

На правах рукописи

ШОРИН Василий Олегович

**Разработка адаптивных алгоритмов управления информационным обменом  
для системы широкополосного радиодоступа технологии МАКВИЛ**

Специальность  
2.2.15-Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

**Научный  
руководитель:**

**Лобов Евгений Михайлович** – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией НИЛ-4803 МТУСИ.

**Официальные  
оппоненты:**

**Портной Сергей Львович** – доктор технических наук, профессор, профессор департамента электронной инженерии московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова (МИЭМ) ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"(НИУ ВШЭ)

**Мазепа Роман Богданович** – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры 402 «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационная безопасность» ФГБОУ ВО, «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева» (ФГАУ НИЦ Телеком), г. Москва

Зашита диссертации состоится «12» февраля 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.8-а, МТУСИ, ауд.А-211

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ:

<https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-ShorinVO/dis-ShorinVO.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 55.2.002.01  
доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_

М.В. Терешонок

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Системы профессиональной радиосвязи получили серьёзный стимул для развития в связи со сложной международной обстановкой. Требования, предъявляемые к профессиональным системам связи, по своему функционалу и надёжности работы во многом превышают требования, предъявляемые к сотовым системам радиотелефонной связи. Использование этих систем силовыми ведомствами наряду с гражданскими корпоративными пользователями определяет необходимость российского производства оборудования. Передаваемый при этом объем информации обуславливает необходимость наличия широкополосного радиоинтерфейса в рассматриваемых системах для обеспечения качественного высокоскоростного обмена мультимедийными данными между пользователями, чего не позволяют достичь такие распространённые стандарты как APCO25, TETRA, DMR.

Для решения таких задач китайской фирмой Xinwei был разработан и включён в рекомендацию МСЭ-R M.1801-2 стандарт мобильного широкополосного доступа. На его основе был разработан национальный стандарт Российской Федерации «ГОСТ Р 58166-2018. Технические требования к радиоинтерфейсу широкополосной подвижной радиосвязи (ШПР). Организация протоколов и алгоритмов работы на канальном и физическом уровнях. Основные параметры и технические требования», которым определена структура сигнала, использующего перспективные технологии, такие как OFDM. Брендовое название технологии – МАКВИЛ (McWiLL). Совместным российско-китайским предприятием «НИРИТ-СИНВЭЙ Телеком Технолоджи» была построена национальная сеть профессиональной радиосвязи технологии МАКВИЛ и ведется непрерывная работа по локализации технологии консорциумом, объединяющим научно-производственные предприятия, развивающие технологию МАКВИЛ в России. Технология относится к поколению 4G и, следовательно, основывается на широком базисе результатов научных исследований этого поколения. Однако, выделенные решениями ГКРЧ в России диапазоны частот не являются допустимыми для использования систем связи 4G LTE и, следовательно, невозможно полноценно использовать уже имеющийся научно-технический задел по этим системам. В связи с этим в особом свете предстаёт ряд исследований, начатых ещё в прошлом веке, по развитию классических методов организации работы радиоканала для приложений, связанных с системами подвижной связи. Сюда входят методы пространственной обработки сигналов, выбор геометрии антенн, алгоритмы распределения ресурса радиоканала между абонентами, техника организации хэндовера, исследования способов борьбы с внутрисистемными и внешними помехами, а также вопросы ЭМС.

При локализации системы МАКВИЛ на территории РФ были проведены масштабные работы по детальному изучению её принципов и основ. В результате

был определен ряд технических и теоретических аспектов, усовершенствование и дальнейшая проработка которых может заметно повысить эффективность МАКВИЛ в условиях, характерных для РФ с учетом выделенного диапазона частот. Российские учёные и разработчики, включая автора диссертации, оказались в этой части в более выигрышном положении. Во-первых, они смогли учесть опыт китайских разработчиков. Во-вторых, при развертывании и запуске в эксплуатацию сети МАКВИЛ на территории РФ был получен ряд новых оригинальных результатов. Качество информационного обмена в таких системах в основном определяется качеством широкополосного радиоканала и оптимизацией режимов работы системы при сотовой структуре. Внутри таких полос неизбежно возникают частотно-селективные замирания с динамическим характером поведения. Поэтому для эффективной работы радиоканала в системах радиосвязи и системах широкополосного доступа требуется в реальном времени решать задачу слежения за частотно-селективными искажениями с целью их компенсации. Кроме того, радиоэфир в целом приобрёл новые негативные свойства. Они состоят в высоком уровне воздействий внешних и внутрисистемных помех, обладающих ярко выраженным динамическим поведением. Поэтому в системах широкополосного доступа требуется решение, обеспечивающее внутрисистемную ЭМС и борьбу с помехами. Причём алгоритмы и процедуры реализации должны обладать предельно высокой производительностью при ограничениях на вычислительные ресурсы.

Широкий круг вопросов, который необходимо решать для улучшения качества работы системы, также включает в себя вопрос оптимизации режима хэндовера, в том числе путем выбора наилучших параметров структуры сигнала.

В связи с изложенным, исследование вопросов повышения качества информационного обмена между абонентами, в результате применения адаптивных алгоритмов оценки параметров радиоканала и повышения помехоустойчивости, и, как следствие, скорости передачи информации в реальной системе технологии МАКВИЛ с учётом её конкретных особенностей, в том числе режима хэндовера, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** В период разработки системы МАКВИЛ наряду с общесистемными вопросами, был рассмотрен широкий круг проблем, связанных с вопросами технологии цифровой и аналоговой обработки сигналов. Слияние двух потоков решений – исследований Стэнфордской школы в части усовершенствованных методов пространственно-временных преобразований и группы из Остинского (шт. Техас, США) университета в части аналоговых и цифровых методов обработки сигналов – способствовало их взаимному обогащению и позволило в итоге реализовать проект McWiLL. Однако, ряд научных и технических вопросов оказался вне детальной проработки в силу ограниченной длительности проекта.

Определённая стандартом сигнальная структура OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing)-мультиплексирование с ортогональным частотным разделением, имеет существенное преимущество: такие сигналы обладают высокой устойчивостью к искажениям при многолучевом распространении радиосигнала. Отпадает необходимость в использовании сложных схем эквалайзеров, предназначенных для коррекции искажений, порождаемых при многолучевом распространении радиосигнала.

Совокупность всех параметров и архитектурных решений системы, в числе которых ключевое значение имеют алгоритмы хэндовера (как один из наиболее сложных компонентов) формируют результирующее качество обслуживания (QoS), что, в свою очередь, непосредственно определяет потенциальный объем информационного обмена.

Главным инструментом, формирующим показатели помехоустойчивости систем и линий связи, являются алгоритмы обработки сигнала, реализующие на приёме заданное качество приема информации в условиях предельно низких отношений уровня мощности сигнала к уровню мощности смеси помехи и шума в радиоканале. Для идеализированных условий, предполагающих отсутствие искажений сигнала и справедливость модели аддитивных гауссовских шумов, потенциально достижимые показатели безошибочной передачи информации известны специалистам в рамках классической теории информации Клода Шеннона. В настоящее время усилиями учёных, разработчиков и технических специалистов получены решения и сигнально-кодовые конструкции, которые в ряде лабораторных тестовых испытаний продемонстрировали скорость информационного обмена, практически не отличающуюся от уровня предельной границы Шеннона.

Помимо положительных свойств у OFDM сигналов имеется ряд недостатков. Главными из них являются: высокое значение пик-фактора (Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)) сигналов; требование централизованной организации единой тактовой синхронизации на активных АТ и на БС системы; повышенная чувствительность к качеству частотной синхронизации и доплеровским сдвигам частот; повышенная чувствительность к воздействию внешних помех, при малых отстройках по спектру от рабочей полосы.

Совокупность приведённых выше обстоятельств выступает серьёзным препятствием для применения известных методов стохастической фильтрации, традиционно предлагаемых теорией статистической обработки сигналов для решения задач синхронизации и слежения за изменяющимися параметрами. Высокая чувствительность алгоритмов стохастической фильтрации к параметрам уравнений движения фильтруемого процесса не позволяет гарантировать условие «высокой точности», лежащее в основе указанной техники. Тем более, что для достижения близкой к предельной пропускной способности радиоканала обычно

требуются достаточно сложные законы модуляции (QAM64 и выше), для которых незначительные ошибки способны приводить к потере работоспособности.

