

На правах рукописи

Родионов Владимир Вячеславович

**Повышение скорости передачи данных в сетях GSM на
принципах когнитивного радио**

Специальность 05.12.13 –
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2012

Работа выполнена на кафедре «Средства связи с подвижными объектами» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Громаков Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук
Бутенко Валерий Владимирович

- кандидат технических наук
Дю Константин Олегович

Ведущая организация - ОАО «НПК «НИИДАР»

Защита состоится «15» мая 2012 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Петраков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Мобильные и беспроводные технологии сегодня обеспечивают практически глобальное покрытие для передачи речи и данных с невысокой скоростью. Только в сетях GSM предоставляются услуги более 4 миллиардам абонентам в 219 странах. Успех технических решений, принятых в стандарте GSM более 20 лет назад, позволяет применять их в современных и перспективных системах связи. На основе GSM развиваются системы связи для железных дорог (GSM-R). На базе GSM создаются в Европе и России системы экстренного реагирования на дорогах (eCall и ЭРА ГЛОНАСС). В США планируется создание системы GSM в новой полосе частот – 850 МГц. Параллельно с GSM уже существуют сети UMTS и CDMA 2000, относящиеся к третьему поколению сотовой связи (3G). На их основе развиваются новые виды технологий, услуг и приложений для мобильных и стационарных абонентов для общения людей между собой, для развития бизнеса, для взаимодействия с устройствами и машинами (M2M).

Главной тенденцией для пользователя становится получение услуг мультимедиа и различного контента «везде и в любое время» через различные устройства и системы доступа. Основной проблемой для реализации современных тенденций развития мобильной и беспроводной связи становится проблема увеличения скорости передачи данных на радиointерфейсе, решение которой однозначно связано с расширением полосы частот, выделяемой системе связи.

В связи с ограниченностью частотного ресурса, приемлемого для мобильной и сотовой связи, чрезвычайно *актуальной проблемой* является поиск способов повышения скорости передачи данных в радиоканале без увеличения полосы частот системы связи. К ним можно отнести:

- увеличение плотности установки базовых станций, применение микросот и фемтосот, за счет чего увеличивается емкость сети, а также скорость передачи данных на одного абонента;

- применение современных систем сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа с агрегацией трафика;

- применение интеллектуальных антенн для увеличения уровня принимаемых сигналов, что обеспечивает возможность работы с высокоскоростными видами модуляции и реализует методы пространственного разнесения;

- совместное использование полос частот, выделенных отдельным операторам сотовой связи (spectrum sharing);

- «когнитивное радио».

В данной работе исследуются вопросы повышения скорости передачи данных в сетях GSM на принципах «когнитивного радио».

Объект и предмет исследований. Объектом исследований являются сети мобильной и беспроводной связи и их характеристики, связанные со скоростью передачи данных.

Предметом исследования являются способы построения когнитивной системы передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM, а также возможные варианты построения оборудования подсистемы передачи данных на принципах адаптации по спектру с действующими сетями GSM.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование системы передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM на основе когнитивного радио. В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие основные задачи:

1. Анализ возможных способов увеличения скорости передачи данных в сетях сотовой связи GSM. Анализ технологий когнитивного радио, ориентированных на передачу данных с высокой скоростью.
2. Разработка способа передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM на принципах когнитивного радио. Разработка методов адаптивного выбора рабочих частот и формирования сигнала для сети передачи данных, работающей на принципах когнитивного радио.
3. Анализ вопросов электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС) GSM и системы высокоскоростной передачи данных.
4. Разработка алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, реализующего физический уровень системы высокоскоростной передачи данных.
5. Разработка рекомендации по практической реализации системы высокоскоростной передачи данных в сетях GSM.

Методы исследований

В работе использованы методы системного анализа, теории связи, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, частотного планирования сетей радиосвязи, теория телетрафика, теории планирования эксперимента и теории моделирования.

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней разработаны:

1. Способ увеличения скорости передачи данных в системе сотовой связи GSM на основе создания дополняющей микросотовой сети, работающей в общей полосе частот с действующей сетью GSM на принципах когнитивного радио с соблюдением условий электромагнитной совместимости РЭС GSM и дополняющей микросотовой сети.

2. Способ формирования сигнала в каналах передачи данных на основе использования OFDM модуляции, обеспечивающий работу сети GSM и микросотовой сети высокоскоростной передачи данных в общей полосе частот.

3. Методы реализации функций адаптации по спектру и уровню сигналов, излучаемых в микросотовой сети высокоскоростной передачи данных, обеспечивающих электромагнитную совместимость с РЭС действующих сетей GSM.

Личный вклад

Автором разработаны и получены лично представленные результаты исследований способа передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM, структурные схемы сети, базовых и абонентских станций высокоскоростной сети передачи данных, способ формирования сигнала в канале передачи данных на основе OFDM мультиплексирования, обеспечивающий электромагнитную совместимость РЭС базовой сети и сети высокоскоростной передачи данных, результаты исследования электромагнитной совместимости сети GSM и предлагаемой микросотовой сети, включая численные результаты, модель физического уровня совмещенной сети высокоскоростной передачи данных на основе OFDM/GSM.

Практическая значимость заключается в разработке способов, алгоритмов и рекомендаций, использование которых позволяет создавать совмещенные системы сотовой связи GSM с дополняющей системой, обеспечивающей скорость передачи данных в GSM, близкую к скорости передачи данных в системах сотовой связи 3G с HSPA и HSPA+, без выделения дополнительного спектра частот.

