

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/39TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/39TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/39TVN115>)

**УДК 621.396.94**

**Казачков Виталий Олегович**

ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Россия, Москва<sup>1</sup>

Аспирант

E-mail: [Elektronik89@rambler.ru](mailto:Elektronik89@rambler.ru)

## **Исследование реализации синхронизации по сигналам Задова-Чу в стандарте Long Term Evolution для канала с замираниями**

---

<sup>1</sup> 142121 Московская область, г. Подольск, ул. Генерала Смирнова д. 3, кв. 192

**Аннотация.** Последовательности Задова-Чу используются в Long Term Evolution (LTE) системах как первичный и вторичный синхросигналы. Их ключевой особенностью является низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции. Процедура синхронизации сводится к вычислению корреляционной функции между принимаемым искаженным синхросигналом и заранее известным на приемной стороне образце, но из-за шумов, а так же в следствие эффекта Доплера и многолучевого распространения сигнала возможно ложное определение максимума корреляционной функции. В данной статье предлагается метод вычисления корреляционной функции для последовательностей Задова-Чу, позволяющий снизить вероятность ложного определения максимума корреляционной функции. Корреляционная функция вычисляется как результат произведения двух компонент. Первая компонента - это корреляционная функция принятого синхросигнала и его образца. Вторая компонента - корреляционная функция результата быстрого преобразования Фурье от принимаемого синхросигнала и результата быстрого преобразования Фурье от образца синхросигнала. Предлагаемый метод был апробирован на имитационной модели в среде Matlab/Simulink для моделей каналов Extended Pedestrian A (EPA) при частоте Доплера 5 Гц, Extended Vehicular A (EVA) при частоте Доплера 70 Гц и Extended Typical Urban (ETU) при частоте Доплера 300 Гц. При идеальной синхронизации для значения вероятности ложного определения максимума корреляционной функции  $P = 10^{-5}$  энергетический выигрыш составляет 1.9 дБ для модели канала ETU, 1.7 для модели канала EVA и 1.5 для модели канала ETU в сравнении с классическим методом вычисления корреляционной функции по принимаемому синхросигналу и его образцу. При наличии нормированной частотной отстройки до  $f/\Delta f \approx 0.35$  (где  $\Delta f = 15$  кГц – разнос между поднесущими), предлагаемый метод позволяет получить значение вероятности ложного определения максимума, которое корреляционная функция принятого синхросигнала и его образца позволяет достичь лишь при полном отсутствии нормированной частотной отстройки.

**Ключевые слова:** цифровая связь; ортогональное частотное мультиплексирование; синхронизация; первичный синхросигнал; последовательности Задова-Чу; быстрое преобразование Фурье; корреляционная функция; имитационное моделирование; каналы с замираниями; частотная отстройка.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Казачков В.О. Исследование реализации синхронизации по сигналам Задова-Чу в стандарте Long Term Evolution для канала с замираниями // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/39TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/39TVN115

## Введение

LTE (Long Term Evolution) (дословно с английского можно перевести как долговременное развитие) – стандарт мобильной связи, разработанный консорциумом 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project). С момента своего появления технология LTE прошла через несколько этапов развития, называемых релизами, а 10 релиз (LTE – Advanced (LTE-A)) был утвержден Международным Союзом Электросвязи как система 4 поколения (4 Generation (4G)). В настоящее время наблюдается существенный рост трафика мобильными абонентами, и способность обеспечить высокие скорости передачи данных делает стандарт LTE наиболее перспективным направлением развития мобильных сетей. Кроме того стандарт LTE обладает масштабируемой полосой (1.4, 3, 5, 10, 15 и 20 МГц), начиная с 10 релиза стандарт поддерживает агрегацию каналов, что позволяет достигать значения занимаемой полосы в 100 МГц, так же поддерживается передвижение абонентов на скоростях до 350 км/ч и т.д. [1-4].

Для осуществления передачи и приема данных в сетях LTE мобильная станция должна синхронизироваться с базовой станцией. Для реализации процедуры синхронизации базовая станция передает специальные синхронизирующие сигналы: первичный синхросигнал (PSS - Primary Synchronization Signal) и вторичный синхросигнал (SSS - Secondary Synchronization Signal).

При этом алгоритм синхронизации может быть разделен на следующие этапы [5]:

1. Грубая временная синхронизация с началом слота и оценка дробной частотной отстройки по корреляционной кривой циклического префикса.
2. Временная синхронизация с началом 0-го или 10-го слота, определение второй составляющей идентификатора соты и целой части частотной отстройки по корреляционной кривой первичного синхросигнала.
3. Временная синхронизация с началом кадра, определение первой составляющей идентификатора соты по корреляционной кривой вторичного синхросигнала.

Анализ публикаций по данной тематике показал, что в настоящее время существует ряд методов, позволяющих добиться высокой вероятности верного обнаружения синхросигнала стандарта LTE [6-7]. В данной статье рассматривается метод вычисления корреляционной функции синхросигналов стандарта LTE, позволяющий снизить вероятность возникновения ложного максимума, обусловленную наличием шумов в канале, замираниями, а так же частотной отстройкой.

## Описание метода

Первичный и вторичный синхросигналы в стандарте LTE – это последовательности Задова-Чу (Zadoff-Chu) [8]. Первичный синхросигнал формируется в соответствии с ниже представленным математическим описанием [1-5]:

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

где  $u$ - индекс, принимающий значение в зависимости от второй составляющей идентификатора соты  $N_{ID}^{(2)}$ :

**Таблица 1.**

**Значения индекса  $u$  (составлено автором)**

$N_{ID}^{(2)}$	$u$
0	25
1	29
2	34

В данной работе будут представлены результаты, полученные именно для первичного синхросигнала, для случая вторичного синхросигнала зависимости полностью идентичны. Это связано с тем, что в основе предложенного метода лежит следующее свойство: быстрое преобразование Фурье (БПФ) (Fast Fourier Transform (FFT)) от последовательности Задова-Чу – это тоже последовательность Задова-Чу. Эта особенность характерна для всех последовательностей Задова-Чу в целом, и не связана с конкретными значениями индекса  $u$ .