Ожидаемый результат (в работе подтверждён для системы МАКВИЛ) состоит в разработке алгоритмов с предельно простыми вариантами агрегирования статистических данных, который бы уже на малых выборках гарантировал рабочие характеристики, незначительно уступающие потенциальным. В дальнейшем в качестве допустимых для МАКВИЛ были использованы эквивалентные энергетические потери, составляющие не более 1.5 дБ.

Известны два подхода к организации борьбы с блокирующими помехами. Первый заключается в увеличении рабочего динамического диапазона применяемых схем АЦП, второй – в применении на входе АЦП аналоговых фильтров с высоким показателем прямоугольности амплитудно-частотной характеристики. Но указанные подходы, к сожалению, порождают существенные побочные технологические издержки. В результате их применение на терминалах мобильных абонентов становится невозможным по ряду технических и экономических причин.

Вопросу создания эффективных радиочастотных (RF) микросхем для формирования и обработки радиосигналов в цифровом виде посвящено достаточно большое число работ и есть готовые решения, применяемые в терминалах систем подвижной радиосвязи.

В той или иной степени рассмотренные выше вопросы прорабатывались в трудах российских учёных: Аджемова А.С., Быховского М.А. Крейнделина В.Б., Дворковича А.В., Волчкова В.П., Пестрякова А.В., Бокка Г.О., Карташевского В.Г., Шломы А.М., Шорина О.А. и др.

**Цель работы.** Повышение эффективности информационного обмена в системе широкополосной профессиональной радиосвязи технологии МАКВИЛ в результате использования разработанных алгоритмов и рекомендаций по улучшению ключевых параметров радиосистемы.

**Научная задача исследования** заключается в разработке адаптивных методов оценки параметров синхронизации и АЧХ радиоканала, разработке рекомендаций по улучшению качества борьбы с мощными внешними помехами и рекомендаций по организации режима хэндовера, что ведёт к повышению эффективности информационного обмена в системе в целом.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие научные задачи:

1. Определить в результате анализа наиболее существенные факторы, влияющие на информационный обмен в системах радиосвязи, использующих технологию МАКВИЛ, в выделенном для их функционирования частотном диапазоне в Российской Федерации.
2. Разработать адаптивный алгоритм синхронизации и коррекции характеристик радиоканала по RS врезкам, учитывающий реальные

параметры технологии МАКВИЛ, динамику движения абонента, и обеспечивающий более высокую помехоустойчивость по сравнению со известными алгоритмами.

3. Разработать рекомендации по аналогово-цифровой обработке сигнала, обеспечивающие повышенную эффективность борьбы с мощными внешними помехами без изменения аппаратной части абонентского устройства.
4. Разработать рекомендации по организации режима хэндовера в технологии МАКВИЛ, позволяющие повысить скорость и объём информационного обмена в системе связи.

**Объектом исследования** являются системы профессиональной подвижной радиосвязи, работающие по ГОСТ Р 58166-2018, реализующие технологию МАКВИЛ.

**Предметом исследования** являются алгоритмы адаптивной оценки параметров радиоканала, вхождения в синхронизацию, борьбы с мощными внешними помехами и параметры режима хэндовера.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач исследования используются методы теории вероятностей, статистической радиотехники, теории радиотехнических цепей, имитационного статистического моделирования и вычислительного эксперимента.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработан адаптивный алгоритм синхронизации и коррекции характеристик радиоканала по RS врезкам физического уровня технологии МАКВИЛ в режиме TDD, который, в отличие от известных алгоритмов, учитывает динамику движения абонентов, за счет чего позволяет получить выигрыш 5 дБ в отношении сигнал/шум при заданном качестве оценки характеристик радиоканала.
2. Разработаны рекомендации и запатентован способ аналогово-цифровой обработки сигнала, который, в отличие от известных, позволяет обеспечивать информационный обмен в системе связи МАКВИЛ при повышенном более чем на 18 дБ уровне внешней помехи блокирования без модификации аппаратной платформы устройств абонентов.
3. Разработаны рекомендации по организации режима хэндовера в технологии МАКВИЛ, в отличие от известных учитывающие качества новых алгоритмов обработки сигналов, что в совокупности приводит к повышению эффективности информационного обмена в системе широкополосной профессиональной радиосвязи технологии МАКВИЛ, подтвержденному в результате расчетов и натурных испытаний на эксплуатируемом участке сети связи.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в разработке алгоритмов синхронизации и коррекции

параметров радиоканала по единичным измерениям на RS врезках, позволяющих в широкополосных системах радиосвязи, работающих в режиме TDD и использующих технологию МАКВИЛ, получить результаты, превосходящие рекомендации вендоров и обеспечивающие при упрощении вычислительной сложности потери, не превосходящие 1,5 дБ. Определены также параметры бесконфликтных зон хэндовера, что позволяет повысить эффективность обслуживания абонентов системы.

Практическая значимость определяется непосредственным внедрением результатов работы при оптимизации структуры системы связи, проводимой ООО «НПП ИРТ» (г. Москва), и использованием разработанных алгоритмов в программном обеспечении оборудования, выпускаемого ООО «Завод «Эталон» (г. Тверь).

**Степень достоверности и апробации результатов.** Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью использования математического аппарата, соответствием результатов теоретических расчетов и результатов, полученных с помощью имитационного компьютерного моделирования, стендовых и натурных испытаний.

**Публикации результатов.** По теме диссертации было опубликовано 14 работ. Из них 4 статьи опубликованы в журналах из перечня ВАК, 2 работы проиндексированы в базах данных Web of Science и SCOPUS. Получено 2 патента на изобретение.

**Личный вклад автора.** Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая получена лично соискателем.

**Соответствие паспорту специальности.** Проведённое автором исследование соответствует п. 5 «Исследование путей совершенствования управления информационными потоками» паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанный адаптивный алгоритм синхронизации и коррекции характеристик радиоканала по RS врезкам в режиме TDD обеспечивает выигрыш в отношении сигнал/шум не менее 5 дБ по отношению к известным алгоритмам при заданном качестве оценки характеристик радиоканала.

2. Разработанный способ аналого-цифровой обработки сигнала позволяет обеспечить штатную работу абонентских устройств при повышенном более чем на 18 дБ уровне блокирующих помех, присутствующих в непосредственной близости к частотному диапазону, выделенному для работы системы связи МАКВИЛ в Российской Федерации.

3. Разработанные рекомендации по организации режима хэндовера позволяют повысить эффективность информационного обмена в системе широкополосной профессиональной радиосвязи МАКВИЛ, что количественно

выражается в увеличении зоны бесконфликтного обслуживания абонентов в условиях городской застройки до 1,5 раз и увеличении средней скорости передачи информации до 34%.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Основная часть диссертации изложена на 150 страницах текста с 91 иллюстрацией и 10 таблицами. Список литературы насчитывает 64 наименования. Приложения изложены на 21 странице.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные направления исследований, приведён краткий анализ существующих и предлагаемых методов поставленных задач. Конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая и научая ценность работы, сведения об аprobации, публикациях автора, а также указаны основные положения, выносимые на защиту.

В **первом** разделе рассмотрены конкретные технические решения, реализованные в существующих системах подвижной радиосвязи поколений 4G и 5G. Выделено 3 основных проблемных направления, для которых, даже с учётом предлагаемых технических и теоретических решений, ориентированных на системы 5G, известные результаты не могут рассматриваться как близкие к оптимальным или даже как удовлетворительные.

К ним относятся:

- 1) методы и алгоритмы контроля состояния динамически изменяющихся параметров радиоканала по служебным RS-сигналам в условиях многолучевого распространения;
- 2) обеспечение помехоустойчивости приёма и цифровой обработки сигналов при воздействии помех высокой мощности, близко расположенных к рабочему частотному диапазону;
- 3) оптимизация алгоритмов хэндовера в условиях сложной городской застройки.

Рассмотрены типы хэндоверов в технологии МАКВИЛ: хэндовер обычного типа (по признаку уменьшения уровня сигнала, тип 1), типа 1а (уменьшение ниже уровня сигнала соседней БС на заданное значение) и тип 1б (уменьшение ниже критического уровня); хэндовер по признаку снижения уровня качества связи (переключение вида модуляции, тип 2); хэндовер по признаку конфликта распределения ресурса радиоканала (тип 3).

Показано, что каждое из указанных направлений обладает потенциалом для существенного повышения эффективности информационного обмена в системах профессиональной радиосвязи. Особенно заметными результаты могут оказаться для систем критических коммуникаций, которые обладают малыми ресурсными

возможностями по сравнению с радиосетями общего пользования и требуют повышенного уровня защищенности и устойчивости линий информационного обмена. Именно к таким сетям связи относятся системы подвижной радиосвязи, построенные по технологии МАКВИЛ.

