**Задания на курсовую работу по дисциплине «Сети ЭВМ и телекоммуникации»**

**Тема:** Проектирование мобильной сети 4G (LTE)

**Задание:** Требуется рассчитать количество оборудования (базовые станции, маршрутизаторы, элементы управления сетью, транспортные каналы) для построения сети LTE при заданных параметрах.

*Табл. 1.* Исходные данные

|  |  |
| --- | --- |
|  | Выберите значение параметра в соответствие с вариантом (последняя цифра пароля) |
| Параметр | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **0** |
| Диапазон частот, ГГц | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 1,8 | 3,6 | 1,95 | 2,4 | 3,4 | 0,46 | 0,84 |
| Режим дуплексирования | FDD (отдельные симметричные полосы частот под UL и DL) |
| Ширина полосы частот (BW), МГц | 5 | 10 | 15 | 20 | 5 | 10 | 20 | 15 | 10 | 20 |
| Мощность передатчика eNB, Вт | 10 | 80 | 40 | 20 | 4 | 40 | 20 | 5 | 60 | 40 |
| Усиление антенны eNB, dBi | 21 | 14 | 16 | 18 | 19 | 19 | 20 | 17 | 12 | 15 |
| Потери в антенно-фидерном тракте, dB | 2 | 2,1 | 2 | 1,5 | 0.4 | 1 | 1 | 0,6 | 3 | 3 |
| Тип местности\* | DU | SU | U | U | FS | DU | Indoor | FS | RU | SU |
| Требуемая скорость в UL на краю соты, Мбит/с | 1 | 0,256 | 0,26 | 0,512 | 0,512 | 0,256 | 1 | 1,256 | 0,128 | 0,256 |
| Требуемая скорость в DL на краю соты, Мбит/с | 2 | 0.5 | 0.6 | 1 | 1.1 | 1.2 | 2.2 | 2.5 | 0.5 | 0.9 |
| Шумы eNB (NF), дБ | 2 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3 | 2,7 | 2 |
| Шумы абонентского терминала UE (NF), дБ | 7 дБ – если фамилия начинается на букву из диапазона А-З |
| 6,5 дБ – если фамилия начинается на букву из диапазона И-У |
| 7,4 дБ – если фамилия начинается на букву из диапазона Ф-Я |
| Высота подвеса антенны eNB, м | 50 | 60 | 70 | 60 | 20 | 40 | 30 | 35 | 100 | 80 |
| Высота антенны UE, м | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |
| Потери сигнала на проникновения (застройка), дБ | 28 | 15 | 20 | 21 | 19 | 25 | 27 | 26 | 10 | 12 |
| Площадь, тыс. км.кв | 200 | 250 | 260 | 220 | 10 | 180 | 170 | 19 | 400 | 320 |
| Число абонентов, тыс.чел  | 240 | 250 | 290 | 310 | 100 | 260 | 400 | 75 | 300 | 250 |
| Объем трафика, скачиваемый абонентов в ЧНН (DL), Мбайт | 10 Мбайт – если имя начинается на букву из диапазона А-З |
| 13 Мбайт – если имя начинается на букву из диапазона И-У |
| 17 Мбайт – если имя начинается на букву из диапазона Ф-Я |
| Число секторов на БС (eNB) | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| Максимальное число eNodeB, подключаемых к одному S-GW | 100 | 150 | 200 | 120 | 140 | 160 | 210 | 190 | 180 | 170 |
| Максимальное число eNodeB, подключаемых к одному MME | 250 | 300 | 350 | 400 | 270 | 450 | 360 | 390 | 380 | 290 |

\* U –Urban; DU – Dense Urban; FS – Free Space; RU – Rural; SU – Suburban.

**Методические указания по выполнению курсового проекта**:

1. *Выберите модель распространения сигнала, отталкиваясь от заданных параметров. Обоснуйте свой выбор.*

Для нахождения радиуса соты LTE применяются модели, которые предсказывают затухание радиосигнала на определенном расстоянии для самых различных радиоусловий. Это могут быть аналитические модели, например, модель свободного пространства, не учитывающая факторы воздействия внешней среды на сигнал, а также эмпирические, полученные опытным путем для самых разных условий и типов приемопередающих устройств (например, модели Walfish-Ikegami, Knife-Edge, Okumura, Hata, и пр.).

Рассмотрим наиболее часто используемые модели распространения сигналов для сетей LTE. Базовые станции eNodeB могут устанавливаются практически где угодно: на зданиях, в бизнес-центрах, в аэропортах, вдоль железных дорог и пр.

