

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR LTE COVERAGE OPTIMIZATION

R. V. Akhpashev

Siberian State University of Telecommunication and Information Sciences,
630102, Novosibirsk, Russia

The LTE is a reality today and is growing fast in the global mobile technology. The members which using mobile internet must be having broadband access wherever they go, and not just at home or in the office. The users are enhanced further for more demanding applications like interactive TV, mobile video streaming, advanced games or professional services.

For the LTE deployment and modelling of cell coverage using the most common propagation model is very important. The radio propagation models are very significant while planning for any wireless communication system. The propagation models calculating for some area (e.g. Japan). The problem of this models is a low level of accuracy for another place [3]. The propagation model tuning is one of the most important issues in efficient network planning. Obviously, we need to correct these models and find the correction factor because the calculating parameters of original COST 231 Hata are not true.

A mobile network operators design LTE networks with help of a radio propagation models (Okumura-Hata, Walfisch-Ikegami, etc.). One of the most common model used in determining the radio coverage in LTE networks is COST 231 Hata. Tuning of the model is carried out using large number of measurement records to increase the accuracy of the path loss prediction. The path loss predictions of tuned model are compared with the COST 231 Hata model. In this paper, tuning of COST 231 Hata prediction method has been carried out based on experiments using LTE technology. Authors are carried out the link budget calculation for path losses in urban area using theoretical parameters for LTE.

The radio propagation models are very important while planning for any wireless communication system. The model describes the behavior of the signal while it is transmitted from the transmitter towards the receiver, and the path loss. The Path loss models are important for predicting coverage area, interference analysis and cell parameters which are basic elements for network planning process in cellular systems.

In this paper, tuning of COST 231 Hata prediction method has been carried out based on experiments using LTE technology. Authors are carried out the link budget calculation for path losses in urban area using theoretical parameters for LTE. The information of path losses provides defining the coverage area of the LTE networks. The main parameters of link budget are transmitter power, antenna gain, antenna direction, height of base station and subscriber antenna height. The LTE standard uses the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology on physical layer. OFDM subdivides the bandwidth available for signal transmission into a multitude of narrowband subcarriers. The basic LTE downlink physical resource can be seen as a time-frequency grid. The OFDM symbols are grouped into resource blocks. The resource blocks have a total size of 180k Hz in the frequency domain and 0.5 ms in the time domain. The important parameters of cell quality are measurements. In LTE network user equipment (UE) need to measure signal strength of its own and neighbor cell constantly, during idle, connected mode or handovers in order to keep the signal quality constant. UE measures RSRP and RSRQ in LTE. RSRP is the linear average of the downlink reference signals across the channel bandwidth.

The information of path losses provides defining the coverage area of the LTE networks. The main parameters of link budget are transmitter power, antenna gain, antenna direction, height of base station and subscriber antenna height.

The main task in this paper is to develop a mobile application (Android) that will receive the LTE measurements (RSRP, RSRQ) from the service base station. All of this data could be tagged with geographic information. Also, we need to develop the server software for data analysis, finding the „weak LTE coverage areas“ and making the recommendations of parameter correction.

Authors have developed the hardware and software system that allows to calculate the correction factors for the empirical propagation model based on LTE measurements getting from mobile devices. The software helps to get measurements from LTE base station. The predicted coverage area calculated with the theoretical model is 857 m. The black circle shows the cell radius after the correction factor adding. The cell range based on the correction factor is equal to 368 m. If we compare two coverages, we can see that the empirical model does not accurately indicate the coverage area.

Key words: LTE, optimization, COST 231 Hata, Android.

References

1. MORAY RUMNEY. LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, 2nd Edition, JohnWiley, 2013.
2. FAROOQ KHAN. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. Cambridge University Press, 2009.
3. HARRI HOLMA, ANTTI TOSKALA. LTE for UMTS — OFDMA and SC-FDMABasedRadio Access. John Wiley, 2009.
4. TIHVINSKIJ V. O. Seti mobil'noj svjazi LTE, tehnologii i arhitektura. Jeko-Trendz, 2010.
5. TRIANTAFYLLOPOULOU D.; KOLLIAS K.; MOESSNER K. QoS and Energy Efficient Resource Allocation in Uplink SC-FDMA Systems, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015. V. 14, Iss. 6, P. 3033–3045.
6. CHIEN-HUA CHEN, KAI-TEN FENG. Statistical Distance Estimation Algorithms With RSS Measurements for Indoor LTE-A Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. V. 66, Iss. 2, P. 1709–1722.
7. SHAKHOV V. Experiment Design for Parameter Estimation in Sensing Models // Springer Lecture Notes in Computer Science. 2013. V. 8072, P. 151–158.
8. HATA, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. V. 29 (3), P. 317–25.
9. SHAHOV V. V., JURGENSON A. N., SOKOLOVA O. D. Jeftektivnyj metod generacii sluchajnyh geometricheskikh grafov dlja modelirovanija besprovodnyh setej // Prikladnaja diskretnaja matematika. 2016. N 4 (34). S. 99–109.
10. KIRAN P.; JIBUKUMAR M. G.; PREMKUMAR C. V. Resource allocation optimization in LTE-A/5G networks using big data analytics // International Conference on Information Networking (ICOIN), 2016, P. 254–259.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОПОКРЫТИЯ СЕТИ LTE

Р. В. Ахпашев

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, Новосибирск, Россия

УДК 004.7

Операторы мобильной связи проектируют сеть с помощью эмпирических моделей распространения радиосигнала, точность которых вызывает сомнение. Одна из таких моделей — модель COST 231 Hata. Данная модель разработана для учета таких факторов как дифракция, отражение и рассеивание сигнала в условиях городской застройки. Она прогнозирует общие потери при распространении сигнала в сотовых сетях. В данной работе авторами был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий вычислить корректирующий коэффициент к эмпирической модели COST 231 Hata в сети LTE на основании измерений, выполненных мобильными устройствами. В частности, было разработано приложение на базе Android и серверная часть на базе языка Python.

Ключевые слова: LTE, оптимизация, COST 231 Hata, Android.

Введение. В настоящее время происходит бурный рост развития технологий широкополосного доступа в Интернет. Технология широкополосной беспроводной мобильной связи Long Term Evolution (LTE) является основным направлением эволюции сотовых сетей [1]. Современные технологии беспроводного широкополосного доступа развиваются по пути конвергенции услуг передачи данных, телефонии, телевидения и т. п. Интеграция различных типов информации в одной системе с различными требованиями к скорости передачи данных и времени задержки обуславливает необходимость обеспечения соответствующих механизмов управления качеством обслуживания, QoS [2].

Одним из важных моментов по развитию технологии является разработка адекватных методов анализа, учитывающих реалистические условия функционирования сети и внутреннее территориально-кодовое планирование сети. В сетях LTE все устройства работают на одинаковой частоте, что способствует значительному ограничению по числу мобильных станций на соту. Очевидно, что изначально сети планируют так, чтобы покрыть максимально большую площадь и предоставить основные виды услуг, таких как речь, передача данных, мультимедиа, но с усовершенствованием технологий, увеличением количества пользователей и потребностями в большей скорости и надежности передачи, т. е. качеством обслуживания, операторам приходится добавлять новые базовые станции для обеспечения качественного предоставления услуг. Последствием данного подхода является то, что с каждой новой добавленной станцией оператор терпит большие затраты на перепланировку сетей, так как приходится проводить драйв-тесты по всему городу.

Также операторы мобильной связи проектируют сети LTE при помощи эмпирических моделей распространения сигнала. Проблема заключается в том, что параметры данных

моделей рассчитывали в определенной местности, которая не всегда совпадает с местностью, для которой необходимо рассчитать зону радиопокрытия сети LTE. Одна из важных прикладных задач — корректно подобрать необходимые параметры для более точного прогнозирования радиопокрытия сети в условиях конкретной местности. Основная проблема состоит в том, что обслуживание абонентов, находящихся на краю соты, может осуществляться на основе неадекватного решения о состоянии сети на данный момент, что в дальнейшем приведет к деградации качества обслуживания.