Реализация полученных результатов

Результаты диссертационной работы использованы компанией ОАО «Интеллект Телеком» при формировании программы работ «Стратегическое моделирование будущего телекоммуникаций», явились основанием для включения в план работ ОАО «Интеллект Телеком» НИОКР «Разработка системы передачи данных с высокой скоростью в системах GSM на принципах «когнитивного радио».

Результаты диссертации представлены в отчете по теме «Концепция формирования современной инфраструктуры связи», исполнитель ОАО «Интеллект Телеком», заказчик – Министерство связи и массовых коммуникаций. В указанной теме «Способ передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM на принципах «когнитивного радио» включен в перечень отраслевых критических технологий, связанных с прогнозом развития отрасли информационных и телекоммуникационных технологий: «обеспечение радикального увеличения пропускной способности сетей и снижения стоимости пропуска трафика».

Результаты диссертационной работы использованы ОАО «Мегафон» для оценки перспектив увеличения скорости передачи данных в сетях второго поколения стандарта GSM при составлении планов технического развития сетей 2G на 2012 год и при разработке функциональной стратегии развития сети ОАО «МегаФон» до 2015 года.

Апробация

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2011». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 2011.

Публикации

По теме диссертации опубликована заявка на изобретение № 2009149054 Российская Федерация, МПК А Н04W80/00. Способ передачи данных в системе сотовой связи и система для его реализации. Громаков Ю.А. Настасин К.С. Родионов В.В.; заявл. 30.12.2009; опубл. 10.07.2011, Бюл. №19; приоритет 30.12.2009, решение о выдаче патента 06.02.2012, 3 с.

По теме диссертационной работы опубликованы 2 печатные работы в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК, результаты работы отражены в 1 научном отчете.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ увеличения скорости передачи данных в системе сотовой связи GSM на принципах когнитивного радио, обеспечивающей скорость передачи данных в GSM, соответствующую скорости передачи данных в системах сотовой связи 3G с HSPA и HSPA+ в рамках действующих сетей GSM.

2. Способ формирования OFDM-сигнала в каналах передачи данных, обеспечивающий работу базовой сети и сети высокоскоростной передачи данных в общей полосе частот с соблюдением заданных требований электромагнитной совместимости.

3. Инфраструктура совмещенной сети GSM и дополняющей микросотовой сети передачи данных, структура приемопередающих устройств в дополняющей сети передачи данных, позволяющие реализовать предложенный способ увеличения скорости передачи данных.

4. Методика определения максимально допустимой мощности базовой станции микросотовой сети, обеспечивающей электромагнитную совместимость макросотовой и микросотовой сетей с учетом частотно-территориального разнеса между базовыми станциями указанных сетей.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 99 страницах текста и состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Графический материал представлен в виде 51 рисунка и 19 таблиц. Список использованных источников включает 58 наименований на 5 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели и основные направления исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, представлена информация по апробации и внедрению результатов.

В **первой главе** содержится анализ способов увеличения скорости передачи данных в рамках сети сотовой связи GSM. До настоящего времени увеличение скорости передачи данных достигалось путем:

- перехода от системы с коммутации каналов к системе с коммутацией пакетов;
- увеличения спектральной эффективности каналов связи;
- применения более эффективных методов кодирования каналов и коррекции ошибок;

при этом для поддержки новых возможностей в системе требуется добавление новых и модернизация действующих узлов сети, а также замена абонентских станций.

Выявлены проблемы в развитии сотовой связи GSM и последующих поколений. Среди них можно отметить ограниченную ширину полосы частот канала связи, а также более низкую спектральную эффективность действующих решений на базе GSM по сравнению с сетями сотовой связи последующих поколений. Однако для увеличения ширины полосы частот канала связи, в новых системах сотовой связи осуществляется переход в более высокие диапазоны радиочастот. При переходе на более высокие частоты из-за

физических ограничений дальности распространения радиоволн, сокращается зона обслуживания базовой станции, что приводит к увеличению:

- количества базовых станций и соединительных линий между базовой станцией и контроллером;
- количества хендверов при движении абонентской станции, что снижает вероятность успешного завершения вызова;
- затрат ресурсов сети сотовой связи на управление процессами соединения, хендвера и сигнализации при движении абонента в зоне с малыми размерами сот.

Основной проблемой развития сетей сотовой связи является ограниченность частотного ресурса.

Проанализированы технологии когнитивного радио, которые позволяют эффективно использовать радиочастотный ресурс при работе в полосах частот, выделенных для применения различных РЭС. Системы, построенные по принципам когнитивного радио, используют на вторичной основе не занятые в текущий момент времени участки спектра («белые пятна»), либо учитывают особенности сигнала первичной сети для одновременной работы. При этом главным условием работы систем когнитивного радио является не причинение недопустимых помех первичной сети.

Во **второй главе** предложен способ передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM на принципах когнитивного радио. В соответствии с предлагаемым решением, на существующую макросотовую топологию сети (или сетей) GSM накладывается взаимодополняющая микросотовая сеть, работающая в тех же частотных диапазонах 900 МГц и/или 1800 МГц, используемых GSM (рис.1).