**А) Модель свободного пространства FSPM (Free Space Propagation Model)**

Данная модель применяется в условиях открытого пространства между приемником и передатчиком для диапазона сверхвысоких частот (3..30 ГГц).

Формула для расчета затуханий имеет вид (1):

$PL\left(d\right)=20∙log\_{10}\left(d\right)+20∙log\_{10}\left(f\right)-27.55$, (1)

где *f* – это несущая частота сигнала в МГц, *d* – расстояние между приемником и передатчиком в м.

Такую модель можно использовать при проектировании маломощных базовых станций в помещениях.

**Б) Модель UMiNLOS (Urban Micro Non-Line-of-Sight)**

Данная модель также применяется в условиях размещения точек доступа в помещениях (Indoor).

Формула для расчета затуханий имеет вид (2):

$PL\left(d\right)=26∙log\_{10}\left(f\left[ГГц\right]\right)+22.7+36.7∙log\_{10}(d\left[м\right])$, (2)

**В) Модель Окумура-Хата и ее модификация COST231**

Данная модель распространения сигнала является одной из наиболее часто используемых моделей при проектировании покрытия макросот LTE. Она применима для сетей, работающих в частотных диапазонах от 150 МГц до 2 ГГц при высоте подвеса антенны базовой станции от 30 до 200 м, высоте антенны мобильного устройства от 1 до 10 м и радиусе соты от 1 до 20 км.

Формула для расчета затуханий имеет вид (3):

$PL\left(d\right)=A+B∙log\_{10}\left(f\right)-13.82∙log\_{10}\left(hBS\right)-a+s∙log\_{10}\left(d\right)+Lclutter$, (3)

где *f* – это несущая частота сигнала в МГц, *d* – расстояние между приемником и передатчиком в км, $hBS$ – высота подвеса антенны БС eNodeB, $Lclutter, A,B$ – константы (см.Табл.2).

*Табл. 2.* Значения коэффициентов А и В для различных диапазонов частот.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Диапазоны частот, МГц** | **А** | **В** |
| **150-1500** | 69.55 | 26.16 |
| **1500-2000** | 46.3 | 33.9 |

 Параметр *a* зависит от высоты антенны мобильной станции $hms$, от несущей частоты *f*, а также от типа местности (или клаттера) и определяется по формуле (4):

$a\left(hms\right)=\left\{\begin{array}{c}3.2∙\left[log\_{10}\left(11.75∙hms\right)\right]^{2}-4.97 для DU и U\\\left[1.1∙log\_{10}\left(f\right)\right]∙hms-\left[1.56∙log\_{10}\left(f\right)-0.8\right] для SU, RURAL,ROAD\end{array}\right.$, (4)

где DU –это Dense Urban (плотная городская застройка), U – urban (город), SU – suburban (пригород), RURAL – сельская местность, ROAD – трасса.

 Последняя составляющая в выражении (3) – это *Lclutter*, зависящая от несущей частоты *f* и от типа местности, определяется как (5):

$Lclutter=\left\{\begin{array}{c}3 для DU\\0 для U\\-\left(2∙\left[log\_{10}\left(\frac{f}{28}\right)\right]^{2}+5.4\right) для SU\\-\left(4.78∙\left[log\_{10}\left(f\right)\right]^{2}-18.33∙log\_{10}\left(f\right)+40.94\right) для RURAL\\-\left(4.78∙\left[log\_{10}\left(f\right)\right]^{2}-18.33∙log\_{10}\left(f\right)+35.94\right) для ROAD\end{array}\right.$, (5)

 Составляющая *s* зависит от высоты базовой станции $hBS$, от несущей частоты *f* и от расстояния между абонентом и базовой станцией *d* и определяется как (6):

$s=\left\{\begin{array}{c}44.9-6.55∙log\_{10}\left(f\right), для d\geq 1 км\\\left(47.88+13.9∙log\_{10}\left(f\right)-13.9∙log\_{10}\left(hBS\right)\right)×\frac{1}{log\_{10}\left(50\right)}, для d<1 км\end{array}\right.$, (6)

1. *Постройте зависимость потерь сигнала от расстояния между абонентом и базовой станции eNB.*

На рисунке 1 представлены полученные с помощью некоторых из описанных выше моделей распространения сигнала зависимости потерь мощности радиосигнала от расстояния между приемником и передатчиком (это лишь примеры!).



