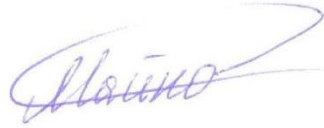


На правах рукописи



**МАЙКОВ ДЕНИС ЮРЬЕВИЧ**

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИМВОЛЬНОЙ И  
ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ  
OFDM-СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ**

**Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**Томск – 2014**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: Пуговкин Алексей Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск.

Официальные оппоненты:

Разинкин Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Федоров Вячеслав Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Якутск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие "Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи" (ФГУП «ЛО ЦНИИС»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «30» декабря 2014 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 212.268.01 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201 (главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146 и на сайте Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники <http://www.tusur.ru/ru/science/education/diss.html>

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.268.01,  
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Системы радиосвязи повсеместно используются в различных сферах деятельности человека и в настоящее время активно развиваются: возрастают дальность действия радиосвязи, скорость передачи данных, количество одновременно обслуживаемых абонентов, и т.д. Вместе с этим повышаются и требования к системе синхронизации, применяемой для автоматического поддержания параметров сигналов, генерируемых в приемнике (частота несущей, тактовая частота и т.д.), а также определения времени начала обмена информационными сигналами, которое зависит от расстояния «передатчик – приёмник».

Необходимость применения системы синхронизации обусловлена дрейфом частоты гетеродинов в приемнике и передатчике, а также изменением временных интервалов приёма сигналов из-за перемещения абонентов системы радиосвязи.

В современных цифровых системах радиосвязи (ЦСР) подсистема синхронизации представляет собой комплекс программно-аппаратного обеспечения, в котором реализованы алгоритмы оценки рассогласования параметров сигналов, генерируемых в приемнике и передатчике (несущая частота, смещение по времени относительно начала времени приема сигнала и т.д.), относительно номинальных.

В настоящее время широкое распространение получили мобильные ЦСР, использующие OFDM-сигналы (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – OFDM), представляющие собой сумму ортогональных, перекрывающихся по спектру гармонических сигналов. Такие сигналы чувствительны к межчастотной интерференции, что обуславливает необходимость применения частотной синхронизации.

В мобильных системах радиосвязи с временным разделением каналов расстояние между передатчиком и приёмником может изменяться, и без символьной синхронизации возможна интерференция информационных сигналов смежных временных каналов.

Частотная и символьная синхронизация в OFDM-системах радиосвязи осуществляется путём цифровой обработки сигналов с известными параметрами (несущая частота, длительность и т.д.), называемых в диссертационной работе сигналами синхронизации.

Шумы различной природы, временные и частотно-селективные искажения сигнала синхронизации приводят к нарушению ортогональности поднесущих OFDM-сигнала и межсимвольной интерференции информационных сигналов смежных временных каналов.

Основные работы по разработке, исследованию и практическому применению алгоритмов цифровой обработки сигналов синхронизации для

OFDM-систем радиосвязи, датируются концом 20-го началом 21-го века, в связи с появлением высокопроизводительных микропроцессоров. Первые теоретические исследования и разработки алгоритмов цифровой обработки сигналов частотной и символьной синхронизации OFDM-систем радиосвязи выполняли Т.М. Шмидл, Д.С. Кокс, У.Д. Уорнер, Ж.Ж. ван де Бик, а несколько позже проблемами синхронизации стали заниматься отечественные учёные Ю.Б. Зубарев, Б.И. Шахтрин, А.П. Солодовников, И.А. Батырев, Г.В. Свистунов, М.С. Малютин и др.

Автором диссертационной работы показано, что при использовании в OFDM-системах радиосвязи известных алгоритмов цифровой обработки сигналов синхронизации в условиях частотно-селективных замираний и скорости взаимного перемещения приёмника и передатчика не менее 60 км/ч, имеет место нарушение ортогональности в принятых OFDM-сигналах и межсимвольная интерференция. Кроме того, такие алгоритмы требуют значительного числа вычислительных операций и сравнительно дорогостоящих комплектующих.

В настоящей работе предлагаются алгоритмы цифровой обработки сигналов синхронизации, которые позволяют относительно известных алгоритмов в значительной мере улучшить качество радиосвязи при скорости взаимного перемещения приемника и передатчика не менее 60 км/ч в условиях частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции. Для указанных условий автором представлены теоретические и экспериментальные результаты реализации алгоритмов: оценки ухода частоты гетеродина приемника относительно частоты гетеродина передатчика (далее оценка рассогласования частоты гетеродинов), а также оценки смещения по времени принятых сигналов синхронизации.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена современными тенденциями к совершенствованию мобильных систем цифровой радиосвязи. С одной стороны, возрастают дальность действия, скорость передачи данных, количество одновременно обслуживаемых абонентов и т.д. С другой стороны, ужесточаются условия работы таких систем - наряду с частотно-селективными замираниями необходимо обеспечить требуемое качество радиосвязи при передвижении абонентов со скоростью не менее 60 км/ч.

**Цель диссертационной работы** – разработка и исследование для мобильных OFDM-систем радиосвязи алгоритмов оценки рассогласования частоты гетеродинов и оценки смещения по времени сигналов синхронизации, обеспечивающих уменьшение среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценки не менее чем на 30%, по отношению к наиболее точным известным аналогичным алгоритмам при воздействии

многолучевого канала РРВ и скорости перемещения абонентов не менее 60 км/ч.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

– Исследование путем цифрового моделирования алгоритмов оценки смещения по времени сигнала синхронизации и оценки рассогласования частоты гетеродинов для мобильных OFDM-систем радиосвязи и получение для каждого из них зависимости СКО ошибки оценки соответствующего параметра от отношения сигнал/шум (ОСШ) при наличии искажений сигнала синхронизации, вносимых многолучевым каналом РРВ и эффектом Доплера (скорость перемещения абонента не менее 60 км/ч).