Во втором разделе разработан усовершенствованный алгоритм адаптивной настройки радиоканала для системы широкополосного доступа технологии МАКВИЛ. При синтезе алгоритма обработки замера (режим вхождения в синхронизацию) для смеси шума и помех на поднесущих будем полагать справедливой модель независимых гауссовых случайных величин с дисперсиями  $\sigma^2$ , присутствующих в каждой квадратуре. В результате условная вероятность наблюдения, составленного на «парах» элементов, входящих в базовую сигнальную структуру, будет:

$$W\left(\vec{F}_I(1), \vec{F}_Q(1), \vec{F}_I(2), \vec{F}_Q(2) \middle| P, R, \vec{A}_I, \vec{A}_Q\right) = \\ = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^K} \exp \left\{ -\frac{\sum_{k=1}^K (F_I(k,1) - A_I(k))^2 + \sum_{k=1}^K (F_Q(k,1) - A_Q(k))^2 + \sum_{k=1}^K (F_I(k,2) - PA_I(k) + RA_Q(k))^2 + \sum_{k=1}^K (F_Q(k,2) - PA_Q(k) - RA_I(k))^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (1)$$

где  $\vec{F}_I(m) = (F_I(1,m), F_I(2,m), \dots, F_I(K,m))^T$ ,  $\vec{F}_Q(m) = (F_Q(1,m), F_Q(2,m), \dots, F_Q(K,m))^T$  – вектора квадратурных компонент спектральных составляющих, наблюдаемые в позициях поднесущих принимаемой базовой сигнальной структуры;  $k=1,2,\dots,K$  и  $m=1,2$  – номера поднесущих и символов в парах, соответственно;  $\vec{A}_I = (A_I(1), A_I(2), \dots, A_I(K))^T$ ,  $\vec{A}_Q = (A_Q(1), A_Q(2), \dots, A_Q(K))^T$  – априорно неизвестные вектора распределения квадратурных уровней (синфазных и ортогональных, соответственно) в базовой сигнальной структуре;  $K$  – число поднесущих в базовой сигнальной структуре;  $P$  и  $R$  – априорно неизвестные параметры, устанавливающие изменения квадратур от 1-го символа ко 2-му. Для систем связи МАКВИЛ значение числа поднесущих  $K$  составляет 64 для сигнала Преамбулы и 16 – для канала ВСН, или выделенного речевого абонентского соединения.

На основе измерений  $\vec{F}_I(1), \vec{F}_Q(1), \vec{F}_I(2), \vec{F}_Q(2)$  по критерию максимального правдоподобия (МП) были получены оценки неизвестных  $\vec{A}_I = (A_I(1), A_I(2), \dots, A_I(K))^T$ ,  $\vec{A}_Q = (A_Q(1), A_Q(2), \dots, A_Q(K))^T$ ,  $P$  и  $R$ .

$$\left\{
\begin{aligned}
p &= \sum_{k=0}^K (F_I(k,1)F_I(k,2) + F_Q(k,1)F_Q(k,2)), \\
r &= \sum_{k=0}^K (F_I(k,1)F_Q(k,2) - F_Q(k,1)F_I(k,2)), \\
\Delta &= \sum_{k=0}^K (F_I^2(k,1) + F_Q^2(k,1) - F_I^2(k,2) - F_Q^2(k,2)), \\
G &= \left( -\Delta/2 + \sqrt{\Delta^2/4 + p^2 + r^2} \right) / (p^2 + r^2), \\
\hat{P} &= G \cdot p, \quad \hat{R} = G \cdot r, \\
\hat{A}_I(k) &= \frac{F_I(k,1) + G(F_I(k,2)p + F_Q(k,2)r)}{1 + G^2(p^2 + r^2)}, \\
\hat{A}_Q(k) &= \frac{F_Q(k,1) + G(F_Q(k,2)p - F_I(k,2)r)}{1 + G^2(p^2 + r^2)}, \quad k = 1, \dots, K,
\end{aligned}
\right. \tag{2}$$

Для синхронизации по частоте на начальном этапе был предложен эмпирический алгоритм, ориентированный на устойчивое состояние частоты на интервале базовой структуры (0.687мс для МАКВИЛ), и связанный с оценками МП (2), который вычисляет усреднённый набег фаз между 1-ми и 2-ми символами, составляющими «пары» в базовой сигнальной структуре:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi T} \arctan(r/p), \tag{3}$$

где  $T$  – интервал времени между символами в «парах» (для Преамбул  $T=10$ мс, для Pilot-врезок  $T = 1.1$ мс или  $T=0.687$ мс).

Этим завершается синтез алгоритма МП обработки замера для режима начальной синхронизации по частоте.

Обработку замера при синхронизации по задержке предложено организовать согласно критерию МП.

Так как между парами символов существует задержка, на которой из-за ошибок синхронизации по частоте может наблюдаться сдвиг фаз, то было предложено алгоритм МП задержки привязать к одной из половин базовой сигнальной структуры (т.е. к первым или вторым символам в «паре»). В математической форме (без ограничения общности можно ориентироваться на 1-е символы) запишется так:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_m = \arg \max_{t=0 \dots Ke-1} \left( \left| IFFT_{Ke} \left( \vec{Fe}_I(1), \vec{Fe}_Q(1), t \right) \right| \right), \\ s_{-1} = \left| IFFT_{Ke} \left( \vec{Fe}_I(1), \vec{Fe}_Q(1), t_m - 1 \right) \right|, \\ s_0 = \left| IFFT_{Ke} \left( \vec{Fe}_I(1), \vec{Fe}_Q(1), t_m \right) \right|, \\ s_{+1} = \left| IFFT_{Ke} \left( \vec{Fe}_I(1), \vec{Fe}_Q(1), t_m + 1 \right) \right|, \\ \rho = \frac{1}{2} \cdot \frac{s_{+1} - s_{-1}}{2s_0 - (s_{+1} + s_{-1})}, \\ \Delta \hat{\tau} = (t_m + \rho + c(\rho)) \tau_T, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $t$  – дискретный параметр времени, задающий номера отсчётов обратного преобразования Фурье (IFFT);  $Ke$  – число спектральных компонент в спектре базовой сигнальной структуры (с учётом возможного дополнения нулевыми составляющими);  $\tau_T$  – тактовый интервал между точками IFFT,  $c(\rho)$  – функция, корректирующая интерполяционную поправку второго порядка, которая подбирается для каждого типа сигналов конкретно. Например, для Pilot-врезок сигнала ВЧН системы МАКВИЛ, при  $Ke = 256$ , корректирующая функция, сформированная методом наименьших СКО в отсутствии шумов, имеет вид:

$$c(\rho) = 0.0456 \cdot \left( \frac{3}{5} \sin(2\pi\rho) - \frac{128}{15} \rho \left( \rho^2 - \frac{1}{4} \right) \right). \quad (5)$$

При этом остаточные систематические среднеквадратические ошибки интерполяции 2-го порядка сокращаются с  $0.19\tau_T$  до  $0.011\tau_T$ . В пересчёте на абсолютные значения это соответствует сокращению 95нс до 5.5нс (рассмотрен случай частоты дискретизации IFFT 2 МГц, используемой в МАКВИЛ). Было показано, что оценки параметров, полученных по алгоритму обработки единичных замеров на кадре МАКВИЛ при коррекциях характеристик канала по Pilot-врезкам синтезированный по критерию максимума апостериорной вероятности совпадают с оценками полученными по (2). То есть показано, что всегда можно формировать оценки спектральных характеристик независимо на каждом ресурсном блоке МАКВИЛ (в мобильном режиме) или на двух соседних ресурсных блоках (в стационарном режиме). Особый интерес представляет исследование алгоритмов накопления результатов на двух или четырёх RS врезках.