*Рис. 1*. Потери мощности радиосигнала в помещении, рассчитанные по моделям UMiNLOS и FSMP.

1. *Рассчитайте бюджет восходящего и нисходящего каналов, отталкиваясь от требований к скоростям на краю соты в обоих направлениях. Оцените максимально допустимые потери в обоих направлениях (MAPL).*

В рамках данного курсового проекта нас будут интересовать принципы расчета радиуса действия одной соты LTE. При расчете радиопокрытия беспроводных точек доступа или базовых станций, нужно учитывать физические факторы, ограничивающие зону действия. Прежде всего, это чувствительность приемного устройства *RxSens* (приемника базовой станции eNodeB или пользовательского терминала UE), которая вычисляется по формуле (7):

$RxSens=NoiseFigure+ThermalNoise+ReqiredSINR$, (7)

где *NoiseFigure (NF)* – коэффициент шума, который обычно указывается производителем оборудования; *RequiredSINR* – требуемое отношение мощности сигнала к мощности шумов и интерференции, зависящее от используемых схем модуляции и кодирования MCS, а также от механизмов, позволяющих снизить это значение (features); *ThermalNoise* – тепловой шум приемника, определяемый по формуле (8):

$ThermalNoise=-174+10∙log\_{10}(BW)$, (8)

где *BW* – ширина полосы частот принимаемого сигнала в Гц, а -174 дБм – уровень шума на 1 Гц полосы частот при температуре 200С.

Значение *RxSens*, получаемое из выражения (7) – это минимальный требуемый уровень радиосигнала, при котором возможно успешное декодирование битов данных.

Для того, чтобы определить *RequiredSINR*, необходимо знать, какая схема модуляции и кодирования MCS может использоваться на краю соты. MCS зависит от требований оператора к скорости передачи данных на краю соты. Ниже приведена таблица, показывающая спектральную эффективность различных MCS (число бит передаваемых в секунду в 1 Гц полосы частот) и требования к *RequiredSINR (Таблица 3)*.

*Табл. 3.* Для определения *RequiredSINR.*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | MCS | Спектральная эффективность, бит/с/Гц | *RequiredSINR,* дБ |
| 1 | QPSK1/32 | 0.0625 | 2.1 |
| 2 | QPSK1/15 | 0.133 | 2.9 |
| 3 | QPSK1/7 | 0.286 | 5.1 |
| 4 | QPSK1/3 | 0.67 | 6.3 |
| 5 | QPSK2/3 | 1.33 | 7.9 |
| 6 | QPSK6/7 | 1.71 | 9.5 |
| 7 | QAM16 1/3 | 1.33 | 12.9 |
| 8 | QAM16 2/3 | 2.66 | 15.4 |
| 9 | QAM16 9/10 | 3.6 | 19.8 |
| 10 | QAM64 1/8 | 0.75 | 16 |
| 11 | QAM64 3/8 | 2.25 | 19.1 |
| 12 | QAM64 ½ | 3 | 20.2 |
| 13 | QAM64 5/8 | 3.75 | 21.3 |
| 14 | QAM64 ¾ | 4.5 | 24.7 |
| 15 | QAM64 9/10 | 5.4 | 26.9 |

В таблице 3 показаны лишь примерные значения, которые могут отличаться от стандарта 3GPP (LTE).

В рамках данного курсового проекта важно выбрать наиболее помехозащищенный метод модуляции и кодирования (Самый низкий MCS по возможности), гарантирующий требуемую скорость передачи данных на краю соты.

Пример расчета скорости для MCS15 и полосы частот 3 МГц:

***Максимальная скорость=5.4\*3\*10^6=16,2 Мбит/с***

*RequiredSINR* для такой скорости на краю соты = 26.9 дБ.

Для того чтобы определить, какой должен быть максимальный уровень допустимых потерь радиосигнала MAPL (Maximum Allowed Path loss), при котором будет возможно успешно декодировать данные, составляется и рассчитывается так называемый бюджет восходящего (от пользователя к точке доступа UL) и нисходящего (от точки доступа к пользователю DL) каналов.

***а) Бюджет нисходящего канала (DL Link Budget)***

 На рисунке 2 показано из каких компонентов составляется бюджет нисходящего канала DL.

