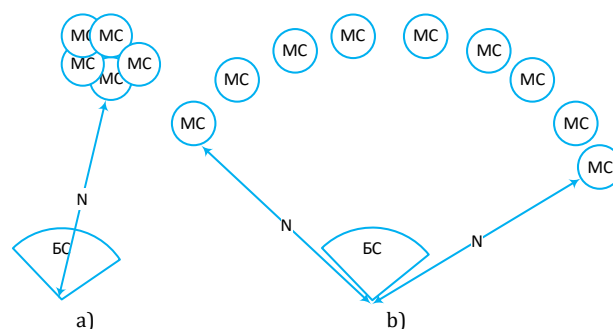


Рис. 4. Варианты расположения МС на равном удалении: а) сгруппированное; б) распределенное

Fig. 4. Variants of UE Arrangement on the Same Distance: a) Grouped; b) Distributed

В ходе эксперимента величина добавочного ЦС была взята равной 0 в силу неопределенности параметров выбора величины этого сдвига для разных значений параметра ZeroCorrelationZoneConfig. Однако на практике такие случаи не сильно распространены, и более правильным было бы ввести в расчет изменяемую величину ЦС, вызванного временной задержкой из-за расстояния между МС и БС. Величина такого добавленного ЦС не должна превышать величину, определенную выбранной конфигурацией канала случайного доступа. Характер распределения величины добавочного ЦС был выбран как равномерное случайное распределение. Полученные данные приведены в таблице 2. Цветом указаны ячейки с нехарактерными значениями, что вызвано случайным выбором при моделировании величины ЦС, эмулирующего удаление МС от БС по расстоянию.

Значения $\Delta\text{КК}$ приведены на диаграмме (рисунок 5), где видно, что $\Delta\text{КК}$ увеличивается с ростом количества одновременно передаваемых преамбул.

ТАБЛИЦА 2. Значения коэффициентов корреляции и $\Delta\text{КК}$ в зависимости от используемых корневых последовательностей с учетом возможного циклического сдвига

TABLE 2. Values of Correlation Coefficients and Its Delta Depending on the Used Sequence Roots and Considering Possible Cyclic Shift

ЦС	КК-4	$\Delta\text{КК}-4$	КК-16	$\Delta\text{КК}-16$	КК-32	$\Delta\text{КК}-32$	КК-56	$\Delta\text{КК}-56$
15	0,4991	0	0,2478	0	0,1735	0	0,1924	0,1442
18	0,4991	0	0,2478	0	0,2555	0,1748	0,1969	0,1730
22	0,4991	0	0,2478	0	0,2555	0,1748	0,1584	0,0937
26	0,4991	0	0,2478	0	0,1735	0	0,1555	0,0847
32	0,4991	0	0,2478	0	0,2113	0,0940	0,1627	0,1025
38	0,4991	0	0,2478	0	0,2022	0,0845	0,1615	0,1072
46	0,4991	0	0,2478	0	0,2006	0,0817	0,1649	0,1102
59	0,4991	0	0,2760	0,0713	0,2064	0,0916	0,2109	0,2156
76	0,4991	0	0,2775	0,0751	0,2063	0,0955	0,1662	0,1185
93	0,4991	0	0,2749	0,0689	0,2082	0,1035	0,1619	0,1130
119	0,4991	0	0,2779	0,0746	0,2072	0,1054	0,1696	0,1297
167	0,4991	0	0,2825	0,0766	0,2118	0,1092	0,1680	0,1258
279	0,5207	0,0346	0,2808	0,0835	0,2124	0,1129	0,1675	0,1252
419	0,5243	0,0172	0,2849	0,0902	0,2070	0,1039	0,1728	0,1322