– Разработка алгоритма оценки смещения по времени сигнала синхронизации для мобильных OFDM-систем радиосвязи, который позволяет при влиянии эффекта Доплера и искажениях, вносимых многолучевым каналом РРВ получить СКО ошибки оценки меньше в два и более раз по отношению лучшему из рассмотренных аналогичных алгоритмов.

– Сравнение, полученных при помощи моделирования, зависимостей СКО ошибки оценки смещения по времени сигнала синхронизации, полученных для предложенного и рассмотренных аналогичных алгоритмов.

– Разработка алгоритма оценки рассогласования частоты гетеродинов для мобильных OFDM-систем радиосвязи, который позволяет при влиянии эффекта Доплера и искажениях, вносимых многолучевым каналом РРВ уменьшить СКО ошибки оценки не менее чем на 30%, по отношению к лучшему из рассмотренных аналогичных алгоритмов.

– Сравнение путем цифрового моделирования алгоритмов оценки рассогласования частоты гетеродинов мобильной OFDM-системы радиосвязи зависимостей СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов, полученных для предложенного и рассмотренных аналогичных алгоритмов.

**Методы исследования.** Для решения перечисленных задач были использованы методы линейной алгебры, теории статистической радиотехники, корреляционного анализа, цифрового моделирования.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработаны новые алгоритмы, позволяющие уменьшить СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика мобильной OFDM-системы радиосвязи не менее чем на 30% и СКО ошибки оценки смещения по времени сигнала синхронизации минимум в два раза по отношению к наиболее точным известным

аналогичным алгоритмам, в условиях частотно-селективных замираний, межсимвольной интерференции и скорости перемещения абонентов не менее 60 км/ч.

2. Для мобильных OFDM-систем радиосвязи, работающих в условиях частотно-селективных замираний, межсимвольной интерференции и воздействии эффекта Доплера, получены теоретические и экспериментальные результаты по зависимостям СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов и СКО ошибки оценки смещения по времени сигнала синхронизации.

**Практическая значимость** полученных результатов. Результаты работы внедрены в составную часть опытно конструкторских работы, выполняемых «ТУСУР» для ЗАО «НПФ Микран» в рамках х/д 74/10, о чем свидетельствует акт внедрения.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы были апробированы на международных и всероссийских конференциях:

- Научная сессия ТУСУР-2010, г. Томск, 2010 г.;
- Научная сессия ТУСУР-2011, г. Томск, 2011 г.;
- International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceedings, Altai, 2011;
- Научная сессия ТУСУР-2012, г. Томск, 2012 г.;

**Личный вклад автора.** Автором диссертационной работы выполнена разработка программного обеспечения, позволяющего моделировать работу подсистемы синхронизации мобильной OFDM-системы радиосвязи. Им лично выполнена разработка алгоритмов оценки рассогласования частоты гетеродинов и оценки смещения по времени сигнала синхронизации мобильной OFDM-системы радиосвязи. Автор участвовал в проведении эксперимента на городских трассах совместно с коллективом кафедры теоретических основ радиотехники (ТОР) ТУСУР. В рамках эксперимента автор участвовал в подготовке экспериментальных макетов приемного и передающего пунктов, подготовке излучаемых сигналов, разработке программного обеспечения для регистрации и обработки экспериментальных сигналов.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм цифровой обработки принятого сигнала синхронизации, основанный на вычислении взаимной корреляционной функции двух последовательных OFDM-сигналов одинаковой длительности и структуры, позволяет уменьшить более чем в два раза СКО ошибки оценки смещения по времени для ОСШ от 0 дБ до 25 дБ относительно алгоритмов обработки одного OFDM-сигнала той же длительности, не превышающей время когерентности канала РРВ.

2. Применение в мобильных OFDM-системах радиосвязи двухсигнальной конструкции сигнала синхронизации для предложенного алгоритма оценки рассогласования частоты гетеродинов по максимуму взаимной корреляционной функции (ВКФ), позволяет уменьшить СКО ошибки оценки не менее чем на 30%, по отношению к наиболее точному известному алгоритму, в диапазоне ОСШ от 0 дБ до 25 дБ и искажениях, внесенных многолучевым каналом РРВ с временем когерентности равным или большим длительности сигнала синхронизации.

**Публикации.** По теме работы опубликовано 12 научных работ, из них 2 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 публикаций в материалах конференций, 3 коллективных монографии, 4 патента.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 102 источников. Основная часть работы изложена на 133 страницах машинописного текста. Работа содержит 114 рисунков и 20 таблиц.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено описание основных проблем подсистемы синхронизации мобильных OFDM-систем радиосвязи, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, указана научная новизна полученных в работе результатов и представлены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Оценка смещения по времени принятого сигнала синхронизации в мобильных OFDM-системах радиосвязи» описана математическая модель OFDM-сигнала, представленная в дискретном виде

во временной области выражением: 
$$\dot{S}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \dot{C}_k e^{j2\pi n \frac{k}{N}}, n=0, \dots, N-1.$$

где  $N$  – количество поднесущих;  $n$  – индекс временного отсчета сигнала;  $k=0 \dots N-1$  – индекс поднесущей;  $\dot{C}_k = A_k e^{j\varphi_k}$  – комплексный элемент сигнального созвездия, соответствующий передаваемой битовой последовательности.

Рассмотрены основные преимущества и недостатки использования такого вида модуляции. К основным преимуществам можно отнести увеличение спектральной эффективности в два и более раз по сравнению с другими видами модуляций, а также повышенная устойчивость к межсимвольной интерференции, которая обеспечивается структурой сигнала, представленной в виде множества медленно модулируемых (по сравнению с задержками отражений) узкополосных сигналов. К основным недостаткам такого вида модуляции можно отнести чувствительность OFDM-сигналов к межчастотной интерференции, вследствие которой возникают помехи, связанные с взаимным влиянием соседних поднесущих,

а также большое значение пик-фактора, который показывает отношение максимального уровня сигнала к среднему и определяет требования к линейности аналоговых трактов и сложности аппаратной реализации устройства в целом.

