

ИССЛЕДОВАНИЕ ZC-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТАНДАРТЕ LTE

В. О. Лазарев¹, А. Е. Рыжков¹

¹ СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
Адрес для переписки: laviol.94@gmail.com

Информация о статье

УДК 654.16

Язык статьи: русский

Поступила в редакцию 21.01.16, принята к печати 22.02.16

Ссылка для цитирования: Лазарев В. О., Рыжков А. Е. Исследование ZC-последовательностей, используемых в стандарте LTE // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 1. С. 79–86.

Аннотация

В данной статье рассмотрены особенности формирования сигналов на основе ZC-последовательностей, используемых в стандарте LTE, на примере первичного синхронизирующего сигнала (PSS) и сигнала преамбулы запроса на доступ к сети. Показаны и оценены их корреляционные свойства.

Ключевые слова

синхронизация, преамбула, ZC-последовательность, Zadoff-Chu, LTE, PSS, SSS, PRACH, PUSCH, PUCCH.

LTE STANDARD ZC-SEQUENCES ANALYSIS

V. Lazarev¹, A. Ryjkov¹

¹ SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation
Corresponding author: laviol.94@gmail.com

Article info

Article in Russian

Received 21.01.16, accepted 22.02.16

For citation: Lazarev V., Ryjkov A.: LTE Standard ZC-Sequences Analysis // Telecom IT. 2016. Vol. 4. N 1. pp. 79–86 (in Russian).

Abstract

The paper describes the generation process and special features of ZC-sequence-based signals used in LTE standard. In particular, the research considers primary synchronization signal (PSS) and network access request preamble. Correlation properties of the signals are shown and evaluated.

Keywords

synchronization, preamble, ZC-sequence, Zadoff-Chu, LTE, PSS, SSS, PRACH, PUSCH, PUCCH.



Введение

В стандарте LTE широкое применение нашли так называемые ZC-последовательности (*Zadoff-Chu*), которые используются для формирования синхронизирующих и опорных сигналов. При передаче вниз на основе ZC-последовательностей формируют первый синхронизирующий сигнал (PSS), а при передаче вверх, с использованием технологии SC-FDMA, ZC-последовательности применяют в качестве опорных сигналов [1]. В сетях стандарта LTE ZC-последовательности также используют при передаче вверх в качестве опорных сигналов демодуляции, зондирующих сигналов и преамбул запроса на доступ к сети [1, 2, 3, 4].

В данной работе рассмотрены особенности формирования соответствующих сигналов на основе ZC-последовательностей и оценены их корреляционные свойства.

ZC-последовательности

ZC-последовательности представляют собой функцию следующего вида:

$$(X_{ZC})^{(q)}(k) = e^{-j \cdot \pi \cdot q \frac{k(k+1)}{M_{ZC}}}, \quad (1)$$

где q – индекс ZC-последовательности из всего возможного набора значений для заданной длины M_{ZC} .

ZC-последовательности относятся к классу последовательностей CAZAC (*Constant-Amplitude Zero-Auto-Correlation*), которые обладают следующими свойствами:

- постоянством амплитуды сигнала,
- нулевой взаимной корреляцией (кросс-корреляцией) одной и той же корневой последовательности при различных циклических сдвигах и малой корреляцией разных последовательностей, при определенных значениях q .

Фазовые сдвиги сигнала, построенного на основе ZC-последовательности, зависят от параметров q и M_{ZC} , при этом длина M_{ZC} должна быть простым числом – тогда такие последовательности обладают оптимальными корреляционными свойствами.

ZC-последовательности для стандарта LTE

В качестве PSS в сетях стандарта LTE используют три ZC-последовательности с разными индексами q . Каждой из них соответствует идентификатор физического уровня $N_{ID}^{(2)} = 0; 1; 2$. На практике это удобно при построении сети на основе трехсекторных сотовых структур: в *eNB* находятся три базовые станции, принадлежащие к одной идентификационной группе, но каждая имеет свой собственный $N_{ID}^{(2)}$.