В случае наличия шума в канале, принимаемый сигнал можно записать как:

$$S(n) = d_u(n) + N(n) \quad (2)$$

где  $N(n)$  – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ).

Взаимная корреляция принятой смеси сигнала с шумом и образца синхросигнала находится как:

$$Corr_1(m) = \sum_{n=0}^{61} d_u^*(n)S(n+m) \quad (3)$$

Далее выполняются операции:

$$d_{u\ p}(n) = pad(d_u(n)) \quad (4)$$

$$S_p(n) = pad(S(n)) \quad (5)$$

где  $pad$  - операция заполнения массива нулями до размера в 64 отсчета.

Это необходимо для выполнения операции БПФ. Т.к. изначальный размер массива 62 отсчета, операция  $pad$  добавляет 0 в начало и конец массива.

Затем выполняется операция БПФ:

$$FFT_S(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S_p(n)e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$FFT_{d_u}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d_{u\ p}(n)e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (7)$$

После чего вычисляется взаимнокорреляционная функция результатов БПФ:

$$Corr_2(m) = \sum_{n=0}^{61} depad(|FFT_S^*(n)|)depad(|FFT_{d_u}(n+m)|) \quad (8)$$

где  $depad$  - операция выкалывания, т.е. удаления из массива значений, соответствующих расположению добавленных ранее 0 в результате операции  $pad$ .

Результатом является перемножение двух полученных взаимнокорреляционных функций [9]:

$$R(m) = |Corr_1(m)Corr_2(m)| \quad (9)$$

Структурная схема предложенного метода представлена на рис. 1, где Norm - операция нормирования, жирная линия (Frame) означает структуру сигнала в виде кадра, тонкая линия (Sample) означает структуру в виде отсчетов сигнала.

В случае наличия фазовой и частотной отстройки, математическое описание метода идентично представленному в формулах (3) - (9), но принимаемая смесь сигнала с шумом будет иметь вид:

$$S(0) = (d_u(0) + N(0))e^{j\varphi(0)} \quad (10)$$

$$S(n) = (d_u(n) + N(n))e^{j(2\pi f(n-1)T + \varphi(n))}, \quad n > 0 \quad (11)$$

где  $f(n-1), \varphi(n)$  – частотная и фазовая отстройка, соответственно;  $T$  – шаг дискретизации.

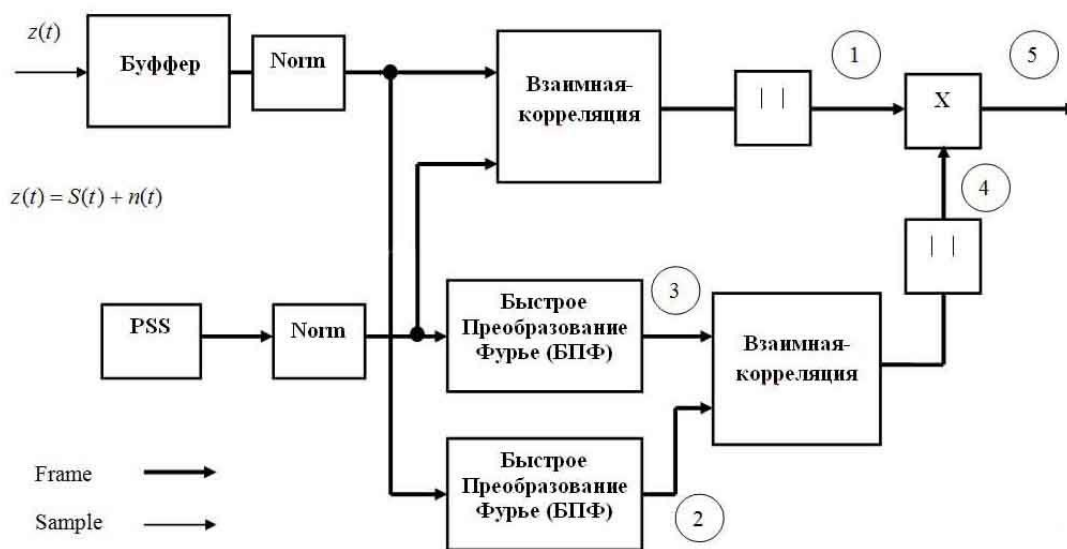


Рис. 1. Структурная схема предлагаемого метода. (составлено автором)

### Имитационное моделирование

В виду сложности аналитического решения рассматриваемой задачи в качестве основного метода расчета и анализа характеристик выбран метод имитационного моделирования. Имитационное моделирование проводилось в среде Matlab/Simulink на разработанной модели стандарта LTE (рис. 2) для канала с замираниями со следующими профилями задержки: Extended Pedestrian A (EPA), Extended Vehicular A (EVA) и Extended Typical Urban (ETU). Эти профили представляют низкий, средний и высокий разброс задержки среды. Характеристики каналов представлены в таблице 2, 3 и 4 [10]. Для модели канала EPA максимальная частота Доплера 5 Гц, для EVA и ETU 70 и 300 Гц, соответственно.