Проверка исследуемых алгоритмов оценки и коррекции искажений радиоканала проводилась путём компьютерного моделирования с использованием

моделей радиоканала, утвержденных Рек. 3GPP и GSM. Был выделен минимальный перечень вариантов обработки, обеспечивающих наилучшие рабочие характеристики (или отличающиеся от наилучших не более чем на 1 дБ по эффективному показателю сигнал/шум) для всех сочетаний (мощность сигнала) + (скорость движения абонента). Общий объем обучающей выборки составил 240 000 независимых испытаний. Были исследованы алгоритмы без накопления, с накоплением на двух RS врезках, с накоплением на четыре RS врезках. На рисунках 1 и 2 представлены наиболее характерные результаты моделирования. Алгоритмы с накоплением обозначены как **q1, q2, q3**. Между врезками коррекция проводилась на основе интерполяционных формул. Алгоритмы синхронизации по задержке соответственно без накопления с накоплением: **t1-t7**, а коррекции фаз по частотным замерам **f1-f3**. Уточнение предварительного усреднения зависит от способа оценки параметра задержки  $\Delta\tau$ . Поэтому ниже, в экспериментальных результатах варианты с предварительным усреднением по соседним поднесущим обозначается как  $(t^*) + q^*$ , где вместо звёздочек стоят цифры. Например,  $(t1) + q1$  обозначает, что предварительное усреднение выполнено с использованием оценки задержки, полученной алгоритмом **t1**, после чего применялся алгоритм когерентного накопления **q1** для оценки спектральных искажений. Варианты  $(t6)+q^*$  обозначают случаи с предварительным усреднением замеров, что соответствует штатному алгоритму, а варианты  $(t7)+q^*$  - без усреднение на соседних поднесущих. Символы **f\*** обозначают применение вспомогательного алгоритма синхронизации по частоте, который нужен для устранения набега фаз и устранения возможных неоднозначностей в формируемых оценках. Таким образом, полное обозначение тестируемого алгоритма коррекции искажений спектральной характеристики канала имеет формат  $(f^*+t^*)+q^*$ , где в позициях первой и последней звёздочек могут стоять цифры от 1 до 3, а в позиции второй звёздочки – от 1 до 7.

На рисунке 1 показана мощностно-скоростная плоскость с полученной разбивкой на кластеры для режима оценки коррекции частотно-селективных искажений радиоканала. В каждом кластере показан тип алгоритма, обеспечивающий в нем наилучшие показатели по точности (минимум относительного уровня остаточных ошибок). На рисунке 2 для минимальной и максимальной исследуемых скоростей показаны зависимости относительных ошибок оценок частотно-селективных искажений от уровня сигнала, для наилучших сочетаний алгоритмов. Штриховыми линиями показаны границы применимости различных схем модуляции (QPSK, PSK8, QAM16 и QAM64) с учётом остаточных ошибок восстановления радиоканала. Потенциальные возможности выигрыша от алгоритмов с накоплением более чем на 4-х врезках могут составить порядка 0.7 дБ (как видно из данных рисунка 2 а) и только в случае стационарных абонентов. Для мобильных абонентов усреднение уже на 4-х RS-врезках приносит отрицательный результат.

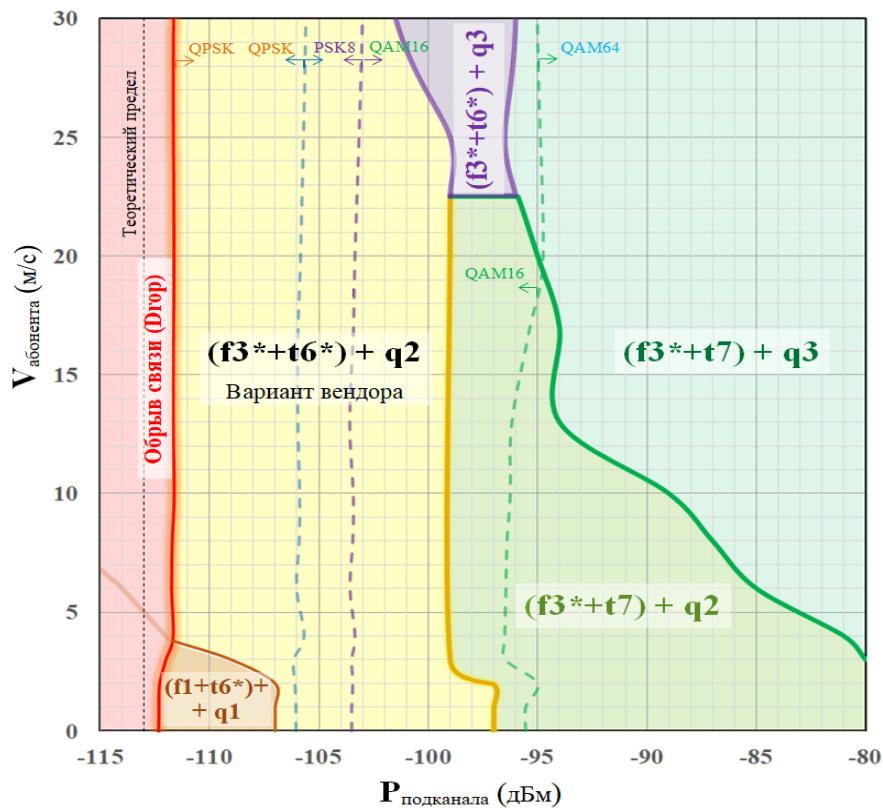


Рисунок 1 – Кластеры расширенной таблицы CQI организации управления алгоритмом оценки-коррекции частотно-селективных искажений радиоканала с учетом скорости движения абонента

Алгоритм **(f3+t6) + q2**, прописанный изначально в документации вендора, демонстрирует наилучшие или близкие к наилучшим показатели только при низких уровнях сигнала ( $\leq -100$  дБм). При высоких уровнях приёма он значительно уступает вариантам **(f3+t7) +q2,3**, которые способны обеспечить качество восстановления радиоканала, пригодное даже для использования модуляции QAM256.

Также предложена и исследована методика расширенной таблицы CQI (Channel Quality Indicator) предполагает дополнительное использование информации о скорости движения абонента. Нужно отметить, что прямое измерение скорости мобильных абонентов через радиоканал в системах поколения 4G не предусматривается.

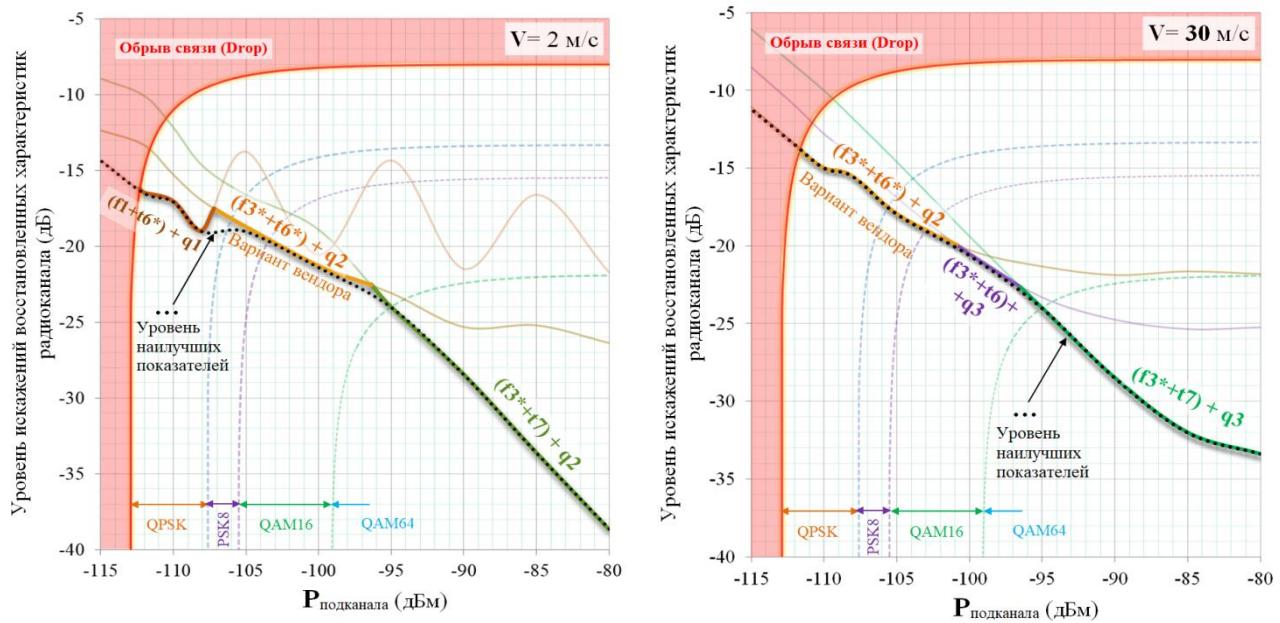


Рисунок 2 – Зависимости относительных ошибок оценок частотно-селективных искажений от уровня сигнала

Не составляет исключения и система МАКВИЛ. Поэтому для использования предложенной методики, расширенного CQI – индикатора качества канала, потребовалось найти решение задачи оценки скорости абонента на основе параметров радиоканала, доступных прямым измерениям. В результате моделирования было установлено, что наиболее значимой корреляционной связью со скоростью движения абонента обладает показатель статистики, формируемой как квадратный корень значения минимума 3-х оценок дисперсий замеров сдвига частоты, получаемых с помощью алгоритмов  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ , соответственно.

$$\hat{\sigma}_{f \min} = \sqrt{\min(\hat{\sigma}_{f1}^2, \hat{\sigma}_{f2}^2, \hat{\sigma}_{f3}^2)}. \quad (6)$$

Для согласования по абсолютным значениям при этом требуется для каждой системы и каждого диапазона подбирать соответствующий масштабный коэффициент длины. Для системы МАКВИЛ, работающей в диапазоне 340МГц, он оказался равным 1.6 [м].

