

На правах рукописи



Попов Иван Леонидович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ МЯГКОЙ ЭСТАФЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ
В СТАНДАРТЕ СОТОВОЙ СВЯЗИ ТЕХНОЛОГИИ МДКР**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ).

Научный руководитель: **Горелов Георгий Владимирович** - Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор МГУПС.

Официальные оппоненты: **Шорин Олег Александрович** - Генеральный директор компании ЗАО «Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий», доктор технических наук, профессор.

Ваванов Кирилл Юрьевич - руководитель направления ООО «Неоком софтвеа», кандидат технических наук.

Ведущая организация: **ФГБУ ВПО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России).**

Защита диссертации состоится 26 апреля 2016 г., в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при ФГБОУВО Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ауд. 301-3.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, ФРЭМТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 15 февраля 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



..Г. Самойлов

Общая характеристика работы

Актуальность темы:

Для организации сетей подвижной связи используются сети сотовой связи, во многих из которых применяют технологии мобильной связи третьего поколения 3G (third generation), при пакетной передаче данных со скоростью до 3,6 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц.

Используются 5 стандартов 3G семейства IMT-2000 (UMTS/WCDMA, CDMA2000/IMT-MC, TD-CDMA/TD-SCDMA, DECT и UWC-136). Наиболее распространены два: UMTS (или W-CDMA) и CDMA2000 (IMT-MC), основанные на технологии многостанционного доступа с кодовым разделением каналов – CDMA (Code Division Multiple Access).

Одним из основных преимуществ CDMA, по сравнению с технологией второго поколения – многостанционным доступом с временным разделением каналов – TDMA (Time Division Multiple Access), является реализация иного принципа эстафетной передачи базовыми станциями мобильной станции – «мягкого хендвера» («make-before-break»), обеспечивающего меньшую вероятность обрыва связи в процессе эстафетной передачи.

При CDMA в пределах зоны, в которой существует проблема эстафетной передачи (будем называть ее «зоной эстафетной передачи») мобильная станция (МС) непрерывно получает сигналы от базовых станций (БС) на одной несущей и моменты начала и окончания эстафетной передачи определяются (в отличие от «жесткой» процедуры при TDMA) без задержек в передаче и обрывов соединения.

Для определения размера зоны эстафетной передачи необходима зависимость качества пакетной передачи в диапазоне 2,4 ГГц от расстояния между МС и БС--дальности действия радиоканальных устройств (ДДРУ).

У операторов сотовой связи имеется достаточно широкий набор программных средств для имитации прохождения сигналов по трассам в различных условиях, которые позволяют, с одной стороны достаточно точно, а с другой, относительно быстро рассчитывать затухания на трассах с учётом существующей застройки и растительности.

При этом результаты исследований характеризуют большое среднеквадратическое отклонение оценок при одном и том же значении ДДРУ (порядка 4 – 5 дБ).

Главным отличием исследований данной диссертационной работы является нивелирование в лабораторных условиях влияния многолучёвости с использованием предложенного физического имитатора радиоканала (ФИРК) и входящей в его состав имитационной физической моделью радиолинии с ничтожными шумами многолучёвости (ИФМР).

С учетом изложенного выше можно сформулировать основные положения, определяющие актуальность темы диссертационной работы:

- решение задач эстафетной передачи в сотовой связи поколения 3G;
- решение задач, связанных с наибольшей уязвимостью процедуры эстафетной передачи в условиях многолучёвости распространения;
- использование предложенного физического имитатора радиоканала в качестве инструмента для решения этих задач.

Цели и задачи работы:

Цель работы состоит в определении размера зоны эстафетной передачи при сотовой связи технологии МДКР.

Для достижения цели необходимо решить задачи:

- анализ систем сотовой связи и реализуемых в них процедур эстафетной передачи (хэндовера);
- разработка физического имитатора радиоканала (ФИРК) с входящей в его состав имитационной физической моделью радиолинии с ничтожными шумами многолучевости (ИФМР);
- формирование в лабораторных условиях при измерениях с помощью ФИРК базы данных для имитации разных аспектов функционирования реального радиоканала;
- Определение с помощью ФИРК дальности действия радиоканальных устройств (ДДРУ) и градуировка ФИРК в области определения ДДРУ как в условиях свободного пространства, так и в условиях существенного влияния многолучевости;
- определение размера зоны хэндовера с использованием ФИРК и значений ОСШ, КНИ и разборчивости на выходе приемника мобильной станции;
- сравнение результатов, полученных при использовании ФИРК, с результатами функционирования имитируемого реального радиоканала.

Исходная основа диссертации:

В основе диссертации лежат:

- фундаментальные работы Н. Винера, В.А. Котельникова, К. Шеннона и др.
- теоретические и прикладные исследования Ю.В. Ваванова, К.Ю. Ваванова, М.Д. Венедиктова, А.М. Вериго, А.П. Галкина, В.И. Зыкова, О.Р.Никитина, О.Н.Ромашковой, П.А. Полушина, А.Г. Самойлова, С.А. Самойлова, Б.В.Сычева и др.

Объект исследования - система сотовой связи технологии многостанционного доступа с кодовым разделением.

Предмет исследования - физический имитатор радиоканала диапазона частот 2,4 ГГц.

Научная новизна:

1. Впервые разработан физический имитатор радиоканала с ничтожными шумами многолучевости, предоставляющий широкий набор новых функций для имитации реального радиоканала, как в условиях свободного пространства, так и в условиях существенного влияния многолучевости;
2. Произведена градуировка ФИРК в области определения ДДРУ и впервые с помощью ФИРК получены значения ДДРУ, предназначенные для прогнозирования и расчета характеристик реального радиоканала;
3. Впервые (с использованием ФИРК) при значениях ОСШ, КНИ и разборчивости на выходе приемника мобильной станции определен размер зоны эстафетной передачи в сети сотовой связи диапазона 2,4 ГГц.

Практическая и теоретическая значимость:

1. Разработанный физический имитатор радиоканала (ФИРК) с ничтожными шумами многолучевости, предоставляющий широкий набор новых функций для имитации, дал реализованную в диссертации возможность получения практически важных результатов анализа реального радиоканала диапазона 2,4 ГГц, но его использование безусловно целесообразно и при решении практических задач исследований во всех диапазонах частот, где существенно проявляется многолучевое распространение;
2. Особый интерес для практики представляет градуировка ФИРК в области определения дальности действия радиоканальных устройств (ДДРУ) и ее результаты при прогнозировании ДДРУ для реального радиоканала;
3. Практический интерес представляет и определение размера зоны эстафетной передачи в сети сотовой связи диапазона 2,4 ГГц при значениях ОСШ, КНИ и разборчивости на выходе используемого в составе реального радиоканала приемника мобильной станции.