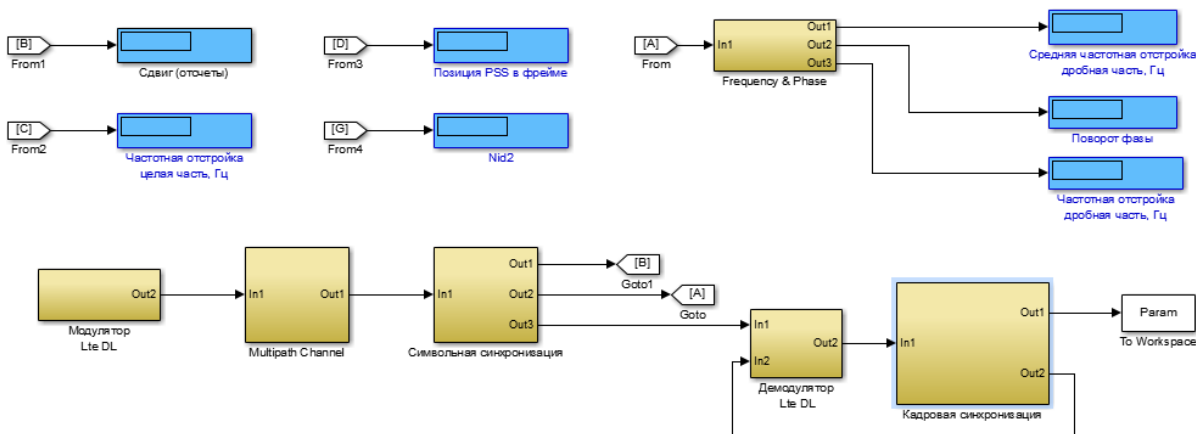


Рис. 2. Имитационная модель стандарта LTE в среде Matlab/Simulink. (составлено автором)

На рис. 3, 4 и 5 представлены зависимости вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции ( $P_v$ ) от отношения сигнал/шум (ОСШ) в полосе сигнала (Signal-to Noise Ratio (SNR)) для моделей каналов EРА, EVA и ETU при идеальной работе системы синхронизации, где ОСШ – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума. Зеленой линией обозначена кривая для корреляционной функции на основе результатов БПФ (БПФ КФ), красной линией кривая для "классической" корреляционной функции (КФ) и синей – предлагаемый метод (ПМ). Предлагаемый метод позволяет снизить вероятность ложного определения максимума взаимокорреляционной функции по сравнению с классическим методом. Так для вероятности  $P_v = 10^{-5}$  для модели канала EРА энергетический выигрыш составил 1.9 дБ, для модели канала EVA 1.7 дБ, для модели канала ETU 1.5 дБ. Метод вычисления корреляционной функции на основе результатов БПФ показал практически идентичные с классическим методом результаты.

**Таблица 2**

**Профиль задержки EРА (составлено автором)**

Задержка, нс	Мощность, дБ
0	0
30	-1
70	-2
90	-3
110	-8
190	-17.2
410	-20.8

**Таблица 3**

**Профиль задержки EVA (составлено автором)**

Задержка, нс	Мощность, дБ
0	0
30	-1.5
150	-1.4
310	-3.6
370	-0.6
710	-9.1
1090	-7
1730	-12
2510	-16.9

Таблица 4.

Профиль задержки ETU (составлено автором)

Задержка, нс	Мощность, дБ
0	-1
50	-1
120	-1
200	0
230	0
500	0
1600	-3
2300	-5
5000	-7

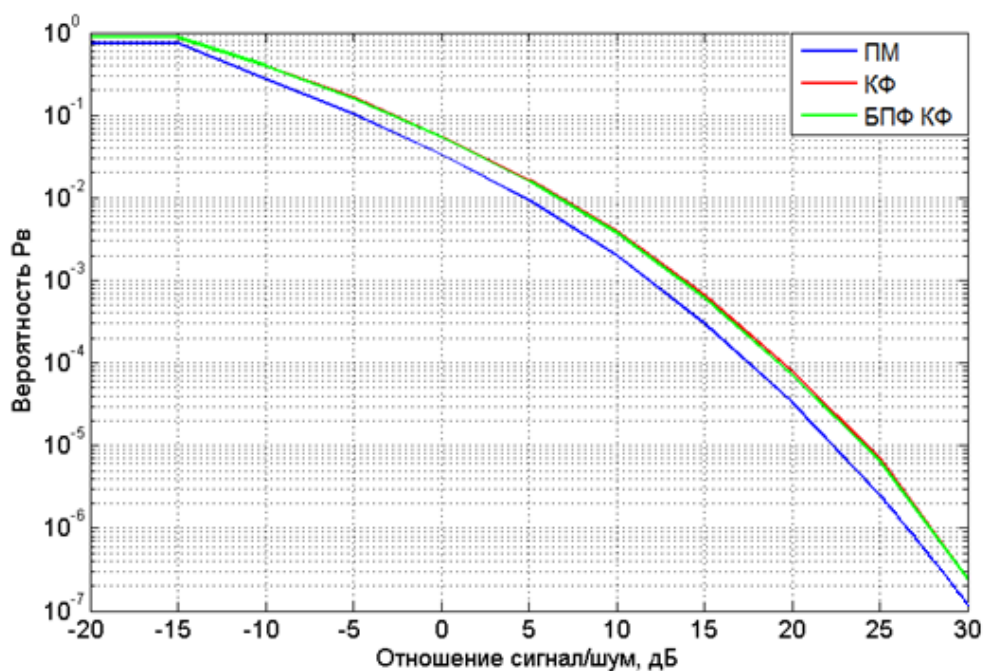


Рис. 3. Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции ( $P_v$ ) от ОСШ для модели канала EPA. (составлено автором)