На рисунке 3 показаны установленные при тестировании зависимости между скоростью движения абонента и умноженным на масштабный коэффициент 1.6 показателем (6) для случаев различных уровней принимаемых сигналов. Интервал формирования выборок в алгоритме вынесения решения, основанном на (6), составлял 12 с (что для МАКВИЛ соответствует 1200 отсчётом). Можно видеть, начиная со скоростей 10 м/с и выше, алгоритм оценки скорости на основе (6) даёт точность в пределах 5%, что вполне пригодно для управления переключениями через расширенные таблицы CQI.

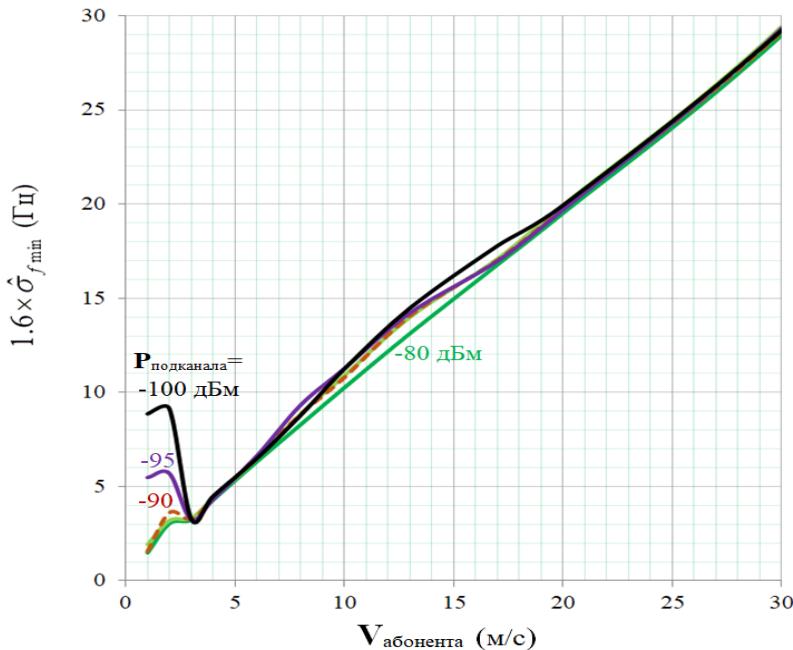


Рисунок 3 – Зависимость прямо измеряемой статистики радиоканала, предлагаемой в качестве показателя мобильности, от скорости движения абонента

Анализ различных алгоритмов оценки параметров сигнала по RS врезкам в OFDM сигнале технологии МАКВИЛ показал, что при учёте реальной структуры сигнала и режима работы TDD, оценка параметров задержки для установления синхронизации в виде оценок максимального правдоподобия и оценки параметров сигнала, используемые для коррекции характеристик радиоканала, полученные по критерию максимальной апостериорной вероятности совпадают. При этом могут быть использованы достаточно простые с квазиоптимальные алгоритмы, имеющие потери по сравнению с оптимальными не превышающие 1,5 дБ.

Конкретно для систем стандарта МАКВИЛ установлено, что для синхронизации режим когерентной обработки на кадрах не даёт значимых результатов. Для достижения качества синхронизации, близкого к потенциальному, достаточно использовать алгоритмы максимального правдоподобия, синтезированные для обработки измерений в пределах одного ресурсного блока с последующим статистическим усреднением на последовательности кадров.

Результаты испытаний различных вариантов статистической обработки измерений, формируемым алгоритмом оценки спектральных характеристик радиоканала системы МАКВИЛ, показали, что не существует одного варианта, обеспечивающего наилучшие показатели. Установлено, что при разделении всех возможных случаев на четыре ситуации (с мобильным или стационарным поведением абонентов, уровнем принимаемых сигналов выше или ниже -100 дБм) можно путём специального выбора соответствующей процедуры обеспечить близкие к наилучшим показателям оценки и последующую коррекцию спектральных характеристик радиоканала МАКВИЛ. В результате удаётся достичь

показателей качества работы в режиме демодуляции, превосходящих показатели штатного алгоритма, прописанного в исходной документации фирмы Xinwei, т.е. получить выигрыш не менее 5дБ или перейти на уровень более высокий уровень многопозиционности в QAM модуляции.

**В третьем** разделе рассмотрены вопросы приема и обработки сигнала в условиях мощных блокирующих помех и настройки хэндовера в сети связи. Установлено, что в диапазоне 340 МГц, выделенном для работы сети МАКВИЛ на территории РФ, механические фильтры имеют довольно большие размеры и вес (более 1 кг). ПАВ фильтры имеют значительно меньшие массогабаритные показатели, но их частотно-селективные показатели значительно уступают (только 40 дБ затухания при отстройках порядка 2.0 (в единицах рабочей полосы) против 55 дБ у механических фильтров). Кроме того, большое затухание сигнала при прохождении ПАВ фильтра требует применения дополнительного малошумящего усилителя, что увеличивает потребление и себестоимость аппаратуры. В результате варианты с внешними фильтрами оказываются пригодными только для базовых станций.

Для абонентских станций для борьбы с блокирующими помехами предложена оригинальная методика нестандартной настройки комбинаций из anti-aliasing фильтров и основного цифрового фильтра рабочей полосы. На примере RF чипа AD9361, используемого в абонентской аппаратуре МАКВИЛ, с помощью предложенной методики выполнена настройка комбинации из аналоговых фильтров BB+TIA и цифрового 128 точечного FIR фильтра. Теоретически показано и подтверждено экспериментально на специально созданном измерительном стенде, что указанная методика настройки позволяет в диапазоне 340 МГц повысить на абонентских терминалах (смартфоны, рации, модемы) пороговый уровень блокировок более чем на 18 дБ. Для перспективных разработок RF чипов установлено, что если от anti-aliasing фильтров Баттерворта 3-го порядка (как в существующем чипе AD9361) перейти к эллиптическим фильтрам 5-го порядка, то можно будет обеспечить показатели подавления блокирующих помех на уровне лучших образцов внешних фильтров. В соответствии с выявленными структурами для стендовых испытаний были выбраны 5 вариантов воздействующих помех, показанные на рисунке 4. На рисунке 5 представлены результаты стендовых испытаний подавления мощных внеполосных помех на нижних частотах спектра при коррекции прошивки абонентских радиостанций с использованием разработанной методики расчёта фильтров.

Анализ усовершенствованных алгоритмов цифровой обработки был протестирован в режимах процедур хэндовера типов 1-3 на фрагменте сети МАКВИЛ в г. Москве, в районе станции метро Авиамоторная. Указанный фрагмент, включающий в себя пять БС с указанием расстояний (ISD) и высот подвесов антенн показан на рисунке 6.