Сигнал PSS состоит из 62 символов ($n = 0 \dots 61$) вида

$$d_q(n) = \begin{cases} e^{-j \frac{\pi q n(n+1)}{63}}, & \text{при } n = 0, 1, \dots, 30 \\ e^{-j \frac{\pi q(n+1)(n+2)}{63}}, & \text{при } n = 31, 32, \dots, 61 \end{cases}. \quad (2)$$



При этом каждому корневому индексу $N_{ID}^{(2)} = 1, 2$ и 3 соответствуют значения $q = 25, 29$ и 34 .

Последовательности, используемые при формировании сигнала PSS, изображены на рис. 1, а.

Было проведено исследование взаимнокорреляционных свойств сигналов PSS. Полученные взаимнокорреляционные функции, представленные на рис. 1, б, подтверждают низкий уровень взаимной корреляции сигналов PSS соседних секторов.

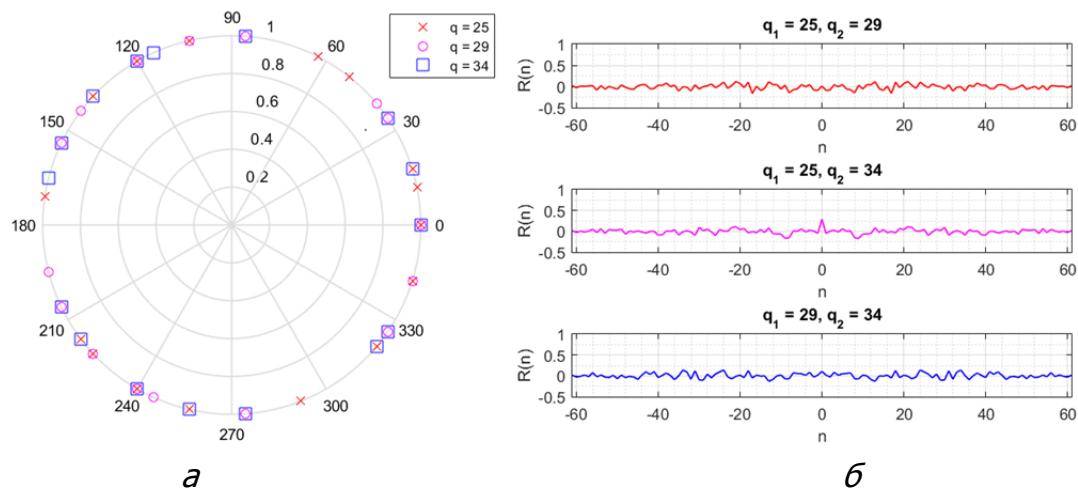


Рис. 1. ZC-последовательности с различными индексами q (а); взаимнокорреляционные функции сигналов PSS соседних секторов (б)

В отличие от классических цифровых опорных сигналов вниз, для формирования опорных сигналов вверх по каналам PUSCH и PUCCH используют ZC-последовательности. Это связано с тем, что при OFDM-передаче эти сигналы дают низкое значение пик-фактора, что позволяет обеспечить высокий КПД усилителя мощности передатчика UE.

Опорные сигналы вверх формируют с помощью циклического сдвига а базовой ZC-последовательности $\bar{r}_{u,v}(n)$:

$$r_{u,v}^{(\alpha)}(n) = e^{j\alpha n} \bar{r}_{u,v}(n). \quad (3)$$

В (3) n – номер соответствующей поднесущей. Длина опорного сигнала $M = 12m$, где m – число выделенных РБ в физическом канале.