В данной статье приводится обзор технологии LTE на основе монографий [1–4] и ряда журнальных публикаций. Также публикуются результаты разработки программного обеспечения для оптимизации радиопокрытия сети LTE. Разработанное приложение позволяет проводить онлайн мониторинг сети LTE с целью дальнейшей оптимизации характеристик сети, чтобы уменьшить временные и финансовые затраты операторов мобильной связи на драйв-тесты и анализ статистики.

1. Системы связи 4G на основе технологии LTE. 1.1. Общие сведения. Система LTE была разработана для того, чтобы предоставить пользователям доступ к всевозможным сервисам, а также к сети Интернет посредством протокола IP. Сеть LTE состоит из множества узлов. Все узлы сети принято делить на две категории. Узлы, относящиеся к сети радиодоступа (radioaccess), и узлы — опорной сети (corenetwork). Ключевым элементом, определяющим эффективность любой радиосети, являются алгоритмы и механизмы, используемые для передачи данных между базовой станцией (БС, в англоязычной литературе — eNodeB) и мобильными станциями (МС, в англоязычной литературе — UE). Далее рассматриваются основные характеристики сети LTE, относящиеся к сети радиодоступа.

Согласно требованиям к системе LTE, при радиусе соты в 5 км все требования к спектральной эффективности, пропускной способности и работе с мобильными абонентами должны поддерживаться. При радиусе соты в 30 км допускается ухудшение в показателях производительности.

Для обеспечения двунаправленной передачи данных между БС и МС технологией LTE поддерживается как частотный (FDD), так и временной дуплекс (TDD). Для частотного дуплекса определено 15 парных частотных диапазонов (частоты от 800 МГц до 3.5 ГГц), а для временного — 8. При этом ширина радиоканала может быть различной. Допустимы следующие значения: 1.4, 3, 5, 10, 15 и 20 МГц. В качестве систем множественного доступа в LTE используются OFDMA в нисходящем канале и SC-FDMA в восходящем канале [5].

При использовании технологии OFDMA весь имеющийся спектр разбивается на поднесущие, ортогональные друг другу. В зависимости от используемой ширины канала общее количество поднесущих может быть 72, 180, 300, 600, 900 или 1200. Каждая из поднесущих может иметь свой вид модуляции. Могут использоваться следующие модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM. Множественный доступ организуется за счет того, что одна часть поднесущих выделяется одному пользователю в кадре, другая часть — второму пользователю и т. д. Для более подробной информации см. описание физического уровня.

Основной плюс технологии OFDMA заключается в том, что она позволяет бороться при приеме сигнала с негативными эффектами, вызванными многолучевым распространением. Однако, этой технологии также присущи и некоторые недостатки. Основные из них заключаются в том, что данная технология очень чувствительна к синхронизации по частоте. А также сгенерированный OFDMA сигнал обладает высоким PAPR. Это, в свою очередь, сказывается на том, что используемый усилитель сигнала будет работать в нелинейных участках своей характеристики. Поэтому его эффективность будет низкой,

что достаточно критично для устройств с ограниченным запасом энергии (мобильных терминалов). Из-за этого в восходящем канале LTE используется другая технология множественного доступа, а именно SC-FDMA. Отличие SC-FDMA от OFDMA заключается в том, что в SC-FDMA используется дополнительная обработка сигнала для снижения PAPR. В SC-FDMA в качестве такой дополнительной обработки сигнала используется преобразование Фурье. Так же, как и в нисходящем канале, в восходящем канале могут использоваться следующие виды модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM.

Стандарт LTE также поддерживает технологию передачи MIMO, которая позволяет существенно увеличить пиковую скорость передачи данных и значение спектральной эффективности. Суть технологии MIMO заключается в том, что при передаче и приеме данных используется несколько антенн с каждой стороны. Разные антенны могут передавать одни и те же данные, в этом случае повышается надежность передачи данных, но не скорость передачи. Также разные антенны могут передавать различные потоки данных, при этом увеличивается скорость передачи данных. Максимально в нисходящем канале технологией LTE поддерживается схема 4x4. Это означает, что на передающей и приемной стороне используется по четыре антенны. В этом случае скорость передачи данных может быть увеличена до 4-х раз (в действительности чуть меньше из-за увеличения количества пилотных сигналов).

При использовании технологии MIMO и ширине канала 20 МГц максимальная скорость передачи данных может достигать 300 Мбит/с в нисходящем канале и 170 Мбит/с в восходящем.

В требованиях к LTE значения спектральной эффективности указаны как 5 бит/с/Гц для нисходящего канала и 2,5 бит/с/Гц для восходящего канала (что соответствует скоростям передачи данных в 100 Мбит/с и 50 Мбит/с). При этом высокие показатели производительности должны поддерживаться для мобильных пользователей, перемещающихся со скоростью до 120 км/ч.

Основные преимущества сети LTE:

- высокие скорости передачи данных;
- маленькая задержка (latency — время отклика) при передаче управляющей и пользовательской информации за счет усовершенствования архитектуры;
- масштабируемость: возможность работать в различной полосе частот, от 1,4 до 20 МГц;
- высокая спектральная эффективность.

1.1. Физический уровень LTE. Технологии OFDM и SC-FDMA.

На физическом уровне (на участке между UE и eNodeB) в стандарте LTE применяют технологию OFDM и SC-FDMA.

В восходящем канале допустимая мощность излучения значительно ниже, чем в нисходящем. Поэтому первичным становится энергетическая эффективность метода передачи информации с целью увеличения зоны покрытия, снижения стоимости терминального устройства и потребляемой им мощности.

Основной недостаток технологии OFDMA — высокое соотношение пиковой и средней мощности сигнала (PAR). Это связано с тем, что во временной области спектр OFDM-сигнала становится аналогичным Гауссову шуму, характеризующемуся высоким PAR.

В связи с этим для восходящего канала LTE была предложена новая технология — SC-FDMA. Принципиальное ее отличие — если в OFDMA на каждой поднесущей одно временно передается свой модуляционный символ, то в SC-FDMA поднесущие модулируют

ются одновременно и одинаково, но модуляционные символы короче. То есть в OFDMA символы передаются параллельно, в SC-FDMA — последовательно. Такое решение обеспечивает меньшее отношение максимального и среднего уровней мощности по сравнению с использованием обычной модуляции OFDM, в результате чего повышается энергоэффективность абонентских устройств и упрощается их конструкция (существенно снижаются требования к точности частотных параметров передатчиков).

Структура SC-FDMA-сигнала во многом аналогична технологии OFDM. Также используется композитный сигнал — модуляция множества поднесущих, расположенных с шагом Δf . Принципиальное отличие в том, что все поднесущие модулируются одинаково — т. е. единовременно передается только один модуляционный символ.

Поддержка систем MIMO. Как уже отмечалось выше, в системах LTE предусмотрены различные режимы работы с несколькими передающими и принимающими антеннами. Работа таких систем может быть организована по двум принципам: по принципу пространственного уплотнения и по принципу пространственно-временного кодирования.

Суть первого принципа заключается в том, что различные передающие антенны будут передавать различные информационные блоки. Передача данных ведется параллельно с двух или с четырех антенн. На приемной стороне производится прием и разделение сигналов различных антенн, и становится возможным увеличение максимальной скорости передачи данных в 2 или в 4 раза.

В системах, построенных по принципу пространственно-временного кодирования, со всех передающих антенн осуществляется передача одного и того же потока данных с использованием схем предварительного кодирования с целью обеспечения лучшего качества приема. Так, например, при формировании сигнала с двух передающих антенн поток комплексных модуляционных символов, которые будут модулировать одну из поднесущих OFDMA-сигнала, разбивается на нечетные (x_1) и четные (x_2) символы, т. е. данные модуляционные символы соответствуют одной поднесущей, но разным OFDMA-символам.

В системах MIMO, построенных по принципу TD с четырьмя передающими антеннами, в какой-либо момент времени ведется передача сигнала только с двух антенн. При этом последовательность комплексных модуляционных символов разбивается на „четверки“ символов x_1 , x_2 , x_3 и x_4 , которые будут передаваться в порядке.