Методология и методы исследования:

В работе использованы методы математического анализа, теории вероятностей, современные методы измерения устройств телекоммуникаций.

На защиту выносятся:

- концепция, структурная схема и физическая реализация (использованная при экспериментах) физического имитатора радиоканала (ФИРК) с ничтожными шумами многолучевости;
- результаты градуировки ФИРК в области определения дальности действия радиоканальных устройств (ДДРУ) и ее применение при прогнозировании ДДРУ для реального радиоканала;

- результаты определения размера зоны эстафетной передачи в сети сотовой связи диапазона 2,4 ГГц при значениях ОСШ, КНИ и разборчивости на выходе используемого в составе реального радиоканала приемника мобильной станции.

Степень достоверности результатов проведенных исследований:

Достоверность результатов проведенных в диссертации исследований обусловлена корректным применением используемых математических методов, применением сертифицированного оборудования для экспериментальных исследований реальной радиолинии и предложенной ее имитационно–физической модели, сравнением авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике.

Апробация работы выполнена на заседаниях кафедр радиотехники и электросвязи и автоматики телемеханики и связи на железнодорожном транспорте МИИТа, а также - на конференции: «День радио», секция «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» (Санкт-Петербург) - 2015.

Результаты работы внедрены и использованы.

Результаты работы внедрены:

- ФГУП «ЗащитаИнфоТранс»;
- НПО ООО «Аксион - Радио, Телевидение, Информатика»;

Результаты работы использованы:

- Государственным институтом русского языка им. А.С. Пушкина;
- Московским государственным университетом путей сообщения (МИИТ) в госбюджетной НИР кафедры Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте (раздел «Исследование (на элементной базе МДКР) идеализированной радиолинии диапазона частот 2,4 ГГц») 2014-2015 г.;
- Московским государственным университетом путей сообщения в учебном процессе путей сообщения, что подтверждено соответствующими актами.

Публикации

Основные положения диссертации и результаты исследования опубликованы в восьми работах. Из них четыре работы из перечня, определенного ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований и приложения. Основная часть диссертации изложена на 92 страницах машинописного текста, содержит 20 рисунков, 19 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении предложено обоснование актуальности и новизны темы диссертационной работы, приведён краткий анализ современных достижений в исследу-

емой области, сформулированы цели и задачи работы, и анонсированы основные положения диссертации.

В первой главе приведено краткое описание стандартов сотовой связи, особое внимание уделено стандартам третьего поколения, основанным на технологии многостанционного доступа, таким как IMT-2000, UMTS, CDMA2000 и другим.

Определены основные процедуры эстафетной передачи в сетях сотовой связи и проблемы ее реализации (в том числе и, мягкого хэндовера) в условиях влияния многолучевого распространения.

Приведен обзор методов имитации (при влиянии многолучевости) функционирования систем сотовой связи. Операторы сотовой связи располагают широким набором программных средств для расчёта прохождения сигналов по различным трассам.

Это программные комплексы Asset (AirComm, Англия), Atoll (Франция), где преобладают модели распространения и составляют одну из важнейших составляющих в указанных комплексах, будучи встроенными (модель DHL в Asset), либо являются продуктом внешних разработчиков, участвующих в кооперации с вендорами программных комплексов (например, Asset и Atoll). В качестве последних, можно указать продукты Volcano (фирмы Siradel, Франция) и продукт CrossWave (фирма Forsk). В этих моделях в зоне близкого распространения используется расчётная имитация многократных переотражений лучей с интерференционным комбинированием. А в средней и дальних зонах – настраиваемые, как правило, 4-х параметрические модели затухания.

Это позволяет, с одной стороны достаточно точно, а с другой, относительно быстро рассчитывать затухания на трассах с учётом существующей застройки и кластеров растительности. Но поскольку точных данных об электродинамических показателях зданий, растительности, о дифракционных показателях нет, а собрать их в глобальном масштабе невозможно, то значительные усилия приходится прилагать для настройки таких моделей по результатам драйв-тестов.

Важным оказывается наличие векторных карт высотной (3D) застройки местности. Хорошим результатом настройки считается среднеквадратическая расчётная ошибки порядка 4 – 5 дБ.

Более высокая точность практически недостижима, так как сезонное появление/исчезновение растительности, выпадение осадков, рефракционные изгибы трасс из-за градиента температуры и плотности воздуха у поверхности Земли, усыхание бетонных стен новых зданий, застройка пустырей, точность определения мест установки антенн (сказываются даже ошибки в несколько метров) не позволяет точно решать задачу. Кроме того, абонент может своим телом случай-

но экранировать антенну (в пределах 3 – 4 дБ), а динамический характер усиления группового сигнала в усилителе мощности БС тоже приводит к тому, что уровень приёма замирает в пределах до 5 дБ.

Все это приводит к тому, что задачу расчёта затухания при распространении нужно рассматривать как сугубо статистическую и не пытаться использовать трудоёмкие методы для достижения сверхточных значений отдельных показателей, которые, все равно, будут «замаскированы» случайными составляющими других компонент.

Данная глава имеет обзорный характер и формирует необходимую основу дальнейшего диссертационного исследования.

Во второй главе предлагаются концепция, структурная схема и физическая реализация (использованная при экспериментах) физического имитатора радиоканала диапазона 2,4 ГГц (ФИРК) с ничтожными шумами многолучёвости [3; 5].

Выше перечислены современные программные комплексы, используемые операторами сотовой связи для имитации влияния многолучевости систем. Но и прежде создавались имитаторы радиоканала, позволяющие моделировать это влияние, путем привлечения разнообразных моделей (распределений вероятностей характеристик сигнала и помех). Достаточно обратиться к работам А.Г.Самойлова, О.Р.Никитина, П.А.Полушина и их учеников.

В этом контексте главное отличие предложенного в диссертации имитатора – нивелирование в лабораторных условиях влияния многолучёвости [8], избегая значительную дисперсию оценок результатов натурных измерений при пакетной передаче в дециметровом диапазоне волн.

Структурная схема ФИРК, предложенного в диссертации, представлена на рисунке 1 (ЗГ - задающий генератор, КНИ-коэффициент нелинейных искажений).