При числе РБ 3 и более в качестве базовой последовательности используют ZC-последовательность вида

$$\bar{r}_{u,v}(n) = x_q(n \bmod M_{ZC}) \quad 0 \leq n \leq 12m, \quad (4)$$

где соответствующая ZC-последовательность.

$$X_q(k) = e^{-j\frac{\pi q k (k+1)}{M_{ZC}}} \quad 0 \leq k \leq M_{ZC} - 1. \quad (5)$$

Корневую ZC-последовательность выбирают так, чтобы ее длина M_{ZC} была равна максимальному простому числу меньше M . Так, при выделении 3 РБ (36 поднесущих) требуется ZC-последовательность длиной в 36 элементов, в то время, как ближайшее простое целое равно 31. Соответственно в (4) и (5) $M_{ZC} = 31$. Выбор q в (5) определяется идентификатором соты N_{ID}^{cell} и значением M_{ZC} . При этом можно организовать 30 групп базовых последовательностей $\tilde{r}_{i,\chi}(l)$ по индексу i , в результате чего оператор может работать с фиксированным распределением i по сотам или использовать групповые скачки индекса i , меняя от субкадра к субкадру номера групп [1].

Обратимся к ZC-последовательностям, на основе которых построены преамбулы для запроса доступа к сети. В соответствии с RACH¹ существует пять форматов преамбул. Их значения приведены в таблице 1.

Таблица 1.
Форматы преамбул

Формат преамбулы	Длина преамбулы, мс	Длина преамбулы с защитным интервалом, мс	Количество субкадров	Рекомендуемый радиус соты, км
0	0,800	0,903	1	~ 14
1	0,800	1,484	2	~ 75
2	1,600	1,803	2	~ 28
3	1,600	2,284	3	~ 108
4	0,133	0,148		

Преамбулы формата от 0 до 3 используют в сетях с частотным дуплексом, а формата 4 – в сетях с временным дуплексом. Выбор формата преамбулы определяет оператор в зависимости от размеров соты. Структура преамбулы с защитным интервалом показана на рис. 2.

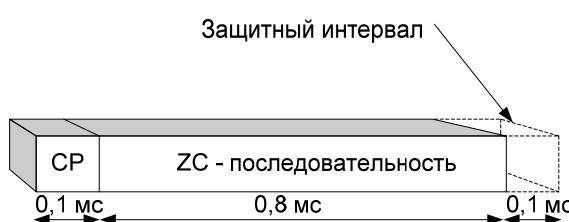


Рис. 2. Структура преамбулы с защитным интервалом

Число возможных вариантов преамбул в соте устанавливает оператор, но теоретически в каждой соте может быть реализовано до 64 вариантов преамбул. В стандарте LTE доступ к сети абонентской станции возможен на основе состязания абонентской станции и без состязания. При доступе к сети на основе состязания мобильная станция выбирает преамбулу случайным образом из всех

¹RACH [Электронный ресурс]. URL: http://www.sharetechnote.com/html/RACH_LTE.html



доступных преамбул. В тех случаях, когда команда на передачу преамбулы мобильная станция получает от сети (хэндоверы, восстановление синхронизации и т. п.), ей указывают номер преамбулы, что обеспечивает доступ к сети без соствязаний. Набор из 64 последовательностей преамбул для каждой из сот находится сперва для всех доступных циклических сдвигов корневой ZC-последовательности (в порядке возрастания этих сдвигов) с использованием логического индекса RACH_ROOT_SEQUENCE, где RACH_ROOT_SEQUENCE передают как часть системной информации. Если все 64 преамбулы не могут быть сгенерированы из одной корневой ZC-последовательности, то дополнительные последовательности преамбул получают из корневых последовательностей последующих логических индексов до тех пор, пока не получат все 64 преамбулы. Логическая корневая последовательность цикличесна: логический индекс 0 следует за индексом 837. Соотношение между индексом логической корневой последовательности и индексом физической корневой последовательности q приведено в технической спецификации² для всех форматов преамбул. При этом цифры для физических корневых последовательностей в таблице подобраны так, чтобы их взаимная корреляция была минимальна.