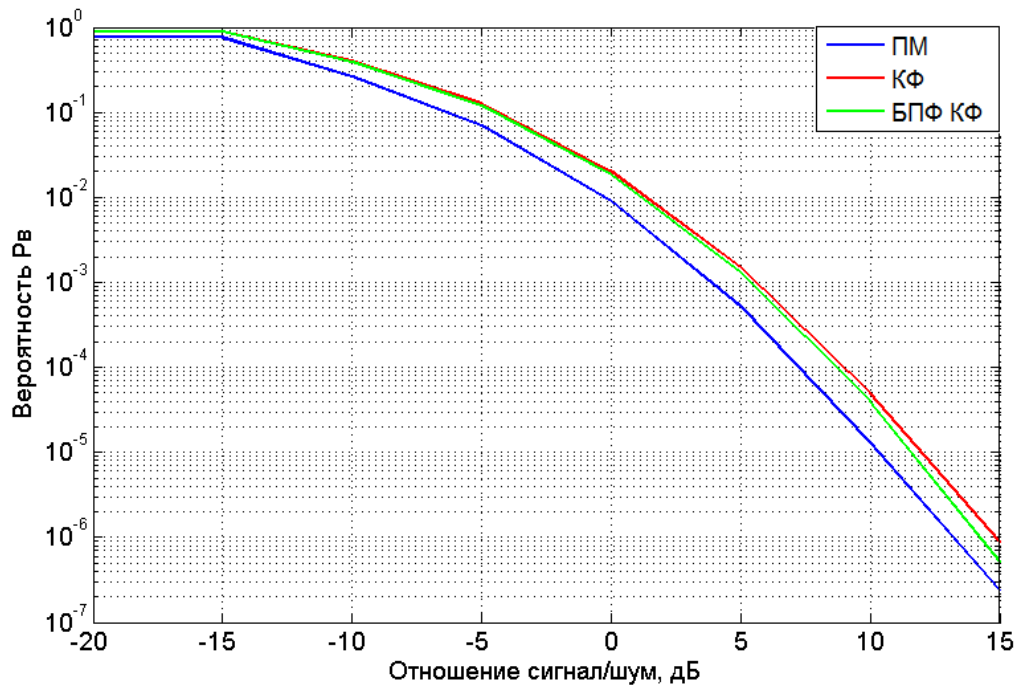


Рис. 4. Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции ( $P_v$ ) от ОСШ для модели канала EVA. (составлено автором)

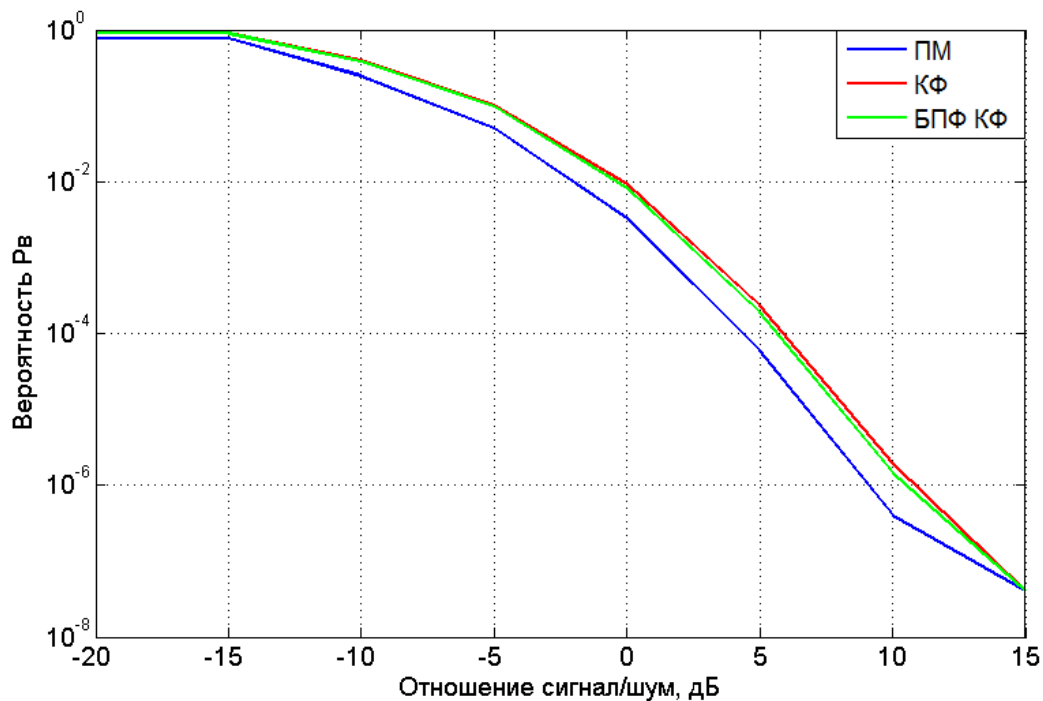
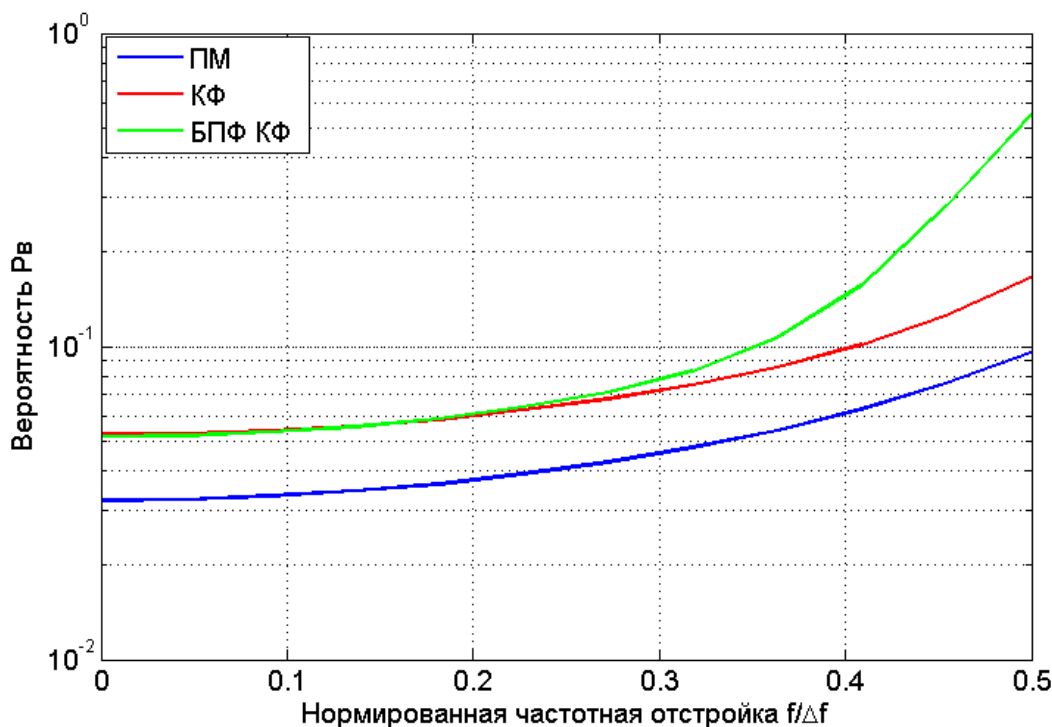