Структура кадра. Каждому абонентскому устройству (UE) в каждом слоте назначается определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области (рис. 1) — ресурсная сетка. Ячейка ресурсной сетки — так называемый ресурсный элемент — соответствует одной поднесущей в частотной области и одному OFDM-символу — во временной. Ресурсные элементы образуют ресурсный блок — минимальную информационную единицу в канале. Ресурсный блок занимает 12 поднесущих (т. е. 180 кГц) и 7 или 6 OFDM-символов, в зависимости от типа циклического префикса — так, чтобы общая длительность слота составляла 0,5 мс. Число ресурсных блоков NRВ в ресурсной сетке зависит от ширины полосы канала и составляет от 6 до 110 (ширина частотных полос восходящего/нисходящего каналов в LTE — от 1,4 до 20 МГц). Ресурсный блок — это минимальный ресурсный элемент, выделяемый абонентскому устройству планировщиком базовой станции. О распределении ресурсов в каждом слоте базовая станция сообщает в специальном управляющем канале (рис. 1).

Каждая поднесущая модулируется посредством 4-, 16- и 64-позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QPSK, 16-QAM или 64-QAM). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит. При стандартном префиксе символ-

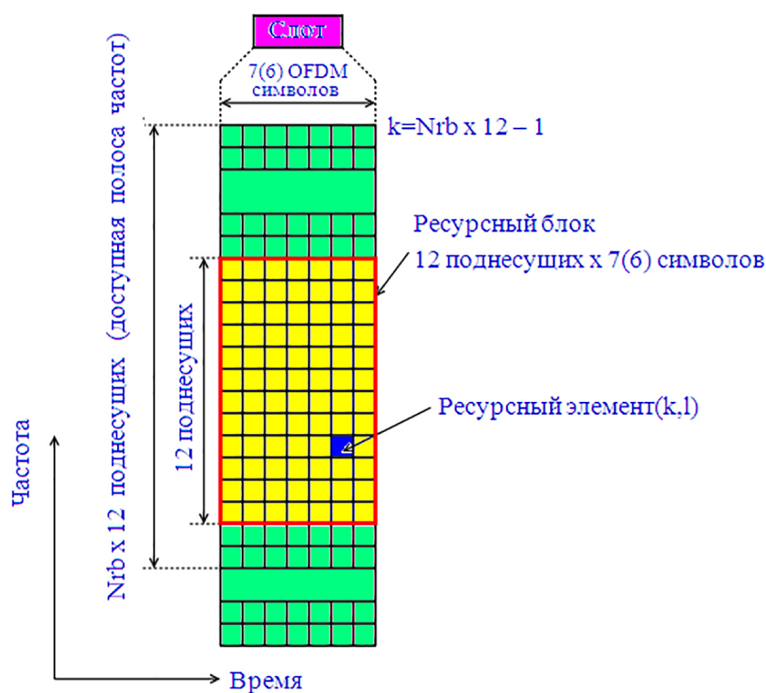


Рис. 1. Ресурсная сетка сети LTE

ная скорость составит 14000 символов/с, что соответствует при FDD-дуплексе агрегатной скорости от 28 до 84 кбит/с на поднесущую. Сигнал с полосой 20 МГц содержит 100 ресурсных блоков или 1200 поднесущих, что дает общую агрегатную скорость в канале от 33,6 до 100,8 Мбит/с.

Обмен между базовой станцией (БС) и мобильной станцией (МС) строится по принципу циклически повторяющихся кадров (в терминологии LTE — радиокадр). Длительность радиокадра — 10 мс. Все временные параметры в спецификации LTE привязаны к минимальному временному кванту $T_s = 1/(2048 \times \Delta f)$, где Δf — шаг между поднесущими, стандартно — 15 кГц. Таким образом, длительность радиокадра — $307200T_s$. Сам же квант времени соответствует тактовой частоте 30,72 МГц, что кратно стандартной в 3G-системах (WCDMA с полосой канала 5 МГц) частоте обработки 3,84 МГц ($8 \times 3,84 = 30,72$).

Функционирование сетей LTE может осуществляться в частотных диапазонах с различной шириной. Сигналы нисходящего или восходящего направления могут занимать полосы от 1,4 до 20 МГц в зависимости от количества активных ресурсных блоков, понятие которого будет дано ниже. Границы частотного диапазона, занимаемого сигналом, всегда определяются симметрично относительно несущей частоты.

Для любого частотного диапазона вводится частотная сетка с шагом 100 кГц, называемым канальным растром; это означает, что центральные (несущие) частоты каналов должны быть кратны 100 кГц.

Все временные значения выражаются в единицах элементарного временного интервала, равного $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ с.

Передача информации в восходящем и нисходящем направлениях организована в кадрах (radio frames) длительностью 10 мс, которые, в свою очередь, подразделяются на более мелкие временные структуры-слоты. При этом возможны два типа структур кадра: FDD и TDD.

Таблица 1

Конфигурация кадра с временным разделением

Конфигурация вверх-вниз	Периодичность вверх-вниз	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 мс	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 мс	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 мс	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 мс	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 мс	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

FDD предназначен для частотного дуплексирования — как для полного дуплекса, так и для полудуплекса. Такой кадр состоит из 20 слотов (длительностью 0,5 мс), нумерованных от 0 до 19. При полудуплексном режиме радиокадры в восходящем и нисходящем каналах передаются параллельно, но с оговоренным в стандарте временным сдвигом. В полудуплексном режиме физические каналы по-прежнему разделены дуплексным расстоянием, однако UE не может одновременно работать на прием и на передачу.

Радиокадр типа TDD предназначен только для временного дуплексирования. Он состоит из двух полукадров длительностью по 5 мс. Каждый полукадр включает 5 субкадров длительностью 1 мс. Стандарт предусматривает два цикла временного дуплексирования — 5 и 10 мс. В первом случае 1-й и 6-й субкадры идентичны и содержат служебные поля DwPTS, UpPTS и защитный интервал GP. При 10-мс цикле TDD 6-й субкадр используется для передачи данных в нисходящем канале. Субкадры 0 и 5, а также поле DwPTS всегда относятся к нисходящему каналу, а субкадр 2 и поле UpPTS — к восходящему. Возможно несколько вариантов длительности полей DwPTS, UpPTS и GP, но их сумма всегда равна 1 мс.

В табл. 1 приведены возможные варианты конфигураций „восходящий–нисходящий“, формируемые для каждого подкадра в пределах одного кадра. Символ „D“ означает, что такой подкадр зарезервирован для нисходящего направления, а символ „U“ — для восходящего.

Необходимость перехода от одного направления к другому означает наличие в кадрах специальных подкадров, содержащих пилотное поле, называемое точкой переключения, обозначаемое в табл. 1 символом „S“. В этом поле выделяют специальные пилотные слоты нисходящего направления DwPTS и пилотные слоты восходящего направления UpPTS, которые располагаются последовательно, вместе с защитным полем GP.

1.3. *Основные блоки системной информации.* Для корректного и эффективного функционирования сети LTE базовая станция (eNB) передает необходимые конфигурационные параметры по радиointерфейсу всем мобильным станциям (UE), находящимся в соте. К таким параметрам относится информация о полосе канала (bandwidth), различные параметры, которые используются мобильной станцией при выборе соты для подключения, настройки канала множественного доступа (PRACH), значения всевозможных таймеров и множество другой информации.

Системная информация передается в Master Information Block (MIB) и System Information Blocks (SIB) блоках. На рис. 2 обозначены логические, транспортные и физические каналы, которые используются для передачи MIB и различных SIB.

Ширина нисходящего канала (Downlink Channel bandwidth)	
Конфигурация канала PHICH	Длительность PHICH
	Ресурсы для PHICH
Номер кадра (System Frame Number (SFN))	

Рис. 2. Информация, содержащаяся в MIB блоке информации

Информация для подключения к сектору (Cell Access Information)	Список PLMN (от 1 до 6 элементов)	PLMN Identity
		Cell Reserved for Operator Use
	Tracking Area Code	
	Cell Identity	
	Cell Barred	
	Intra-Frequency Cell Reselection Allowed	
	CSG Indication	
	CSG Identity	
Информация для выбора сектора (Cell Selection Information)	Qrxlevmin	
	Qrxlevminoffset	
Pmax		
Frequency Band Indicator		
Scheduling Information List (от 1 до 32 элементов)	SI Periodicity	
	SIB Mapping	
SI Window Length		
System Information Value Tag		

Рис. 3. Строение SIB1 блока

Как видно из рисунка, только Master Information Block передается по транспортному каналу BCH и физическому каналу PBCH. Все остальные блоки системной информации — SIB1-SIB16 — передаются по цепочке DL-SCH-PDSCH. При этом, следует отметить, что для передачи блока SIB1 введено специальное RRC сообщение.