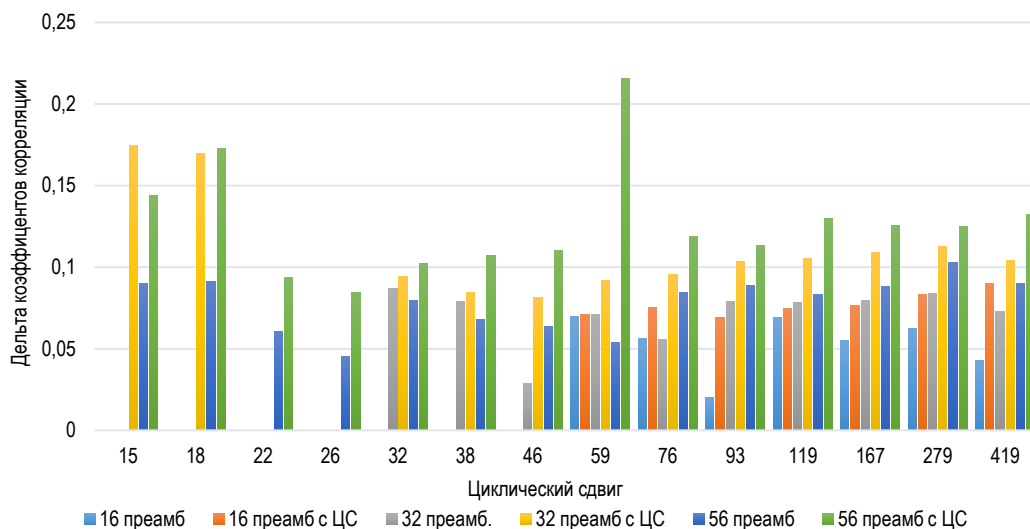


Рис. 5. Дельта минимального и максимального коэффициентов корреляции

Fig. 5. Delta Value of the Minimal and the Maximal Correlation Coefficients

График на рисунке 5 показывает разницу между максимальным и минимальным значением КК. Следует обратить внимание на большое значение ДКК для ЦС-59 в случае передачи 56-ти преамбул. Этот выброс имеет во многом случайное значение, потому что, как было указано выше, величина добавочного ЦС в эксперименте выбиралась случайным образом, что послужило причиной этой аномалии.

На рисунке 6 приведены данные аналогичного эксперимента. Можно видеть, что большое значение ДКК получено при ЦС-93 (на рисунки – CS-93). Однако более важным является то, что с увеличением

количества одновременно передаваемых преамбул минимальный КК стремится к 0. Это говорит о том, что есть преамбулы, которые будет очень сложно детектировать. Потенциально это вызовет повтор процедуры случайного доступа и, соответственно, увеличение времени доступа МС к сети.

Подобные повторы процедуры предусмотрены стандартом и сами по себе не несут никакого негативного влияния на сеть за исключением повышенной нагрузки на канал случайного доступа, однако в сценариях с ультранизкой задержкой это недопустимо.

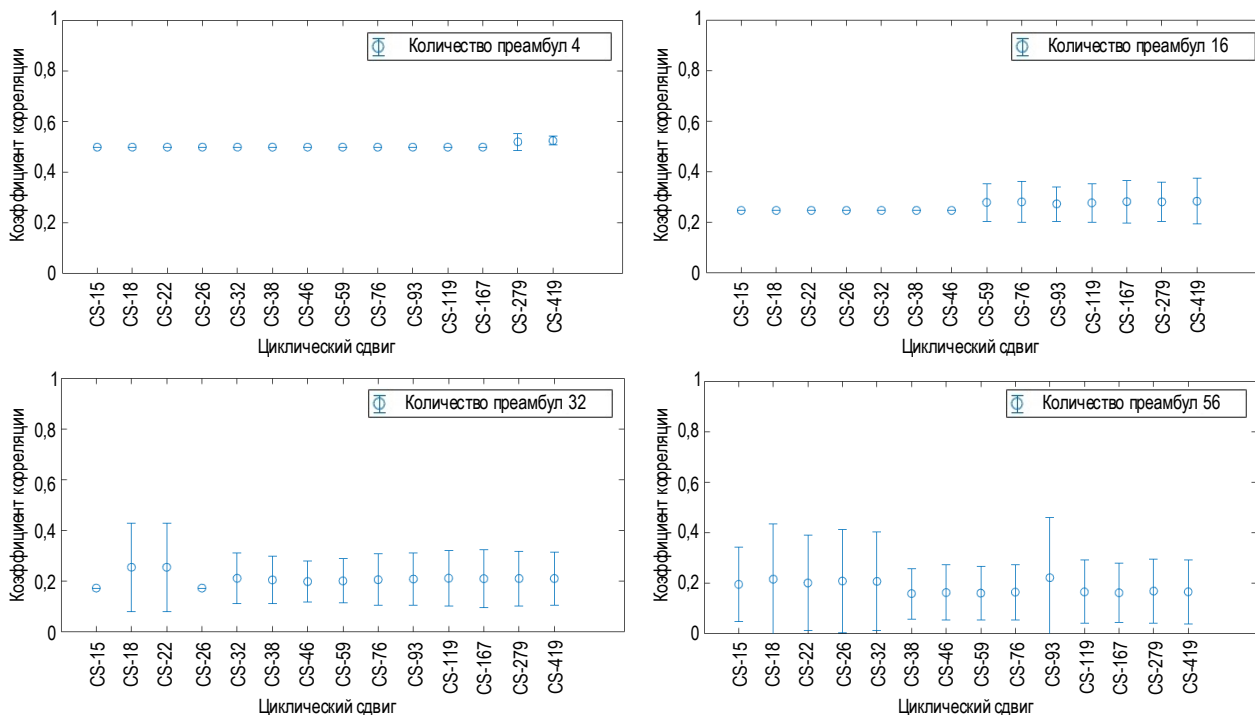


Рис. 6. Зависимость величины дельты от количества одновременно передаваемых преамбул

