

В. И. Попов, В. А. Скуднов

**ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СОТОВЫХ СЕТЕЙ
МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Москва
Горячая линия – Телеком
2017

Содержание

Предисловие	7
От авторов	9
Введение. Цели, задачи и алгоритм первичного этапа проектирования ССМС	11
Литература к введению	13
Глава 1. Основные принципы организации современных ССМС	15
1.1. Иерархия сетевой архитектуры наземного сегмента ССМС в современных технологиях 2G, 3G,4G. Сетевые топологии макро-, микро-, пико- и фемто-ССМС	15
1.2. Сетевая архитектура WiMAX	24
1.3. Сетевая архитектура ССМС 4G	27
1.4. Сетевая архитектура фемто-ССМС	33
1.5. Сетевая архитектура Wi-Fi	38
1.6. Интеграция ССМС в HetNet	55
1.7. Выводы	62
Литература к 1-й главе	66
Глава 2. Частотные диапазоны в ССМС	69
2.1. Стандартизация на выделяемые полосы частот для ССМС	69
2.2. Принципы повторного использования частот в ССМС	85
2.3. Частотное распределение каналов в ССМС	91
2.4. Особенности использования верхних и нижних частот для LTE	93
2.5. Выводы	96
Литература к 2-й главе	96
Глава 3. Основы проектирования территориального радиопокрытия в ССМС	98
3.1. Анализ антенных систем в ССМС и их параметров ..	99
3.1.1. Анализ антенных систем мобильных терминалов (станций) в 3G/4G ССМС	100

3.1.2. Анализ антенных систем базовых станций в 3G/4G ССМС	107
3.2. Принципы радиопокрытия зоны обслуживания в ССМС	122
3.2.1. Статистический метод радиопокрытия зоны обслуживания	123
3.2.2. Детерминированный метод радиопокрытия зоны обслуживания	126
3.3. Особенности распространения радиоволн с ССМС ...	127
3.4. Математические модели РРВ в ССМС	131
3.4.1. Однолучевая математическая модель РРВ в ССМС	135
3.4.2. Влияние окружающей среды на РРВ в ССМС ..	138
3.4.3. Двухлучевая математическая модель РРВ в ССМС	140
3.4.4. Особенности РРВ в условиях неоднородной трассы	144
3.4.5. Математические модели РРВ в условиях города и пригорода	146
3.4.6. Математические модели распространения радиоволн в лесных массивах	165
3.4.7. Сравнение моделей РРВ в различных условиях	177
3.4.8. Расчет кластерной структуры ССМС	181
3.4.9. Математическое моделирование РРВ в ССМС в программе MathCad	183
3.5. Картографирование зоны радиопокрытия в ССМС оператора	208
3.6. Выводы	209
Литература к 3-й главе	210
Глава 4. Основы теории телетрафика ССМС	213
4.1. Определения	213
4.2. Основные характеристики телетрафика в ССМС	214
4.3. Математические модели телетрафика в ССМС	215
4.4. Определение числа пользователей в зоне обслуживания ССМС	219
4.5. Проблемы современных методов теории телетрафика в ССМС 3G	220
4.6. Выводы	225

Литература к 4-й главе.....	226
Глава 5. Измерения, мониторинг и оптимизация ССМС	228
5.1. Ключевые показатели качества (KPI) ССМС.....	228
5.2. Измерения и мониторинг в ССМС.....	255
5.2.1. Измерительные комплексы для измерений и мониторинга в ССМС.....	256
5.2.2. Программные комплексы для измерений и мониторинга ССМС.....	265
5.3. Проблемы оптимизации ССМС.....	278
5.3.1. Основы оптимизации ССМС.....	280
5.3.2. Самоорганизующиеся ССМС (SON).....	283
5.3.3. Автоматизированная система планирования и оптимизации на основе специализированного программного комплекса ONEGA.....	303
5.4. Выводы.....	313
Литература к 5-й главе.....	317
Глава 6. Моделирование и экспериментальные исследования HetNet, включающих ССМС, АОН, Интернет	321
6.1. Измерения и мониторинг ССМС GSM/3G/4G с использованием тестовых комплексов.....	321
6.2. Проектирование и экспериментальные исследования гетерогенной сети (HetNet).....	329
6.2.1. Проектирование HetNet. Принцип действия HetNet.....	329
6.2.2. Экспериментальные исследования параметров передачи в HetNet.....	334
6.2.3. Анализ полученных результатов.....	340
6.3. Экспериментальные исследования в сетях стандарта Wi-Fi.....	342
6.3.1. Экспериментальные исследования локальной WiFi-сети (IEEE 802.11b) с WDS.....	342
6.3.2. Экспериментальные исследования РРВ в WiFi-сети (802.11b/g).....	356
6.4. Выводы.....	365
Литература к 6-й главе.....	369
Глава 7. Перспективы развития ССМС	371
7.1. Поколение ССМС 5G.....	371