Приведено описание условий цифрового моделирования, определены параметры используемых при моделировании сигналов, описаны основные блоки цифровой модели и представлена структурная схема моделирования работы исследуемой системы (рисунок 1).

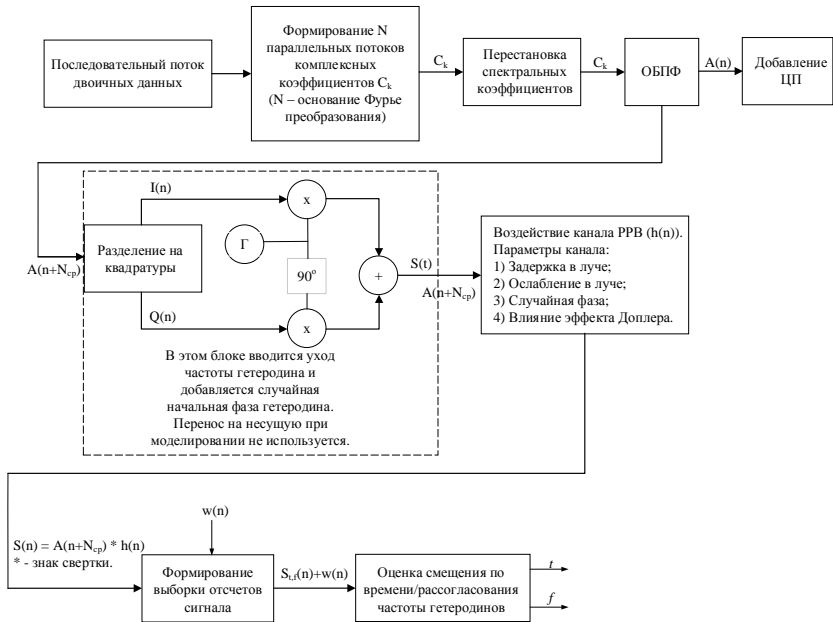


Рисунок 1 – Структурная схема моделирования

Параметры многолучевого канала РРВ задавались согласно рекомендациям МСЭ.

Произведен расчет времени когерентности канала РРВ по формуле:

$$T_c = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_d^2}}$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.



Таблица 1 – Доплеровское смещение и время когерентности канала РРВ

Частота несущей, ГГц	Скорость, км/ч	Максимальное доплеровское смещение, Гц	Время когерентности, мс
2,5	2	4,6	92
2,5	10	23	18,5
2,5	60	139	3

Так как время когерентности канала РРВ в несколько раз больше длительности используемого сигнала синхронизации примем, что искажения, вносимые каналом будут одинаковы для одного OFDM-сигнала или группы таких сигналов.

Рассмотрена проблема символьной синхронизации, а именно ошибка оценки смещения по времени выборки принятого сигнала синхронизации относительно начала интервала выполнения операции быстрого преобразования Фурье (БПФ) в приемнике. С помощью цифрового моделирования продемонстрировано влияния ошибки смещения по времени OFDM-сигнала на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и сигнальное созвездие такого сигнала при условии отсутствия помех (рисунок 2).

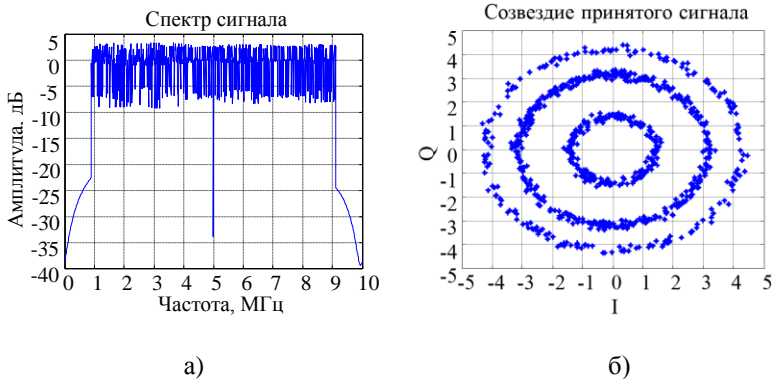


Рисунок 2 – Спектр (а) и сигнальное созвездие (б) OFDM-сигнала, смещенного на пять отсчетов дискретизации

При ошибке оценки смещения по времени принятого сигнала, превышающей длительность одного отсчета дискретизации, элементы сигнального созвездия отклоняются от истинного значения пропорционально линейному фазовому набегу сигнала, приобретенному вследствие неверного выбора границ временного интервала операции

БПФ. Фазовый набег, вызванный смещением принятого сигнала по времени и приводящий к вращению сигнального созвездия сигнала можно описать выражением:

$$\dot{C}_k e^{-j\frac{2\pi km}{N}} = FFT(\dot{S}_{n-m}),$$

где  $FFT$  - оператор прямого БПФ;  $\dot{S}_{n-m}$  - дискретная комплексная выборка OFDM-сигнала, смещенная по времени на  $m$  отсчетов дискретизации;  $k$  - индекс поднесущей;  $n$  - индекс временного отсчета сигнала.

Основным фактором, влияющим на точность оценки смещения по времени OFDM-сигнала, является многолучевая структура канала РРВ, которая проявляется в виде дружных или частотно-селективных замираний в спектре принятого сигнала. Известные алгоритмы оценки смещения по времени принятого сигнала позволяют получить приемлемое для рассматриваемых систем значение ошибки оценки (не превышающее длительность отсчета дискретизации) при воздействии на сигнал аддитивного белого Гаусовского шума (АБГШ), однако при наличии искажений, вызванных прохождением сигнала через многолучевой канал распространения радиоволн (РРВ), ошибка оценки смещения по времени OFDM-сигнала не позволяет произвести безошибочную демодуляцию.