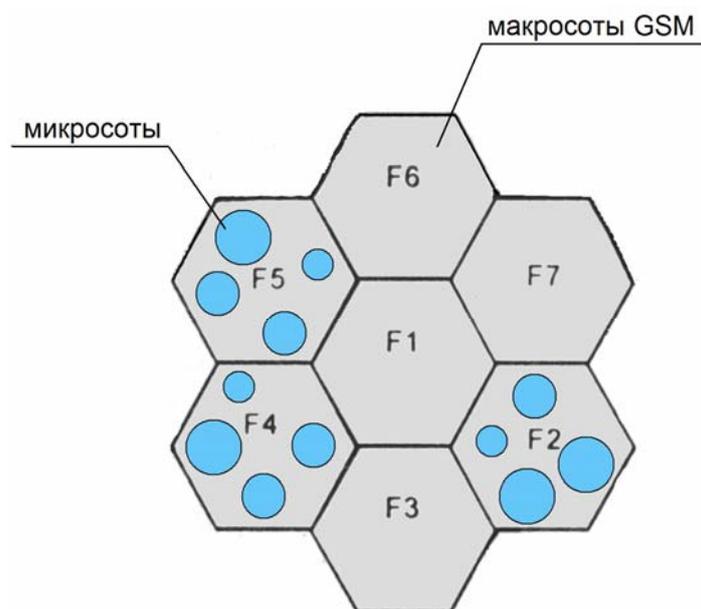


Рис.1 Наложение микросотовой сети передачи данных на макросотовую сеть GSM

В действующих сетях на территории каждой конкретной макросоты действующей сети GSM используются не все радиоканалы предусмотренные стандартом, что дает возможность использовать для работы наложенной микросотовой сети на данной территории не задействованные частоты GSM при условии обеспечения электромагнитной совместимости. Использование частот GSM когнитивной системой возможно при условии отсутствия помех GSM, что может быть обеспечено при непрерывном мониторинге занятых (рабочих) каналов GSM и адаптации по уровню излучения РЭС микросотовой сети.

Для построения когнитивной системы передачи данных обоснован выбор технологии OFDM, которая позволит гибко управлять шириной полосы излучения сигнала, а также реализовать режектирование поднесущих OFDM программными методами в зависимости от используемых номиналов частот макросотовой сетью GSM, повысить эффективность приема данных в условиях многолучевости. Исключение излучения сигналов микросотовой сети на частотах работы действующей сети GSM в микросотовой сети происходит следующим образом.

Комплексная огибающая OFDM символа длительностью T , который начинается в момент времени t_k имеет вид:

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=0}^{N_s-1} \dot{d}_i e^{j2\pi \frac{i}{T}(t-t_k)}, \quad t_k \leq t \leq t_k + T \quad (1)$$

где: \dot{d}_i - комплексное число, представляющее амплитуду и начальную фазу i -й поднесущей OFDM символа, N_s - число поднесущих колебаний в OFDM символе.

Для исключения излучения на частотах занятых GSM первоначально необходимо определить поднесущие, совпадающие с рабочими частотами GSM. Если необходимо исключить излучение на i -й частоте сети GSM, то, в соответствии с (1), при формировании OFDM символа необходимо \dot{d}_i приравнять нулю.

Для формирования OFDM символов с возможностью исключения частот, необходимо изменить известную схему формирования OFDM символов. Требуется установить нулевые символы на заданных позициях. Что можно делать во время последовательно-параллельного преобразования потока символов, поступающих с модулятора, зная номера исключаемых частот.

При этом итоговая скорость передачи данных в микросотовой сети уменьшается пропорционально количеству исключаемых поднесущих. Для того чтобы в процессе обнуления поднесущих не происходило потери информации, скорость информационного битового потока на входе модулятора должна быть согласована с доступным частотным ресурсом, что согласно модели взаимодействия открытых систем OSI решается на транспортном уровне.

Дана оценка максимальной скорости передачи данных на сектор базовой станции в микросотовой сети при различных коэффициентах повторного использования частот.

Максимальное число частотных каналов (N_{\max}) в GSM900, GSM1800 и E-GSM равно:

$$N_{\max} = N_{\text{GSM-900}} + N_{\text{GSM-1800}} + N_{\text{E-GSM}}, \quad (2)$$

$$N_{\max} = 124 + 374 + 50 = 548.$$

Число свободных частотных каналов (не используемых в кластере) $N_{\text{своб}}$ определяется по формуле:

$$N_{\text{своб}} = N_{\max} - K \cdot N_{\text{чс}} \cdot N_{\text{оп}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{чс}}$ – количество частот, приходящихся на один сектор; $N_{\text{оп}}$ – количество операторов на данной территории.

При этом теоретически возможная суммарная скорость передачи данных в секторе (V_{\max}) при использовании стандартной в GSM модуляции GMSK можно определить по формуле:

$$V_{\max} = N_{\text{тс}} \cdot V_{\max \text{ тс}} \cdot N_{\text{своб}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{тс}}$ – число тайм-слотов в канале, $V_{\max \text{ тс}}$ – максимальная скорость передачи данных в одном тайм-слоте TDMA кадра GSM.

В стандарте GSM в одном TDMA кадре содержится 8 тайм-слотов. Максимальная скорость передачи данных в одном тайм-слоте составляет 14,4 кбит/с.

