

УДК 621.396.93

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗАДОВА–ЧУ ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ ПО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ КРИВОЙ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРЕФИКСА OFDM-СИМВОЛОВ LTE ТЕХНОЛОГИИ

Киселева Т. П., аспирант кафедры радиотехнических систем Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), e-mail: golzev2011@yandex.ru.

USING ZADOV-CHU SEQUENCES FOR SYNCHRONIZATION ALONG THE CORRELATION CURVE OF THE CYCLIC PREFIX OFDM-SYMBOLS LTE TECHNOLOGY

Kiseleva T.P.

In this paper, the criteria for the selection of complex sequences of Zadov-Chu (ZC) for their use in the formation of cyclic prefix OFDM-symbols in LTE technology at the stage of synchronization on the correlation curve of the cyclic prefix of symbols of the frame transmitted from the base station to the mobile user are determined. The use of ZC sequences to fill the time interval of the cyclic prefix increases the speed and efficiency of synchronization, which is confirmed by the results of modeling in the MATLAB operating environment. The studied ZC sequences as part of a cyclic symbol prefix can be used to analyze subcarriers modulated by elements of these sequences, which are used by the mobile station as control ones, when detecting selective frequency distortions in the channel with fading.

Key words: LTE OFDM, Zadov-Chu sequence (ZC), correlation function, OFDM-symbol, cyclic prefix.

Ключевые слова: LTE OFDM, последовательность Задова-Чу (ZC), корреляционная функция, OFDM-символ, циклический префикс.

Введение. Краткая характеристика системы синхронизации технологии LTE OFDM

Технология LTE (Long Term Evolution – долговременное развитие) – стандарт мобильной связи, разработанный консорциумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project) как технология дальнейшего развития системы WLAN для работы с высокоподвижными объектами (до 350...500 км/ч) и величиной занимаемой полосы в 100 МГц. Физический уровень сетей LTE реализован на базе сигнальной технологии OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – мультиплексирование с ортогональным частотным разнесением [1]. Принципиальной особенностью этой технологии является распределение информационных модулированных сигналов по поднесущим частотам, передаваемым параллельно в одном физическом канале связи. Технология OFDM позволяет высокоскоростной поток данных конвертировать в несколько параллельных битовых потоков меньшей скорости, передаваемых одновременно, причем каждый поток данных модулирует свою поднесущую. Спектры параллельных битовых потоков не перекрываются.

Принципы построения алгоритмов системы синхронизации в технологии OFDM рассмотрены в ряде таких публикаций, как [1, 2, 3, 4] и др. В данной работе вопросы построения систем синхронизации технологии LTE OFDM рассмотрены для варианта частотного разделения каналов (FDD) в нисходящем направлении от базовой станции к пользователям (DL – Down Link).

При активизации мобильного пользователя произво-

Определены критерии выбора комплексных последовательностей Задова-Чу (ZC) для их использования при формировании циклического префикса OFDM-символов в технологии LTE на этапе синхронизации по корреляционной кривой циклического префикса OFDM-символов кадра, передаваемого от базовой станции к мобильному пользователю. Применение последовательностей ZC для заполнения временного интервала циклического префикса повысит скорость и эффективность синхронизации, что подтверждается результатами моделирования в операционной среде MATLAB. Исследуемые последовательности ZC в составе циклического префикса символов можно использовать для анализа поднесущих, модулированных элементами этих последовательностей, которые используются мобильной станцией как контрольные, при выявлении селективных частотных искажений в канале с замираниями.

дится процесс синхронизации с ближайшей к нему базовой станцией (БС). В технологии LTE БС в нисходящем направлении периодически посылает два синхросигнала, построенных на последовательностях с хорошими корреляционными характеристиками – первичный (PSS) и вторичный (SSS), в которых закодирован идентификатор БС, определенный для конкретного пользователя:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)},$$

где $N_{ID}^{(1)}$ – идентификатор группы (0...167), определяемый SSS; $N_{ID}^{(2)}$ – идентификатор сектора (0, 1, 2), определяемый PSS. Каждая БС формирует 504 сотовых идентификатора, организованных в 168 групп по 3 идентификатора в каждой [4]. Передача данных в нисходящем (от БС) и восходящем (к БС) направлениях организована как последовательность кадров длительностью 10 мс, включающих битовые данные пользователя, сформированные в модуляционные символы $QPSK$, $16QAM$, $64QAM$ [4, стр.97...100], и служебную информа-