Принцип работы существующих алгоритмов оценки смещения по времени принятого OFDM-сигнала основан на вычислении взаимной корреляционной функции (ВКФ) между повторяющимися частями сигнала и оценке положения максимума этой ВКФ.

Рассмотрен алгоритм Шмидла и Кокса (англ. SCA – Schmidle and Cox Algorithm) в котором предлагается оценивать положение максимума рассчитываемой ВКФ двух повторяющихся во времени частей принятого сигнала синхронизации, сглаженной применением операции скользящего суммирования:

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{(R(d))^2}, \quad (1)$$

где  $P(d) = \sum_{m=0}^{L-1} (r_{d+m}^* r_{d+m+L})$  - комплексная ВКФ двух половин принятого

сигнала;  $R(d) = \sum_{m=0}^{L-1} |r_{d+m+L}|^2$  - автокорреляционная функция (АКФ) второй

половины принятого сигнала;  $L$  – окно операции скользящего суммирования;  $d$  – индекс временного отсчета.

Такой алгоритм не сложен в реализации, но пик рассчитанной ВКФ не имеет локального максимума и представляет собой «плато», что увеличивает дисперсию оценки смещения по времени принятого сигнала.

Рассмотрен алгоритм, предложенный Минном (англ. Minn), позволяющий уменьшить дисперсию оценки смещения по времени принятого OFDM-сигнала, по сравнению с алгоритмом SCA, благодаря использованию модулирующей тренировочной последовательности, основанной на последовательности Голя – Рудина – Шапиро. Во временной области, сформированный OFDM-сигнал состоит из нескольких повторяющихся частей (до 15) одинаковой длины. Применение такой модулирующей тренировочной последовательности позволяет получить ВКФ, характеризующуюся наличием максимума с большей крутизной спада по сравнению с ВКФ алгоритма SCA, и тем самым уменьшить дисперсию оценки смещения по времени принятого сигнала. Рассчитанная ВКФ сглаживается алгоритмом скользящего суммирования, после чего оценка смещения по времени производится путем поиска максимума полученной ВКФ.

$$\Lambda_c(d) = \left( \frac{L}{L-1} \frac{|P(d)|}{E(d)} \right)^2,$$

$$\text{где } P(d) = \sum_{k=0}^{L-2} b(k) \cdot \sum_{m=0}^{M-1} r^*(d + kM + m) \cdot r(d + (k+1)M + m),$$

$$E(d) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{L-1} |r(d + kM + i)|^2,$$

$$b(k) = p(k)p(k+1), k = 0, 1, \dots, L-2$$

В выражении выше  $\{p(k) : k = 0, 1, \dots, L-1\}$  означает полярность повторяющейся части;  $L$  – количество повторяющихся частей;  $M$  – количество отсчетов каждой повторяющейся части.

Такой алгоритм требует выполнения большого количества математических операций для расчета ВКФ между повторяющимися частями сигнала с применением операции скользящего суммирования, что затрудняет его применение в системах связи реального времени.

Последним из рассмотренных алгоритмов оценки смещения по времени принятого сигнала, является алгоритм, предложенный Чоем (англ. Choi). Автор данного алгоритма предлагает использовать последовательность постоянной амплитуды с нулевой автокорреляцией (англ. CAZAC – Constant amplitude zero autocorrelation) в качестве модулирующей тренировочной последовательности. OFDM-символ во временной области представляет собой структуру из двух повторяющихся частей, при условии зеркального отражения и комплексного сопряжения второй половины сигнала. Благодаря применению CAZAC

последовательности рассчитываемая в рассматриваемом алгоритме ВКФ характеризуется максимальной крутизной в максимумах и при наличии многолучевости позволяет оценить задержки принятых отраженных сигналов, проявляющиеся в виде дополнительных пиков. Для оценки смещения по времени принятого сигнала производится отбор значений рассчитанной ВКФ, которые превысили порог:

$$\eta = M_{Pr}(\tau_0) / (SNR + 20),$$

где  $M_{Pr}(\tau_0)$  - значение рассчитанной ВКФ в момент времени  $\tau_0$ , соответствующее максимуму ВКФ;  $SNR$  - отношение сигнал шум в дБ.

После чего, рассчитывается функция:

$$E_p(d) = \sum_{k=0}^{S-1} M_{Pr}(\hat{\tau}_0 - d + k),$$

где  $d$  - параметр, задающий смещение окна скользящего суммирования;  $k$  - индекс отчета окна скользящего суммирования;  $S$  - размер окна скользящего суммирования.

Эта функция представляет собой зависимость суммарного уровня значений ВКФ превысивших порог в некотором окне операции скользящего суммирования. Оценка смещения по времени принятого сигнала с учетом корректировочного значения, соответствующего максимуму функции  $E_p(d)$  запишется в виде:

$$\hat{\tau} = \hat{\tau}_0 - \hat{\tau}_1,$$

где  $\hat{\tau}_0$  - оценка смещения по времени принятого сигнала, соответствующая максимуму рассчитанной ВКФ;  $\hat{\tau}_1$  - оценка временного положения максимума функции  $E_p(d)$ .

Недостатком данного алгоритма является его итеративность, а также необходимость индивидуального подбора для каждой системы таких параметров как: размер окна для операции скользящего суммирования  $S$  и порога  $\eta$ , что затрудняет его использование в реальных мобильных OFDM-системах радиосвязи.

В предлагаемом алгоритме используется сигнальная конструкция, состоящая из двух одинаковых OFDM-сигналов, излучаемых последовательно (рисунок 3). В передатчике к каждому OFDM-сигналу длительностью  $T_b$  добавляется избыточная информация в виде циклического префикса/постфикса длительностью  $T_g$  для уменьшения влияния межсимвольной интерференции, которая удаляется в приемнике.

