

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-

нитинг 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