В неравенстве, показанном на рисунке 2, все входные параметры за исключением *PL(d)* являются константами. В левой части этого неравенства стоят составляющие, характеризующие реальный уровень сигнала в зависимости от расстояния *d*, в правой же – требования к уровню такого сигнала, при котором декодирование будет осуществимо. Если приравнять левую и правую часть неравенства, мы получим уравнение (9), где *PL(d)* можно заменить на *MAPL\_DL* – уже независящие от расстояния максимально допустимые потери радиосигнала, которые удовлетворяют минимальным требованиям успешного приема данных.

$TxPowerENodeB-FeederLoss+AntGainENodeB+MIMOGain-MAPL\\_DL-IM-PenetrationM=RxSensUE$. (9)

На рисунке 3 показано, что происходит с сигналом при прохождении через антенно-фидерный тракт. Потери сигнала во многом зависят от того как сконфигурирована базовая станция.



*Рис. 2*. Бюджет нисходящего канала DL в сетях LTE

 В случае использования фидера, как правило, фидер доходит до малошумящего усилителя (МШУ), который монтируется максимально близко к антенне, а затем, с помощью соединительного джампера сигнал передается на антенну, где происходит его усиление за счет конфигурации антенны и MIMO.



*Рис. 3*. Усиление и ослабление сигнала в антенно-фидерном тракте базовой станции eNodeB LTE.

Если с выхода базовой станции сигнал попадает в фидер, то там он ослабляется примерно на 2 дБ. Точное значение ослабления зависит от типа и длины фидера. Затем сигнала попадает на МШУ, где ослабляется еще на 0.4 дБ, после чего в джампере до антенны он затухает еще на 0.5 дБ. Если базовая станция сконфигурирована без фидера (приемо-передатчик близко с антенной), то потерями в антенно-фидерном тракте будут считаться только потери 0.5 дБ в джампере между приемо-передатчиком и антенной.

MIMO c двумя передающими антеннами позволяет усилить сигнал на 3 дБ или в 2 раза (*MIMOGain*). В настоящее время бывают базовые станции и с четырьмя, и с восьмью передающими антеннами, что в свою очередь еще больше усиливает сигнал.

Запас (margin) мощности сигнала на проникновения *PenetrationM* включает в себя не только возможные затухания сигнала при прохождении через такие препятствия как стены зданий, но и затухания в теле человека (Body penetration) при телефонном разговоре (учитывается только для голосовых сервисов).

Решив уравнение (9), можно определить допустимые потери уровня сигнала *MAPL\_DL* в нисходящем канале, однако, расстояние, на котором сигнал затухнет на эту величину все еще неизвестно. Для того чтобы это выяснить, необходимо сопоставить MAPL\_DL с подходящей моделью распространения радиосигнала.

***б) Бюджет восходящего канала (UL Link Budget)***

 На рисунке 4 представлены основные составляющие бюджета восходящего канала UL.

 В неравенстве, показанном на рисунке 4, все входные параметры за исключением *PL(d)* – это константы. В левой части данного неравенства стоят составляющие, отражающие реальный уровень сигнала на некотором расстоянии *d* от пользователя, в правой же части – требования к уровню такого радиосигнала, при котором декодирование будет возможно. Приравняв левую и правую часть неравенства, получаем уравнение (10), где *PL(d)* можно заменить на *MAPL\_UL* – это независящие от расстояния максимально допустимые потери радиосигнала в восходящем канале UL, которые удовлетворяют минимальным требованиям успешного приема данных.

$TxPowerUE-FeederLoss+AntGainENodeB+MIMOGain-MAPL\\_UL-IM-PenetrationM=RxSensENodeB$. (10)

 Принципиальными отличиями бюджетов восходящего и нисходящего каналов являются чувствительность приемника *RxSens* (в зависимости от направления – это либо чувствительность UE, либо eNodeB), которая определяется по формуле (7) и мощность передатчика *TxPower* (UE или eNodeB).

Результатом решения уравнения (10) будет определение допустимых потерь *MAPL\_UL* в восходящем канале UL. Остается определить расстояние, на котором сигнал затухнет на эту величину.



*Рис. 4*. Бюджет нисходящего канала UL сети LTE.

1. *Исходя из значения MAPL и требований к минимальной скорости закачивания на краю соты, определите радиус соты для UL и DL (по меньшему радиусу делается расчет количества оборудования)*

 **Расчет радиуса и площади соты (Range and area calculation)**

Применив выбранную модель распространения радиосигнала, получаем зависимость, отражающую затухание радиосигнала при увеличении расстояния между пользователем UE и базовой станцией eNodeB. Для того чтобы определить, на каком расстоянии декодирование данных будет все еще возможно в восходящем и нисходящем каналах, нужно знать уровень максимально допустимых потерь в обоих направлениях (*MAPL\_UL* и *MAPL\_DL*).