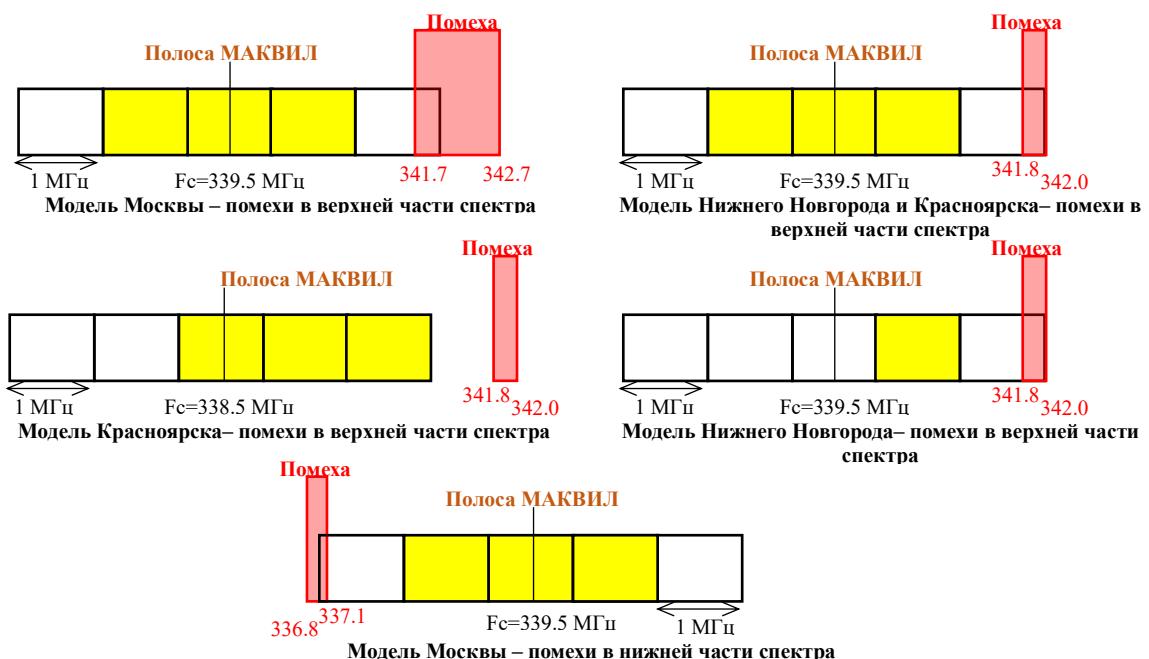


Рисунок 4 – Пять основных вариантов воздействия помех, выбранные для стендовых испытаний

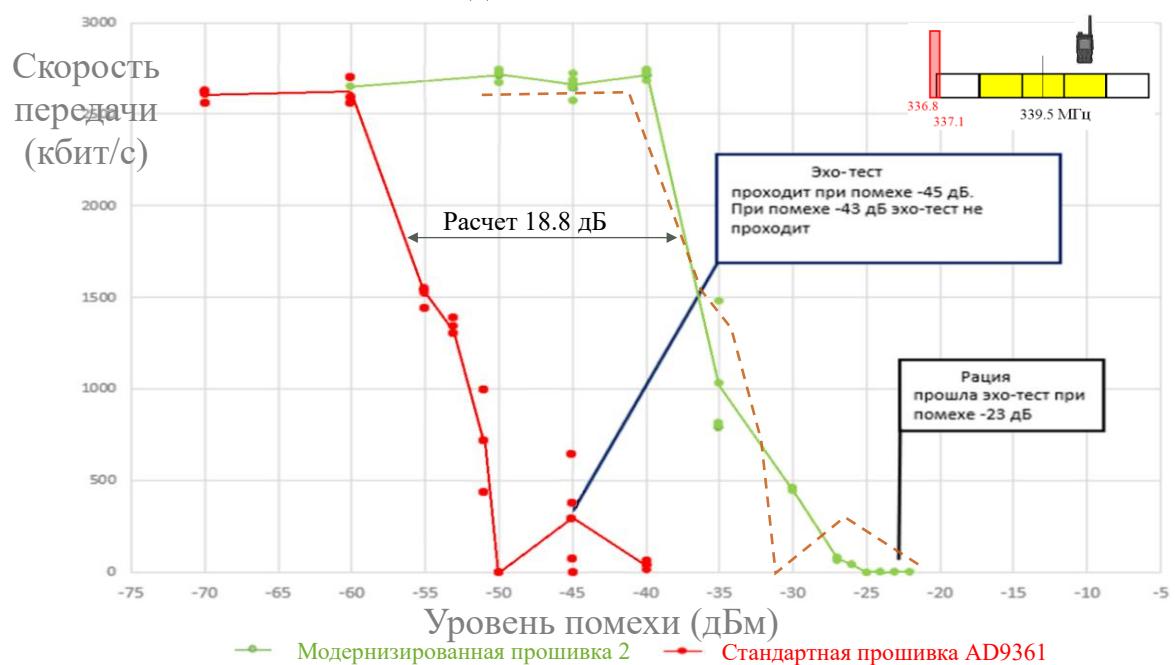


Рисунок 5 – Результаты стендовых испытаний абонентских радиостанций на помехоустойчивость

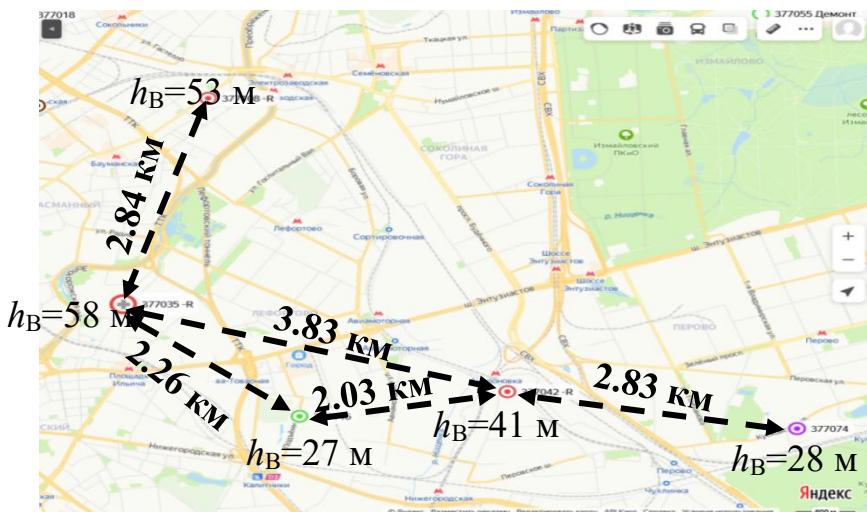


Рисунок 6 – Фрагмент сети МАКВИЛ, на котором происходило тестирование алгоритмов цифровой обработки

Технические показатели зоны хэндовера были первоначально рассчитаны по модели COST Hata с использованием установок по умолчанию системы МАКВИЛ. На следующем этапе был выполнен контроль расчёта экспериментально для мобильных абонентов с радией внутри салона автомобиля, работающей на частотах диапазона 340 МГц. На рисунке 7 показана зона связи с уровнем сигнала от -100 дБм до -105 дБм для БС 377035 и границы хэндовера 1 по контрастности и по критическому снижению уровня (стандартные установки).

На рисунке 8 показано, как изменяются зоны хэндовера при переходе от штатного алгоритма цифровой обработки к усовершенствованному варианту.

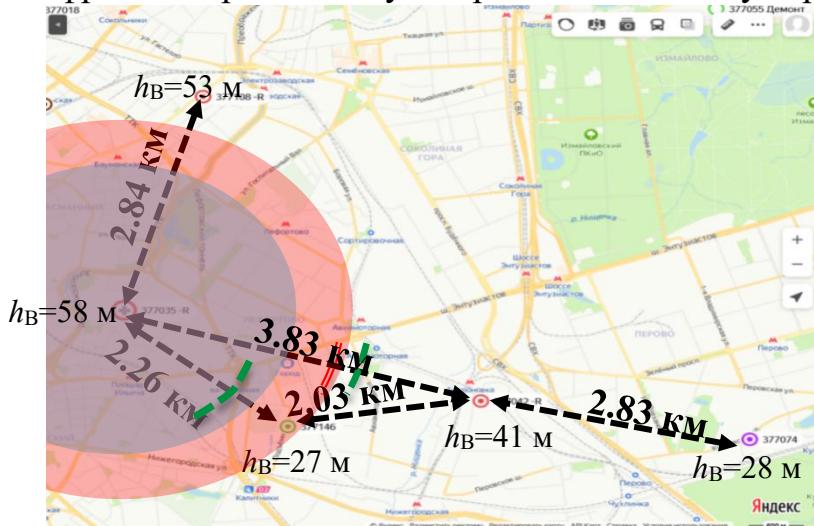


Рисунок 7 – Зона связи с уровнем сигнала от -100 дБм до -105 дБм для БС 377035 и границы хэндовера 1 (штатный алгоритм)