Рис. 5. Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции ( $P_v$ ) от ОСШ для модели канала ETU. (составлено автором)



Предложенный метод позволяет получить без усреднения результаты соизмеримые с результатами, представленными в [6] лишь при числе усредняемых результатов равном 30. Из рис. 3-5 следует, что вероятность правильного детектирования опускается ниже значения 0.9 при ОСШ -5 дБ для модели канала EРА, при -7 дБ для модели канала EVA и -8 дБ для EТУ, что превосходит так же результаты представленные в [7].

Далее исследован характер изменения вероятности  $P_B$  от нормированной частотной отстройки при фиксированном значении ОСШ для рассматриваемых моделей каналов. Нормировка произведена к величине разноса между поднесущими  $\Delta f = 15$  кГц. Примеры полученных зависимостей представлены на рис. 6-11. Рис. 6-8 отображают зависимости вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции  $P_B$  от нормированной частотной отстройки  $f/\Delta f$  для каналов EРА, EVA и EТУ, соответственно, при ОСШ = 0 дБ. Для всех каналов метод на основе результатов БПФ показывает практически идентичные результаты с классическим методом при нормированной частотной отстройке  $f/\Delta f < 0.25$ , свыше данного значения для метода на основе БПФ наблюдается ухудшение точности в сравнении с классическим методом.



**Рис. 6.** Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции ( $P_B$ ) от нормированной частотной отстройки для модели канала EРА. ОСШ = 0 дБ. (составлено автором)

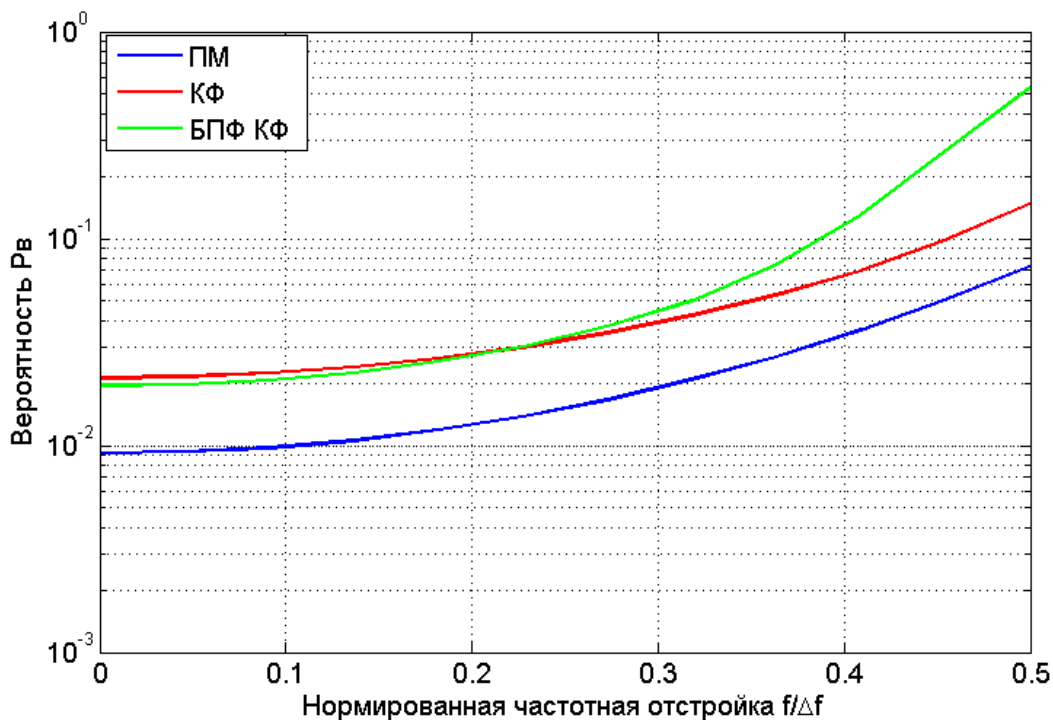


Рис. 7. Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции ( $P_v$ ) от нормированной частотной отстройки для модели канала EVA. ОСШ = 0 дБ. (составлено автором)

