

**ОТЗЫВ**  
**ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
**доктора технических наук, профессора**  
**Зеленевского Владимира Владимировича**  
**на диссертационную работу соискателя учёной степени**  
**кандидата технических наук по научной специальности**  
**2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки)**  
**Киселевой Татьяны Павловны, выполненную на тему:**  
**«Корреляционный метод синхронизации по границам OFDM**  
**символов кадра стандарта LTE»**

***Актуальность темы***

Развитие передовых технологий современной техники связи выдвигает повышенные требования к скорости, точности и эффективности синхронизации систем связи. Вопросы повышения эффективности синхронизации базовых станций (далее – БС) с пользователями и быстрого восстановления синхронизации при её потере, является актуальной задачей существующих и разрабатываемых систем связи. Актуальную остроту приобретает проблема повышения скорости синхронизации без значительных аппаратно-программных затрат.

Для технологии сотовой связи LTE (*The UMTS Long Term Evolution*) задача совершенствования систем синхронизации при росте урбанизации, числа мобильных пользователей в условиях многолучевости релейского канала приобретает особую актуальность. В технологии LTE кадр в нисходящем направлении (от БС пользователям) включает синхросигналы, позволяющие провести грубую временную синхронизацию по моменту начала кадра с использованием интервала статистической и корреляционной обработки не менее длительности четырех кадров LTE DL (*Downlink* – нисходящее направление передачи кадра). Этап синхронизации по границам символов OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing* – ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием), кадра LTE DL, как правило, в существующих системах синхронизации не используется ввиду низкой эффективности в условиях релейского канала связи. Автором диссертационной работы

Вход. № 54/26  
« 03 » 04 2016г.  
подпись

разработан корреляционный метод синхронизации по границам символов OFDM с модификацией символов кадра, не содержащих служебной информации БС, при помощи последовательностей с хорошими корреляционными свойствами, что позволяет значительно сократить интервал статистической обработки принятого кадра и повысить точность и скорость синхронизации во временной области.

Применение в разработанном методе последовательностей с хорошими корреляционными свойствами – многофазных CAZAC последовательностей Задова – Чу и Фрэнка дает возможность синхронизации по границам символов OFDM в сложных условиях релейского канала связи с добавлением аддитивного гауссовского шума в диапазоне отношения сигнал/шум (далее – ОСШ) 0 дБ – 50 дБ. Причем время синхронизации на первых двух этапах корреляционной синхронизации кадра LTE во временной области значительно сокращается за счет уменьшения интервала статистической и корреляционной обработки до полукadra LTE DL. На первом этапе временной синхронизации по границам символов OFDM выигрыш в значении среднего времени синхронизации до 2,6 раз по сравнению с базовым вариантом построения символов. Следует отметить, что по результатам ранее проведенных исследований авторами статей по данной тематике, синхронизация по пикам циклической автокорреляционной функции циклического префикса (далее – АКФ ЦП) для получения границ символов кадров в различных технологиях связи в базовом варианте была возможна только в гауссовском канале связи с ОСШ > 17дБ. В настоящее время с ростом этажности строений и применения низкоскоростных средств передвижения пользователей растет потребность в надежной и быстрой связи именно в релейском канале, что повышает актуальность темы диссертации и перспективы продолжения исследований.

Следовательно, тема диссертации Киселевой Т.П. «Корреляционный метод синхронизации по границам OFDM символов кадра стандарта LTE» является актуальной для существующих и вновь разрабатываемых систем синхронизации с формированием кадров символами OFDM-технологии с учетом минимальных аппаратно-программных затрат.

В диссертационной работе *научно обоснованы*:

- задачи, решаемые в процессе исследований;
- результаты, выдвигаемые на защиту, основанные на успешном решении поставленных задач и обеспечивающие достижение поставленной цели – повышении эффективности системы связи стандарта LTE за счёт уменьшения времени символьной и кадровой синхронизации базовой станции с пользователями;
- требования к выбору последовательностей с хорошими корреляционными свойствами – это величина мерит-фактора АКФ различных исследуемых последовательностей и разнообразие длины (количества элементов) последовательностей;
- цели и условия проведения исследований в идеальном и релейском каналах.

**Представленные** в диссертационной работе *теоретические обоснования* построения математической модели синхронизации по границам OFDM-символов кадра LTE DL и границе полукadra в условиях релейского канала на физическом уровне, а также аналитические выражения этапов применения разработанного корреляционного метода синхронизации *позволяют* получить результаты вычисления характеристик синхронизации после имитационного моделирования прохождения модифицированного кадра LTE DL через модели релейского канала с дальнейшей статистической и корреляционной обработкой выбранного «окна» приема и обработки кадра.

**Полученные практические результаты** *подтверждают* гипотезу об уменьшении среднего времени синхронизации кадра, относительного смещения частоты поднесущих символов кадра, дробного фазового смещения поднесущих и повышения точности определения границ символов на первом этапе временной синхронизации за счет применения CAZAC последовательностей для модификации символов кадра, не содержащих служебной информации БС.