цию, расположенную в известных на стороне приема ресурсных элементах (RE) кадра. Кадр во временной области разбивается на 20 слотов, каждый из которых состоит из 6 или 7 символов технологии OFDM (рис. 1)

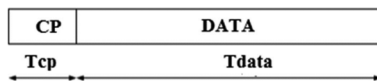


Рис. 1. OFDM-символ

Для защиты от межсимвольных искажений (ISI) и интерференции поднесущих (ICI) в OFDM-символе предусмотрен защитный интервал (циклический префикс-CP), длительность которого, определяемая размерами соты, составляет 1/4, 1/8, 1/16 величины информационной части символа (DATA). В технологии OFDM CP формируется переносом в интервал TCP блока данных той же длительности с конца информационной части (Tdata) OFDM-символа.

Первичная синхронизация БС с пользователем включает стандартные этапы:

- тактовая синхронизация, в данном случае – определение границ OFDM-символа по корреляционной кривой CP;

- цикловая синхронизация – в данном случае это синхронизация по корреляционной кривой сигнала PSS, расположенного в 7-м OFDM-символе 0-го и 10-го слота передаваемого кадра [4], т.е. в начале 1 и 2 половины кадра, что позволяет получить циклическую корреляционную функцию PSS, построенного на комплексных последовательностях Задва-Чу ($ZC(u, n)$) и их циклических сдвигах. Это комплексные последовательности постоянной амплитуды с фазами, вычисляемыми по формуле, приведенной далее. Циклическая автокорреляционная функция (ACF) последовательности ZC имеет вид δ -функции с нулевым значением боковых лепестков, т.е. обладает идеальными корреляционными характеристиками [3]. Корреляционная кривая PSS позволяет получить грубую временную привязку к границам полукadra;

- кадровая синхронизация – в данном случае это синхронизация по корреляционной кривой SSS, построенных на 2-х 31-элементных M-последовательностях и их циклических сдвигах, размещенных в 6-м OFDM-символе 0-го и 10-го слота передаваемого кадра [4]. Поскольку M-последовательности в составе SSS в 0 и 10 слотах различны, корреляционные пики SSS повторяются через 20 слотов, т.е. с периодом длительности кадра. Это позволяет получить временную привязку к началу кадра, т.е. завершить процесс кадровой синхронизации. Компенсация частотных сдвигов поднесущих возможна поэтапно, начиная с комплексной корреляционной характеристики CP, из квадратур которой можно вычислить дробную часть фазового смещения поднесущих в полосе передаваемого кадра [2].

Методы подбора последовательностей Задва-Чу для формирования циклического префикса OFDM-символов

В данной работе исследуются пути повышения эффективности синхронизации по корреляционной кривой циклического префикса. Это первый этап синхронизации,

позволяющий получить временную привязку к границам OFDM-символа и началу слота. На рис. 2 показан процесс перезаписи блока информации с конца символа в область CP во временной области при формировании последовательности передаваемых OFDM-символов слота.

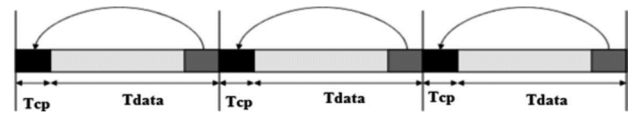


Рис. 2. Процесс перезаписи данных конца OFDM-символа во временной интервал циклического префикса последовательности символов в слоте LTE OFDM кадра

Дискретизация OFDM-символов производится с частотой выборки (Samples) $f_s = 30,72$ МГц, или периодом T_s – базовым временным интервалом в технологии LTE OFDM (Basic time unit) [4], равным $1/f_s = 3,255e-8$ с.