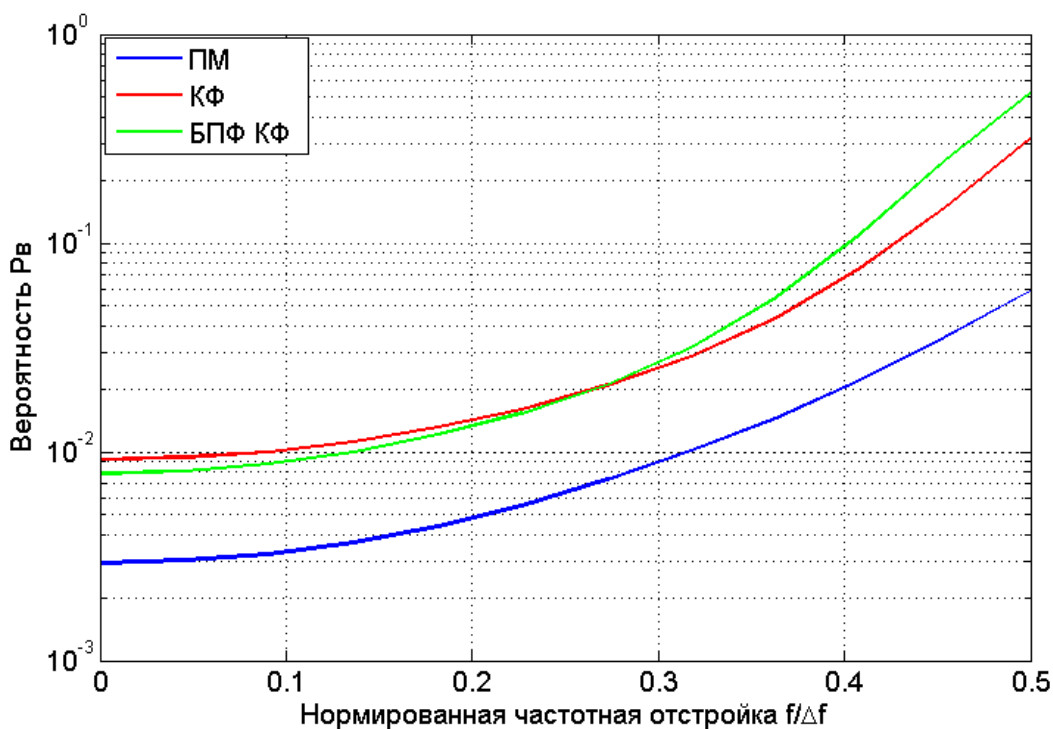
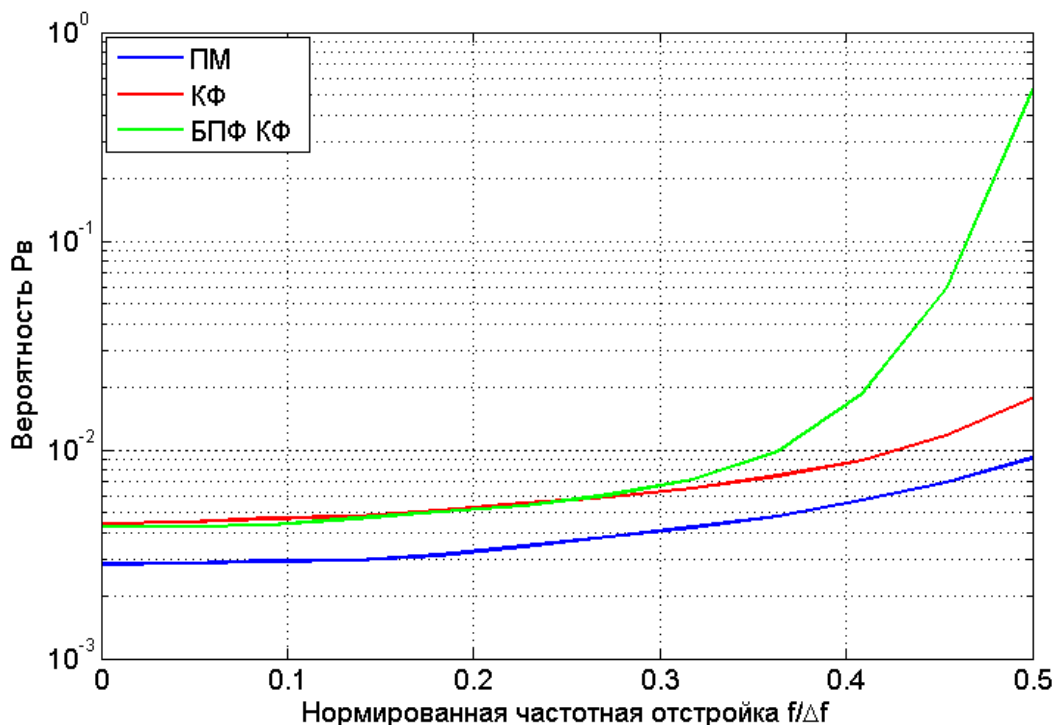


Рис. 8. Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции ( $P_v$ ) от нормированной частотной отстройки для модели канала ETU. ОСШ = 0 дБ. (составлено автором)

Так же на рис. 6-8 продемонстрировано преимущество предлагаемого метода перед классическим во всем рассматриваемом диапазоне нормированной частотной отстройки  $f/\Delta f$ . Для модели канала ЕРА (рис. 6) классический метод позволяет получить вероятность порядка  $P_B \approx 5 \cdot 10^{-2}$  при нормированной частотной отстройке  $f/\Delta f = 0$ , предлагаемый же метод позволяет получить такое же значение вероятности, но при  $f/\Delta f \approx 0.35$ . Аналогичная тенденция отображена и на рис. 7-8.