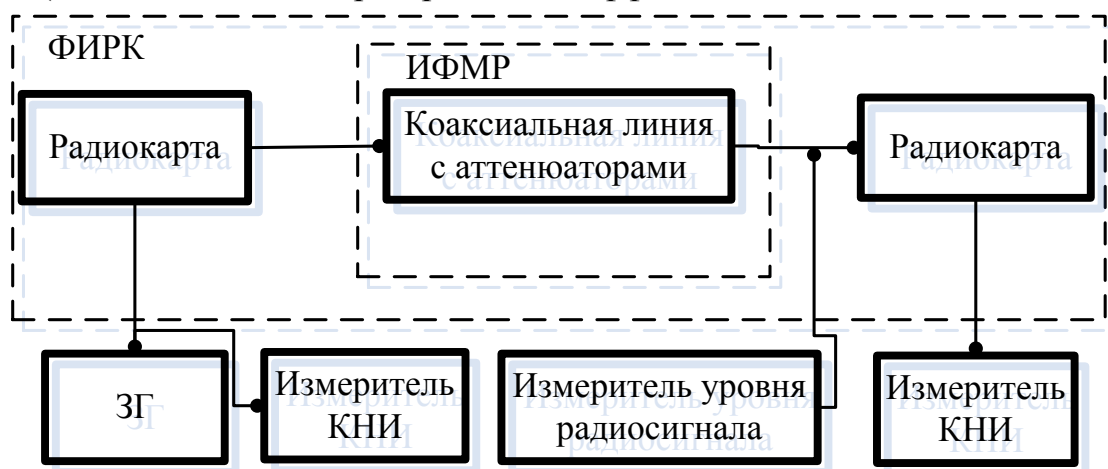


Рисунок 1. Структурная схема ФИРК

Главной концептуальной особенностью построения ФИРК является отсутствие необходимости имитировать функционирование стандартных приемопере-

дающих устройств (ППУ), используемых и в ФИРК, и в имитируемом с его помощью реальном радиоканале (тем более, что функционирование ППУ не подвержено влиянию многолучёвости [8]).

Функции имитации ложатся на входящую в состав ФИРК, имитационную физическую модель радиолинии (ИФМР) с ничтожными шумами многолучёвости [2,5].

Важнейшим следствием упомянутой особенности построения ФИРК является возможность, имитируя значения уровня сигнала на выходе ИФМР, сохранять все особенности функционирования реального канала и точно оценивать качество с использованием оценок на выходе ФИРК.

Качество на выходе радиоканала оцениваем в диссертации по критериям:

- коэффициента нелинейных искажений КНИ, %;
- отношения сигнал/шум ОСШ, дБ (СИНАД по ГОСТ 12252-86);
- слоговой разборчивости S , % (аналитическая оценка, адекватная оценке при артикуляционных испытаниях и многократно апробированная кафедрой РЭС МИИТА в исследованиях различных систем связи) [7];
- класса качества (по ГОСТ Р 50840-95).

При проведении в лабораторных условиях многочисленных измерений с помощью ФИРК создана база данных для имитации разных аспектов функционирования реального радиоканала.

Приведем лишь несколько примеров.

В таблице 1 представлены оценки качества на выходе ФИРК в зависимости от затухания, вносимого ИФМР при уровне сигнала на ее входе 0 дБм [8].

В таблице 2 представлены оценки качества на выходе ФИРК в зависимости от уровня сигнала на входе ИФМР [8].

В базу данных для имитации с помощью ФИРК аспектов функционирования реального радиоканала вошли и формулы (1) - (8) для возникающих на практике задач (в формулах использованы обозначения: U_c , дБн и $U_{ш}$, дБн – уровни сигнала и шума на выходе ФИРК; S , % - слоговая разборчивость).

$$K_{пр} = \begin{cases} 0,01 \text{ при } U_c > -70 \text{ дБн и } U_c < 0 \text{ дБн;} \\ \frac{0,32}{U_c+86,8} - 0,01 \text{ при } U_c > -82 \text{ дБн и } U_c < -70 \text{ дБн;} \\ \frac{2,9}{U_c+90,2} - 0,3 \text{ при } U_c > -88 \text{ дБн и } U_c < -82 \text{ дБн;} \end{cases} \quad (1)$$

Таблица 1 – Зависимость от затухания, вносимого ИФМР оценок качества на выходе ФИРК

Затухание А, вносимое ИФМР, дБ	Значения Кпр, %	Значения ОСШ, дБ	Значения слоговой разборчивости, S%	Класс каче- ства
0	1	40	91,2	Высший
70	1	40	91,2	
74	1	40	91,2	
75	1,2	38,4	90,5	
76	1,6	35,9	89,2	
77	2	34	88,1	
78	2,4	32,4	87,1	
79	3	30,5	85,9	
80	3,5	29,1	84,8	
81	4,5	26,9	83,1	
82	6	24,4	80,8	
83	10	20	76,1	I
84	15	16,5	71,5	
85	25	12	64,4	
86	30	10,5	61,5	
87	50	6	51,8	II
88	100	0	35	III

Таблица 2 – Зависимость от уровня сигнала на входе ИФМР оценок качества на выходе ФИРК

Уровень сигнала на входе ИФМР, дБм	Значения Кпр, %	Значе- ния ОСШ, дБ	Значения слоговой разбор- чивости, S%
1	2	3	4
0	25	12	64,3
2	10	20	76,1
4	4,5	26,9	83,1
6	3,2	29,9	85,4

Таблица 2 (продолжение)

8	2,6	31,7	86,7
10	2	34	88,1
12	1,5	36,5	89,5
14	1	40	91,2
16	1	40	91,2
18	1	40	91,2
20	1	40	91,2

$$\text{ОСШ} = \begin{cases} 40, & \text{при } U_c > -70 \text{ дБи и } U_c < 0 \text{ дБи;} \\ -0,19U_c^2 - 27,25U_c - 958,7, & \text{при } U_c > -88 \text{ дБи и } U_c < -70 \text{ дБи;} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{ОСШ} = \begin{cases} 40, & \text{при } U_c > -70 \text{ дБи и } U_c < 0 \text{ дБи;} \\ 62,4 - \frac{600}{U_c + 96,9}, & \text{при } U_c > -88 \text{ дБи и } U_c < -70 \text{ дБи;} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{ОСШ} = a(U_c)U_{\text{ш}}^2 + b(U_c)U_{\text{ш}} + c(U_c), \quad (4)$$