По корреляционной кривой CP в любом из вариантов проводится определение границ символа и временного положения начала слота. При прохождении канала связи с Рэлеевскими замираниями информационные данные на протяжении длительности OFDM-символа, особенно при «быстрых» замираниях, могут измениться настолько, что CP и конечный интервал символа, с которого копировалась информация при передаче кадра, не сформируют явного пика взаимокорреляционной функции (VCF) при прохождении корреляционного или согласованного фильтра оптимального приемника. В работе [6] предложен способ улучшения корреляционных характеристик CP OFDM-символов в системе DVB-T2 путем использования M-последовательности с размещением ее в защитном интервале. Приведены результаты моделирования процесса корреляционного декодирования M-последовательности, передаваемой совместно с информацией циклического префикса. В [6] показано, что применение M-последовательностей в качестве заполнения CP повышает скорость и качество процесса синхронизации. В этой работе обращено особое внимание на короткие M-последовательности длиной 31 и 63 элемента, позволяющие уменьшить перекрестные искажения между блоком OFDM-символов и используемыми последовательностями.

В данной работе в LTE технологии предлагается использовать в качестве циклических префиксов OFDM-символов короткие последовательности Задва-Чу (ZC), не используемые в группе стандартов, выделенных в 36-ю серию технических спецификаций 3GPP. Что касается M-последовательностей длиной 31 и 63 элемента, то эти M-последовательности и их циклические сдвиги широко используются для формирования вторичного синхросигнала (SSS) и не могут рассматриваться как формирующие CP OFDM-символов LTE технологии.

В стандарте LTE использованы следующие последовательности ZC [4]:

1. Первичный синхросигнал PSS, построенный на $ZC(u, n)$, где корень (индекс) $u = 25$, либо 29 или 34, количество элементов $n = 62$. Математическая модель $ZC(u, n)$

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi un(n+1)}{63}} & n = 0, 1, \dots, 30 \\ e^{-j\frac{\pi u(n+1)(n+2)}{63}} & n = 31, 32, \dots, 61 \end{cases}$$

где $d_u(n)$ – n -й элемент последовательности u -го корня.

2. Два типа опорных сигналов восходящего (UL) направления:

– Демодулированные последовательности (Demodulation reference signal – DM-RS), передаваемые в общем канале (PUSCH) или логическом канале управления (PUCCH).

– Зондирующий сигнал (Sounding reference signal – SRS), служащий для оценки качества канала. SRS – опорный (референсный – RS) сигнал с шириной полосы, охватывающей весь диапазон поднесущих частот пользователя.

Оба рассматриваемых сигнала и их циклические сдвиги формируются из одной базовой последовательности Задова-Чу:

$$x_q(m) = \exp\left[\frac{-j\pi qm(m+1)}{N_{ZC}^{RS}}\right],$$

где корень q пропорционален значению $N_{ZC}^{RS} \left[\frac{u+1}{31} \right]$,

$u = 0 \dots 29$, N_{ZC}^{RS} – число элементов последовательности:

$$N_{ZC}^{RS} < M_{sc}^{RS},$$

где $M_{sc}^{RS} = m * N_{sc}^{RB} = m * 12$ – общее число поднесущих, доступное пользователю в текущем сеансе обмена, кратное 12, т.е. числу поднесущих N_{sc}^{RB} одного ресурсного блока (RB) [4]. Из формулы базовой последовательности для формирования SRS, DM-RS опорных сигналов следует, что число элементов этих последовательностей кратно 12 – числу поднесущих одного RB.

Преамбулы канала случайного доступа (PRACH) построены на последовательностях ZC с числом элементов $N_{ZC} = 139, 839$.

3. Преамбулы PRACH канала и их циклические сдвиги формируются из одной базовой последовательности Задова-Чу:

$$x_u(n) = \exp\left[\frac{-j\pi un(n+1)}{N_{ZC}}\right],$$

где корень определяется из соответствующих таблиц [4], $0 \leq n \leq (N_{ZC} - 1)$.

При выборе последовательностей ZC для формирования CP OFDM-символов предлагается руководствоваться следующими критериями:

1. В число последовательностей ZC для CP не входят последовательности, указанные выше, и используемые в стандарте LTE [4].

2. Если число элементов подобранной для формирования CP последовательности не кратно $2k$ (k – целое положительное число), что необходимо для выполнения быстрого Фурье-преобразования (БПФ), недостающие элементы дополняются нулевыми значениями (предполагается, что число элементов последовательности меньше ближайшего значения $2k$).