В спецификациях 3GPP четко задаются ресурсные блоки, которые используются для передачи блока системной информации MIB. Поэтому никакой дополнительной информации для того, чтобы мобильные станции успешно прочитали MIB, передавать не нужно. Для деталей передачи MIB см. канал PBCH.

В отличие от MIB, для передачи блоков системной информации SIB могут использоваться различные ресурсы, отведенные под физический канал PDSCH. Соответственно, для того, чтобы мобильные станции смогли корректно принять блоки системной информации SIB, необходимо сообщить, какие именно ресурсные блоки содержат SIB блоки. Для этого используется канал PDCCH. Так как блоки системной информации SIB являются общей информацией для всех мобильных станций, данные о местоположении этих блоков в канале PDCCH скремблируются специальным RNTI, который называется SI-RNTI. Значение SI-RNTI, согласно стандарту, равно FFFF.

Одной из задач базовой станции является выделение ресурсов для передачи блоков системной информации (MIB, SIBs) с необходимой периодичностью. Периодичность передачи блоков MIB и SIB1 задается спецификациями 3GPP. Периодичность передачи остальных блоков системной информации может быть различной и определяется производителем оборудования или конфигурационными параметрами.

В начале работы мобильная станция должна прочитать блок системной информации MIB. После этого она имеет всю необходимую информацию для нахождения блока системной информации SIB1. В свою очередь, блок системной информации SIB1 содержит данные о периодах передачи всех остальных блоков системной информации.

Master Information Block является первым блоком системной информации, который должна принять мобильная станция, чтобы подключиться к LTE сети. Данный блок передается по физическому каналу PBCH. Блок системной информации MIB может быть полностью получен в каждом радиокадре (фрейме), то есть каждые 10 мс. При этом, с целью повысить надежность передачи этого блока, системной информации добавляется большая избыточность на этапе кодирования. Далее приводится список элементов, которые содержит в себе MIB.

Рассмотрим каждый элемент подробнее:

— Ширина нисходящего канала указывается в количестве ресурсных блоков (ResourceBlocks — RB). Соответственно, могут быть указаны значения: 6, 15, 25, 50, 75 и 100. Прочитав эту информацию, мобильная станция может найти каналы PICH (подтверждения HARQ) и PDCCH (расписание передач). После этого мобильная станция может определить, в каких ресурсных блоках будут передаваться остальные блоки системной информации.

— Конфигурация канала PICH определяется двумя параметрами: длительностью (может быть 'normal' и 'extended') и количеством ресурсов, которые отводятся под передачу этого канала (PICHGroupScalingFactor, может быть 1/6, 1/2, 1 и 2).

— Номер кадра (SystemFrameNumber — SFN), где передаются старшие 8 бит номер кадра. Всего номер кадра состоит из 10 бит и может принимать значения от 0 до 1023.

SystemInformationBlock 1 (SIB1) является вторым блоком системной информации, который должна принять мобильная станция, чтобы подключиться к LTE сети. Данный блок передается по физическому каналу PDSCH (PhysicalDownlinkSharedChannel) каждые 20 мс, то есть SIB1 передается в каждом втором кадре (фрейме). Говоря более точно, блок системной информации SIB1 передается в каждом кадре, номер которого кратен 8. После чего следуют три повторные передачи SIB1 в кадрах, номера которых кратны двум. Далее приводится список элементов, которые содержит блок системной информации SIB1.

Рассмотрим каждый элемент подробнее:

— Список PLMN (Public Land Mobile Network) Identity может содержать до шести элементов (таким образом один сектор может относиться сразу к нескольким сетям). PLMN

является идентификатором сети и состоит из кода страны и кода мобильной сети (подробнее об PLMN можно почитать в статье об идентификаторах). Первый PLMN в списке называется Primary PLMN.

— Флаг „Cell Reserved for Operator Use“ присутствует для каждого указанного PLMN и сообщает о том, зарезервирован или нет данный сектор для нужд оператора связи.

— Tracking Area Code (TAC) — идентификатор зоны отслеживания, который может принимать значения от 0 до 65536. Данный идентификатор относится ко всем PLMN, которые перечислены в предыдущем списке.

— Cell Identity — идентификатор сектора (соты). Длина данного идентификатора составляет 28 бит. При этом данный идентификатор содержит в себе идентификатор базовой станции (eNB), который имеет длину от 20 до 28 бит. Таким образом на одной базовой станции может быть размещено от 1 до 256 секторов. Идентификатор сектора относится ко всем PLMN, указанным в первом списке. Идентификатор сектора может быть соединен с PLMN, чтобы образовать глобальный уникальный идентификатор сектора.

— Флаг Cell Barred сообщает мобильным станциям, разрешено или запрещено выбирать данный сектор (процедура cell reselect), когда они находятся в состоянии Idle Mode.

— Флаг Intra-Frequency Cell Reselection сообщает мобильным станциям, разрешено или запрещено им выбирать другие сектора (процедура cell reselect), функционирующие в том же частотном диапазоне, что и текущий сектор, когда флаг „Cell Barred“ выставлен.

— Поле Closed Subscriber Group (CSG), выставленное в 1, сообщает о том, что доступ к данному сектору разрешен только для мобильных станций, чей идентификатор CSG совпадает со значением Closed Subscriber Group, указанным в следующем поле.

— Требование к минимальному уровню радиосигнала (по сути, к значению RSRP — Reference Signal Received Power), при котором разрешается выбрать текущий сектор для подключения, задается с помощью поля $Q_{rxlevmin}$. Мобильная станция переданное значение $Q_{rxlevmin}$ умножает на 2 и прибавляет 1.

— Поле $Q_{rxlevminoffset}$ определяет значение, которое вычитается из $Q_{rxlevmin}$ во время периодической процедуры поиска сектора, который относится к более приоритетной сети (PLMN). Фактическое значение, которое вычитается из $Q_{rxlevmin}$, получается умножением $Q_{rxlevminoffset}$ на 2.

— Поле P_{max} определяет максимальную разрешенную мощность передачи в восходящем канале. Этот параметр также может влиять на процедуру выбора сектора в том случае, если максимальная мощность мобильной станции меньше, чем разрешенная максимальная мощность передачи в восходящем канале для текущего сектора.

— Так как существует несколько пересекающихся частотных диапазонов для нисходящего канала, однозначно определить какой из них используется, просто приняв нисходящий канал, невозможно. Поэтому в поле Frequency Band Indicator передается идентификатор используемого частотного диапазона.

— Также блок системной информации SIB1 содержит расписание передач для блоков системной информации от 2 по 16. Расписание передач задается двумя параметрами: System Information Periodicity и System Information Window. Периодичность (System Information Periodicity) задается для каждой группы блоков системной информации своя. А окно передачи (System Information Window) задается общим для всех блоков системной информации.

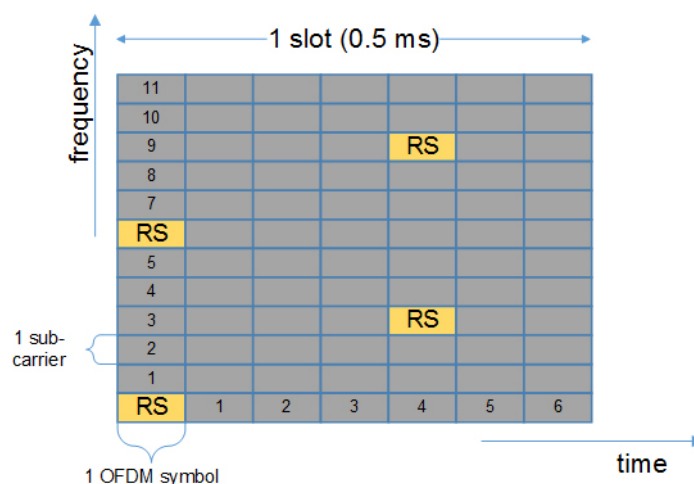


Рис. 4. Распределение пилотных сигналов в одном ресурсном блоке с нормальным циклическим префиксом

— Флаг System Information Value Tag выставляется в том случае, если в каком-то из блоков системной информации со 2 по 16 произошли изменения, и мобильным станциям надо обновить информацию.