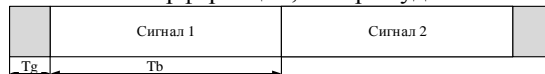


Рисунок 3 – Сигнальная конструкция, используемая в алгоритме

В качестве модулирующей последовательности выбрана BPSK последовательность, двоичная последовательность для которой основана на кодах Голда.

Предложенный алгоритм оценки смещения OFDM-сигнала по времени можно представить в виде структурной схемы, изображенной на рисунке 4.



Рисунок 4 – Структурная схема предлагаемого алгоритма оценки смещения по времени принятого сигнала синхронизации

Мнимая и действительная части принятого сигнала синхронизации после преобразования частоты поступают на блок оцифровки, с выхода которого формируются с частотой дискретизации комплексные отсчеты принятого сигнала. Отсчеты поступают в блок накопления для формирования пары массивов комплексных отсчетов, соответствующих OFDM-сигналам, входящим в сигнал синхронизации. Для пары полученных сигналов выполняется операция удаления избыточной информации, после чего для каждого из них вычисляется БПФ. Далее путем вычисления ОБПФ от поэлементного произведения значений массивов, содержащих спектральные отсчеты принятых сигналов рассчитывается комплексная ВКФ:

$$\dot{R}_{S_{1w}, S_{2w}}(n) = \text{ОБПФ}(\dot{S}_{1w}(k) \cdot \dot{S}_{2w}(k)), k = 0 \dots N-1,$$

где  $k$  - индекс спектрального отсчета, принятого OFDM-сигнала;  $N$  - размер окна операции БПФ;  $\dot{S}_{1w}(k)$  и  $\dot{S}_{2w}(k)$  - спектральные отсчеты принятых сигналов.

Грубая оценка смещения по времени принятых сигналов  $\hat{t}_0$  соответствует положению максимума модуля рассчитанной ВКФ. Точная

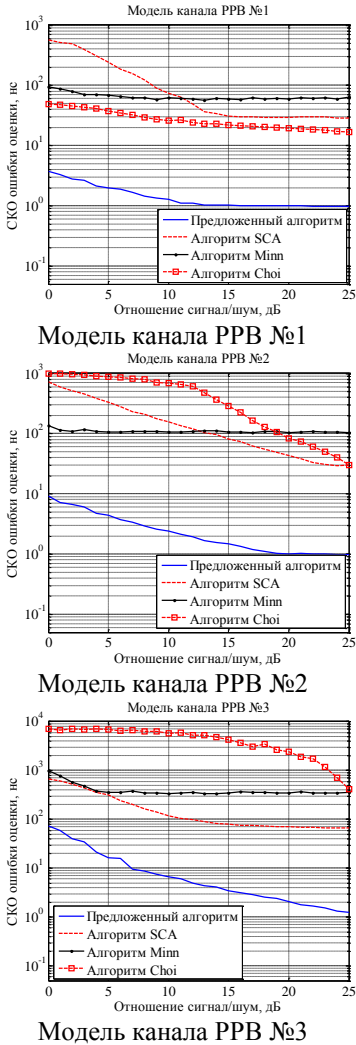


Рисунок 5 – Сравнение зависимостей СКО ошибки оценки смещения по времени наименьшего значения СКО ошибки оценки смещения по времени, при искажениях сигнала, вызванных многолучевым каналом РРВ с временем

оценки  $\hat{\tau}_1$  необходима для устранения неоднозначности положения максимума ВКФ, которая возникает в следствии смещения по времени не кратному длительности отсчета дискретизации, для чего максимум ВКФ восстанавливается функцией квадратичной интерполяции (соответствует

уравнению параболы  $y = ax^2 + bx + c$ ), для вычисления которой требуются значения трех отсчетов ВКФ в окрестности максимума. В результате точная оценка смещения по времени запишется в виде:

$$\hat{\tau}_1 = \frac{\max(P(m)) - \frac{M}{2}}{M}, \quad m = 0 \dots M-1,$$

где  $P(m)$  - функция квадратичной интерполяции пика ВКФ;  $M$  - количество отсчетов функции квадратичной интерполяции.

Результирующая оценка смещения по времени принятого сигнала запишется в виде:

$$\hat{\tau} = \hat{\tau}_0 + \hat{\tau}_1.$$

Сравнение результатов цифрового моделирования предложенного и рассмотренных алгоритмов оценки смещения по времени приведено на рисунке 5.

На основании первой главы можно сделать вывод, что применение алгоритма оценки смещения по времени, использующего структуру сигнала синхронизации, приведенную на рисунке 3, позволяет добиться

когерентности равным или большим длительности такого сигнала и скорости перемещения абонента не менее 60 км/ч.

**Во второй главе** «Оценка рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика мобильной OFDM-системы радиосвязи» показано влияние рассогласования частоты гетеродинов на форму модуляционного созвездия для значений ухода частоты 100 Гц, 200 Гц и 500 Гц. При рассогласовании частоты гетеродинов на значения превышающие 2% от интервала между поднесущими точки модуляционного созвездия выходят за пределы своего квадранта в следствии нарушения ортогональности в сигнале. Пример искажения модуляционного созвездия КАМ-64 при рассогласовании частоты гетеродинов 500 Гц приведен на рисунке 6.

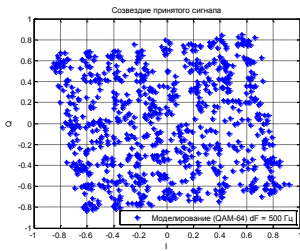


Рисунок 6 – Искажение модуляционного созвездия рассогласовании частоты 500 Гц

Рассмотрен алгоритм SCA в котором оценка рассогласования частоты гетеродинов вычисляется с помощью выражения:

$$\Delta \hat{f} = \hat{\phi} / \pi T,$$

где  $\hat{\phi} = \text{angle}(P(d))$  - фаза в точке максимума  $d$  комплексной ВКФ двух половин принятого сигнала  $P(d)$ , расчет которой приведен в (1);  $T$  - длительность сигнала.