где $a(U_c)$, $b(U_c)$ и $c(U_c)$ – коэффициенты, значения которых зависимости от уровня сигнала определяются по формулам (5), (6), и (7).

$$a(U_c) = \begin{cases} -9,38 \cdot 10^{-3} & \text{при } U_c > -70 \text{ дБи и } U_c < 0 \text{ дБи;} \\ -7,17 \cdot 10^{-4}U_c^2 - 0,13U_c - 5,45 & \text{при } U_c > -82 \text{ дБи и } U_c < -70 \text{ дБи;} \\ 1,9 \cdot 10^{-4}(U_c + 78,3)^2 - 0,02 & \text{при } U_c > -88 \text{ дБи и } U_c < -82 \text{ дБи;} \end{cases} \quad (5)$$

$$b(U_c) = \begin{cases} 0,02U_c - 1,4 & \text{при } U_c > -70 \text{ дБи и } U_c < 0 \text{ дБи;} \\ -0,16U_c^2 - 28,67U_c - 1250,32 & \text{при } U_c > -82 \text{ дБи и } U_c < -70 \text{ дБи;} \\ 0,05(U_c + 77,8)^2 - 5,5 & \text{при } U_c > -88 \text{ дБи и } U_c < -82 \text{ дБи;} \end{cases} \quad (6)$$

$$c(U_c) = \begin{cases} -9,37 \cdot 10^{-3}U_c^2 + 1,4U_c - 3,91 & \text{при } U_c > -70 \text{ дБи и } U_c < 0 \text{ дБи;} \\ -9,67U_c^2 - 1683,7U_c - 73304 & \text{при } U_c > -82 \text{ дБи и } U_c < -70 \text{ дБи;} \\ 2,8(U_c + 77,7)^2 - 305 & \text{при } U_c > -88 \text{ дБи и } U_c < -82 \text{ дБи.} \end{cases} \quad (7)$$

На рисунке 2 приведено семейство графиков зависимостей ОСШ от затухания в ИФМР при разных уровнях шума [6, 8].

В третьей главе с помощью ФИРК определена дальность действия радиоканальных устройств реального радиоканала.

Широко используются термины: дальность уверенной радиосвязи, дальность радиосвязи, дальность радиоканала, дальность действия радиоканальных устройств, протяжённость радиолинии, расстояние между радиоустройствами.

К проблематике диссертации наиболее близок по смыслу термин дальность действия радиоканальных устройств (далее используем аббревиатуру ДДРУ), который может быть применен и к реальному радиоканалу, и к ФИРК и который, по сути, определяет расстояние между оконечными радиоустройствами работающего радиоканала.

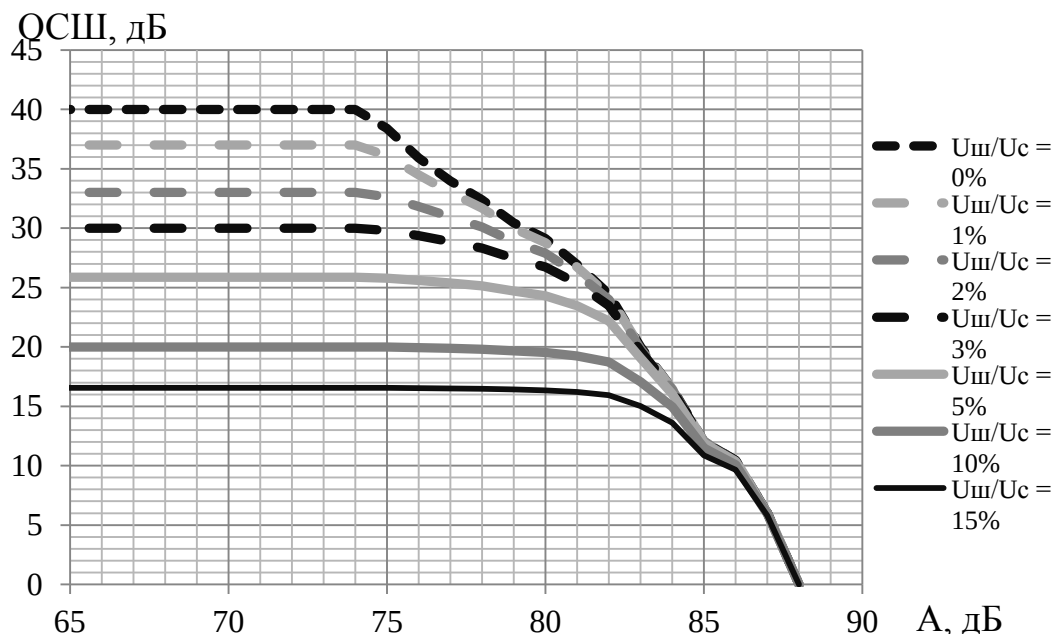


Рисунок 2. Семейство зависимостей ОСШ от затухания в ИФМР при разных уровнях шума

Для практического применения необходимо адаптировать ФИРК к условиям функционирования реального радиоканала, на которое и, прежде всего, на ДДРУ оказывает существенное влияние многолучевое распространение.

В главе излагается последовательность действий по решению этой задачи.

В начале, рассматривается вопрос наделения ФИРК функциями определения дальности действия радиоканальных устройств («градуировки» ФИРК в области определения ДДРУ).

В качестве основы градуировки используем формулу (6.1) из раздела 6 «Расчет потерь распространения радиосигнала в свободном пространстве» ГОСТ Р 53363-2009 [8].

Используя значение $f = 2,4$ ГГц и выражая L в метрах, применяя наши обозначения, получаем:

$$A^I = 40 + 20\lg(L), \text{ дБ.} \quad (8)$$

где A^I , дБ - потери распространения (ослабление) радиосигнала в свободном пространстве (затухание, вносимое ИФМР); L , м – ДДРУ.

Естественно, может использоваться формула для решения обратной задачи [8]:

$$L = 10^{\frac{A^I - 40}{20}}. \quad (9)$$

При градуировке следует иметь в виду, что формула (8) из ГОСТ Р 53363-2009 основана на кривых распространения радиоволн (зависимости напряжённости поля в дБи в точке приёма от расстояния). Поэтому используя для градуиров-

ки данные таблицы 1 переводим размерность уровня сигнала на выходе ИФМР из дБм в дБи и получаем значения A^{Π} затухания в ИФМР.

Результат градуировки представлен в таблице 3.