1.4. *Измерения в LTE*. Перед началом работы в сети LTE мобильной станции необходимо выбрать базовую станцию, которая будет ее обслуживать. Кроме конфигурационных параметров, которыми можно повлиять на этот выбор, основным показателем, на основе которого происходит выбор базовой станции, является состояние радиоканала между мобильной станцией и базовой станцией. После этого, во время работы в сети мобильная станция должна отслеживать изменения в состоянии радиоканала как до обслуживаемой базовой станции, так и до соседних базовых станций. Если измерения покажут, что состояние радиоканала с одной из соседних базовых станций улучшилось и превосходит качество канала между мобильной станцией и текущей обслуживаемой базовой станцией, то мобильная станция должна проинформировать обслуживаемую базовую станцию об этом. Получив такого рода информацию, базовая станция может инициировать процедуру хэндовера.

Далее рассматривается, как в сетях LTE организованы процедуры измерений, которые проводятся мобильными станциями для определения качества радиоканала канала.

Для определения качества радиоканала может использоваться одна из следующих характеристик: RSRP или RSRQ.

RSRP — линейное усреднение мощности ресурсных элементов, несущих в себе опорные сигналы (Reference Signal). Распределение пилотных сигналов показано на рис. 4.

RSRQ — показатель качества принятых пилотных сигналов. Рассчитывается по формуле

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}, \quad (1)$$

где $RSSI$ — средняя мощность принятых сигналов во всем OFDM-символе, измеряемые в одной антенне, в N ресурсных блоках;

N — количество ресурсных блоков в которых проходило измерение.

На рис. 5 показаны OFDM-символы, в которых промеряется значение $RSSI$.

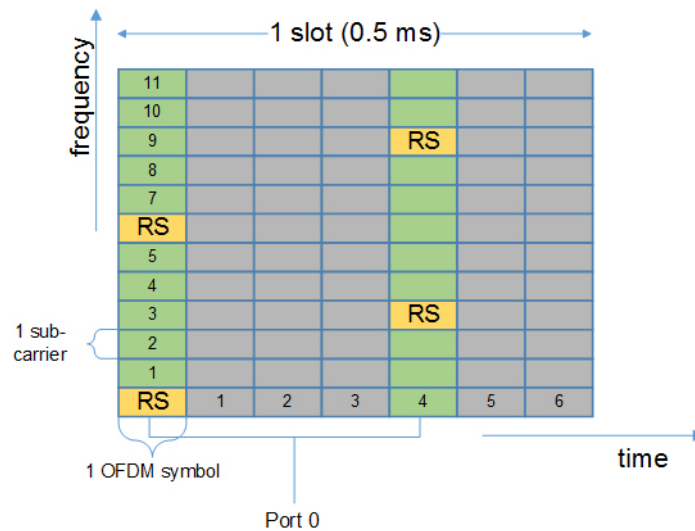


Рис. 5. Местоположение OFDM-символов, где измеряется RSSI

2. Планирование сетей LTE. Общие сведения. Для планирования сетей LTE выпускается дорогое и сложное программное обеспечение, но вероятно, что инженеры, студенты или продвинутые пользователи будут заинтересованы в простом инструменте для оценки пропускной способности и дальности действия базовой станции сети LTE.

Для оценки дальности действия сети необходимо составить бюджет мощности. К основным статьям мощностного бюджета следует отнести мощность передатчика базовой станции (данная цифра ограничена стандартами 3GPP) и усиление антенны как зависимость ее направленности. Здесь следует отметить, что в сетях LTE планируется использование адаптивных антенных решеток с возможностью фокусирования луча на оборудование пользователя. Такие антенны способны определить направление прихода сигнала и сформировать узкий пучок по этому направлению, что позволит сильно снизить интерференцию и, как следствие, получить значительное усиление сигнала. Сумма мощности передатчика и усиления антенны, из которой вычтены потери в кабелях и разъемах, носит название эффективная изотропно-излучаемая мощность. Необходимо учитывать различные факторы, влияющие на ухудшение качества передачи сигнала, такие как потери из-за проникновения сигнала в автомобиль или в здание, затухание сигнала в фидере, неравномерность местности, тепловой шум и т. д.

Также основной задачей планирования сетей LTE является территориально-кодовое планирование сетей ввиду того, что в данной технологии используется одна общая полоса частот. Как было сказано выше, абоненты постоянно должны проверять качество принимаемого сигнала, это напрямую влияет на качество обслуживания. В основном сети LTE строят на трехсекторной основе, различие каждого сектора в том, что в каждом из них используется своя схема распределения пилотных сигналов (RS). Основной проблемой является то, что операторы сотовой связи не всегда учитывают данный параметр, что влечет за собой большие потери в качестве обслуживания.

Расчет бюджета мощности. Модели потерь при распространении радиосигнала играют важную роль в разработке сотовых систем для определения ключевых параметров системы, таких как мощность передачи, частота, высота антенны и так далее. Некоторые модели были предложены для сотовых систем, работающих в различной окружающей

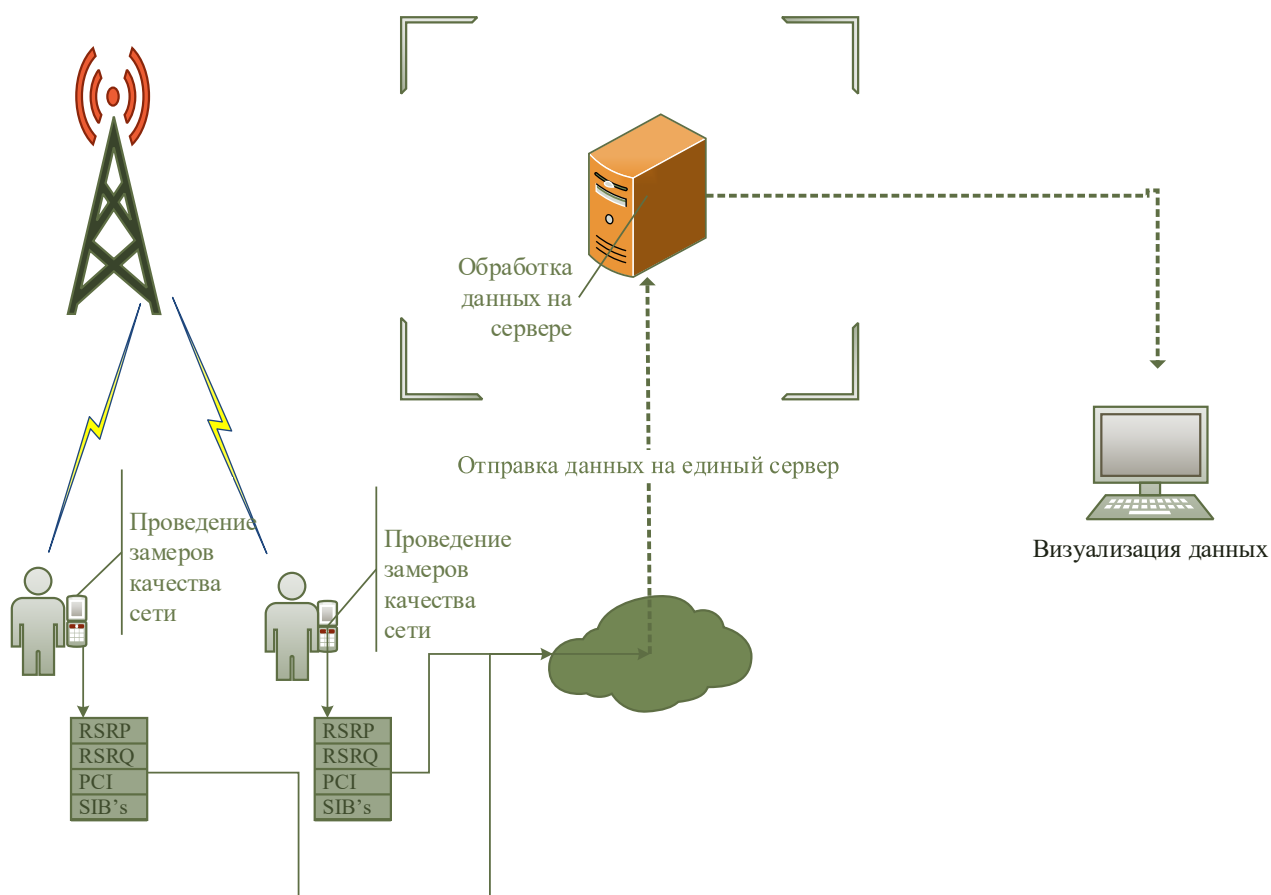


Рис. 6. Общая схема работы приложения

среде (городской, сельской и т. д.). Каждая из моделей использует свои определенные параметры для обеспечения точности предсказания распространения сигнала. Для оценки зависимости качества сигнала от расстояния могут использоваться как линейные, так и нелинейные (экспоненциальные) модели [6, 7].