Алгоритм, предложенный Минном, позволяет произвести оценку рассогласования частоты гетеродинов в два этапа по принятому сигналу, состоящему из  $L$  повторяющихся во времени частей. На первом этапе названным «грубая» оценка рассогласования частоты производится расчет согласно формуле:

$$\hat{\nu} = \frac{L}{2\pi} \sum_{m=1}^H w(m) \varphi(m),$$

где  $w(m)$  - весовой коэффициент;  $\varphi(m)$  - разность фаз между повторяющимися частями сигнала;  $H$  - параметр, выбираемый меньшим или равным  $L-1$  (оптимальным, по заявлению автора, является значение  $H=L/2$ );  $L$  - количество повторяющихся частей.

На втором этапе названным «точная» оценка рассогласования частоты автор алгоритма предлагает выполнить компенсацию рассогласования частоты гетеродинов на значение полученное при «грубой» оценке. Далее необходимо оценить импульсную характеристику канала РРВ, по которой можно вычислить значения задержек отраженных сигналов и маскировать нулями повторяющиеся части, искаженные межсимвольной

интерференцией. «Точная» оценка производится путем вычисления разности фаз в максимуме ВКФ не маскированных повторяющихся частей сигнала.

В алгоритме Вей Сюя при формировании сигнала синхронизации используется CAZAC последовательность. Автором алгоритма предлагается оценивать рассогласование частоты гетеродинов используя один принятый OFDM-сигнал (известный приемной и передающей сторонам), состоящий из двух одинаковых частей. ВКФ сигналов, модулированных CAZAC последовательностью, позволяет при определенных значениях параметров, используемых в алгоритме, оценить задержки отраженных сигналов, представленные в виде дополнительных пиков. После чего, применяя многоэтапную обработку значений фаз в пиках ВКФ оценивается рассогласование частоты гетеродинов.

Предлагаемый алгоритм оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика использует сигнальную конструкцию, приведенную на рисунке 3. Структурная схема предлагаемого алгоритма приведена на рисунке 7.

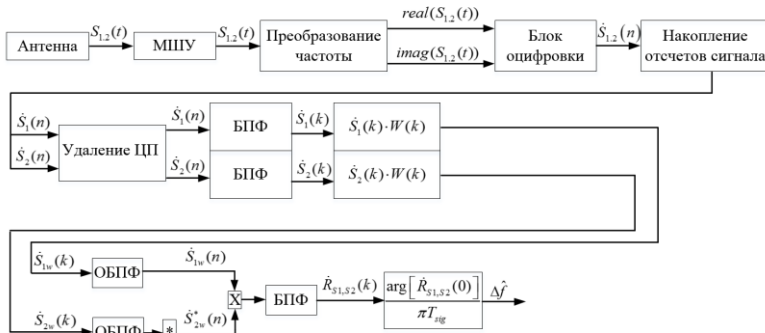


Рисунок 7 – Структурная схема предлагаемого алгоритма

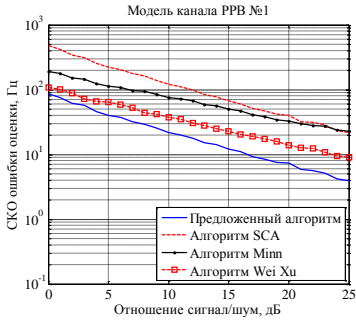
Для оценки рассогласования частоты гетеродинов производится расчет комплексной ВКФ двух принятых сигналов:

$$\hat{R}_{S1,S2}(k) = \text{БПФ} \left( \text{ОБПФ}(\hat{S}_{1w}(k))_{n=0..N-1} \cdot \text{ОБПФ}(\hat{S}_{2w}(k))^*_{n=0..N-1} \right), k = 0 \dots N-1,$$

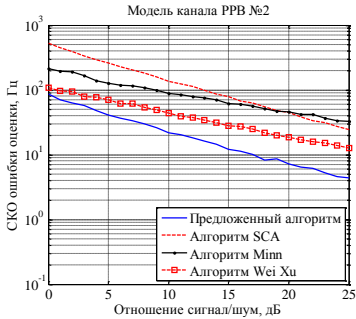
где  $k$  - индекс спектрального отсчета;  $n$  - индекс временного отсчета; \* - операция комплексного сопряжения;  $N$  - размер окна операции БПФ;  $\hat{S}_{1w}(k)$  и  $\hat{S}_{2w}(k)$  - спектральные отсчеты принятых сигналов.

Оценку рассогласования частоты сигналов гетеродинов можно записать следующим образом:

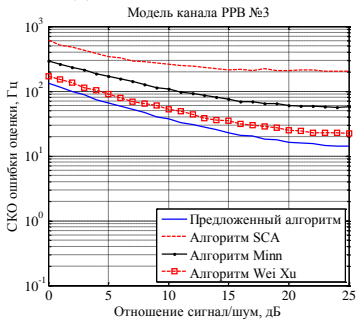




Модель канала PPB №1



Модель канала PPB №2



Модель канала PPB №3

Рисунок 8 – Сравнение зависимостей СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика

$$\Delta f^{\hat{}} = \frac{\arctan\left(\frac{\text{Im}(\dot{R}_{S1,S2}(0))}{\text{Re}(\dot{R}_{S1,S2}(0))}\right)}{\pi \cdot T_{sig}},$$

где  $\text{Im}(\dot{R}_{S1,S2}(0))$  и  $\text{Re}(\dot{R}_{S1,S2}(0))$  - мнимое и действительное значение максимума частотной комплексной ВКФ, соответственно;  $T_{sig}$  - длительность одного OFDM-сигнала.

Сравнение результатов цифрового моделирования предложенного и рассмотренных алгоритмов оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика приведено на рисунке 8.