Для случая работы на одной территории трех операторов, которые используют одинаковые модели построения кластеров, максимальная скорость передачи данных в GSM 900, GSM 1800 и E-GSM в зависимости от коэффициента повторного использования частот (для наиболее используемых моделей построения кластеров) и количества используемых частот в соте (секторе) БС представлены в таблице:

Таблица 1

Максимальная скорость передачи данных (Мбит/с) при использовании одновременно диапазонов GSM900, GSM 1800 и E-GSM в случае работы трех операторов

$N_{\text{чс}} \backslash K$	1	2	3	4	5	6
7	55,87	48,61	42,85	38,02	33,18	28,57
9	53,8	44,93	38,71	32,49	27,53	24,42
12	50,69	40,78	32,49	26,5	22,35	18,2

Как следует из таблицы 1, в частности при коэффициенте повторного использования частот – 7, использовании по 4 частотных канала в каждой соте, для 3 операторов сотовой связи, использовании одновременно диапазонов частот GSM 900, GSM 1800, E-GSM, максимальная скорость передачи данных может составить 38 Мбит/с на соту.

Рассмотрены различные алгоритмы организации процесса передачи данных в микросотовой сети: передача данных на «линии вверх» на свободных частотах, либо с помощью GPRS/EDGE.

При использовании GPRS/EDGE на «линии вверх» учитывается асимметричность трафика в направлении от/к абоненту. При этом можно отметить следующие достоинства и недостатки этого варианта:

достоинство - максимальная скорость на «линии вниз»;

недостатки - отсутствие или загруженность GPRS/EDGE каналов исключает работу микросотовой сети; необходимость изменения в действующей сети GSM в части координации работы подсистемы GPRS/EDGE и микросотовой сети передачи данных; ограниченная скорость передачи данных на «линии вверх».

При передаче данных на свободных частотах в обоих направлениях можно отметить следующие достоинства и недостатки:

достоинства - автономность работы от загруженности или наличия GPRS/EDGE; гибкое управление скоростью в направлениях от/к абоненту;

недостаток - меньшая возможная скорость передачи данных, чем при использовании GPRS/EDGE на «линии вверх».

При построении совмещенной сети, общими элементами как в одной, так и в другой сети являются центр коммутации (MSC), домашний и визитный регистры (HLR и VLR), центр аутентификации (AuC), центр управления и эксплуатации сети (OMC). То есть все функции авторизации, коммутации, взаимодействия с внешними сетями выполняются существующей инфраструктурой GSM.

Предложено использование сети беспроводного широкополосного доступа на основе технологии mesh в качестве транспортной сети.

Предложены обобщенные и структурные схемы базовой и абонентской станций микросотовой сети передачи данных, реализующие вышеуказанный способ.

В **третьей главе** исследованы вопросы электромагнитной совместимости РЭС сети GSM и предлагаемой микросотовой сети передачи данных.

Для обеспечения электромагнитной совместимости микросотовой сети и макросотовой сети, на всей территории действия GSM требуется выполнение условия:

$$P_{Мак} - P_{Мик} > Q, \quad (5)$$

где $P_{Мак}$ – мощность сигнала макросотовой сети на входе приемника макросотовой сети (дБ), $P_{Мик}$ – мощность сигнала микросотовой сети на входе приемника макросотовой сети (дБ), Q – защитное отношение (дБ).

Мощность сигнала передатчика на входе приемника в общем случае равна:

$$P_{вх} = P_{ПРД} + G_{ПРД} + G_{ПРМ} - L_{Ант ПРД} - L_{Ант ПРМ} - L_{\Sigma}, \quad (6)$$

где $P_{ПРД}$ – мощность передатчика (дБ), $G_{ПРД}$ – коэффициент усиления антенны передатчика (дБ), $G_{ПРМ}$ – коэффициент усиления антенны приемника (дБ), $L_{Ант ПРД}$, $L_{Ант ПРМ}$ – потери в фидере передающей и приемной антенны, соответственно (дБ), L_{Σ} – суммарное ослабление радиосигнала при распространении (дБ).

Рассмотрены различные сценарии помехового воздействия:

- 1) Базовая станция (БС) микросотовой сети находится рядом с абонентской станцией (АС) макросотовой сети;
- 2) БС микросотовой сети находится рядом с БС макросотовой сети.

Для расчета суммарного ослабления радиосигнала макросотовой сети на трассе распространения была использована модель Okumura-Nata. Так как для оценки максимального воздействия на макросотовую сеть передатчик микросотовой сети находится в непосредственной близости к приемнику

макросотовой сети, то в данном случае для расчета суммарного ослабления радиосигнала микросотовой сети на трассе распространения использовалась модель COST 231-Walfisch-Ikegami.

Зависимости максимально допустимой мощности передатчика БС микросотовой сети от расстояния между ним и АС макросотовой сети, а также между ним и БС макросотовой сети имеют вид:

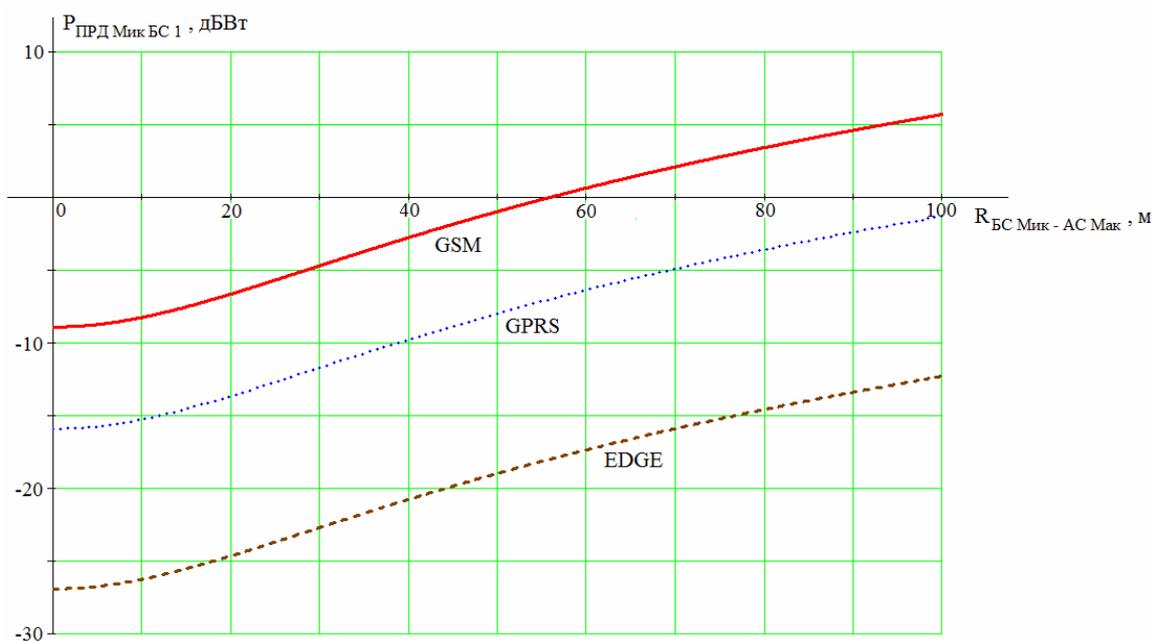


Рис. 2 Зависимость максимальной мощности БС микросотовой сети (дБВт) от расстояния до АС макросотовой сети

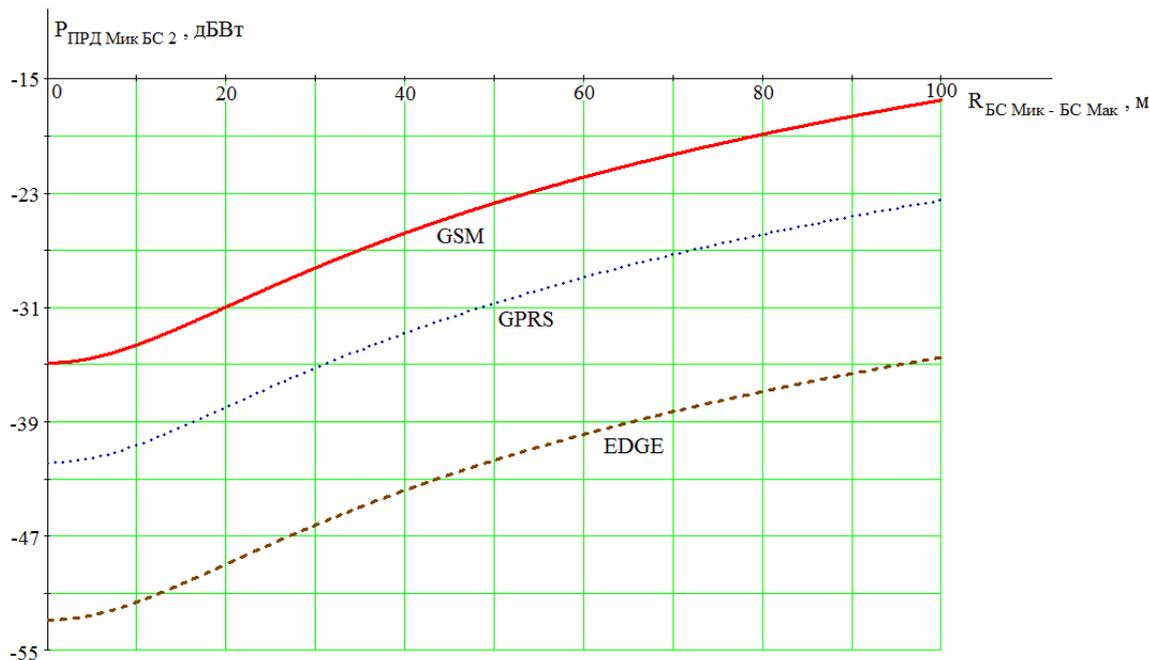


Рис. 3 Зависимость максимальной мощности БС микросотовой сети (дБВт) от расстояния до БС макросотовой сети

Проведен анализ зависимости допустимой мощности БС микросотовой сети от частотного разнеса между рабочими частотами микросотовой и макросотовой сетей.

Так как OFDM-поднесущие совпадающие с частотами занятыми GSM не излучаются, между рабочими частотами данных сетей устанавливается частотный разнос. Взаимное влияние сетей друг на друга оказывается внеполосным излучением.

Количество энергии, приходящейся на заданную полосу радиочастот, можно определить с помощью равенства Парсеваля:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S(\Omega)]^2 d\Omega . \quad (7)$$

Излучаемый сигнал OFDM в общем случае состоит из суммы прямоугольных импульсов. Энергия прямоугольного импульса с амплитудой A и длительностью τ_u в полосе $\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$:

$$E_{\Delta\Omega} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} [S(\Omega)]^2 d\Omega = A^2 \cdot \tau_u^2 \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \frac{\sin^2(\Omega\tau_u/2)}{(\Omega\tau_u/2)^2} d\Omega = E \cdot \tau_u \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \frac{\sin^2(\Omega\tau_u/2)}{(\Omega\tau_u/2)^2} d\Omega , \quad (8)$$

где E – полная энергия прямоугольного импульса.