7.2. Поколение ССМС 6G.....	385
7.3. Поколение ССМС 7G.....	387
7.4. Глобальный прогноз по мобильному трафику на период 2015–2020 гг.	388
7.5. Выводы.....	396
Литература к 7-й главе.....	396
Заключение	398

Предисловие

Телекоммуникационные системы, к которым можно отнести сотовые сети мобильной связи, радиорелейные (наземные и космические), телевизионные и кабельные (на основе оптических линий связи) системы передачи информации, являются одними из важнейших достижений человечества в XX веке в области информационных систем и технологий. Сотовые сети мобильной связи (ССМС) к 2016 г. завоевали одну из ключевых позиций в области информационных технологий. В 2016 г. число пользователей мобильного Интернета во всем мире уже достигает 40 % от общего числа абонентов мобильной связи (примерно 6 миллиардов пользователей). При этом аналитики полагают, что к этому времени ежегодные доходы от мобильных сервисов вырастут до 1 триллиона долларов. В глобальных масштабах операторы в 2017 г. рассчитывают на 6-процентное увеличение доходов от передачи речи, услуг широкополосного доступа в Интернет и сервисов отправки сообщений. Причем наибольший рост ожидается за счет стран Азии и Латинской Америки, в то время как страны Европы, Ближнего Востока и Африки, как ожидают аналитики, продемонстрируют небольшое снижение из-за «жесткой конкуренции и экономической неразберихи». Мобильная связь уже практически перешла от передачи речи к передаче данных, поскольку мобильные операторы стараются предоставлять услуги для большинства своих клиентов на тарифные планы, включающие передачу данных, и на смартфоны. В Северной Америке и странах Азии операторы уже получают более 40 % своих доходов от мобильных услуг за счет мобильного Интернета и пересылки сообщений. В ближайшие годы количество абонентов на Земле достигнет более 6 миллиардов, а доходы мобильных операторов превысят триллион долларов.

При достаточно быстро расширяющемся рынке услуг ССМС в мире учебный библиографический рынок в области проектирования ССМС как в Западной Европе, США, Японии, так и в странах Восточной Европы сравнительно беден, так как многие фирмы, проектирующие ССМС для операторов, разрабатывают свои алгоритмы и программы (под ключ) и не публикуют их в открытой печати.

Настоящая книга, являющаяся учебным пособием по проектированию ССМС, написана на основании конспектов лекций по дисциплинам «Проектирование мобильных систем связи на транспорте»

и «Проектирование сотовых сетей мобильной связи», которые читались профессором В.И. Поповым в Рижском техническом университете, а также является второй частью учебника: Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. — М.: Эко-Тренз, 2005, 296 с.

Авторы намеренно ограничили рамки книги рассмотрением ССМС стандартов 2G, 3G и 4G по следующей причине: эти технологии ССМС в настоящее время широко используются как в Европейских странах, так и в мире.

Первая глава книги посвящена основным принципам организации ССМС. В ней рассмотрены иерархии сетевой архитектуры ССМС 2G, 3G, 4G (сетевые архитектуры макро, микро, пико, фемтоССМС, WiMAX, Wi-Fi, HetNet) и их общие и технические характеристики.

Во второй главе рассматриваются принципы частотного планирования в ССМС (вопросы стандартизации на выделяемые полосы частот в ССМС в мировой практике, принципы повторного использования частот в ССМС).