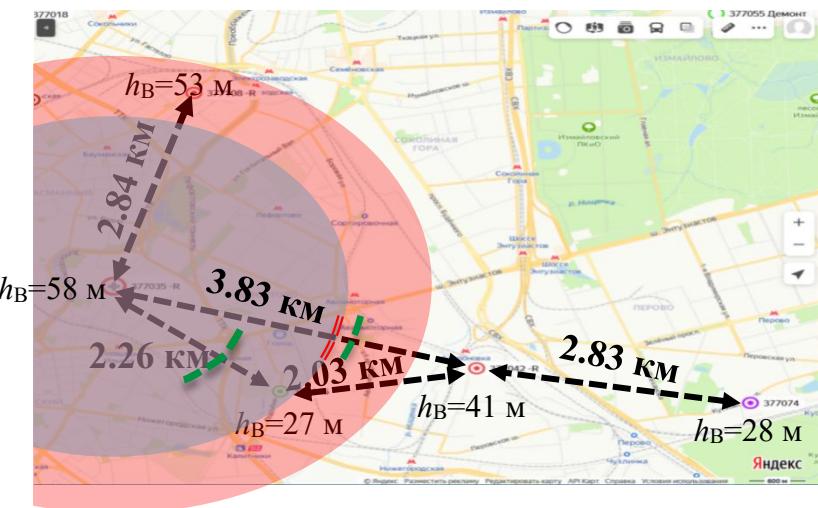


Рисунок 8 – Зона связи с уровнем сигнала от -100 дБм до -105 дБм для БС 377035 и границы хэндовера 1 (усовершенствованный алгоритм)

Хэндовер 1 по контрастности уровня сигнала происходит между БС 377035 (Source) и 377146 (Target). Область такого хэндовера показана дугой штриховой линии зелёного цвета. Серо-синий круг показывает расчётную область для уровня принимаемого внутри автомобиля сигнала более -100 дБм, розовый – от -100 дБм до -105 дБм. Эта область хэндовера типа 1, но выполняемого по признаку критического снижения уровня. Можно видеть, что при штатном алгоритме обработки (рисунок 7) дистанция от точки начала активизации обычного хэндовера до точки перехода на вариант по критическому снижению уровня составляет 200-220 м. В случае перехода на оптимизированный алгоритм (см. рисунок 8) такая дистанция возрастает до 1200-1250 м, что обеспечивает более высокую стабильность хэндовера. При высоких скоростях абонента отрезок 200 м, отвечающий штатному алгоритму, может быть пройден менее чем за 10 с, что в условиях замираний приводит к появлению ощутимой вероятности (~0,1) разрыва соединений с модуляциями QAM16 и выше.

Ещё хуже ситуация для штатного алгоритма при хэндовере 1 между БС 377035 (Source) и 377042 (Target). В этом случае, как видно из рисунка 7, режим перехода по контрастности уровней сигнала выходит за пределы зоны обслуживания. Возможным остаётся только хэндовер по критическому снижению уровня. Его область активизации показана дугой с двойной штриховой красной линией. Расстояние от точки активизации такого хэндовера до точки обрыва соединения из-за снижения под уровень чувствительности (-105 дБм) оказывается менее 100 м. Появляется вероятность потери соединения и перехода на режим reselect. В случае перехода на оптимизированный алгоритм, как показывает рисунок 8, переключение по критическому снижению уровня доступно в области пространства с размером порядка 350 м. Правда зона обычного хэндовера по контрасту все равно оказывается за границей критического снижения. Но время на

выполнение критического хэндовера, даже при высоких скоростях абонентов, оказывается значительно больше 10 с, что обеспечивает гарантированную работу.

На рисунке 9 показаны зоны, доступные для работы с модуляцией QAM16 в радиоканалах, соединяющих БС 377035 с абонентами (расчётное по модели COST Hata расширение зоны сервиса с модуляцией QAM16 при замене штатного алгоритма цифровой обработки на оптимизированный).

Салатовым цветом помечена рассчитанная по модели COST Hata зона для штатного алгоритма Xinwei, зелёным – для оптимизированного варианта. Как можно видеть, Хэндовер 1 между БС 377035 и БС 377146 (зелёная штриховая линия) при использовании оптимизированного алгоритма обработки произойдёт без перехода на QPSK, то есть без хэндовера по качеству типа 2. Для штатного алгоритма избежать перехода на модуляцию более низкого уровня (PSK8 или QPSK) не удастся.

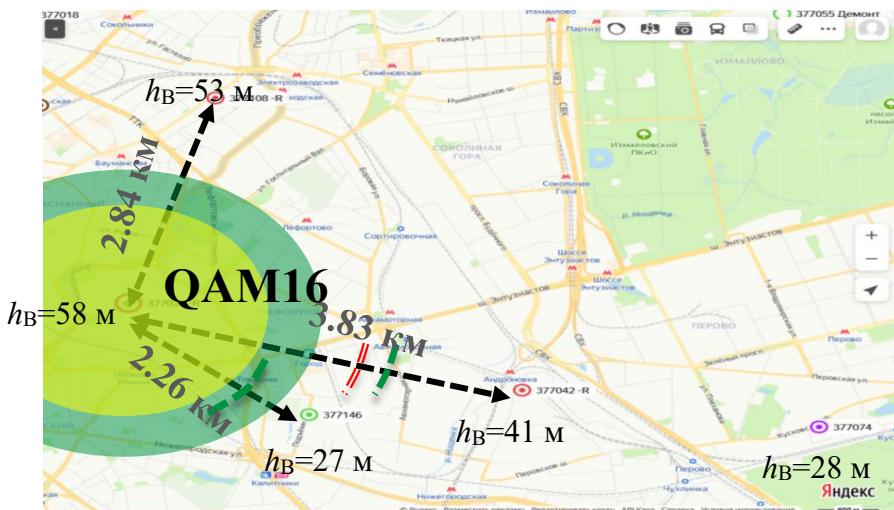


Рисунок 9 – Зоны, доступные для работы с модуляцией QAM16

При одной и той же плотности абонентов, средняя скорость в зеленой зоне (исключая салатовую) при применении алгоритмов вендора пропорциональна площади этой зоны, умноженной на спектральную эффективность PSK8  $\sim 3/\text{бит}/\text{с}/\text{Гц}$  (или QPSK  $\sim 2/\text{бит}/\text{с}/\text{Гц}$ ). После применения новых алгоритмов скорость информационного обмена в зеленой зоне становится пропорциональной спектральной эффективности QAM16  $\sim 4/\text{бит}/\text{с}/\text{Гц}$ . Таким образом потенциальное увеличение средней скорости передачи информации в сети связи в целом за счет применения новых алгоритмов составляет от 14 % до 34 % в зависимости от настроек хендовера типа 2.

Использование модифицированного алгоритма оценки задержки в условиях высокий уровней сигнала, показало точность порядка 500 нс, что в пересчёте на оценку расстояния даёт 75 м. Поэтому даже для АС без модуля GPS попадание в близкую зону фиксировалось с высокой достоверностью. На рисунке 10 в нижней части показан пример зоны погрешности размером 75 м, внутри которой нельзя достоверно вынести решение о попадании абонента в область автономной работы с БС. Тем не менее, даже в такой области допускается использование автономного

режима распределения ресурса со стороны БС. Если в некоторых ситуациях это будет приводить к конфликту с соседними БС, то указанный конфликт будет разрешаться процедурой хэндовера 3.

Проведённый анализ, подтвердившийся экспериментом применения разработанных улучшенных алгоритмов цифровой обработки в режимах хэндовера на примере фрагмента сети McWiLL в г. Москве, в районе м. Авиамоторная, показал:

- 1) для хэндовера типа 1 (по контрастности уровней сигналов соседних БС) улучшенные алгоритмы позволяют сохранять модуляцию QAM16 в радиоканале (переходы на более простые законы QPSK или PSK8 не требуются);
- 2) точности замеров задержек, обеспечиваемые улучшенными алгоритмами, позволяют в городской застройке выносить достоверные решения о попадании абонента в зоны автономной работы с обслуживающей БС.