В данной работе применялась эмпирическая модель Hata и рассчитан бюджет канала для расчета потерь при передаче в районах городской застройки для дальнейшего определения зоны покрытия сетей LTE. К основным параметрам мощностного бюджета следует отнести мощность передатчика базовой станции и усиление антенны как зависимость ее направленности, высоту антенны базовой станции и высоту антенны абонента. Математическая формула модели записывается следующим образом:

$$L_p = -K_1 - K_2 \log(f) + 13,82 \log(h_{bs}) + a(h_m) - [44,9 - 6,55 \log(h_{bs})] \log(r) - K_0, \quad (2)$$

где L_p — потери (в dB);

f — несущая частота (в МГц);

h_{bs} — высота антенны (в метрах) базовой станции;

$a(h_m)$ — коэффициент, зависящий от высоты антенны мобильного устройства;

R — расстояние (в километрах) между абонентом и базовой станцией;

Значения коэффициентов K_1 , K_2 , K_0 для данной были вычислены экспериментально и имеют соответствующие значения.

Большую роль в расчете бюджета мощности играют такие параметры как

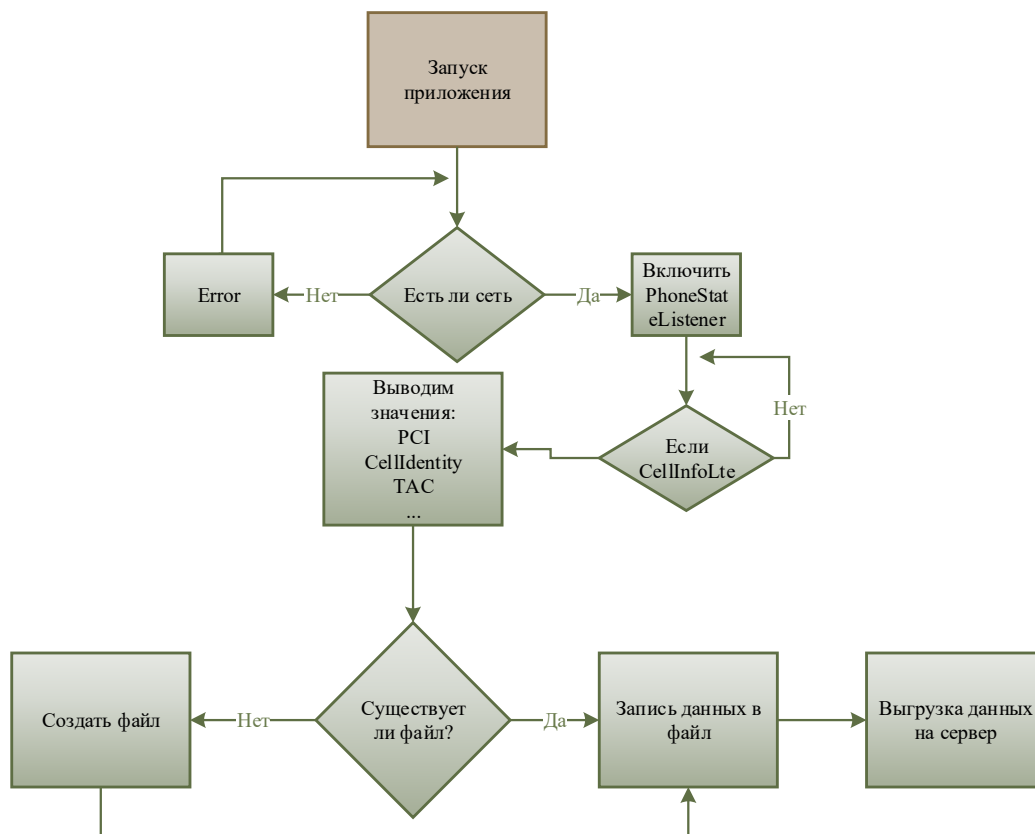


Рис. 7. Алгоритм работы приложения

- мощность передатчика базовой станции;
- потери в фидерном тракте;
- запасы на быстрые замирания;
- коэффициент усиления антенны базовой станции;
- потери при распространении сигнала.

Особенности планирования PCI в LTE. В сетях LTE присутствуют 3 схемы распределения опорных сигналов во фрейме, которые рассчитываются в зависимости от номера Physical-layerCellIdentity.

Данное разделение распределения опорных сигналов необходимо для того, чтобы абонент мог определить, в каком положении он находится.

Из-за неравномерности покрытия и высокого уровня интерференции, зачастую не могут гарантировать стопроцентный сервис. На данный момент эти проблемы решают с помощью драйв-тестов, анализа и обработки полученной информации, что требует больших финансовых и трудовых затрат из-за необходимости выезда инженеров и содержания автомобильного парка для этих целей.

3. Разработка и программная реализация. *Используемые языки программирования и ПО.* При выборе языка программирования для решения поставленной задачи написания приложения под Android, для сбора данных и для дальнейшей отправки на сервер рассматривался язык Java, т. к. именно этот язык программирования используется для написания приложения под Android. Средой разработки была выбрана AndroidStudio. Простота ее использования позволяет быстро находить нужные библиотеки и в режиме онлайн

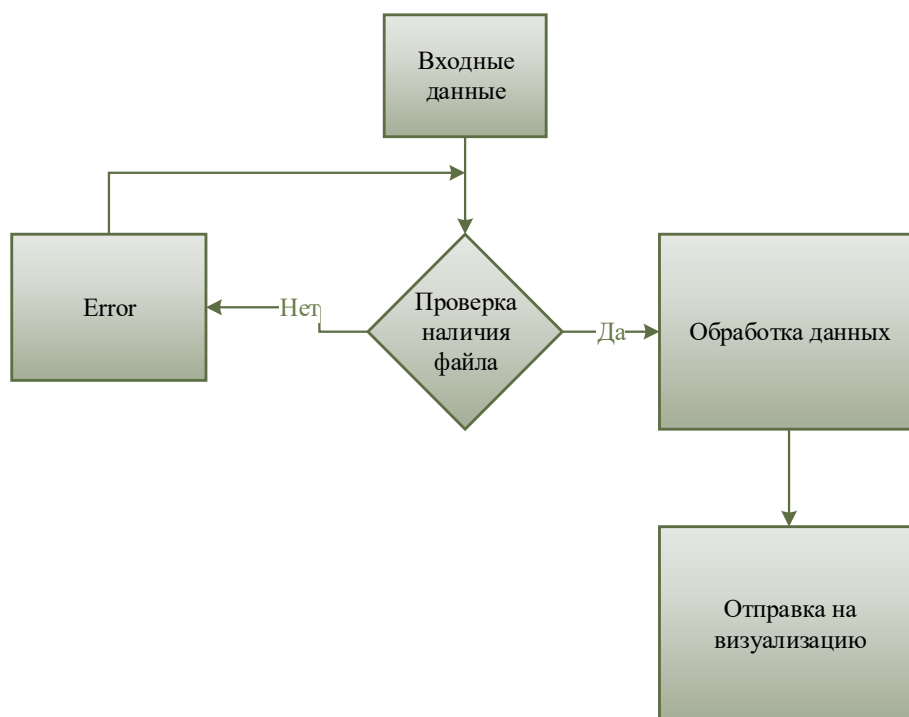


Рис. 8. Упрощенная схема работы сервера

наблюдать за ходом работы приложения с помощью эмулятора. Для разработки серверной части использовался бесплатный сервер Denwer, он позволяет установить локальный сервер практически на любом компьютере. Визуализация данных была сделана с помощью поисково-информационной картографической службы Яндекс (Яндекс.Карты).