3 Корреляционные свойства последовательностей эффективно отражает величина отношения квадрата модуля максимума ACF к среднеквадратическому значению боковых лепестков [7]:

$$MF_m = \frac{R_m^2}{\left(\sum_{i=0}^N R_i^2\right) / N},$$

где R_m^2 – величина квадрата максимума (центрального пика) ACF , R_i^2 – величина квадрата i -го отсчета боковых лепестков, N – длина ACF .

Для последовательностей одинаковой длины это отношение может отличаться в зависимости от значения u – корня (индекса) $ZC(u,n)$, что предполагает подбор последовательности с таким индексом, отношение MF_m которой будет максимальным.

Практические результаты подбора последовательностей $ZC(u,n)$ для формирования циклического префикса OFDM-символов

Для проверки предположения о повышении эффективности процесса синхронизации по корреляционной кривой CP при использовании коротких последовательностей ZC вместо битовых данных CP , в операционной среде MATLAB было проведено моделирование для символов с CP из комплексных последовательностей $ZC(5,9)$, $ZC(9,19)$, $ZC(15,31)$, $ZC(25,37)$ и случайных комплексных битовых последовательностей с одинаковым количеством элементов n . Затем в среде MATLAB построены ACF всех сформированных последовательностей и вычислены значения MF_m (dB) ACF каждой последовательности, причем для случайных битовых последовательностей проведено усреднение результатов вычисленных MF_m не менее, чем по 10 вариантам случайной последовательности для каждой длины n . Вычислен энергетический выигрыш KE от применения коротких последовательностей $ZC(u,n)$ для заполнения CP символов на первом этапе синхронизации по сравнению с классическим заполнением CP битовыми данными.

Результаты исследований приведены в табл. 1. Построен график зависимости MF_m (dB) от длины последовательностей $ZC(u,n)$ и усредненной MF_m (dB) для битовых случайных последовательностей $B(n)$.

По данным табл. 1 построен график (рис. 3).

Таблица 1

n -кол-во элементов последовательности	Усредненное $[MF_m_B]$ (dB) для CP случайных битовых последовательностей	MF_m_ZC (dB) для CP $ZC(u,n)$	$K_E = MF_m_ZC - MF_m_B$ (dB)
9	9,8581	$ZC(5,9)$ 11,5232	1,6651
19	12,7688	$ZC(9,19)$ 14,9381	2,1693
31	14,3025	$ZC(15,31)$ 17,2455	2,9430
37	16,0846	$ZC(19,37)$ 18,0392	1,9546

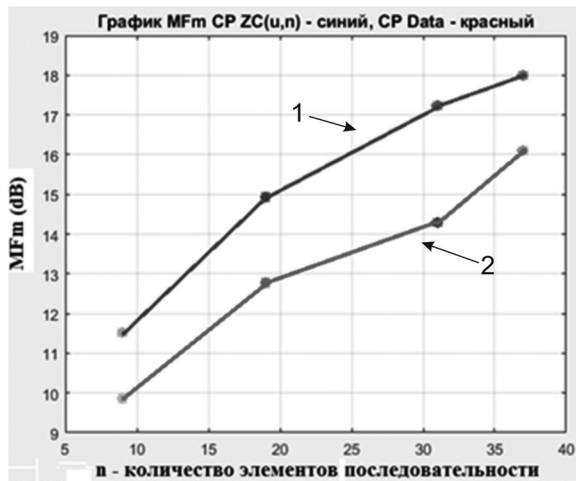


Рис. 3. График отношения модуля максимума ACF к среднеквадратическому значению боковых лепестков в зависимости от длины последовательности: для CP из ZC(u,n) – 1; для CP из случайной битовой последовательности – 2

На рис. 4 представлены автокорреляционные функции случайной цифровой последовательности, формирующей CP:

- а) из данных конца OFDM-символа с числом элементов последовательности $n = 37$;
- б) последовательности ZC(19,37) с числом элементов последовательности $n = 37$.