На основе сравнения результатов моделирования алгоритмов оценки рассогласования частоты сигналов гетеродинов приемника и передатчика, можно сделать вывод о том, что применение предложенного алгоритма, использующего конструкцию сигнала синхронизации приведенную на рисунке 3, позволяет добиться наименьших значений СКО ошибки оценки при искажениях сигнала, вносимых многолучевым каналом PPB с временем когерентности равным или большим длительности сигнала синхронизации и скорости перемещения абонента не менее 60 км/ч. Предложенный алгоритм является наиболее простым, с точки зрения реализации его в аппаратуре, по отношению к рассмотренным во второй главе алгоритмам.



Рисунок 9 – Структурная схема лабораторного макета

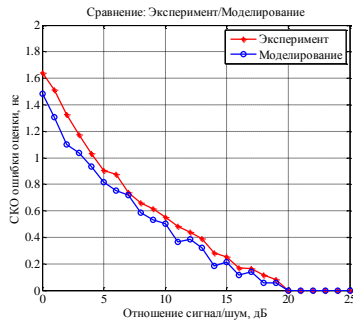


Рисунок 10 – СКО ошибки оценки смещения по времени

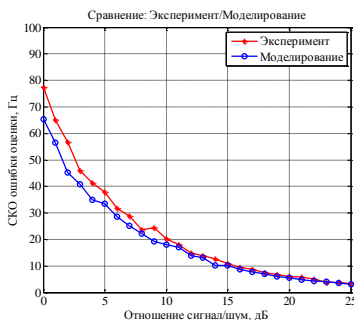


Рисунок 11 – СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика

В третьей главе «Экспериментальное исследование предложенных алгоритмов в лабораторных условиях» описана структура и формирование сигнала синхронизации, используемого при проведении эксперимента, приведены методика проведения эксперимента в лабораторных условиях и результаты эксперимента. Структурная схема лабораторного макета приведена на рисунке 9.

В результате обработки экспериментальных данных предложенными алгоритмами были получены зависимости СКО ошибки оценки смещения по времени принятого сигнала и рассогласования частоты гетеродинов от ОСШ. На рисунках 10 и 11 приведено сравнение результатов лабораторного эксперимента с моделированием.

Из рисунков 10 и 11 видно, что зависимости, полученные с помощью эксперимента имеют отклонения от аналогичных зависимостей полученных путем цифрового моделирования, которые не превышают 1 нс для зависимости СКО ошибки оценки смещения по времени от ОСШ и 15 Гц для зависимости СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика от ОСШ, на основании чего, можно сделать

вывод о правильности проводимого моделирования.

Превышение значений СКО полученных по экспериментальным данным от значений СКО полученных с помощью моделирования объясняется наличием дополнительных погрешностей, вызванных приемной и передающей аппаратурой.

**В четвертой главе «Описание экспериментальных исследований предложенных алгоритмов на реальных трассах РРВ»** приведено описание приемного и передающего оборудования и описание его проверки на реальной трассе РРВ. Приведена классификация экспериментальных трасс и методика проведения эксперимента.

Цель эксперимента: получение экспериментальных данных о переданных сигналах синхронизации, прошедших приземный канал РРВ; проверка предложенных алгоритмов, путем сравнения экспериментальных значений СКО ошибки оценки с зависимостями СКО ошибки оценки, полученными путем цифрового моделирования.

В результате проведения экспериментальных исследований были получены массивы экспериментальных данных, которые содержат записи квадратурных составляющих принятых сигналов синхронизации, прошедших приземный канал РРВ и зарегистрированных с помощью анализатора спектра. Данные об экспериментальных измерениях, с указанием имени файла данных, параметров излучаемого сигнала и т.д. были объединены в единую базу данных.

Результаты обработки экспериментально полученных сигналов приведены на рисунках 12 и 13 для случаев наименьшего и наибольшего значения СКО ошибки оценки.

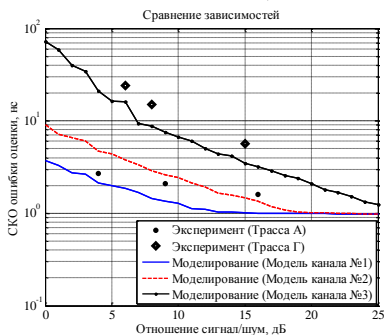


Рисунок 12 – Сравнение СКО ошибки оценки смещения по времени (моделирование и эксперимент)

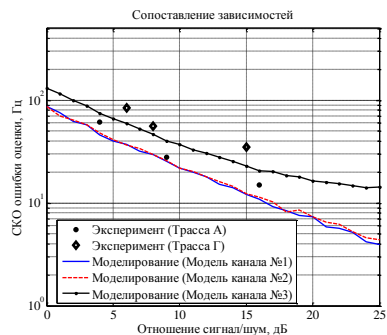


Рисунок 13 – Сравнение СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов (моделирование и эксперимент)

Полученные по экспериментальным сигналам значения СКО ошибки оценки смещения по времени принятого сигнала не превышают допустимое значение ошибки оценки равное 100 нс и СКО ошибки оценки рассогласования частоты гетеродинов меньше чем 2% от интервала между поднесущими (для заданных параметров системы то значение составляет 200 Гц).