Обработка данных на сервере осуществлялась с помощью языка Python. Это свободный интерпретируемый объектно-ориентированный расширяемый язык программирования очень высокого уровня. При выборе Python были приняты во внимание следующие аргументы. Все исходные тексты интерпретатора и библиотек доступны для любого использования, включая коммерческое. Кроме того, имеется API для модулей расширения, которые могут быть созданы на других языках и вызваны из программ на Python. Это удобно в случае необходимости повысить производительность программного обеспечения. Если в ходе применения и развития приложения потребуется решать задачу оптимального распределения ресурсов LTE сети с опорой на результаты трудозатратных вычислительных методов, включающих генерацию топологий беспроводных сетей [9] или аналитику больших данных [10], то данные методы лучше реализовать с использованием языка Си.

Структура разработанного приложения. На рис. 6 изображена общая схема работы приложения.

Структура разработанной программы представлена в виде алгоритма, на котором видна общая картина работы программного приложения.

На рис. 7 изображен алгоритм работы приложения.

На рис. 8 показана упрощенная схема работы сервера.

Схема с расчетом теоретической зоны покрытия с дальнейшим вычислением корректирующего коэффициента показана на рис. 9. Вычисление корректирующего коэффициента основано на данных, полученных с абонентского устройства.

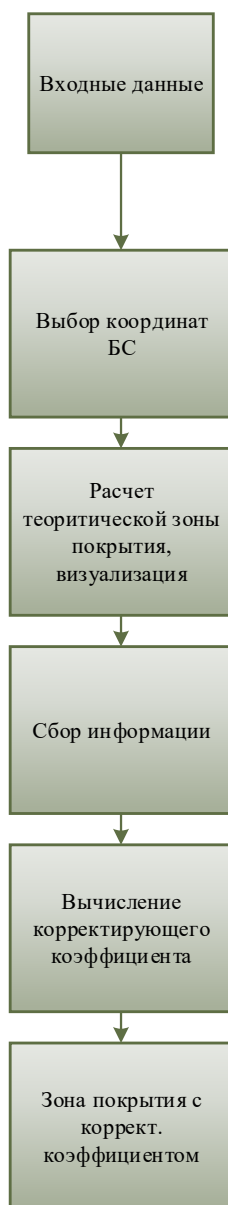


Рис. 9. Схема алгоритма визуализации зоны покрытия

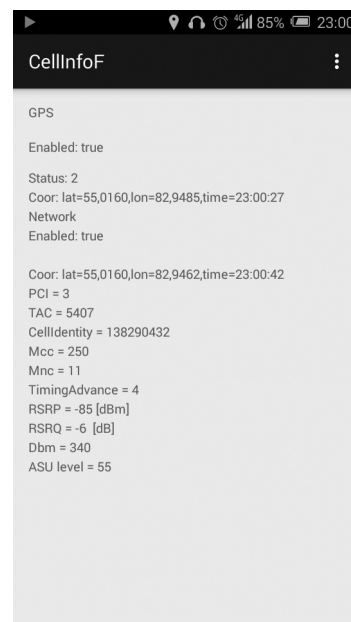


Рис. 10. Главный экран мобильного приложения

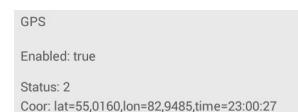


Рис. 11. Определение координат с помощью GPS

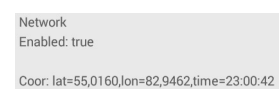


Рис. 12. Определение координат с помощью Интернета

Мобильное приложение. В ходе данной работы было разработано мобильное приложение на базе Android, которое позволяет собирать системную информацию о сети LTE с дальнейшей отправкой на сервер для обработки данных. На рис. 10 показан главный экран приложения.

Определение координат абонента реализовано двумя способами: определение координат с помощью GPS, а также с помощью сети Интернет (как показано на рис. 12). Данная часть поля показывает:

- Enable — состояние модуля GPS (true — включено);
- Status — определяет качество соединения GPS;
- Coor — определены широта и долгота;
- Time — выводит текущее время.

Таблица 2

Результаты тест-драйва

Координаты	Теоретические значения (dBm)	Экспериментальные значения (dBm)
55.0128, 82.9508	-73	-90
55.0122, 82.95	-91	-105
55.0125, 82.9492	-96	-97
55.0128, 82.9481	-104	-113
55.0133, 82.9470	-108	-92
55.0129, 82.9493	-90	-118
Среднее отклонение (dBm):		13,3

Параметры аналогичны предыдущему примеру, только применимые к сети Интернет. Здесь мы видим небольшое различие координат, это связано с тем, что GPS и сеть Интернет определяют местоположение с небольшой погрешностью.

Для поставленной задачи необходимы следующие параметры сети LTE:

- PCI — физический адрес сектора, в котором находится абонент;
- TAC — определение Trackingare, в которой находится абонент;
- CellIdentity — определяет обслуживающую базовую станцию;
- Mcc — мобильный код страны;
- Mnc — мобильный код оператора связи;
- TimingAdvance — задержка при распространении сигнала;
- RSRP — среднее значение мощности принимаемого сигнала;
- RSRQ — качество принимаемого сигнала;
- ASUlevel — напрямую связан с RSRP, показывает идентификатор RSRP.

Данные записываются в формате *.txt, как показано на рис. 13.

Результаты сканирования сети LTE в г. Новосибирске. На основе эмпирической модели распространения сигнала была рассчитана зона покрытия одной базовой станции, состоящей из трех секторов (см. рис. 14).

Данный расчет зоны покрытия является теоретическим и не показывает реальное состояние сотовой сети именно в данной местности ввиду того, что данные о планировании сети являются конфиденциальной информацией. В ходе расчета был вычислен радиус зоны покрытия, равный 857 метрам.

Был проведен тест-драйв разработанного приложения, в ходе чего были получены результаты, которые показаны в табл. 2.

Был вычислен корректирующий коэффициент, равный 13,3 dBm (см. рис. 15).

В результате этого зона покрытия базовой станции значительно сократилась, что и показывает рис. 16.

Радиус базовой станции с учетом корректирующего коэффициента равен 368 м.

Если сравнить рис. 14 и рис. 16, мы увидим, что эмпирическая модель распространения радиосигнала не всегда точно определяет зону покрытия базовой станции. В результате зона покрытия с учетом реальных значений качества радиосигнала оказалась почти в 2 раза меньше, чем предсказанная с помощью эмпирической модели зона покрытия.