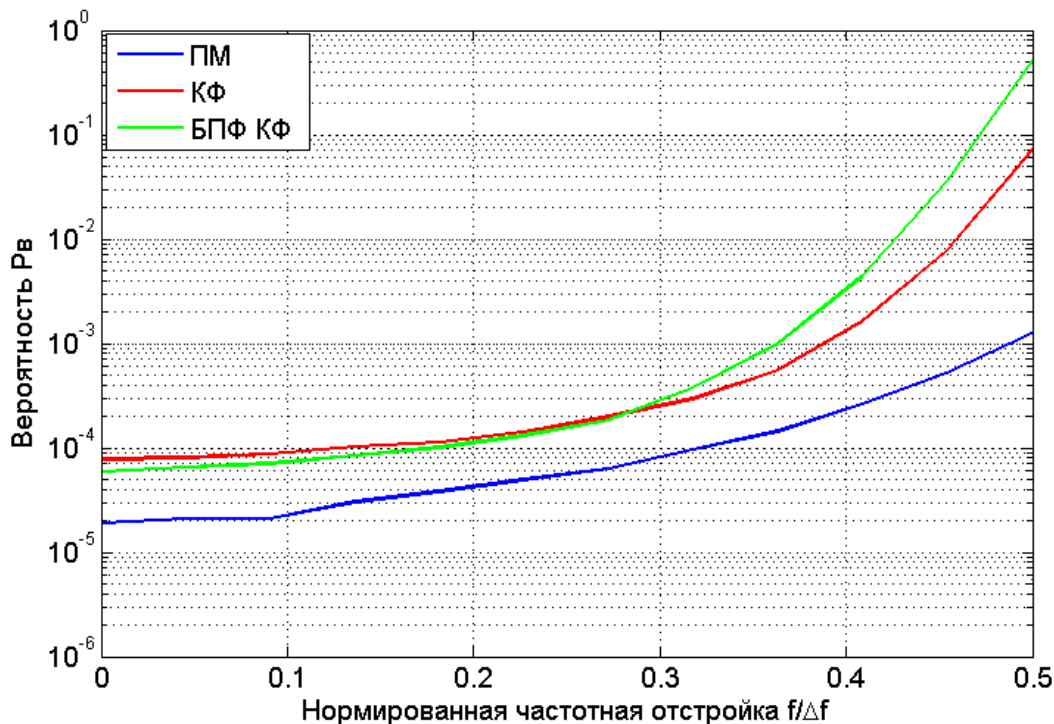
Рис. 9-10 отображают зависимости вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции  $P_B$  от нормированной частотной отстройки  $f/\Delta f$  для каналов ЕРА и EVA, соответственно, при ОСШ = 10 дБ.



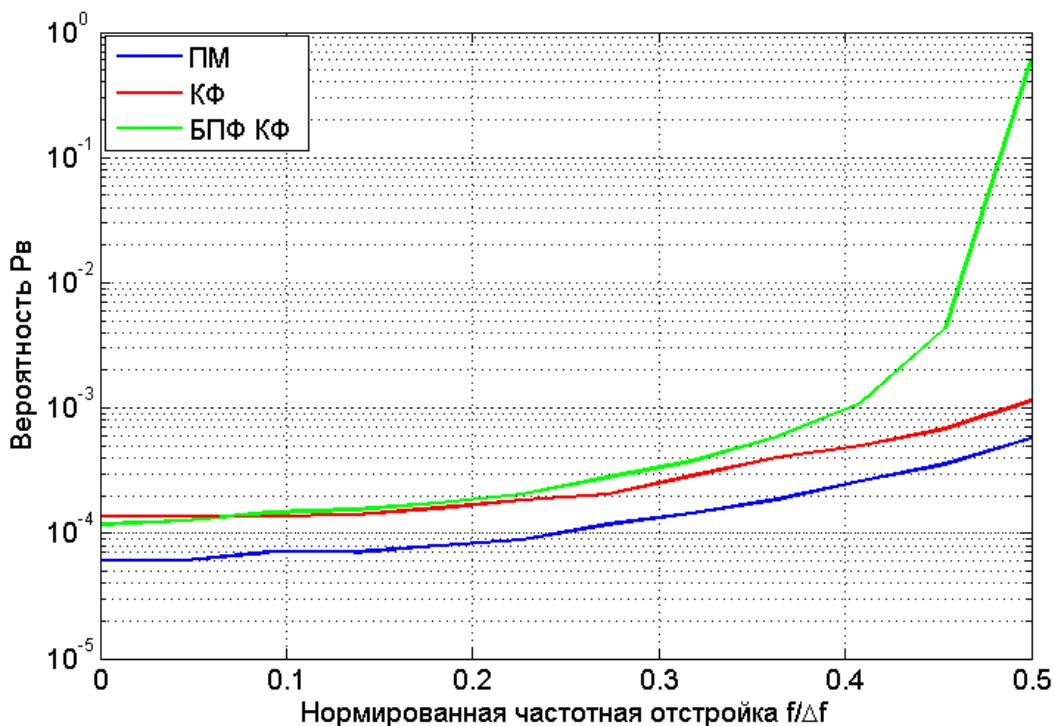
**Рис. 9.** Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции ( $P_B$ ) от нормированной частотной отстройки для модели канала ЕРА. ОСШ = 10 дБ. (составлено автором)

На рис. 11 представлена зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции  $P_B$  от нормированной частотной отстройки  $f/\Delta f$  для канала ЕРА при ОСШ = 20 дБ.

На рис. 9 и 11 видно, что для случая канала ЕРА увеличение ОСШ привело к значительному ухудшению вероятности  $P_B$  для метода на основе результатов БПФ в сравнении с классическим методом, предлагаемый же метод в рассматриваемом диапазоне значений нормированной частотной отстройки  $f/\Delta f$  позволяет добиться снижения вероятности  $P_B$  в сравнении с классическим методом. При этом характер кривых для предлагаемого и классического метода практически идентичен. Для случая канала EVA при ОСШ = 10 дБ (рис. 10) при увеличении нормированной частотной отстройки  $f/\Delta f$  наблюдается значительное увеличение вероятности  $P_B$  не только для метода на основе результатов БПФ, но и для классического метода в сравнении с предлагаемым.