Таблица 3— Зависимость ДДРУ и показателей качества на выходе ФИРК от затухания, вносимого ИФМР

Затухание A^{Π} , дБ	ДДРУ, м	Значения Кпр, %	Значения ОСШ, дБ	Значения слоговой разборчивости, S %
30	0,09	1	40	91,2
40	0,3	1	40	91,2
50	0,9	1	40	91,2
60	2,9	1	40	91,2
70	9,1	1	40	91,2
74	14,5	1	40	91,2
75	16,2	1,2	38,4	90,5
76	18,2	1,6	35,9	89,2
77	20,4	2	34	88,1
78	22,9	2,4	32,4	87,1
79	28,2	3	30,5	85,9
80	28,8	3,5	29,12	84,8
81	32,4	4,5	26,9	83,1
81,8	35,5	5,6	25	81,4
82	36,3	6	24,4	80,8
82,6	38,9	7,9	22	78,4
83	40,7	10	20	76,1
83,4	42,7	11,9	18,5	74,2
84	45,7	15	16,48	71,5
84,1	46,2	15,8	16	70,8
84,2	46,8	16,8	15,5	70,1
84,3	47,3	17,8	15	69,3
84,6	49	20	14	67,7
84,8	50,1	22,4	13	66,1
85	51,3	25	12,04	64,4
85,4	53,7	26,6	11,5	63,4
86	57,5	30	10,46	61,5
87	64,6	50	6	51,8

Отметим что данные в строках таблицы при ОСШ=20, 12 и 6 дБ абсолютно точно совпадают с порогами нижних границ оценок отличного, хорошего и удовлетворительного качества по ГОСТ 12252.

Градуировка закончена. Теперь ФИРК абсолютно точно отслеживает зависимость ДДРУ от ослабления радиосигнала диапазона 2,4 ГГц в свободном пространстве.

Но важнейшим результатом является то, что в отличие от основы градуировки ее результат содержит информацию не только о параметрах радиолинии свободного пространства, но и о параметрах качества на канальном уровне для такой радиолинии.

Но это имеет практическое значение лишь для реального радиоканала в свободном пространстве.

Необходимы результаты, которые могут быть использованы для реальных каналов, испытывающих существенное влияние многолучевого распространения.

В реальных условиях распространения волн на местности величина затухания зависит от множества факторов (отражение сигнала от объектов, преломление радиосигнала, рассеивание радиосигнала, эффекта Доплера) многие из которых и определяют то, что называют влиянием многолучевости.

Выбор поправочных коэффициентов, учитывающих эти факторы, зависит от выбора модели из модификации разработанной Европейским союзом COST (Cooperation for Scientific and Technical Research) — COST 231, хорошо зарекомендовавшей себя на практике (модель Окамуры, модель Хаты, модель COST231-Hata, заказные модели (COST231-Hata), модель «Ли», модель COST231-Уолфиш-Икегами, модель Hata/Davidson/Epstein-Peterson Diffraction, модель TIREM-EDX, модель FCC – EDX, модель FCC – FCC, модель CCIR – EDX, модель FCC - Pt.22 и ряд других моделей).

Используем модель Окамуры (Okumura Technique), для которой расчетная зависимость определяется в наших обозначениях формулой:

$$V_{PE3} = A^{\Pi} + V_{ГОР} - V_{БС} - V_{МС} - C, \text{ дБ}, \quad (10)$$

где V_{PE3} - затухание в реальных условиях;

A^{Π} , дБ - затухание в свободном пространстве (затухание в ИФПР);

$V_{ГОР}$ – затухание в городских условиях относительно затухания в свободном пространстве при задаваемых в модели значениях высот установки антенн базовой ($h_t = 200$ м) и мобильной ($h_r = 3$ м) станций, дБ ;

$V_{БС} = N(h_t)$ – усиление за счет отличия (увеличения) высоты антенны базовой станции от $h_t = 200$ м, дБ (3.9);

V_{MC} – усиление за счет отличия (увеличения) высоты антенны мобильной станции от $h_r = 3$ м, дБ;

C – фактор затухания для различных типов местности, дБ. Ниже полагаем $C=3$ дБ, поскольку для городов средних размеров и пригородов с умеренной плотностью деревьев $C=0$ дБ, для столичных центров (в которых наиболее сильно проявляется явление многолучёвости) используется максимальное значение $C=3$ дБ.

При использовании ФИРК для прогнозирования и расчета реальных радиоканалов с существенным влиянием многолучёвости (свободное пространство, плотная городская застройка, средняя городская застройка и т.д.) в диссертации предложен широкий набор номограмм, позволяющих выполнять прогнозирование и расчет, не проводя натурных испытаний на местности.

Для нас особый интерес представляют реальные радиоканалы диапазона 2,4 ГГц в сетях сотовой связи стандарта 3G.

Тем более, что для формирования исходных данных и проверки результата имеем пример организации такой сети в городе Москва: максимальная мощность излучения передатчика БС 40Вт; максимально допустимая по санитарным нормам Москвы мощность излучения 20Вт; высота установки антенны базовой станции 27 м (мачта Nokia Siemens Networks Flexi Multiradio).

Приведем лишь два примера номограмм.

Номограмма рисунка 3 позволяет для условий плотной городской застройки проводить сопоставление прогнозируемых оценок ДДРУ с прогнозируемыми оценками слоговой разборчивости $S\%$ и класса качества (по ГОСТ Р 50840-95).

В качестве параметра номограммы используем фактор C затухания для различных типов местности C .

Отличие в значениях характеристик сети стандарта 3G диапазона 2,4 ГГц, при которых номограмма справедлива: излучаемая мощность БС 46 дБм.

Номограмма рисунка 4 обладает возможностями предыдущей.

Отличие в значениях характеристик сети стандарта 3G диапазона 2,4 ГГц, при которых номограмма справедлива: излучаемая мощность БС 43 дБм.

Четвертая глава решает основную задачу диссертационного исследования – определение размера зоны мягкой эстафетной передачи.

По введенному нами определению зона эстафетной передачи это область, в которой существует проблема эстафетной передачи и в которой мобильная станция (МС) пребывает от момента возникновения проблемы хэндовера до момента его завершения. Длину пути, который МС совершает за этот временной отрезок, будем называть «размером зоны эстафетной передачи».

Полученная выше зависимость от ДДРУ коэффициента нелинейных искажений на выходе ФИРК представлена в таблице 4.