Fig. 6. Dependency of Delta Value from Number of Preambles Transmitted Simultaneously

Отметим, что рост значений ДКК нелинейный. Области ненулевых значений ДКК – это области, показывающие наличие значений ЦС и начальных значения корней, при которых может зависеть успешность детектирования преамбулы от выбора конкретных корней каналообразующих последовательностей. На основании этого можно сформулировать требования к рациональному выбору корней ZC -последовательности. Представляется логичным, что в процедуре случайного доступа лучше использовать корни, образующие последовательности с наибольшей корреляцией. Выбор и апробация таких корней предполагается в качестве дальнейшего развития исследования. Таким образом, можно сделать вывод, что оптимизация производительности канала случайного доступа возможна уже на уровне выбора конфигурации.

5. Заключение

В данной работе показано, что, несмотря на довольно большое количество исследований в области канала случайного доступа, по-прежнему остаются возможности для оптимизации. Несмотря на использованное в стандартах LTE и 5G NR упорядочивание преамбулообразующих корней, добиться постоянного коэффициента взаимной корреляции не удалось в силу свойств самих ZC -последовательностей. И хотя практика показывает, что имеющаяся неоднородность во взаимной корреляции не является критичной для существующих сервисов, необходимо рассматривать возможность оптимизации характеристик канала случайного доступа, основанную на рациональном выборе корней сигналаобразующей последовательности. Следует учитывать, что растущие требования к системам

мобильной связи в виде массового межмашинного обмена и ультранадежной передачи с низкой задержкой предъявляют повышенные требования в том числе и к процедурам случайного доступа. Допущения, которые были приемлемыми в решениях широкополосного доступа, могут оказаться неприемлемыми в рамках новых сервисов.

Также следует учитывать, что в сценариях внедрения новых сервисов недостатки в работе канала случайного доступа, приводящие к переповторам процедуры, будут влиять не только на временные характеристики системы, но и на возможности автономной работы устройств, сильно ограниченных по питанию. Примером могут служить сценарии МТС при использовании большого количества автономных датчиков и аналогичных им устройств. Потому направление исследований и разработки методов оптимизации канала случайного доступа должны быть продолжены с учетом внедрения сценариев новых сервисов.

В дальнейшем предполагается проведение натурального эксперимента на основе существующих детекторов канала случайного доступа.

В первую очередь в качестве объектов исследования планируется рассмотреть существующие открытые реализации стека LTE/5G NR. Среди них – решения от Software Radio Systems и Open Air Alliance. Оба эти решения позволяют работать обеими технологиями 4-го и 5-го поколений. В то же время исследования коммерческих базовых станций видится малореальным как с точки зрения доступности оборудования и организации тестовой зоны, так и с точки зрения возможных правовых коллизий с их производителями.

Список источников

1. Kottkamp M., Pandey A., Roessler A., Stuhlfauth R., Raddino D. 5G New Radio: Fundamentals, Procedures, Testing Aspects. Rohde & Schwarz, 2019. 450 p.
2. 3GPP (2017-06). Work item on Ultra Reliable Low Latency Communication for LTE (Revision of RP-170796).
3. ETSI TS 136 211 V16.2.0 (2020-09). LTE. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical channels and modulation. 3GPP TS 36.211 version 16.2.0 Release 16. Technical Specification.
4. ETSI TS 138 211 V16.2.0 (2020-07). 5G. NR. Physical channels and modulation. 3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16. Technical Specification.
5. Jang H.S., Kim S.M., Park H.-S., Sung D.K. An Early Preamble Collision Detection Scheme Based on Tagged Preambles for Cellular M2M Random Access // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2016. Vol. 66. Iss. 7. PP. 5974–5984. DOI:10.1109/TVT.2016.2646739
6. Vilgelm M., Gürsu H.M., Kellerer W., Reisslein M. LATMAPA: Load-Adaptive Throughput-MAXimizing Preamble Allocation for Prioritization in 5G Random Access // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 1103–1116. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2651170
7. Lo A., Law Y.W., Jacobsson M., Kucharzak M. Enhanced LTE-Advanced Random-Access Mechanism for Massive Machine-to-Machine (M2M) Communications // 27th World Wireless Research Forum (WWRF) Meeting (WWRF27- WG4-08, Atlantic City, USA, October 2011).
8. Laya A., Alonso L., Alonso-Zarate J. Efficient Contention Resolution in Highly Dense LTE Networks for Machine Type Communications // Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM, San Diego, USA, 06–10 December 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/GLOCOM.2015.7417669
9. Condoluci M., Dohler M., Araniti G., Molinaro A., Sachs J. Enhanced Radio Access and Data Transmission Procedures Facilitating Industry-Compliant Machine-Type Communications over LTE-Based 5G Networks // IEEE Wireless Communications. 2016. Vol. 23. Iss. 1. PP. 56–63. DOI:10.1109/MWC.2016.7422406

