

**Проектирование радиосетей  
СОТОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ  
(опорный конспект лекций)**

**доктор технических наук  
профессор  
Бабков Валерий Юрьевич**

**Санкт-Петербург  
2011 г.**

# **Рабочая программа дисциплины «Проектирование радиосетей сотовых систем связи»**

**Направление подготовки дипломированных специалистов 210400 – «Телекоммуникации» специальность 210402 – Средства связи с подвижными объектами. КАФЕДРА Радиопередающих устройств и средств подвижной связи. Семестр 9.**

**Всего часов по ГОС 90 час. Из них: - лекций  
45 час.**

**- лабораторных занятий 30 час.**

**- практических занятий 15 час.**

**- курсовой проект**

**- Экзамен - 9 семестр**

**• Базовые дисциплины:**

- 1. Устройства генерирования и формирования сигналов в системах подвижной связи.**
- 2. Системы и сети связи с подвижными объектами.**
- 3. Метрология, стандартизация и сертификация.**

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

- **Цель преподавания дисциплины** заключается в ознакомлении студентов с вопросами проектирования радиосетей подвижной связи.
- **Основной задачей дисциплины** является изложение принципов планирования сетей радиодоступа различных стандартов с использованием современных аппаратно-программных средств и электронно-цифровых карт местности.
- В связи с постоянным развитием новых технологий подвижной связи данный курс нуждается в ежегодной переработке рабочей программы

# **ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ**

## **СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**В результате изучения дисциплины студенты ДОЛЖНЫ ЗНАТЬ:**

- основы территориального, частотного и кодового планирования сетей подвижной связи
- методы построения и оптимизации сетей с использованием цифровых карт и программного продукта планирования.

**В результате изучения дисциплины студенты ДОЛЖНЫ УМЕТЬ:**

- определять основные характеристики оборудования действующих и перспективных систем подвижной связи,
- оценивать эффективность проектируемых и действующих сетей подвижной связи.

# СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

## **Тема 1. Принципы построения системы частотно-территориального планирования(6ч).**

Введение, цели и задачи дисциплины. Назначение и задачи, решаемые с использованием системы частотно-территориального планирования.

Функциональная схема системы частотно-территориального планирования.

## **Тема 2. Принципы использования геоинформационных баз данных для решения задач частотно-территориального планирования(8ч).**

Определение геоинформационной системы (ГИС). Принцип создания ГИС. Характеристика цифровых карт местности. Структура геоинформационной системы для систем частотно-территориального планирования.

## **Тема 3. Частотно-территориальное планирование сотовых сетей(41).**

Постановка задачи ЧТП сотовой сети. Алгоритм ЧТП сотовых сетей с частотно-временным разделением каналов. Методики построения начального приближения и оптимизации сотовой сети с частотно-временным разделением каналов. Методы назначения частот в сотовых сетях подвижной связи.

## **Тема 4. Частотно-территориальное планирование транкинговых сетей(8).**

Постановка задачи ЧТП транкинговой сети. Алгоритм частотно-территориального планирования транкинговой сети. Методики построения начального приближения и оптимизации транкинговой сети.

## **Тема 5. Планирование сетей третьего поколения(12).**

Постановка задачи ЧТП сети. Алгоритм планирования сети. Методика построения начального приближения и оптимизации сети. Методы распределения кодов в сетях подвижной связи с кодовым разделением каналов.

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

- Подготовка цифровой модели местности в ГИС «НЕВА»
- Ознакомление с программным комплексом планирования сетей подвижной радиосвязи «OnegaPlan RPLS»  
Изучение методики территориального планирования сетей GSM с использованием программного комплекса «OnegaPlan RPLS»
- Изучение методики частотного планирования сетей GSM с использованием программного комплекса «OnegaPlan RPLS»
- Планирование сети CDMA в САПР «OnePlan RPLS CDMA»

**Всего часов: 30**

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

- Планирование сотовых сетей связи с частотно-временным разделением каналов.
- Разработка технического задания на курсовую работу

**Всего часов: 15**

## ТЕМЫ И КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

1. Планирование сетей стандарта GSM.
2. Планирование сетей стандарта IMT-MS.
3. Планирование сетей стандарта UMTS.

**Курсовой проект должен включать:**

- пояснительную записку, содержащую развернутое техническое задание;
- обоснование выбора архитектуры проектируемой сети и необходимые расчеты;
- частотно-территориальный план проектируемой сети.

# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

## ДИСЦИПЛИНЫ

- **Основная литература.**

- 1. Бабков В.Ю., Цикин И.А. Сотовые системы мобильной радиосвязи: / учебн. Пособие.-СПб.:Изд-во Политехн. Ун-та, 2011.-426 с.

- **Литература к лабораторным и практическим занятиям.**

- 1. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Михайлов П.А. Сети мобильной связи. Частотнотерриториальное планирование. Учебное пособие для вузов.-2-е изд.,испр.-М.:Горячая линия\_Телеком,2007.-224 с.
- 2. Бабков В.Ю., Никитина А.В., Фокин Г.А. Проектирование радиосетей сотовых систем связи: методические указания к лабораторным и практическим занятиям: Часть 1. Сети GSM.-СПб.: Изд-во «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ,2010.- 57 с.
- 3. Бабков В.Ю., Никитина А.В., Фокин Г.А.Планирование сетей мобильной связи с кодовым разделением каналов в системе автоматического проектирования Oneplan RPLS CDMA: методические указания к лабораторным работам и курсовому проектированию: СПбГУТ.-СПб., 2007-48 с.