Отложив значения потерь радиосигнала в нисходящем и восходящем каналах на графике зависимости потерь сигнала от расстояния между пользователем и базовой станцией, как показано на рисунке 5, можно найти радиусы сот. Точки пересечения *MAPL\_UL* и *MAPL\_DL* с кривой *PL(d)* покажут радиусы сот LTE в UL и DL направлениях (*d\_UL* и *d\_DL*).

 При проектировании радиопокрытия всегда берется меньшая из величин *d\_UL* и *d\_DL,* в данном примере – это *d\_UL*.



*Рис. 5*. Определение радиуса UL и DL в LTE-сети при проектировании соты в помещении

Используя модель распространения сигнала UMiNLOS (подходит для расчета покрытия в небольших помещениях, то есть для фемтосот), и рассчитав максимально допустимые потери сигнала в обоих направлениях, получаем радиус соты в восходящем канале 36 м и в нисходящем канале 60 м. В результате, зона действия соты LTE ограничена радиусом 36 м.

На рисунке 6 показано как определить площадь покрытия базовой станции, зная сколько секторов (сот) планируется сконфигурировать на каждой eNodeB.



*Рис. 6*. Определение площади сайта (базовой станции) в зависимости от числа сконфигурированных секторов.

1. *Выполните расчет требуемой пропускной способности сети, отталкиваясь от количества абонентов и скачиваемого ими трафика в час наибольшей нагрузки ЧНН.*
2. *Определите количество оборудования, учитывая количество секторов на БС, требования к радиопокрытию и нагрузки, и нарисуйте схематично архитектуру построения Вашей сети (точное число БС на схеме отражать не требуется):*

*- Число базовых станций (одна базовая станция состоит из числа сот, равного числу секторов)*

*- Число S-GW*

*- Число MME*

 На рисунке 7 представлена архитектура сетей LTE. Пунктирными линиями показаны интерфейсы, используемые для обмена управляющими (сигнальными) сообщениями (CP – Control Plane). Сплошные линии – это интерфейсы передачи пользовательских данных (UP – User Plane). Архитектура сетей 4-го поколения не имеет элемента для централизованного управления радиоподсистемой, например, контроллера базовых станций eNodeB. Для обеспечения сигнального взаимодействия между eNodeB существует логический интерфейс X2. Функции базовых станций eNodeB – это управлением радиоинтерфейсом LTE-Uu (динамическое распределение ресурсов, шифрование данных, HARQ, управление QoS, MIMO и пр.).

 Важнейшим компонентом сети является элемент управления мобильностью MME (Mobility Management Entity), который, благодаря интерфейсу S6a, имеет доступ к абонентским данным из HSS (Home Subscriber Server) для выполнения любых процедур, требующих авторизации UE (User Equipment – пользовательское оборудование) – установление и управление соединениями (сессиями или bearer), регистрация в сети, обновление местоположение и пр.

 Кроме того, MME по интерфейсу S11 осуществляет управление обслуживающим шлюзом S-GW (Serving Gateway) и шлюзом P-GW (Packet Data Network Gateway) для организации логических транспортных каналов передачи данных (EPS Bearers). eNodeB взаимодействуют с MME посредством сигнального S1-U интерфейса. MME во время регистрации пользователей в сети авторизует их по IMSI (International Mobile Subscriber Identity), а затем выделяет им временный идентификатор GUMMEI, который будет использован для идентификации абонентов до отключения мобильных терминалов. 

*Рис. 7*. Архитектура сети LTE

 Главной функцией P-GW является выделение IP-адресов для пользовательских сессий. P-GW также принимает участие в управлении качеством обслуживания QoS и тарификациями совместно с элементом PCRF (Policy and Charging Rule Function). Помимо этого, через P-GW организуется взаимодействие сети LTE (3GPP) с другими сетями оператора, работающими не по стандартам 3GPP (например, CDMA2000, Wi-Fi и пр.). Подключение же к сетям на базе 3GPP выполняется через S-GW посредством интерфейсов S3, S4 и S12 (не показаны на рисунке 7).

Полезные ссылки и литература:

1. <http://www.iaeng.org/publication/WCE2014/WCE2014_pp705-709.pdf>
2. <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning>
3. <http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/Path_loss_models>
4. <http://anisimoff.org/lte/lte.html> (Rus)
5. LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice, Sesia, Stefania, Wiley press