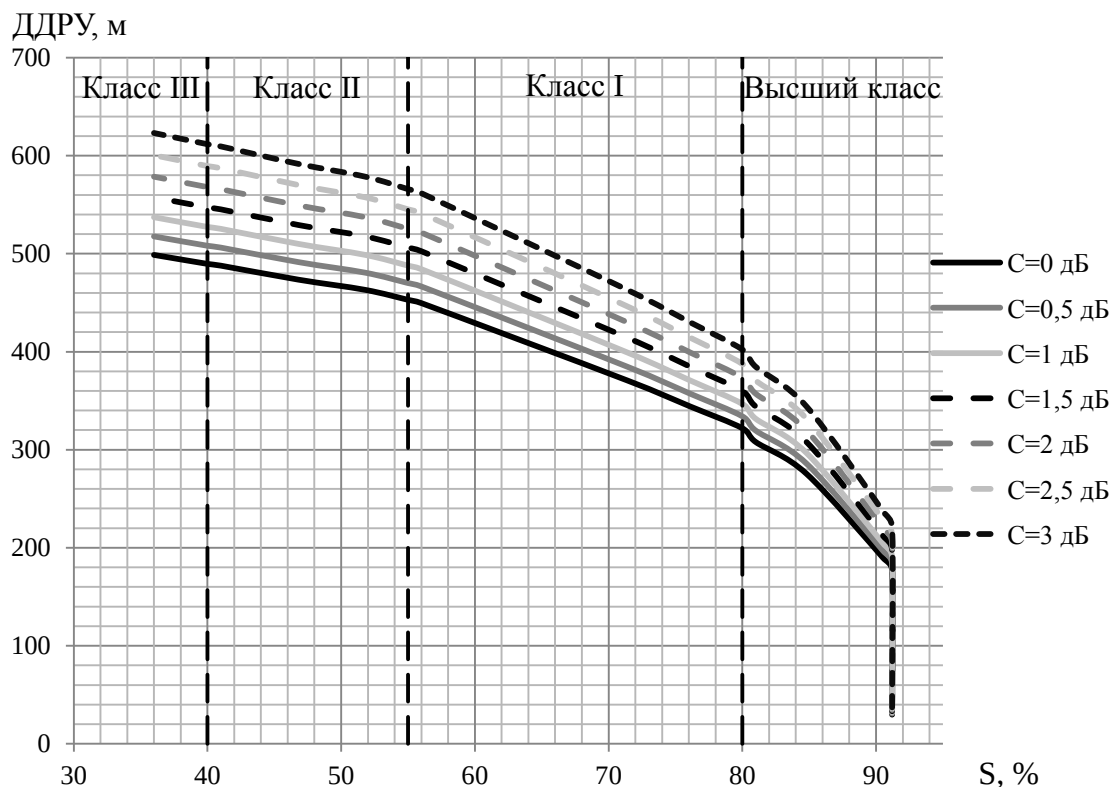


Рисунок 3. Номограмма при излучаемой мощности БС 46 дБм.

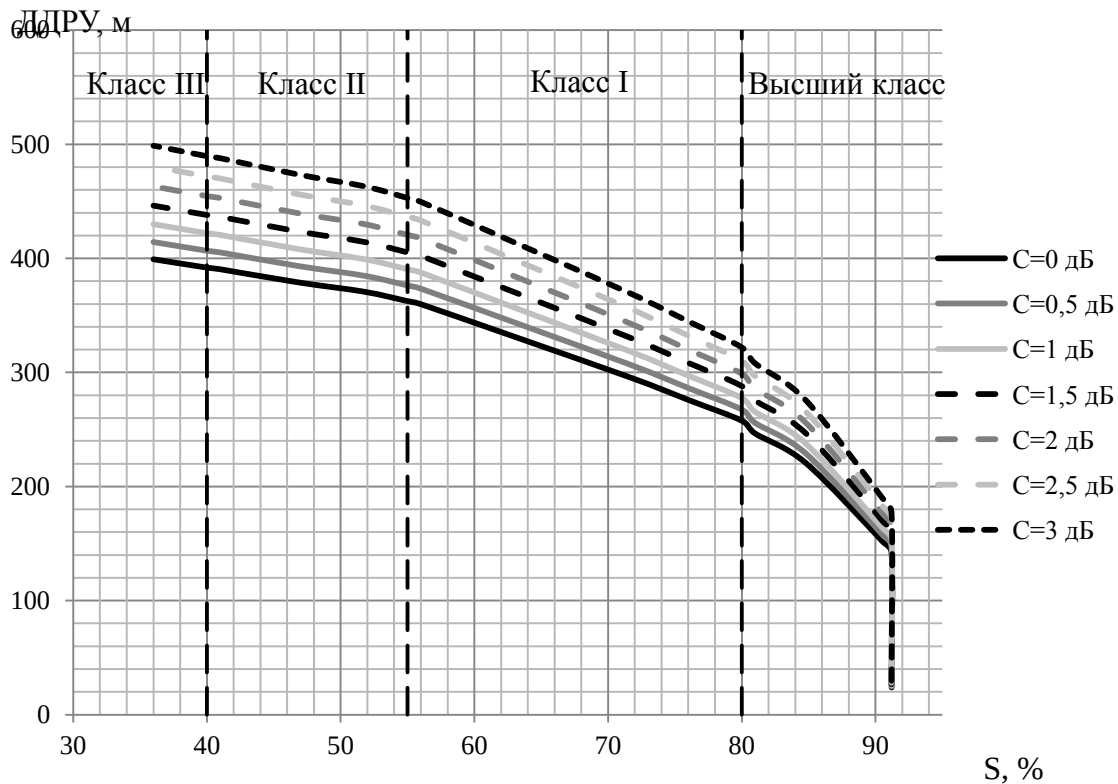


Рисунок 4. Номограмма при излучаемой мощности БС 43 дБм.

Таблица 4 - Зависимость коэффициента нелинейных искажений на выходе ФИРК от ДДРУ

ДДРУ, м	Значения Кпр на выходе ФИРК, %	ДДРУ, м	Значения Кпр на выходе ФИРК, %	ДДРУ, м	Значения Кпр на выходе ФИРК, %
0,09	1	20,4	2	46,8	16,8
0,3	1	22,9	2,4	47,3	17,8
0,9	1	28,2	3	49	20
2,9	1	28,8	3,5	50,1	22,4
9,1	1	35,5	5,6	51,3	25
14,5	1	38,9	7,9	53,7	26,6
16,2	1,2	40,7	10	57,5	30
18,2	1,6	42,7	11,9	64,6	50

Используя данные таблицы 4, в зависимости от пороговых значений ОСШ и КНИ можно определить размер зоны эстафетной передачи. Однако пороговые значения можно определить и используя слоговую разборчивость.