Также в данной работе были выявлены коллизии PCI-планирования, как показано на рис. 17.

```

HTMLViewer
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
CellIdentity = 138344706
RSRP = -86
RSRQ = -7
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
CellIdentity = 138344706
RSRP = -84
RSRQ = -5
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
CellIdentity = 138344706
RSRP = -83
RSRQ = -5
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
CellIdentity = 138344706
RSRP = -84
RSRQ = -6
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
CellIdentity = 138344706
RSRP = -87
RSRQ = -7
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
CellIdentity = 138344706
RSRP = -85
RSRQ = -8
GPS = Coor: 55,0131;82,9506;14:51:01
PCI = 93
TAC = 5407
    
```

Рис. 13. Сохранение информации в *.txt документ

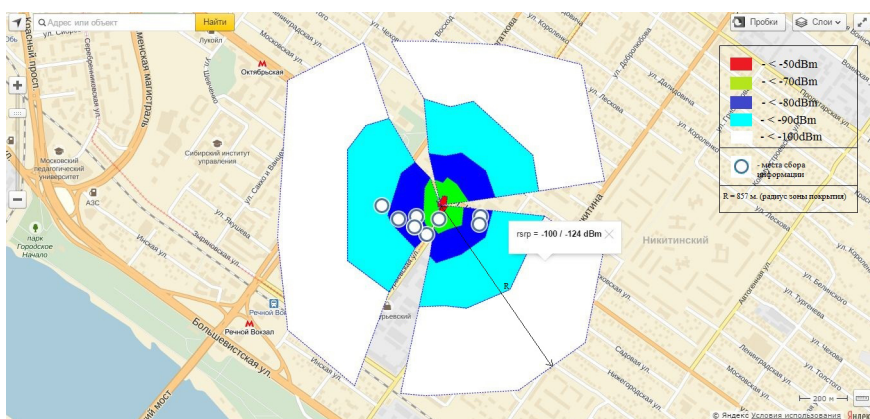


Рис. 14. Теоретический расчет зоны покрытия LTE

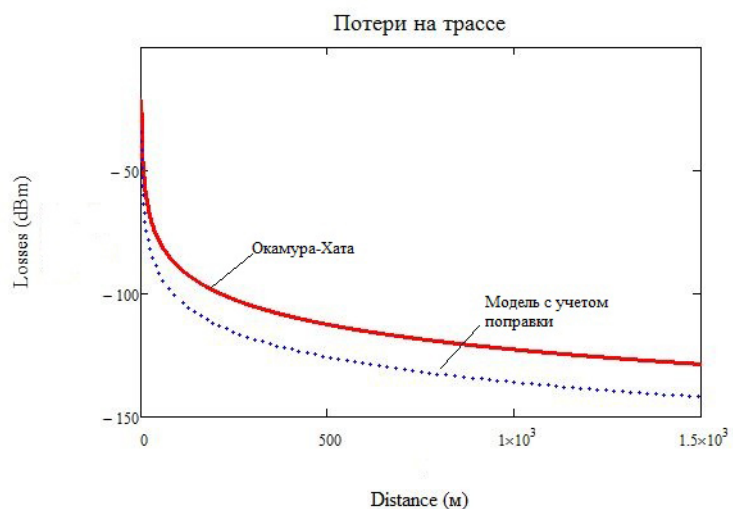


Рис. 15. Корректировка эмпирической модели с учетом корректирующего коэффициента

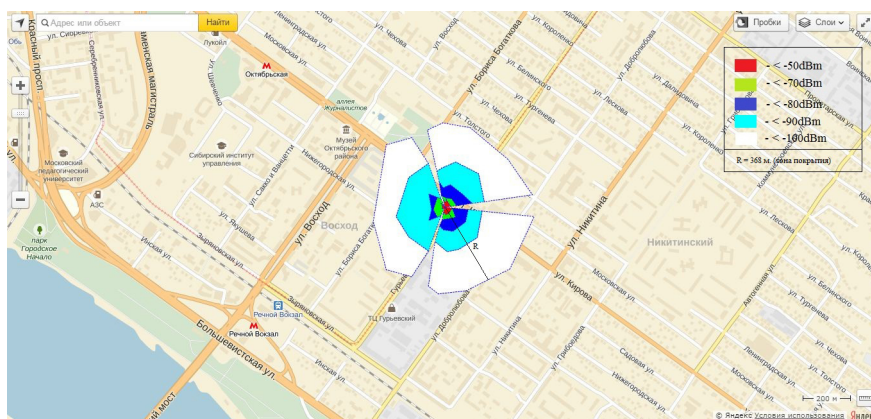


Рис. 16. Зона покрытия базовой станции с учетом корректирующего коэффициента

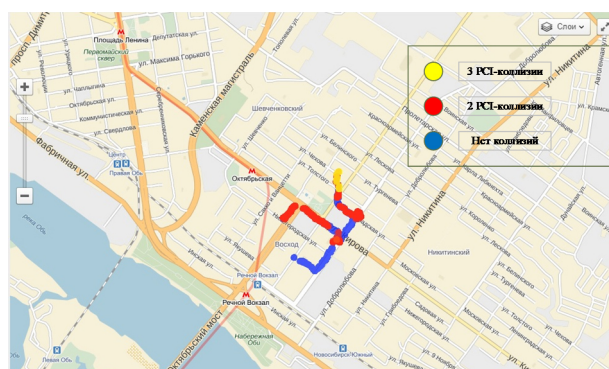


Рис. 17. Выявление PCI-коллизий

Из рисунка мы видим, что существуют проблемы с территориально-кодовым планированием. Разработанное программное обеспечение помогает выявить данные проблемы без временных и финансовых затрат.

Заключение. В результате данной работы разработано мобильное приложение на базе Android, позволяющее собирать системную информацию о сети LTE и отправлять ее в формате *.txt на сервер для дальнейшей централизованной обработки. Разработано серверное программное обеспечение для анализа и оптимизации ключевых показателей эффективности мобильных сетей LTE. Реализованы анализ, обработка и визуализация полученных данных на сервере. Произведено вычисление корректирующих коэффициентов для эмпирических моделей распространения радиосигнала в условиях застройки г. Новосибирска. В результате вычисления среднего отклонения теоретических результатов от экспериментальных можно сделать корректировку существующей модели распространения радиосигнала на 13,3 dBm, что уменьшает радиус зоны покрытия базовой станции в 2 раза. Выявлены PCI-коллизии между сотами оператора „Мегафон“ сети LTE в г. Новосибирске.

Список литературы

1. MORAY RUMNEY. LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, 2nd Edition, JohnWiley, 2013.
2. FAROOQ KHAN. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. Cambridge University Press, 2009.

3. HARRI HOLMA, ANTTI TOSKALA. LTE for UMTS — OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. John Wiley, 2009.
4. ТИХВИНСКИЙ В. О. Сети мобильной связи LTE, технологии и архитектура. Эко-Трендз, 2010.
5. TRIANTAFYLLOPOULOU D.; KOLLIAS K.; MOESSNER K. QoS and Energy Efficient Resource Allocation in Uplink SC-FDMA Systems, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015. V. 14, Iss. 6, P. 3033–3045.
6. CHIEN-HUA CHEN, KAI-TEN FENG. Statistical Distance Estimation Algorithms With RSS Measurements for Indoor LTE-A Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. V. 66, Iss. 2, P. 1709–1722.
7. ШНАКНОВ В. Experiment Design for Parameter Estimation in Sensing Models // Springer Lecture Notes in Computer Science. 2013. V. 8072, P. 151–158.
8. НАТА, М. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. V. 29 (3), P. 317–25.
9. ШАХОВ В. В., ЮРГЕНСОН А. Н., СОКОЛОВА О. Д. Эффективный метод генерации случайных геометрических графов для моделирования беспроводных сетей // Прикладная дискретная математика. 2016. № 4 (34). С. 99–109.
10. KIRAN P.; JIBUKUMAR M. G.; ПРЕМКУМАР С. V. Resource allocation optimization in LTE-A/5G networks using big data analytics // International Conference on Information Networking (ICOIN), 2016, P. 254–259.



Ахпашев Руслан Владимирович в 2011 году начал учебу в Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), где в 2015 году получил степень бакалавра по направлению 09.04.01 „Информатика и вычислительная техника“, профиль:

АСОИУ. С 2015 года является магистрантом по направлению 09.04.01 „Информатика и вычислительная техника“, профиль: АСОИУ. С 2015 года является программистом кафедры ТС и ВС. В сентябре 2015 года зачислен в магистратуру (форма обучения — очная) по направлению подготовки 09.04.01 „Информатика и вычислительная техника“, профиль: АСОИУ. За

последние годы обучения автором было написано порядка 11 статей, 3 из которых индексируются в Scopus. Неоднократно участвовал в конкурсе Alcatel-Lucent и Nokia, где занимал призовые места за научно-исследовательскую работу.

Ruslan Vladimirovich Akhpashev received his Bachelor degree of Telecommunication networks and computer science in 2015. In September 2015 enrolled to the Siberian university of telecommunication and computer science to master's degree course. From 2015 worked in the telecommunication networks and computer department as a software engineer. Nowadays author has an 11 article, 3 of them indexing in Scopus. Also, author has diploma from Alcatel-Lucent, Nokia for the research activity

Дата поступления — 15.06.2017