**Обоснованность** результатов, выдвигаемых на защиту в диссертационной работе, **достоверность** результатов исследований *подтверждаются*

объективностью применения математического аппарата статистической радиотехники, теории корреляционного анализа, теории вероятностей, математической статистики, приемами имитационного моделирования. Основные результаты, выдвигаемые на защиту, *согласуются* с результатами, представленными в опубликованных статьях рецензируемых журналов и докладах на отраслевых научно – технических конференциях.

*Новизна полученных результатов исследования* согласуется с соответствующими положениями, подчеркнутыми в опубликованных трудах соискателя и заключается в следующем:

– сформулированы и доказаны утверждения для определения последовательностей с хорошими корреляционными свойствами по максимуму значения мерит-фактора апериодической АКФ для ПСП, M-последовательностей и последовательностей CAZAC;

– доказана возможность сокращения времени синхронизации сигналов с OFDM по пикам циклической АКФ ЦП в релейском канале связи до 2,6 раза при различных вариантах модификации ЦП путём:

\* заполнения ЦП и конца «пустых» символов OFDM «окна» приёма и обработки кадра LTE технологии CAZAC последовательностями без восстановления данных конца символов;

\* заполнения ЦП и конца символов OFDM «окна» приёма и обработки кадра LTE технологии суммой данных и CAZAC последовательностей с восстановлением данных конца символов на приёмной стороне;

– уменьшение дробной части фазового смещения поднесущих частот OFDM символов кадра до 88% в сравнении с базовым вариантом заполнения ЦП в зависимости от вариантов профилей задержек канала и ОСШ;

– повышение точности определения границ символов «окна» приёма в пределах до  $\pm 2$  временных отсчёта в зависимости от варианта заполнения ЦП;

*Диссертационная работа содержит практические рекомендации* по применению разработанного метода синхронизации при выборе «окна» обработки кадра в вариантах первого включения и случайной потере синхронизации, подробных алгоритмов формирования OFDM символов на этапе

построения ресурсной сетки кадра в двух вариантах заполнения концов символов, свободных от служебной информации БС с применением рассмотренных последовательностей, а также алгоритмов статистической обработки принятого кадра при первом включении пользователя в вариантах:

– усреднения временных отсчетов «окна» приема на интервале одного слота и формирования пиков циклической АКФ ЦП с определением их амплитуд и временного положения;

– усреднения пиков циклической АКФ ЦП по амплитуде и временному положению путем разбиения «окна» приема на слоты, вычисление циклических АКФ ЦП каждого слота и усреднение по амплитуде и временному положению соответствующих пиков циклических АКФ ЦП по слотам.

При случайной потере синхронизации приведены рекомендации восстановления синхронизации по границам OFDM символов в виде подробного алгоритма.

В диссертационной работе соискателем *получено оригинальное решение* задачи повышения скорости и точности синхронизации БС с мобильным пользователем применительно к условиям релейского канала связи при плотной городской застройке, имеющей существенное значение для модификации систем синхронизации во временной области как кадра стандарта LTE, так и других технологий с построением символов кадров по принципам стандарта OFDM без существенных аппаратно-программных коррекций. Достигнутые результаты позволяют повысить эффективность и качество обслуживания мобильных пользователей применительно к технологиям, рассмотренным в работе.

### ***Недостатки диссертационной работы***

К недостаткам диссертационной работы следует отнести:

1) различия в стиле оформления графиков – стиль выполнения рисунков 3.9, 3.11, 3.12 существенно отличается от стиля рисунков 3.13 – 3.16, хотя по существу это графики среднего времени синхронизации в том и другом случае;

2) подраздел 3.5.3 желательно было бы дополнить сводной таблицей, включающей значения среднего времени синхронизации и точности попадания

в границы символов кадра для различных вариантов числа элементов исследуемых последовательностей в зависимости от всех предлагаемых условий проведения испытаний, что способствует лучшему восприятию данной информации, имеющей сравнительный характер.

Однако отмеченные недостатки *не снижают* научную и практическую ценность работы и *не влияют* на обоснованность выдвигаемых на защиту результатов и выводов.

**Содержание автореферата** в целом *соответствует* основным положениям диссертации. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК России и позволяет понять содержание диссертационной работы.

### **Выводы**

Диссертационная работа Киселевой Т.П. является *законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена автором самостоятельно на актуальную тему, обладает внутренним единством, отличается научной и практической значимостью полученных научных результатов и имеет завершённый характер*. По форме и содержанию, актуальности, полноте поставленных и решенных задач, совокупности новых научных результатов, достаточно аргументированных и критически оцененных по сравнению с известными аналогичными результатами в данной области исследований, удовлетворяет критериям пунктов 9 - 11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утв. Пост. Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

Работа написана литературным языком, грамотно, в доказательном стиле изложения. Основные положения диссертационной работы отражены в публикациях в рецензируемых научных журналах и сборниках трудов научно-технических конференций. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, теоретические обоснования, рисунки, графики. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

В диссертации на основании выполненных автором исследований, *решена*