ZC-последовательность с q -м корнем определяется как

$$x_u(n) = e^{-j\frac{\pi q n(n+1)}{N_{ZC}}}, \quad 0 \leq n \leq N_{ZC} - 1, \quad (6)$$

где длины N_{ZC} для различных форматов преамбул приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Формат преамбулы и соответствующие им значения N_{ZC}

Формат преамбулы	N_{ZC}
0–3	839
4	139

Из ZC-последовательности с q -м корнем преамбулы с областями нулевой корреляции длины $N_{CS} - 1$ определяются циклическими сдвигами в соответствии со следующим выражением:

$$x_{q,v}(n) = x_q((n + C_v) \bmod N_{ZC}), \quad (7)$$

где циклический сдвиг задан как

$$C_v = \begin{cases} vN_{CS}, & v = 0, 1, \dots, \left[\frac{N_{ZC}}{N_{CS}} \right] - 1, N_{CS} \neq 0 \\ 0, & N_{CS} = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Выражение (8) используются для неограниченного варианта циклических сдвигов. В технической спецификации³ предусмотрен вариант циклических сдвигов с ограничениями, которые используют при обслуживании мобильных

² Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation [Электронный документ] // 3GPP – 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.211/36211-d10.zip

³ Там же.



станций, движущихся с большой скоростью для устранения нежелательных корреляционных эффектов, вызванных доплеровским сдвигом частоты.

Значение N_{CS} задано в таблице 3⁴ для типов преамбул от 0 до 3 где параметр `zeroCorrelationZoneConfig` задает оператор.

Таблица 3.

Значения N_{CS} для генерации преамбул форматов 0–3

Параметр <code>zeroCorrelationZoneConfig</code>	Значение N_{CS}
0	0
1	13
2	15
3	18
4	22
5	26
6	32
7	38
8	46
9	59
10	76
11	93
12	119
13	167
14	279
15	419

Выбор значения N_{CS} зависит от радиуса соты и чем он больше, тем больше должно быть значение N_{CS} для устранения возможных взаимных корреляций преамбул, посылаемых станциями, находящимися вблизи узла и на границе сот.

Как уже было сказано выше, максимальное число последовательностей преамбул в рамках соты равно 64. Рассмотрим пример формирования этих последовательностей и оценим их корреляционные свойства. Зададим параметры:

- `zeroCorrelationZoneConfig` = 5, что соответствует значению N_{CS} = 26 (табл. 2);
- `RACH_ROOT_SEQUENCE` = 4 для базовой последовательности, что соответствует номеру физической корневой последовательности q = 120⁵;
- `RACH_ROOT_SEQUENCE` = 5 для соседней базовой последовательности, что соответствует номеру физической корневой последовательности q = 719⁶;

⁴ Там же.

⁵ Там же.



- Формат преамбулы = 0, что соответствует значению $N_{ZC} = 839^7$.
Получаем 64 разных последовательности преамбул следующим путем:
Последовательность [0] = базовая последовательность без циклического сдвига;
Последовательность [1] = циклический сдвиг базовой последовательности на $1*26$ отсчетов;
Последовательность [2] = циклический сдвиг базовой последовательности на $2*26$ отсчетов;
Последовательность [3] = циклический сдвиг базовой последовательности на $3*26$ отсчетов;
...
Последовательность [31] = циклический сдвиг базовой последовательности на $31*26$ отсчетов;
Последовательность [32] = сдвиг базовой последовательности до соседней (замена $q = 120$ на $q = 719$);
Последовательность [33] = циклический сдвиг новой базовой последовательности на $1*26$ отсчетов;
Последовательность [34] = циклический сдвиг новой базовой последовательности на $2*26$ отсчетов;
...
Последовательность [63] = циклический сдвиг новой базовой последовательности на $31*26$ отсчетов;

Пример ZC-последовательности, полученной по выражению (6) и использованной в качестве базовой последовательности по заданным выше параметрам, изображен на рис. 3, а.

Полученная взаимнокорреляционная функция, представленная на рис. 3, б подтверждает низкий уровень взаимной корреляции преамбул с соседними номерами физических корневых последовательностей ($q_4 = 120$, $q_5 = 719$).