Подбор последовательности ZC(u,n) с наиболее высоким MF_m проведен на примере ZC(u,37) с различными индексами u. В табл. 2 приведены значения MF_m для последовательностей ZC(u,37).

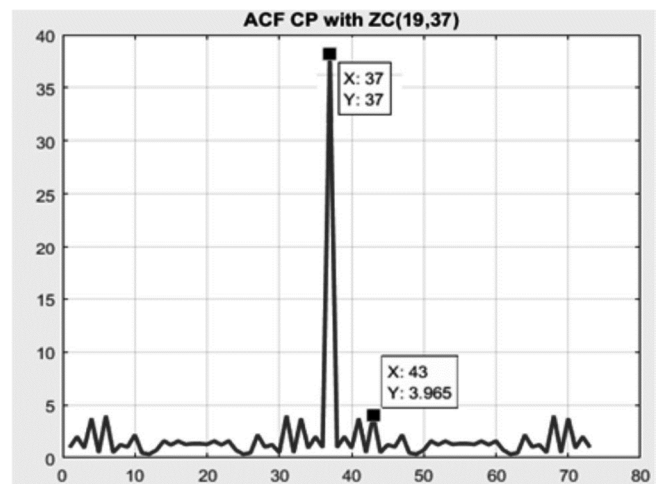
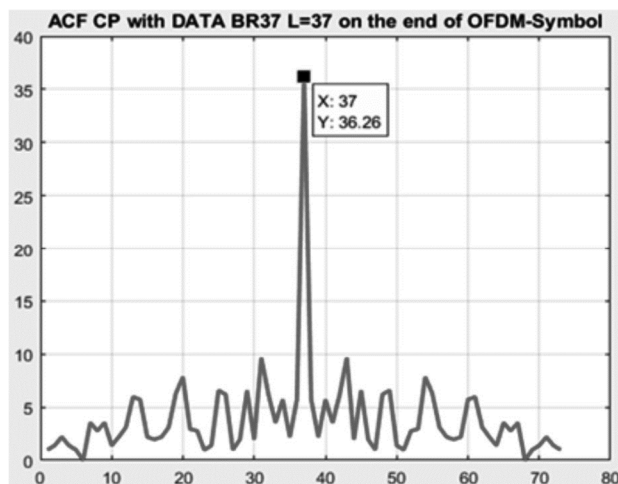


Рис. 4. ACF CP, сформированного: а) из битовых случайных последовательностей с конца OFDM – символа длины $n = 37$; б) последовательностей ZC(19,37)

Таблица 2

Последовательность ZC(u,37)	Величина MF_m (dB)	Последовательность ZC(u,37)	Величина MF_m (dB)
ZC(15,37)	17,7028	ZC(26,37)	17,4088
ZC(17,37)	16,8875	ZC(27,37)	17,2435
ZC(19,37)	18,0392	ZC(29,37)	16,7371
ZC(21,37)	17,7227	ZC(30,37)	16,9138
ZC(23,37)	17,6544	ZC(31,37)	17,5867
ZC(25,37)	18,0037		

Последовательности ZC(u,37) с разными индексами u формируют ACF с различным отношением MF_m вследствие различного уровня боковых лепестков, что отражено на рис. 5 – осциллограммы модуля ACF ZC(19,37), ZC(30,37), ZC(26,37), ZC(15,37), полученные при моделировании автокорреляционных функций данных последовательностей программой MATLAB. Из табл. 2 следует, что все величины MF_m для последовательностей ZC(u,37) больше той же величины $MF_m = 16,0846$ для ACF CP, сформированного из случайной битовой последовательности с таким же числом элементов $n = 37$. Путем подбора индекса и моделирования можно определить последовательность ZC(u,n) длины n с наилучшими корреляционными характеристиками. В данном случае – это ZC(19,37) – выделено в табл. 2 жирным.