10. Hasan M., Hossain E., Niyato D. Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: Issues and approaches // *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51. Iss. 6. PP. 86–93. DOI:10.1109/MCOM.2013.6525600
11. Wiriaatmadja D.T., Choi K.W. Hybrid Random Access and Data Transmission Protocol for Machine-to-Machine Communications in Cellular Networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. Vol. 14. Iss. 1. PP. 33–46. DOI:10.1109/TWC.2014.2328491
12. Lavrukhin V., Lazarev V., Ryjkov A. Correlation Properties Comparative Analysis of Pseudorandom Binary Sequences and LTE Standard ZC Sequences // *Proceedings of the 16th International Conference on Internet of Things, Smart Spaces, ruSMART 2016, and Next Generation Networks and Systems, NEW2AN 2016* (St. Petersburg, Russia, 26–28 September 2016). *Lecture Notes in Computer Science (LNCS, Vol. 9870)*. Computer Communication Networks and Telecommunications (LNCCN). Cham: Springer, 2016. PP. 414–425. DOI:10.1007/978-3-319-46301-8_35

References

1. Kottkamp M., Pandey A., Roessler A., Stuhlfauth R., Raddino D. *5G New Radio: Fundamentals, Procedures, Testing Aspects*. Rohde & Schwarz; 2019. 450 p.
2. 3GPP (2017-06). *Work item on Ultra Reliable Low Latency Communication for LTE* (Revision of RP-170796).
3. ETSI TS 136 211 V16.2.0 (2020-09). *LTE. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical channels and modulation*. 3GPP TS 36.211 version 16.2.0 Release 16. Technical Specification.
4. ETSI TS 138 211 V16.2.0 (2020-07). *5G. NR. Physical channels and modulation*. 3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16. Technical Specification.
5. Jang H.S., Kim S.M., Park H.-S., Sung D.K. An Early Preamble Collision Detection Scheme Based on Tagged Preambles for Cellular M2M Random Access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016;66970:5974–5984. DOI:10.1109/TVT.2016.2646739
6. Vilgelm M., Gürsu H.M., Kellerer W., Reisslein M. LATMAPA: Load-Adaptive Throughput-Maximizing Preamble Allocation for Prioritization in 5G Random Access. *IEEE Access*. 2017;5:1103–1116. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2651170
7. Lo A., Law Y.W., Jacobsson M., Kucharzak M. Enhanced LTE-Advanced Random-Access Mechanism for Massive Machine-to-Machine (M2M) Communications. *27th World Wireless Research Forum (WWRF) Meeting (WWRF27- WG4-08, October 2011)*, Atlantic City, USA.
8. Laya A., Alonso L., Alonso-Zarate J. Efficient Contention Resolution in Highly Dense LTE Networks for Machine Type Communications. *Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM, 06–10 December 2015, San Diego, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/GLOCOM.2015.7417669
9. Condoluci M., Dohler M., Araniti G., Molinaro A., Sachs J. Enhanced Radio Access and Data Transmission Procedures Facilitating Industry-Compliant Machine-Type Communications over LTE-Based 5G Networks. *IEEE Wireless Communications*. 2016;23(1):56–63. DOI:10.1109/MWC.2016.7422406
10. Hasan M., Hossain E., Niyato D. Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: Issues and approaches. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(6):86–93. DOI:10.1109/MCOM.2013.6525600
11. Wiriaatmadja D.T., Choi K.W. Hybrid Random Access and Data Transmission Protocol for Machine-to-Machine Communications in Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014;14(1):33–46. DOI:10.1109/TWC.2014.2328491
12. Lavrukhin V., Lazarev V., Ryjkov A. Correlation Properties Comparative Analysis of Pseudorandom Binary Sequences and LTE Standard ZC Sequences. *Proceedings of the 16th International Conference on Internet of Things, Smart Spaces, ruSMART 2016, and Next Generation Networks and Systems, NEW2AN 2016, 26–28 September 2016, St. Petersburg, Russia. Lecture Notes in Computer Science (LNCS, vol.9870)*. Computer Communication Networks and Telecommunications (LNCCN). Cham: Springer; 2016. p.414–425. DOI:10.1007/978-3-319-46301-8_35

Статья поступила в редакцию 11.10.2022; одобрена после рецензирования 31.10.2022; принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 11.10.2022; approved after reviewing 31.10.2022; accepted for publication 01.11.2022.

Информация об авторе:

БАБАНОВ
Иван Андреевич

аспирант кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-8782-5819>