Таким образом, относительная доля энергии прямоугольного импульса в полосе частот $\Delta\Omega$ определяется формулой:

$$\eta_{\Delta\Omega} = \frac{\tau_u}{2\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \frac{\sin^2(\Omega\tau_u/2)}{(\Omega\tau_u/2)^2} d\Omega . \quad (9)$$

Так как спектр OFDM-сигнала состоит из суммы спектров прямоугольных импульсов с расстоянием между ними $1/\tau_u$, то относительная доля энергии сигнала OFDM, приходящаяся на один частотный канал GSM шириной 200 кГц, расположенный на Δf Гц от ближайшей несущей OFDM имеет вид:

$$\eta_{OFDM} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left[\frac{\tau_u}{2\pi} \int_{2\pi(\frac{m}{\tau_u} + \Delta f \cdot 10^3)}^{2\pi(\frac{m}{\tau_u} + (200 + \Delta f) \cdot 10^3)} \frac{\sin^2(\Omega \tau_u / 2)}{(\Omega \tau_u / 2)^2} d\Omega \right], \quad (10)$$

где N – число поднесущих в сигнале OFDM.

Зависимость относительной энергии сигнала OFDM, приходящейся на один частотный канал GSM, от частотного разнесения сигналов GSM и OFDM $\eta_{OFDM}(\Delta f)$ в случае 10 поднесущих OFDM и расстояния между ними 40 кГц имеет вид:

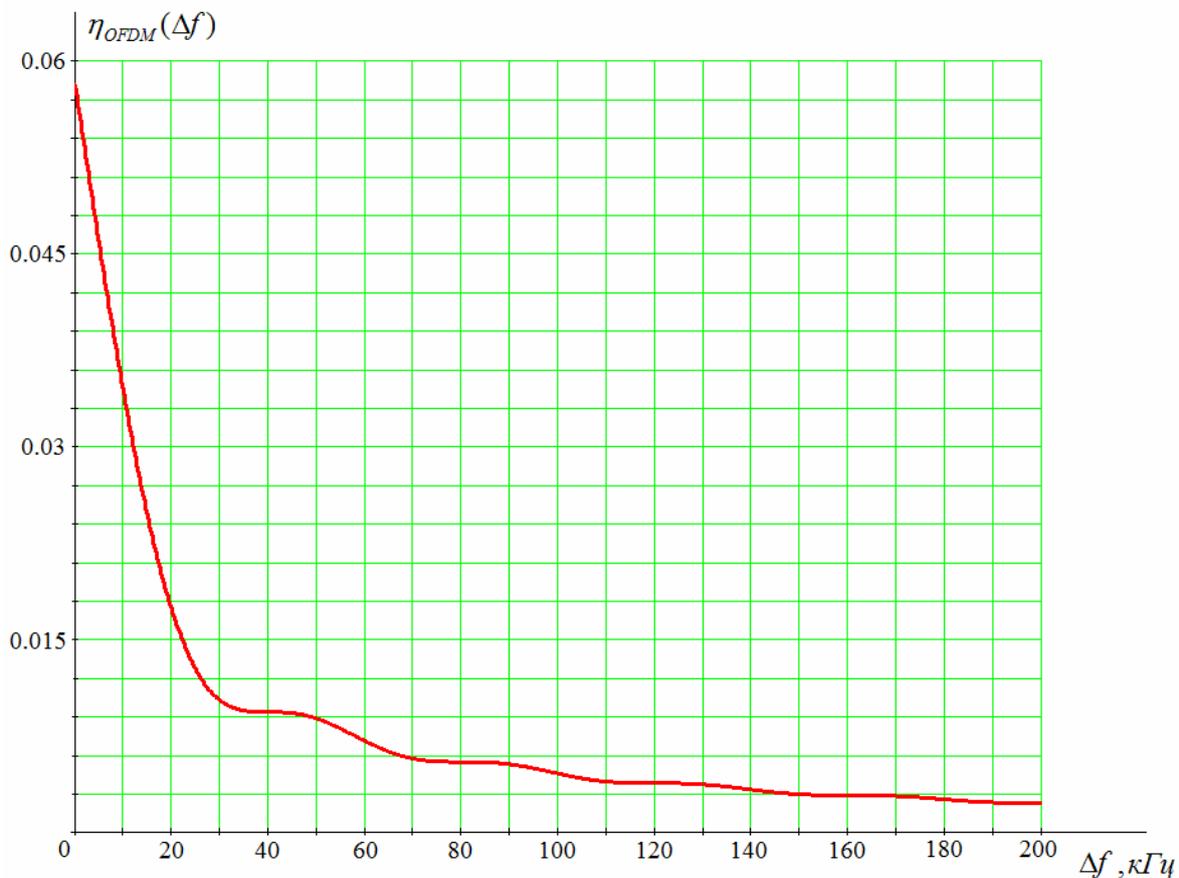


Рис. 4. Зависимость $\eta_{OFDM}(\Delta f)$

Зная максимальную мощность сигнала БС микросотовой сети, приходящуюся на один частотный канал GSM, а также относительную долю энергии сигнала OFDM, приходящуюся на один частотный канал GSM (при этом в общем случае необходимо учитывать возможное расположение OFDM-сигнала как с одной, так и с противоположной стороны канала GSM), получена максимальная мощность излучения базовой станции микросотовой сети, при

которой выполняется условие электромагнитной совместимости микросотовой и макросотовой сетей:

$$P_{\text{ПРД Мик БС}} = P_{\text{OFDM GSM}} - 10 \log(\eta_{\text{OFDM}}) \quad (11)$$