Начиная с этапа грубой временной синхронизации по корреляционной кривой CP, есть возможность оценки характеристик канала связи по величине амплитуды и времени задержки корреляционных пиков CP, формирующихся с периодом, близким к длительности OFDM-символа. Так же, как закрепляется за пользовательской станцией идентификатор $N_{ID}^{(2)}$ PSS, BC может закрепить и выбранную из неиспользуемых в стандарте 3GPP TS 36.211 последовательностей ZC в качестве CP на этапе установления синхронизации. Так, из табл. 2, для числа элементов 37, можно выбрать последовательности ZC(19,37), ZC(21,37), ZC(25,37) для использования в качестве CP OFDM – символа. Число элементов n последовательности ZC(u,n) выбирается, исходя из длины CP (нормальный, расширенный, либо для слотов с тремя символами OFDM) и количества выборок на символ (samples) [3, стр.132, рис. 5.14].

Для определения селективных частотных искажений в Рэлеевском канале в технологии LTE OFDM при завершении процесса синхронизации пользователя с *БС* и получения необходимой служебной информации от *БС*, с пользовательской станции на *БС* поступает зондирующий сигнал (*SRS*) в виде последовательности *ZC*, охватывающий полосу частот выделенного пользователю диапазона [4]. *БС* анализирует селективные искажения поднесущих *SRS* и пересылает информацию о наименее искажаемых каналах поднесущих пользователю. Эти функции на этапе синхронизации может выполнять и последовательность *ZC* в составе *CP*, поскольку эта последовательность известна и на *БС*, и пользователю и может служить контрольным «словом», поэлементно распределенным по поднесущим в полосе *CP* и используемым для оценки селективных частотных замираний канала связи. Для контроля качества канала можно охватить значительную часть частотной полосы пользователя, если за время передачи слота перемещать элементы последовательности в определенном порядке по всему выделенному диапазону поднесущих. Анализировать селективные частотные искажения может сам пользователь, начиная с этапа синхронизации по *CP* и не ожидая завершения полного цикла синхронизации и обмена с *БС* опорными сигналами (*RS*) для оценки качества канала.

Заключение

В данной работе отражены результаты моделирования в операционной среде MATLAB корреляционных функций циклического префикса (*CP*), сформированного цифровыми битовыми данными с интервала конца символа OFDM и комплексных последовательностей $ZC(u,n)$, заменяющих битовые последовательности на аналогичном временном интервале конца символа и *CP*. Проведено сравнение величин отношения модуля корреляционной функции к среднеквадратической величине боковых лепестков MF_m для комплексных последовательностей Задова-Чу и битовых последовательностей *CP*, сформированного стандартным методом, с тем же числом элементов *n*.

Последовательности $ZC(u,n)$ выбирались с числом элементов, отличных от тех, которые задействованы в составе служебных сигналов технологии *LTE*. В резуль-

тате получены значения энергетического выигрыша при использовании $ZC(u,n)$ для формирования *CP* символа OFDM в пределах (1,67...2,94) dB для последовательностей с числом элементов 9,19,31,37, рассмотренных в данной работе. На примере последовательности *ZC* с числом элементов $n = 37$ проведен подбор индекса последовательности *u*, позволяющим получить наибольшую величину MF_m . Кроме того, эти последовательности можно использовать для анализа поднесущих, модулированных элементами этой контрольной последовательности при выявлении селективных частотных искажений в канале с замираниями.

Литература

1. Казачков В.О. Исследование реализации синхронизации по сигналам Задова-Чу в стандарте Long Term Evolution для канала с замираниями. – Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/> Том 7, №1 (2015) УДК 621.396.94. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/39TVN115.pdf> (дата обращения 04.01.2018)
2. Гельгор А.Л., Попов Е.А. Технология LTE мобильной передачи данных: учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2011. – 204 с
3. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. – Torquay, UK: John Wiley & Sons, 2009.
4. ETSI TS 136 211 V10.0.0 (2011-01). Technical Specification. European Telecommunications Standards Institute, 2011, 104 с. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 10.0.0 Release 10).
5. Физический уровень LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader/r/review/2187/doc/53411/> (дата обращения 19.12.2019).
6. Быков В.В., Аль-Мершахи С.М. Улучшение синхронизации OFDM-сигналов в системе DVB-T2 // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – № 6. – С. 21-26.
7. Киселева Т.П. Исследование свойств циклической автокорреляционной функции последовательности Задова-Чу в зависимости от характеристик квантования элементов последовательности. – Цифровая обработка сигналов, № 4, 2018, 40-44 с.