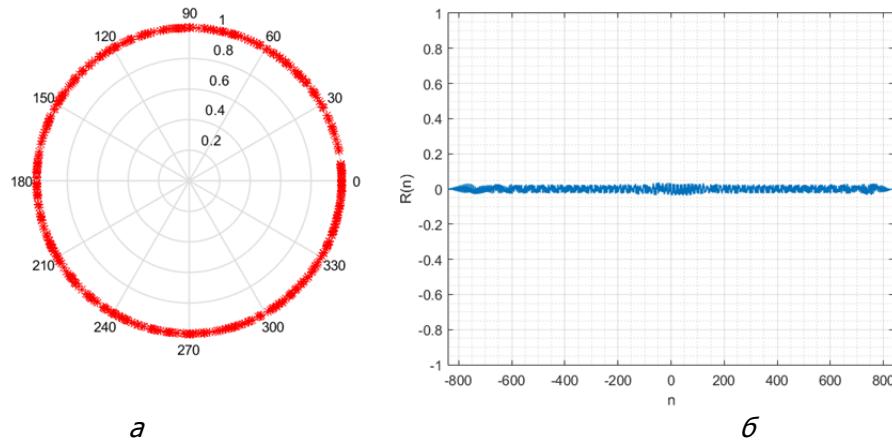


Рис. 3. ZC-последовательность преамбулы при $q = 120$ (а); график взаимнокорреляционной функции последовательностей преамбул при $q = 120$ и $q = 719$ (б)

⁶ Там же.

⁷ Там же.

Заключение

Впервые в современных стандартах связи в качестве сигналов стали использовать не цифровые, а дискретные аналоговые сигналы. Исследования показали, что эти ZC-последовательности обладают требуемыми корреляционными свойствами и позволяют минимизировать помехи при передаче сигналов синхронизации, опорных сигналов и преамбул.

Литература

1. Рыжков А. Е., Сиверс М. А., Бабкин А. С., Пыленок А. М., Трофимов А. П. Сети стандарта LTE. Развитие технологий радиодоступа : монография. СПб. : СПбГУТ, 2014. 256 с. ISBN978-5-89160-118-5.
2. Гельгор А. Л., Павленко И. И., Горлов А. И., Фокин Г. А., Попов Е. А., Лаврухин В. А., Сиверс М. А. Первичная синхронизация с базовыми станциями LTE // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 7. С. 54–62.
3. Гельгор А. Л., Павленко И. И., Фокин Г. А., Горлов А. И., Попов Е. А., Лаврухин В. А., Сиверс М. А. Пеленгация базовых станций в сетях LTE // Электросвязь. 2014. № 9. С. 34–39.
4. Gelgor A., Pavlenko I., Fokin G., Gorlov A., Popov E., Lavrukhin V. LTE Base Stations Localization // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer International Publishing, 2014. pp. 191–204.

References

1. Ryzhkov A. E., Sivers M. A., Babkin A. S., Pylenok A. M., Trofimov A. P. Networks LTE Standard. The Development of Radio Technology: monograph. Saint Petersburg.: SPBSUT, 2014. 256 p. ISBN978-5-89160-118-5.
2. Gel'gor A. L., Pavlenko I. I., Gorlov A. I., Fokin G. A., Popov E. A., Lavrukhin V. A., Sivers M. A. Initial Synchronization with LTE Base Stations // Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2014. Vol. 19. Iss. 7. pp. 54–62.
3. Gel'gor A. L., Pavlenko I. I., Fokin G. A., Gorlov A. I., Popov E. A., Lavrukhin V. A., Sivers M. A. Direction-Finding of Base Stations in the LTE Networks // Elektrosvyaz'. 2014. № 9. pp. 34–39.
4. Gelgor A., Pavlenko I., Fokin G., Gorlov A., Popov E., Lavrukhin V. LTE Base Stations Localization // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer International Publishing, 2014. pp. 191–204.

Лазарев Виталий Олегович

– магистрант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, laviol.94@gmail.com

Рыжков Александр Евгеньевич

– кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, aryjkov@mail.ru

Lazarev Vitaliy

– master student, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, laviol.94@gmail.com

Ryjkov Alexander

– Ph.D., associate professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, aryjkov@mail.ru