В третьей главе изложены проблемы проектирования территориального радиопокрытия в ССМС. Особое внимание уделяется анализу антенных систем мобильных терминалов и базовых станций в стандартах 3G/4G ССМС; принципам радиопокрытия зоны обслуживания в ССМС (статистическому и детерминированному методам); особенностям распространения диапазонов радиоволн, используемых в ССМС; математическим моделям распространения радиоволн в ССМС; численным расчетам максимального радиуса сот; построению кластерной структуры ССМС, а также картографированию зоны радиопокрытия в ССМС оператора.

Четвертая глава посвящена основам проектирования пропускной способности ССМС. В ней рассмотрены основные характеристики пропускной способности ССМС; математические модели телетрафика в ССМС; численные примеры расчета пропускной способности ССМС и определение числа пользователей в зоне обслуживания; проблемы современных методов телетрафика в 3G/4G ССМС.

В пятой главе рассмотрены проблемы измерений, мониторинга и оптимизации ССМС, которые включают определение основных показателей качества ССМС; оценки эффективности ССМС; краткое описание программных измерительных комплексов (QVoice, R&S™ TSMW) и мониторинговых программ (Ascom TEMS Pocket, CellMapper, G-MoN, G-NetTrack Lite, G-NetTrack Pro, 10 программ мониторинга GSM/3G/4G для Android) для измерений и мониторинга ССМС; проблемы оптимизации ССМС.

Шестая глава посвящена экспериментальным исследованиям гетерогенных сетей, включающих экспериментальные измерения и мо-

ниторинг ССМС с использованием программных измерительных комплексов (Ascom TEMS Pocket, CellMapper, G-MoN, G-NetTrack Lite, G-NetTrack Pro и программ мониторинга GSM/3G/4G для Android); проектирование и экспериментальные исследования разработанной авторами гетерогенной сети (HetNet); экспериментальные исследования Wi-Fi-сетей.

В седьмой главе рассмотрены перспективы развития ССМС: поколения ССМС 5G/6G/7G, а также глобальный прогноз по мобильному трафику на период 2015–2020 гг.

Стремление найти компромисс между достаточной полнотой содержания и невозможностью чрезмерной детализации при сохранении простоты и доступности изложения в представленном виде книга не может не иметь недостатков как по полноте охвата, так и по методике изложения и по фактическому содержанию.

Поэтому авторы будут признательны за любые критические замечания, конструктивные отклики, содержащие конкретные пожелания и предложения по E-mail-адресам:

popovs@latnet.lv vladimir.skudnov@sotus.net

Выражения признательности

Благодарим администрацию Рижского технического университета (РТУ) за предоставление возможности проведения научных исследований и обучения студентов в области радиосвязи, в том числе и систем мобильной связи на транспорте.

Благодарим за ценные замечания, которые сделал уважаемый рецензент доктор технических наук, профессор В.И. Вольман.

Выражаем искреннюю признательность за ценную техническую поддержку и сотрудничество администрации и сотрудников следующих организаций: Latvijas Mobilais Telefons, Latvijas Dzelzceļš, Nokia, Siemens, Ericsson, Belam, Samsung, Optron, Sotus Telecom Ltd. и др.

Благодарим Бога за то, что у нас хватило сил, энергии и стойкости, используя отпускное, субботнее и воскресное время, завершить эту книгу и реализовать её издание.

*Валентин Иванович Попов,
Владимир Алексеевич Скуднов
20 июля 2016 года*

От авторов

Несмотря на то что в последние годы появилось большое количество научных статей, монографий и учебников по сотовым сетям мобильной связи (ССМС), до настоящего времени практически отсутствует простое на инженерном уровне изложение основных принципов проектирования ССМС. В основу предлагаемого авторами учебного пособия по основам проектирования ССМС положены курсы лекций профессора В.И. Попова по дисциплинам: «Системы мобильной связи на транспорте» и «Проектирование сотовых сетей мобильной связи», которые читались в Рижском техническом университете (1996–2016 гг.), а также использован ряд разделов докторской диссертации В.А. Скуднова.

Предлагаемый читателям учебник, по сути, является развитием 7-й главы книги: Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. — М.: Эко-Трендз, 2005, 296 с., и предназначен для специалистов в области беспроводных систем связи, а также для студентов вузов, занимающихся проблемами проектирования сотовых сетей мобильной связи.

В.И. Попов, В.А. Скуднов, 20.07.2016