Для первого сценария зависимость максимальной мощности излучения базовой станции микросотовой сети, при которой обеспечивается условие ее электромагнитной совместимости со станциями GSM, от расстояния и частотного разнеса имеет вид:

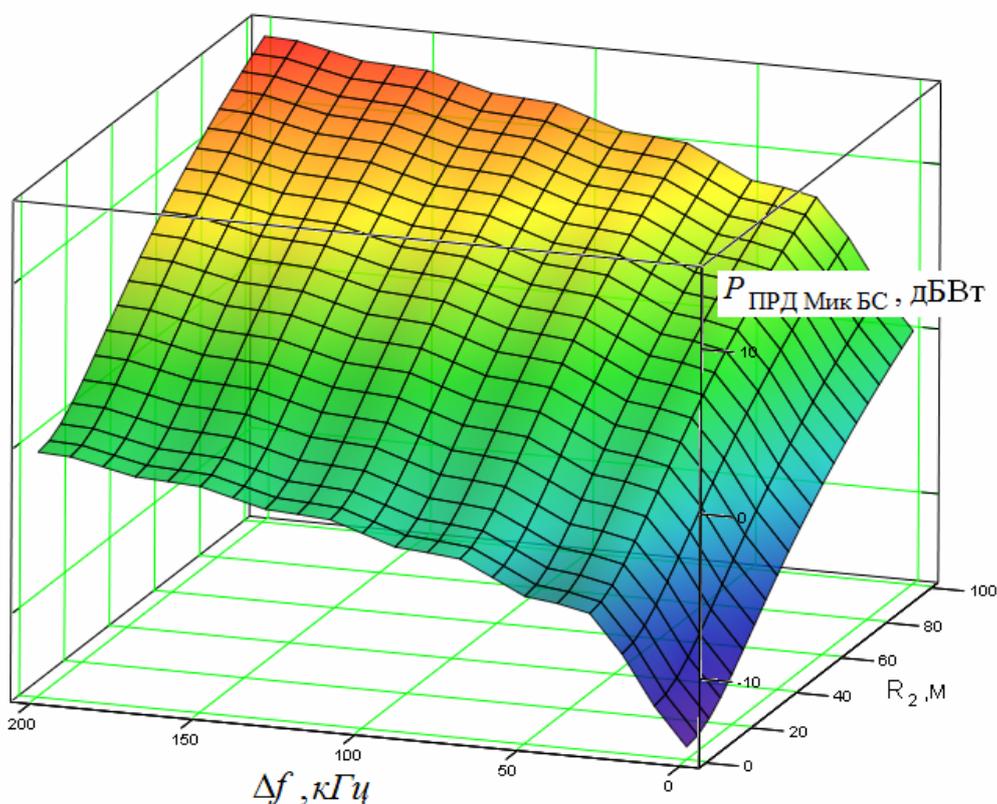


Рис. 5. Зависимость максимальной мощности излучения базовой станции микросотовой сети от расстояния и частотного разнеса для сценария 1

Для второго сценария зависимость максимальной мощности излучения базовой станции микросотовой сети от расстояния и частотного разнеса имеет вид:

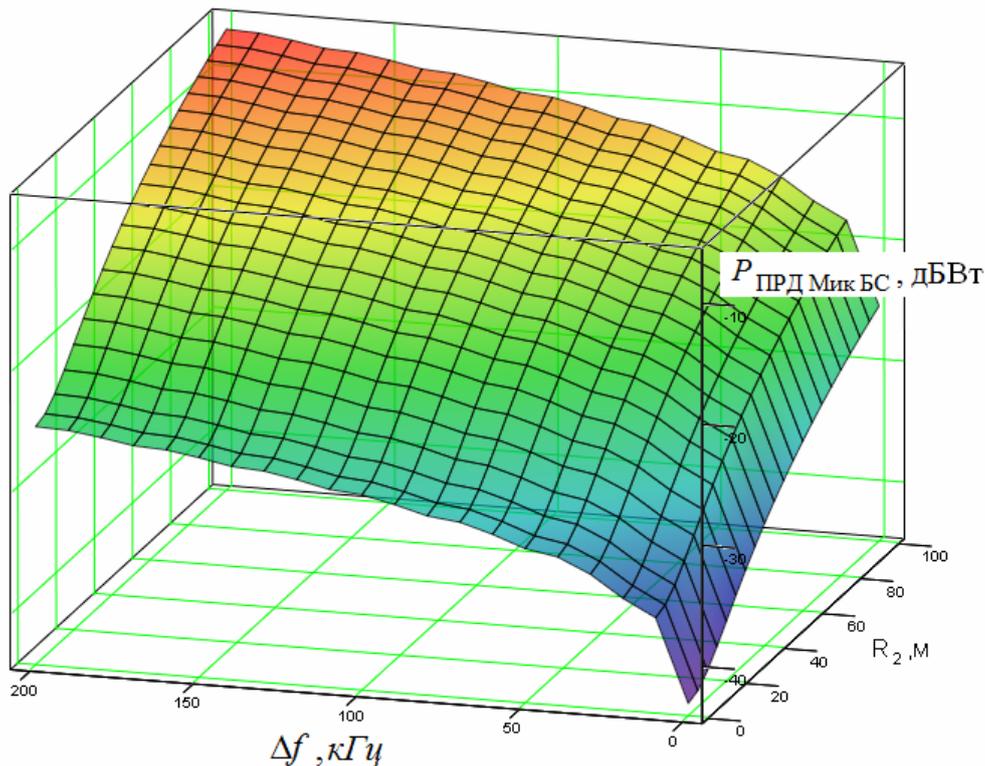


Рис. 6. Зависимость максимальной мощности излучения базовой станции микросотовой сети от расстояния и частотного разноса для сценария 2

Как следует из представленных графиков, при частотном разносе, равном одному частотному интервалу между OFDM-поднесущими (при указанных условиях), допустимая мощность излучения БС микросотовой сети при использовании частотного разделения каналов GSM может составлять около 100 мВт при незначительном территориальном разносе.