**Рис. 10.** Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции ( $P_v$ ) от нормированной частотной отстройки для модели канала EVA. ОСШ = 10 дБ. (составлено автором)



**Рис. 11.** Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции ( $P_v$ ) от нормированной частотной отстройки для модели канала ERA. ОСШ = 10 дБ. (составлено автором)

### Заключение.

Проведенное исследование показало, что рассматриваемый метод позволяет добиться снижения вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции для последовательностей Задова-Чу в сравнении с классическим методом, основанным на вычислении корреляционной функции по принимаемому искаженному синхросигналу и заранее известному на приемной стороне его образцу. При идеальной работе системы синхронизации для значения вероятности ложного определения максимума взаимокорреляционной функции  $P_b = 10^{-5}$  для модели канала ERA энергетический выигрыш составил 1.9 дБ, для модели канала EVA 1.7 дБ, для модели канала ETU 1.5 дБ. При наличии нормированной частотной отстройки до  $f/\Delta f \approx 0.35$  предлагаемый метод позволяет получить значение вероятности  $P_b$ , которое при использовании классического метода достигается лишь при полном отсутствии нормированной частотной отстройки. При дальнейшем увеличении нормированной частотной отстройки значение энергетического выигрыша в сравнении с классическим методом увеличивается.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Khan F., LTE for 4G Mobile Broadband, Air Interface Technologies and Performance, Cambridge University Press, 2009. 492 p.
2. Sesia S., Toufik I., Baker M., LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2011. 752 p.
3. Remy J.-G., Letamendia C. LTE Standards, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2014. 258 p.
4. Cox C. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications, John Wiley & Sons Ltd, 2012. 324 p.
5. Гельгор А.Л., Попов Е.А. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 204 с.
6. Yang X., Xiong Y., Jia G., Fang W., Zheng X. PSS based time synchronization for 3GPP LTE downlink receivers. Communication Technology (ICCT). IEEE 13th International Conference on. Jinan, 2011. pp. 930-933.
7. Nasraoui L., Atallah L.N., Siala M. Robust doubly-differential primary synchronization approach for 3GPP LTE systems. Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Nicosia. 4-8 Aug. 2014. p.1069 - 1074.
8. D. C. Chu, "Polyphase codes with good periodic correlation properties," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 18, no. 4, July 1972, pp. 531-532.
9. Казачков В.О. Реализация синхронизации с использованием сигналов Задова-Чу в стандарте LTE. // V Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований». Сборник научных работ. Москва, 2014, Часть 3. С.58-61.
10. Khan F., LTE for 4G Mobile Broadband, Air Interface Technologies and Performance, Cambridge University Press, 2009. 492 p.

**Рецензент:** Важенин Николай Афанасьевич, доцент, к.т.н., ФГОБУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, Москва.

**Kazachkov Vitaly Olegovich**  
Moscow Aviation Institute (National Research University)  
Russia, Moscow  
E-mail: [Elektronik89@rambler.ru](mailto:Elektronik89@rambler.ru)

## **Investigation of synchronization implementation on Zadoff-Chu signals in Long Term Evolution standard for fading channel**

**Abstract.** Zadoff-Chu sequences are used in LTE systems as the primary and secondary synchronization signals. Their key feature is the low level of side lobes of the autocorrelation function. Synchronization procedure reduces to the calculation of the correlation function between the received distorted synchronization signal and known in advance on the receiving side sample of synchronization signal, but because of the noise, Doppler effect and multipath delays maximum value of the correlation function are not stable in the right place. In this article we propose a method to calculate the correlation function for Zadoff-Chu sequences, which allows reducing false definition probability of the maximum of the correlation function. Correlation function is calculated as the product of two components. First component is the correlation function of the received synchronization signal and his sample. The second component is the correlation function of the fast Fourier transform from the received synchronization signal and the fast Fourier transform from the synchronization signal sample. Proposed method has been tested on simulation model in Matlab/Simulink for the following channel models: Extended Pedestrian A (EPA) with a maximum Doppler shift of 5 Hz, Extended Vehicular A (EVA) with a maximum Doppler shift of 70 Hz and Extended Typical Urban (ETU) with a maximum Doppler shift of 300 Hz. With perfect timing for a false definition probability value of the maximum of the correlation function  $P = 10^{-5}$  energy gain is 1.9 dB for the channel model ETU, 1.7 dB for the channel model EVA and 1.5 dB for the channel model ETU in contrast with correlation function of the received synchronization signal and his sample. When the normalized frequency offset  $f/\Delta f$  up to 0.35 ( $\Delta f = 15$  kHz is subcarrier spacing) proposed method allows to obtain a probability value  $P$ , which is the correlation function of the received synchronization signal and his sample is achieved only in the complete absence of the normalized frequency offset .

**Keywords:** Digital communication; orthogonal frequency division multiplexing; synchronization; primary synchronization signal; Zadoff-Chu sequences; fast Fourier transform; correlation function; simulation; fading channels; frequency offset.

## REFERENCES

1. Khan F., LTE for 4G Mobile Broadband, Air Interface Technologies and Performance, Cambridge University Press, 2009. 492 p.
2. Sesia S., Toufik I., Baker M., LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2011. 752 p.
3. Remy J.-G., Letamendia C. LTE Standards, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2014. 258 p.
4. Cox C. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications, John Wiley & Sons Ltd, 2012. 324 p.
5. Gel'gor A.L., Popov E.A. Tekhnologiya LTE mobil'noy peredachi dannykh: ucheb. posob. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 204 s.
6. Yang Kh., Xiong Y., Jia G., Fang W., Zheng X. PSS based time synchronization for 3GPP LTE downlink receivers. Communication Technology (ICCT). IEEE 13th International Conference on. Jinan, 2011. pp. 930-933.
7. Nasraoui L., Atallah L.N., Siala M. Robust doubly-differential primary synchronization approach for 3GPP LTE systems. Wireless Cmmunications and Mobile Computing Conference, Nicosia. 4-8 Aug. 2014. p.1069 - 1074.
8. D. C. Chu, "Polyphase codes with good periodic correlation properties," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 18, no. 4, July 1972, pp. 531-532.
9. Kazachkov V.O. Realizatsiya sinkhronizatsii s ispol'zovaniem signalov Zadova-Chu v standarte LTE. // V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye kontseptsii nauchnykh issledovaniy». Sbornik nauchnykh rabot. Moskva, 2014, Chast' 3. S.58-61.
10. Khan F., LTE for 4G Mobile Broadband, Air Interface Technologies and Performance, Cambridge University Press, 2009. 492 p.