Используя номограмму, представленную рисунком 4, т.е. решая задачу в условиях плотной городской застройки при исходных данных $h_t = 27$ м, $h_r = 1,5$ м, уровень сигнала на входе ИФМР 43 дБм, получаем данные таблицы 5. При этом ориентируемся на самую плохую ситуацию, принимая $C=3$ по методике Окамура-Хата.

Таблица 5 - Диапазоны размера зоны эстафетной передачи и ее времени исходя из класса качества связи (согласно ГОСТ Р 50840-95) на границах зоны.

Класс качества в начале хэндовера	Класс качества в конце хэндовера	Диапазон размера зоны эстафетной передачи, м	Диапазон времени эстафетной передачи, с при скорости 60 км/ч
Высший	I	14 - 142	0,8 – 8,5
	II	145 – 180	8,7 – 10,8
	III	182 – 191	10,9 – 11,5
I	II	3 – 35	0,2 - 2
	III	40 – 49	2,4 – 2,9

Зависимости времени хэндовера от размера зоны и скорости передвижения МС при различных комбинациях классов качества представлены графиками. Один из них представлен на рисунке 5.

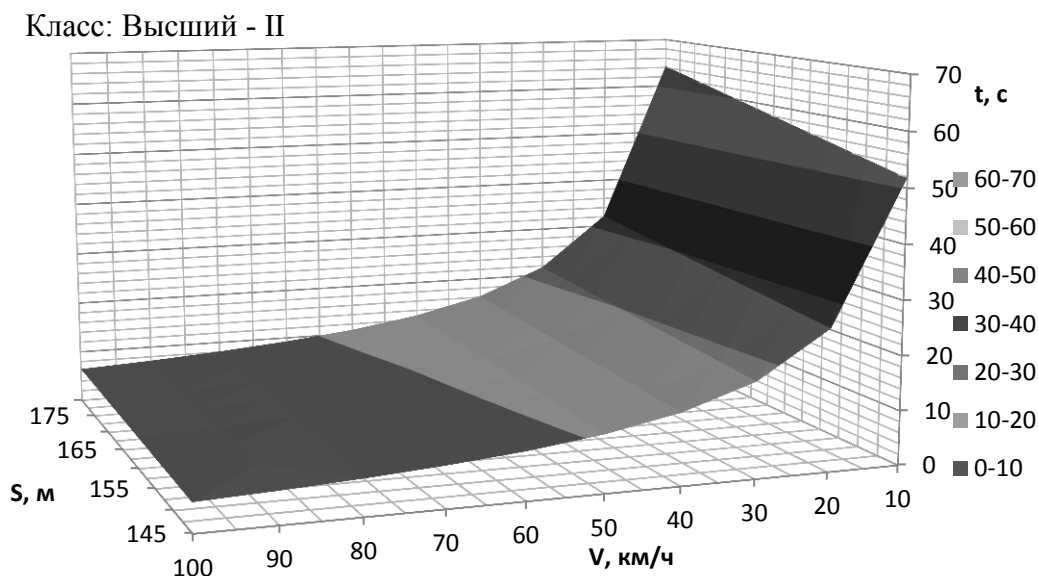


Рисунок 5. Зависимость времени эстафетной передачи от размера зоны и скорости передвижения МС при классах качества связи «высший» в момент начала хэндовера и «II -й» в момент его окончания

В пятой главе выполнено сравнение результатов, полученных при использовании ФИРК, с результатами функционирования имитируемого реального радиоканала.

В параграфе 5.2 сравниваются результаты, полученные при использовании ФИРК, с техническими требованиями к радиокартам, используемым при организации радиointерфейсов диапазона 2,4 ГГц стандарта Radio Ethernet 802.11g (Wi-Fi), технологии мобильной связи третьего поколения 3G и т.п. (радиокартам YARKONIA BX-501, YARKONIA X400, Wiwat WT 2,4, Wiwat WR 2,4 и т.п.). Результат сравнения представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение результатов, полученных при использовании ФИРК, с результатами функционирования имитируемого реального радиоканала

Параметр радиокарты	Значение параметра из технических требований	Значение параметра, полученное с помощью ФИРК	Относительная погрешность
Чувствительность приемника (СИНАД, С/Ш 12дБ), дБм	-85	-85	0%
Коэффициент нелинейных искажений аудиовыхода приемника, %	1	1	0%
Дальность связи для открытого пространства, м	50	51,3	2,6%

В параграфе 5.3 сравниваются результаты определения при использовании ФИРК размера соты в сети стандарта 3G, диапазона 2,4 ГГц с известным результатом для такой сети в городе Москва.

Сравнение производится для условий плотной городской застройки при типовых решениях организации сети в городе Москва: максимальная в Москве мощность излучения передатчика БС 40Вт; максимально допустимая по санитарным нормам Москвы мощность излучения передатчика БС 20Вт; высота установки антенны базовой станции 27 м (мачта Nokia Siemens Networks Flexi Multiradio).

Из известных данных по сети 3G города Москва размер соты в его центре составляет 800 – 1200 м. Результат сравнения представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение результатов определения размера соты в сети стандарта 3G при использовании ФИРК с известным результатом сети в городе Москва

Мощность излучения передатчика БС	Размер соты в центре Москвы, м	Размер соты полученный с помощью ФИРК, м
максимальная 40Вт, 46 дБм	800 – 1200	950
максимально допустимая по санитарным нормам 20Вт, 43 дБм	800 – 1200	680

В параграфе 5.4 сравниваются результаты определения ДДРУ для реального радиоканала (по известным данным натурного испытания) и для ФИРК в сети связи двух компьютеров при радиointерфейсе Radio Ethernet 802.11g диапазона 2,4 ГГц. Результаты сравнения представлены в таблице 8.

Сравнение результатов определения ДДРУ для реального радиоканала и для ФИРК в сети связи компьютеров при использовании радиointерфейса Radio Ethernet 802.11g диапазона 2,4 ГГц выполнено с относительной среднеквадратической погрешностью 4,1%.

Таблица 8 – Сравнение результатов определения ДДРУ для реального радиоканала в сети связи двух компьютеров при радиointерфейсе Radio Ethernet 802.11g и для ФИРК.