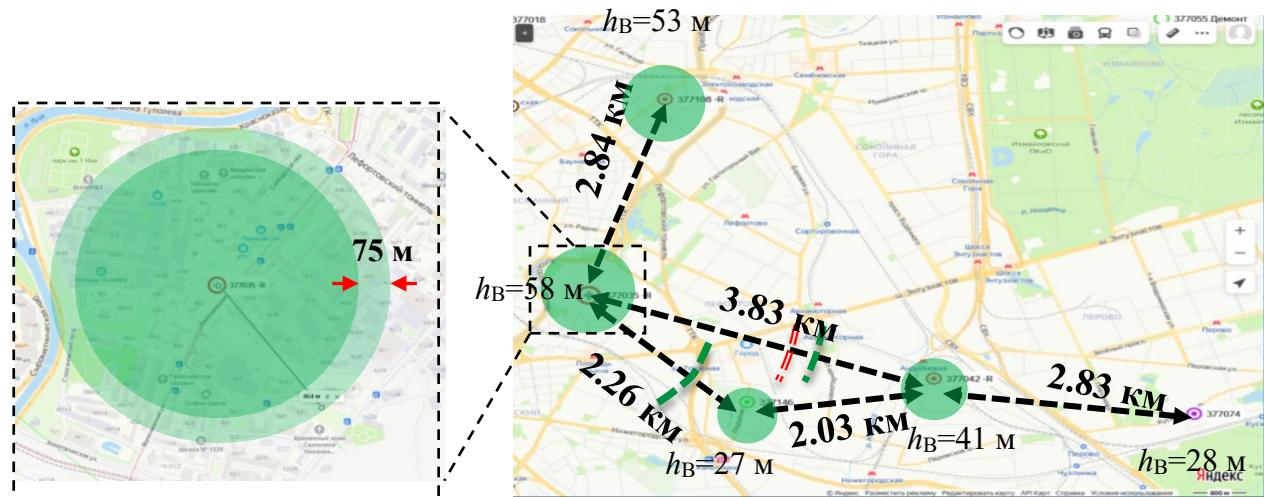


Рисунок 10 – Расчётные зоны автономной работы АС с БС при распределении ресурса радиоканала. Точность оценки расстояния ~75 м

В результате проведенного анализа, теоретических расчетов и натурных испытаний, можно сформулировать научно-обоснованные рекомендации по организации режима хендовера в системе связи МАКВИЛ, заключающиеся в следующем:

1. Учитывать улучшение качества обработки сигнала в результате применения разработанного способа борьбы с помехами при расчете граничных зон хендовера, при расчете скорости и объема общего информационного потока сети, а также при проектировании топологии сети.
2. Использовать для привязки АТ к БС оценки дальности до абонента, получаемые разработанным адаптивным алгоритмом синхронизации (в отсутствие других оценок или дополнительно к ним).

Следование указанным рекомендациям позволит повысить эффективность информационного обмена в системе широкополосной профессиональной радиосвязи МАКВИЛ, что количественно выражается в увеличении зоны

бесконфликтного обслуживания абонентов в условиях городской застройки до 1,5 раз и увеличении средней скорости передачи информации до 34%. Использование оценок дальности до АТ, получаемых с помощью разработанного адаптивного алгоритма синхронизации, позволяет организовывать привязку АТ к БС в отсутствии других источников данных о местоположении АТ.

Указанное повышение эффективности информационного обмена в сети связи МАКВИЛ подтверждено в результате расчетов и натурных испытаний на эксплуатируемом участке сети связи.

### **Заключение**

В диссертационном исследовании получены следующие научные результаты:

1. Определены наиболее существенные факторы, влияющие на информационный обмен в широкополосных системах подвижной радиосвязи технологии МАКВИЛ: точность синхронизации в режиме TDD на ограниченных интервалах времени, алгоритмы контроля параметров радиоканала по служебным RS-сигналам в условиях многолучевого распространения; обеспечение помехоустойчивости при воздействии внеполосных помех высокой мощности; режим хэндовера в системе.

2. Разработан адаптивный алгоритм синхронизации по RS врезкам в режиме TDD, учитывающий параметры технологии МАКВИЛ, который позволяет при упрощении и снижении вычислительной сложности получить потери в отношении сигнал/шум по отношению к оптимальным алгоритмам, не превышающие 1,5 дБ. Показано, что для достижения качества синхронизации, близкого к потенциальному, достаточно использовать алгоритмы максимального правдоподобия, синтезированные для обработки измерений в пределах одного ресурсного блока с последующим статистическим усреднением на последовательности кадров. В результате удается достичь показателей качества работы в режиме демодуляции, превосходящих показатели штатного алгоритма, описанного в исходной документации фирмы Xinwei не менее 5 дБ. Разработанный алгоритм адаптируется к динамике движения абонента.

3. Разработан способ аналогово-цифровой обработки сигнала для борьбы с мощными внеполосными внешними помехами, включающий

- использование стандартных ПАВ фильтров на БС, позволяющих получить подавление внеполосных помех на уровне -95 дБ;

- модификацию настроек и программного обеспечения стандартных высокочастотных микросхем в составе АТ, что позволяет достичь дополнительного подавления на уровне 18 дБ без модификации аппаратной части.

4. Разработаны рекомендации по организации режима хэндовера в радиосистеме технологии МАКВИЛ, которые позволяют увеличить зону бесконфликтного обслуживания абонентов в условиях городской застройки до 1,5 раз и увеличить среднюю скорость информационного обмена до 34%.

Таким образом, **научная задача исследования**, заключающаяся в разработке адаптивных методов оценки параметров синхронизации и АЧХ радиоканала, разработке рекомендаций по улучшению качества борьбы с мощными внешними помехами и рекомендаций по организации режима хэндовера, решена.

**Цель работы**, заключающаяся в повышении эффективности информационного обмена в системе широкополосной профессиональной радиосвязи технологии МАКВИЛ в результате использования разработанных алгоритмов и рекомендаций по улучшению ключевых параметров радиосистемы, достигнута.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях из перечня ВАК**

1. Шорин В.О. Качество алгоритмов оценки параметров сигнала в системе МАКВИЛ / Шорин В.О., Лобов Е.М. // Экономика и качество систем связи. – 2024. – № 3(33). – С. 62-78.
2. Шорин В.О. Улучшенные сигнальные структуры FBMC (5G) для систем критических коммуникаций: повышение помехоустойчивости в условиях многолучевого распространения / Шорин В.О., Шорин О.А., Бокк Г.О. // Экономика и качество систем связи. – 2022. – № 3(25). – С. 22-37.
3. Шорин В.О. Режим хэндовера для сети связи МАКВИЛ в г. Москве // Экономика и качество систем связи. – 2021. – № 4(22). – С. 3-10.
4. Шорин В.О. Мобильный ретранслятор с функцией определения местоположения / Шорин В.О., Лохвицкий М.С. // Экономика и качество систем связи. – 2021. – № 2(20). – С. 52-56.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в МБД Scopus и Web of Science**

5. Shorin V.O. Application of Lagrange Variational Principle to Accurate Solution of Statistical Kalman Filtration Problem in Generalized Conditions / Shorin V.O., Shorin A.O., Bokk G.O. // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-8

6. Shorin V.O. Improved FBMC (5G) Signal Structures for Critical Communications Systems. Increase of noise immunity in conditions of multipath propagation / Shorin V.O., Shorin A.O., Bokk G.O. // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2022. – Vol. 5, No. 1. – P. 338-346.

### **Прочие публикации**

7. Шорин В.О. Адаптивная настройка широкополосного радиоканала по RS-врезкам в OFDM сигналах // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2025. – Т. 16, № 3. – С. 40-45.

8. Шорин В.О. Сигналы FBMC (5G) с повышенной помехозащищенностью / Шорин В.О., Шорин О.А., Бокк Г.О. // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом: сборник материалов (тезисов) I международной конференции, Москва, 26–27 октября 2022 года. – Москва: Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий, 2022. – С. 4-7.

9. Шорин В.О. Вопросы организации использования мобильного ретранслятора для сетей мобильной связи / Шорин В.О., Лохвицкий М.С. // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ (ТЕЗИСОВ) 48-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 26–27 октября 2021 года. – Москва: ЗАО "Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий", 2021. – С. 4-7.

10. Шорин В.О. Анализ режимов хэндовера для профессиональной сети связи Маквил на примере территориальной зоны в г. Москве // Сборник материалов (тезисов) 48-й международной конференции «Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом», 2021. С. 7-8.

11. Шорин В.О. Мобильный ретранслятор для сетей мобильной связи / Шорин В.О., Лохвицкий М.С. // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом: Сборник материалов (тезисов) 47-й Международной конференции, Москва, 05–07 апреля 2021 года. – Москва: ЗАО "Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий", 2021. – С. 11-12.

12. Шорин В.О. Ретранслятор для сетей мобильной связи с использованием систем определения местоположения / Шорин В.О., Лохвицкий М.С. // Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ (ТЕЗИСОВ) 46-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 05–06 ноября 2020 года. – Москва: АО «Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий», 2020. – С. 8-11.

### **Патенты**

13. Патент №2787473 РФ. Способ аналого-цифровой обработки сигнала / В.О. Шорин, Г.О. Бокк. Заявлено 23.03.2022. Опубл. 09.01.2023, Бюл. №1.

14. Патент №2798502 РФ. Способ организации сотовой связи с использованием мобильного ретранслятора / В.О. Шорин, М.С. Лохвицкий. Заявлено 05.10.2022. Опубл. 23.06.2023, Бюл. №1.