В **четвертой главе** разработана модель физического уровня прямого и обратного каналов совмещенной сети OFDM–GSM. Проведено имитационное моделирование канала связи микросотовой сети. Результаты моделирования предложенных алгоритмов физического уровня прямого и обратного каналов совмещенной сети OFDM–GSM позволяют подтвердить полученные ранее теоретические результаты.

В **пятой главе** разработана спецификация параметров OFDM-модуляции в радиоканале передачи данных. Предложено использовать радиointерфейс LTE, как наиболее перспективного стандарта сотовой связи, использующего технологию OFDM мультиплексирования, в микросотовой сети передачи

данных, что позволит применить уже разработанные технические решения, реализованные в современных стандартах связи, и обеспечить совместимость развивающихся «вверх» стандартов сотовой связи. Полосы радиочастот, используемые GSM, определены в технических спецификациях 3GPP и ETSI для возможного применения сетей LTE, однако построение сетей LTE в диапазонах GSM подразумевает замещение действующей сети GSM новой системой связи. Вместе с тем существующие сети GSM полностью удовлетворяют требованиям пользователей по передаче речи, имеют глобальное покрытие и около 4 миллиардов абонентов по всему миру. С помощью способа предложенного в данной диссертационной работе становится возможным использовать LTE при построении микросотовой сети передачи данных и обеспечить ее функционирование параллельно с действующими сетями GSM.

В **Заключении** подведены итоги работы, представлены основные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ способов увеличения скорости передачи данных в рамках сотовой сети GSM. Выявлены проблемные вопросы дальнейшего увеличения скорости передачи данных в рамках GSM, к которым относятся недостаточная ширина канала связи, а также низкая спектральная эффективность действующих решений в GSM по сравнению с сетями сотовой связи последующих поколений.

2. Разработан способ увеличения скорости передачи данных в системе сотовой связи GSM на основе создания дополняющей микросотовой сети, работающей в общей полосе частот с действующей сетью GSM без взаимных помех, на принципах когнитивного радио.

3. Предложена структурная схема совмещенной сети GSM и микросотовой сети передачи данных.

4. Произведена оценка скорости передачи данных в микросотовой сети в зависимости от коэффициента повторного использования частот, количества используемых частот в соте (секторе) базовой станции, количества операторов GSM. При использовании типичных значений параметров сети GSM полученная оценка скорости передачи данных составляет 38 Мбит/с на соту.

5. Разработаны методы реализации функции адаптации по спектру излучаемых сигналов микросотовой сети передачи данных.

6. Предложен способ формирования сигнала в канале передачи данных на основе OFDM мультиплексирования, удовлетворяющий условиям электромагнитной совместимости РЭС базовой сети и сети высокоскоростной передачи данных.

7. Предложено использование сети беспроводного широкополосного доступа на основе технологии mesh в качестве транспортной сети для базовых станций микросотовой сети передачи данных.

8. Предложены обобщенные и структурные схемы базовой и абонентской станций микросотовой сети передачи данных.

9. Исследованы вопросы электромагнитной совместимости сети GSM и предлагаемой микросотовой сети при условии отсутствия помех сети GSM. Определены сценарии помехового воздействия. Исследованы зависимости значений допустимой мощности излучения базовой станции микросотовой сети, приходящейся на канал GSM при различных сценариях помехового воздействия. Получена зависимость допустимой мощности базовой станции микросотовой сети от частотного, а также территориального разнеса между базовыми станциями микросотовой и макросотовой сетей.

10. Разработана модель физического уровня совмещенной сети высокоскоростной передачи данных на основе OFDM-GSM.

11. Разработаны методика расчета параметров OFDM мультиплексирования для радиоканала передачи данных блока, в числе которых: длина защитного интервала, число несущих в спектре сигнала,

расстояние между соседними несущими в спектре сигнала, длительность полезной части OFDM-символа.

12. Предложено использование физического уровня стандарта LTE, как перспективного стандарта сотовой связи, использующего технологию OFDM мультиплексирования, в микросотовой сети передачи данных.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Громаков Ю.А. Родионов В.В. Настасин К.С. Повышение скорости передачи данных в сетях GSM на основе когнитивного радио. // Электросвязь – 2012 – № 1. – С. 21–25.

2. Настасин К.С., Родионов В.В. Особенности маршрутизации в совмещенной сети сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа. // Электронный журнал «Труды МАИ» - 2011 - Вып. №49.

3. Заявка № 2009149054 Российская Федерация, МПК А Н04W80/00. Способ передачи данных в системе сотовой связи и система для его реализации. Громаков Ю.А. Настасин К.С. Родионов В.В.; заявл. 30.12.2009; опубл. 10.07.2011, Бюл. №19; приоритет 30.12.2009, решение о выдаче патента 06.02.2012, 3 с.