**В заключении** сведены основные выводы по работе.

1. Путем цифрового моделирования было выявлено, что рассмотренные алгоритмы оценки смещения по времени принятого сигнала не позволяют получить ошибку оценки менее длительности отсчета дискретизации при наличии частотно-селективных замираний в спектре принятого сигнала синхронизации в диапазоне отношения сигнал/шум (ОСШ) от 0дБ до 10 дБ
2. Предложенные алгоритмы оценки смещения по времени принятого сигнала синхронизации и оценки рассогласования частоты гетеродинов позволяют получить приемлемое значение оценок в диапазоне ОСШ от 0 дБ до 25 дБ при прохождении сигнала через многолучевой канал РРВ, в случае, если время когерентности такого канала превышает длительность сигнала синхронизации.
3. Предложенный алгоритм оценки смещения по времени принятого сигнала позволяет уменьшить СКО ошибки оценки более чем в два раза и алгоритм оценки рассогласования частоты гетеродинов позволяет уменьшить СКО ошибки оценки не менее, чем на 30% по отношению к наиболее точным из рассмотренных аналогичных алгоритмов.
4. Сравнение значений СКО ошибки оценки, полученных при проведении лабораторного эксперимента показало незначительное отклонение значений данного параметра от результатов цифрового моделирования (не более 10 нс для алгоритма оценки смещения по времени и не более 30 Гц для алгоритма оценки рассогласования частоты гетеродинов приемника и передатчика).
5. Полученные при проведении эксперимента на реальных трассах значения СКО ошибки оценки для каждого из алгоритмов не превышают допустимые значения ошибки.

Таким образом, выполненная работа заключается в разработке новых алгоритмов оценки параметров принятых сигналов синхронизации в мобильных OFDM-системах радиосвязи, которые позволили решить задачу, имеющую важное народнохозяйственное значение для страны, по разработке и созданию мобильных OFDM-систем радиосвязи, работающих в условиях многолучевого канала РРВ и скорости передвижения абонентов не менее 60 км/ч.

## Список опубликованных работ по теме диссертации

### В журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Майков Д.Ю., Демидов А.Я., Каратаева Н.А., Ворошилин Е.П. Оценка сдвига частоты для процедуры Initial Ranging в системе «мобильный WiMax». Доклады ТУСУРа, декабрь 2011 № 2 (24), с. 59-63.
2. Гоголева С.А., Демидов А.Я., Каратаева Н.А., Майков Д.Ю., Ворошилин Е.П. Оценка влияния частотной расстройки на вероятность битовой ошибки в OFDMA системах связи. Доклады ТУСУРа, декабрь 2011 № 2 (24), с. 45-48.

### Патенты:

3. Патент № 111371 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/68. Устройство для оценки времени приема радиосигнала, прошедшего приземный канал распространения радиоволн / Вершинин А.С., Ворошилин Е.П., Коротков Д.А., Майков Д.Ю., Рогожников Е.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – № 2011107893/08; заявл. 01.03.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 4 с.
4. Патент № 2450448 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/68, Н 04 В 17/00. Устройство для оценки времени приема радиосигнала / Вершинин А.С., Ворошилин Е.П., Коротков Д.А., Майков Д.Ю., Рогожников Е.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – № 2011112623/08; заявл. 01.04.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13. – 9 с.
5. Патент № 115588 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/69. Устройство для оценки сдвига несущей частоты в восходящем канале для беспроводных телекоммуникационных систем. / Каратаева Н.А., Демидов А.Я., Майков Д.Ю., Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В., Лобанов Н.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Научно-производственная фирма «МИКРАН». – № 2011147451/08; заявл. 22.11.2011; опубл. 24.07.2012, Бюл. № 12. – 4 с.
6. Патент № 2459354 Российская Федерация, МПК Н 04В 1/69, Н 04В 8/20. Способ оценки сдвига несущей частоты в восходящем канале для беспроводных телекоммуникационных систем. / Каратаева Н.А., Демидов А.Я., Майков Д.Ю., Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В., Лобанов Н.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Научно-производственная фирма «МИКРАН». – №2011146810/08; заявл. 17.11.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. №23. – 9 с.

**Монографии:**

7. Ворошилин Е. П., Рогожников Е.В., Вершинин А.С., Демидов А.Я., Каратаева Н.А., Коротков Д.А., Лобанов Н.А., Майков Д.Ю., Абенев Р.Р., Алгоритмы обработки и преобразования сигналов в системе «Мобильный WiMax», Томск: В – Спектр, 2012 г. 153 с.

8. Ворошилин Е. П., Рогожников Е.В., Вершинин А.С., Чигринец В.А., Долгих Д.А., Абенев Р.Р., Гельцер А.А., Коротков Д.А., Лобанов Н.А., Майков Д.Ю., Алгоритмы цифровой обработки сигналов для системы широкополосного беспроводного доступа, Томск: В – Спектр, 2012 г. 214 с.

9. Математическое моделирование систем беспроводной связи: монография / Вершинин А.С., Ушарова Д.Н., Майков Д.Ю., Пуговкин А.В., Демин А.Ю., Рогожников Е.В.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 164 с.

**В сборниках всероссийских и международных конференций:**

10. Д.Ю. Майков, С.А. Гоголева, Н.А. Сысоев, студенты 5 курса, П.С. Киселев, студент 3 курса, А.Я. Демидов, к.ф-м.н., доцент каф. ТОР, Н.А. Каратаева, к.т.н., проф. каф. ТОР ТУСУР. Оценка смещения частоты за счет эффекта Допплера и несовпадения частот гетеродинов базовой (BS) и мобильной (MS) станций OFDMA систем. Научная сессия ТУСУР– 2012 Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2011», 4–6 мая 2011 г., г. Томск, Ч. 6 с. 266-268.

11. Вершинин А.С., Рогожников Е.В., Ворошилин Е.П., Коротков Д.А., Майков Д.Ю. Experimental estimation of accuracy enhancement of TOA measurement by the communication system in case of multichannel processing. International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceedings, 12th Annual, Erlagol, Altai – June 30 – July 4, 2011, p. 173-178.

12. Вершинин А.С., Рогожников Е.В., Ворошилин Е.П., Коротков Д.А., Майков Д.Ю. Estimation of RF Propagation Channel Transfer Function with the Consideration about Its Priori Structure. International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceedings, 12th Annual, Erlagol, Altai – June 30 – July 4, 2011, p. 179-182.