ДДРУ, м	ОСШ при натурном испытании, дБ	ОСШ на выходе ФИРК, дБ	Абсолютная разность значений ОСШ, дБ
6	25	25,8	0,8
45	12,5	16,5	4,0
50	12	12,5	0,5
60	11,5	8,5	3,0

В параграфе 5.5 сравниваются результаты определения ДДРУ для ФИРК и для реального радиоканала при определении зависимости необходимой для обеспечения ДДРУ мощности излучения (по известным данным натурного испытания). Результаты сравнения представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнение результатов определения ДДРУ для ФИРК и для реального радиоканала при определении зависимости необходимой мощности излучения

ДДРУ, м	Необходимая мощность излучения (по данным натурного испытания), дБм	Необходимая мощность излучения (с использованием ФИРК), дБм	Абсолютная разность мощностей излучения, дБм
5	0	0	0
25	7,5	6	1,5
30	8	7,5	0,5
35	10,4	8,8	1,5
50	13,5	12	1,5
55	14,2	12,8	1,4
60	15,2	13,6	1,6
70	16	14,9	1,1

Относительная среднеквадратическая погрешность мощностей излучения, исходя из данных таблицы 5.6, составляет 2,76%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований, представленных в диссертации, получены следующие результаты.

1. Предложена концепция, структурная схема и реализация физического имитатора радиоканала (ФИРК) с ничтожными шумами многолучёвости, предоставляющего широкий набор новых функции для имитации реального радиоканала.
2. Предоставление с помощью ФИРК возможности (реализованной в диссертации) получения практически важных результатов анализа реального радиоканала диапазона 2,4 ГГц, при констатации целесообразности его применения при решении аналогичных задач во всех диапазонах частот, где существенно проявляется многолучевое распространение.
3. Создание при проведении измерений с помощью ФИРК в лабораторных условиях базы данных для имитации различных аспектов функционирования реального радиоканала.

4. Выполнение градуировки ФИРК в области определения дальности действия радиоканальных устройств (ДДРУ), позволившее использовать ФИРК при прогнозировании ДДРУ реального радиоканала. Градуировка выполнена на основе данных ГОСТ Р 53363-2009.

5. При использовании ФИРК для прогнозирования и расчета реальных радиоканалов, в том числе, с существенным влиянием многолучёвости (свободное пространство, плотная городская застройка, средняя городская застройка и т.д.) предложен широкий набор номограмм, позволяющих осуществлять прогнозирование и расчет без проведения натурных испытаний на местности.

6. Для различных комбинаций значений параметров сети сотовой связи стандарта 3G в результате имитации с помощью ФИРК реального радиоканала диапазона 2,4 ГГц определены размеры зоны эстафетной передачи.

Например, в условиях плотной городской застройки и определении момента начала хэндовера классом качества связи «высший» в момент начала хэндовера и «II - й» в момент его окончания размер зоны эстафетной передачи изменяется в пределах от 100 до 175 м, а время хэндовера (при скорости передвижения МС от 10 до 100 км/ч) - в пределах от 50 до 6 с.

7. Выполнено сравнение результатов использования ФИРК с результатами функционирования имитируемых им реальных радиоканалов.

Адекватность применения ФИРК на практике обоснована примерами:

7.1. При сравнении результатов, полученных при использовании ФИРК с техническими требованиями к приемопередающему устройству (стандартной радиокарты) реального радиоканала установлено полное совпадение по параметрам радиокарты: чувствительность (СИНАД), КНИ на аудиовыходе. По параметру: дальность связи радиокарты для открытого пространства относительная погрешность составила 2,6%.

7.2. При сравнении результатов, полученных при использовании ФИРК, с техническими характеристиками сети сотовой связи 3G города Москва использованы типовые решения ее организации и учтены наихудшие для распространения условия плотной городской застройки.

При этом установлено:

- при мощности излучения БС 46 дБм прогноз размера соты составляет 950 м;
- при максимально допустимой по санитарным нормам Москвы мощности излучения БС 43 дБм прогноз размера соты составляет 680 м.

Полученные результаты хорошо коррелируются с известными данными о размере соты в центре Москвы (800 – 1200 м).

7.3. Сравнение результатов определения ДДРУ в сети связи компьютеров при радиointерфейсе Radio Ethernet 802.11g диапазона 2,4 ГГц для реального радиоканала (при натурных измерениях его характеристик) и при его имитации с помощью ФИРК привело к значению 4,1% относительной среднеквадратической погрешности оценок.

7.4. Сравнение результатов определения ДДРУ для ФИРК и для реального радиоканала (при натурных измерениях его характеристик при определении зависимости мощности излучения передатчика от мощности его энергопотребления) привело к значению 2,76 % относительной среднеквадратической погрешности оценок.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях из Перечня ВАК:

1. Попов И.Л. Пакетная передача речи в сетях подвижной связи / Горелов Г.В., Клепцов Г.В. // Мир Транспорта, Издательство: Московский государственный университет путей сообщения (Москва) ISSN: 1992-3252. - 2014. - №3 (52). - с. 50-55.
2. Попов И.Л. Измерение параметров радиолинии диапазона 2,4 ГГц при исключении влияния многолучевого распространения / Горелов Г.В., Маркачёв С.А., Самойлов В.Е. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/121-18358>.
3. Попов И.Л. К определению зоны эстафетной передачи в сетях сотовой связи технологии многостанционного доступа с кодовым разделением / Горелов Г.В., Маркачёв С.А., Самойлов В.Е. // Проектирование и технология электронных средств, ISSN 2071–9809, 2015. - №2. - с. 51-55.
4. Попов И.Л. Энергетический потенциал и дальность связи в радиолинии с ничтожными шумами многолучёвости // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/129-23269>

Публикации в других изданиях

5. Попов И.Л. Зона эстафетной передачи в сети стандарта сотовой связи третьего поколения технологии МДКР / Горелов Г.В., Самойлов В.Е. // Конференция «День радио», секция «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» СПб.: 2015 – №1. – с. 201-202.
6. Попов И.Л. Измерения параметров радиолинии дециметрового диапазона / Горелов Г.В., Маркачев С.А. // Конференция «День радио», секция «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» СПб.: 2015. – №1. - с. 203-204.

7. Попов И.Л. Качество пакетной передачи речи в ДМВ диапазоне / Горелов Г.В., Самойлов В.Е. // 11-я международная научная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (ПТСПИ) – 2015 – с. 80-82.
8. Попов И.Л. Объективные и субъективные оценки разборчивости при оценке качества радиолинии ДМВ диапазона / Горелов Г.В., Самойлов В.Е. // 11-я международная научная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (ПТСПИ) – 2015 – с. 83-84.

Подписано в печать 04.02.2016 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87