## Дополнительная литература

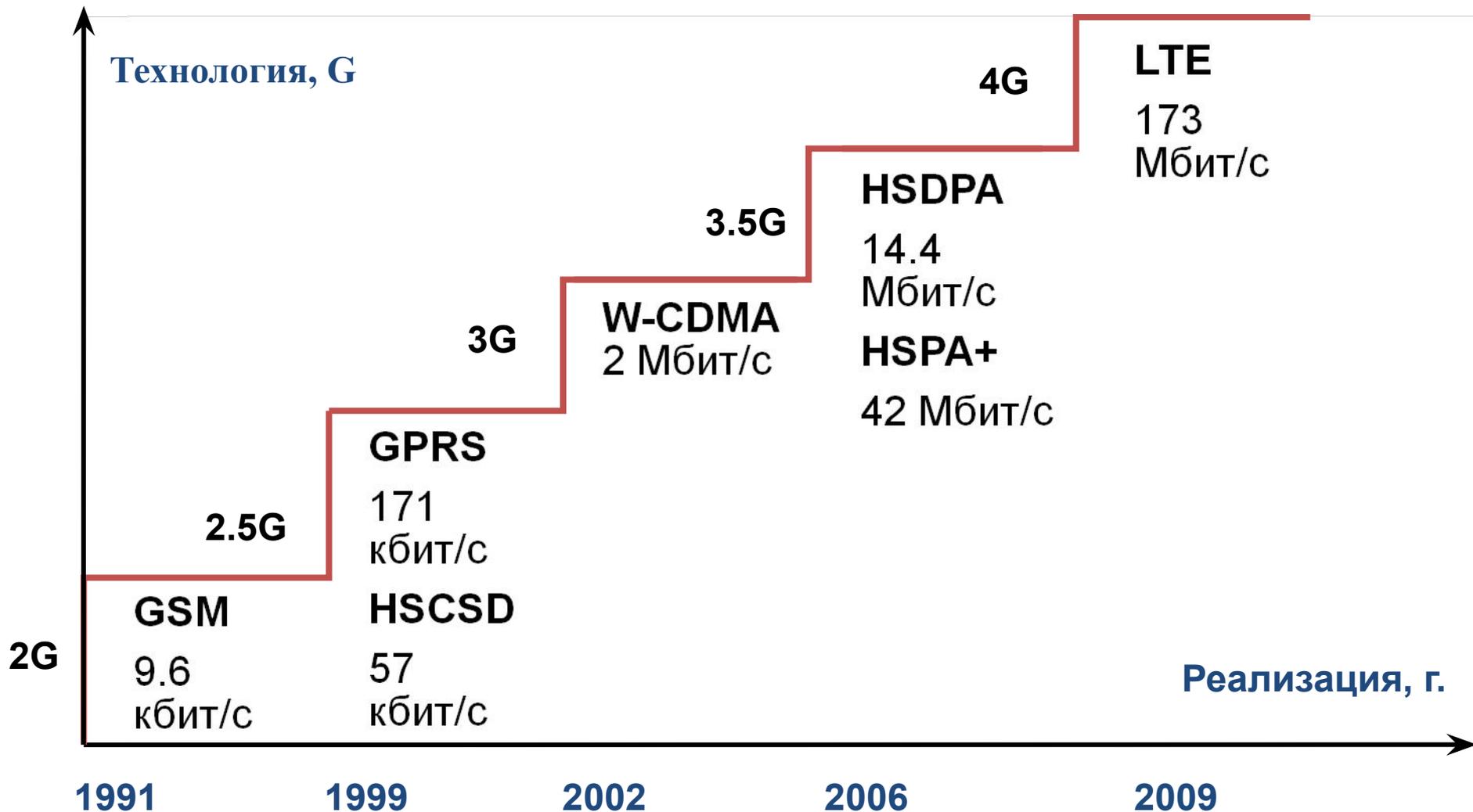
- 1. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи / Пер. с польск. И.Д.Рудинского; под ред.А.И.Ледовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 536 с.
- 2. Бабков В.Ю., Полынцев П.В., Устюжанин В.И. Качество услуг мобильной связи. Оценка, контроль и управление- М.: Горячая линия-Телеком, 2005.-160с.
- 3.UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения: Учебное пособие для вузов/ ВолковА.Н., Рыжков А.Е., Сиверс М.А.-СПб.: Издательство «Линк»,2008.-224с.
- 4.Голант Г.З. Мобильный Интернет в сетях CDMA 2000/ Под ред. проф. Бабкова В.Ю.- СПб: ИА « Энергомашиностроение», 2007.-134с.
- 5.Сети мобильной связи. Планирование, оптимизация, управление/ Под ред. Бабкова В.Ю., Степанца В.А.-СПб: ИА «Энергомашиностроение»,2007.-108с.
- 6.Милютин Е.Р. и др. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. – СПб.: Триада, 2003.- 230 с.

# МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Учебная лаборатория «Средства подвижной радиосвязи»
2. Методические указания к лабораторным работам
3. Учебники и учебные пособия

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 210400 – Телекоммуникации, специальность – 210402 – Средства связи с подвижными объектами

# Системы сотовой связи



# Услуги сетей мобильной связи

<b>Класс трафика</b>	<b>Разговорный</b>	<b>Потоковый</b>	<b>Интерактивный</b>	<b>Фоновый</b>
<b>Основные характеристики</b>	<b>Передача в реальном масштабе времени; низкая временная задержка; симметричность трафика</b>	<b>Сохранение временной зависимости между информационными составляющими потока</b>	<b>Ответ на запрос</b>	<b>Передача в произвольный момент времени</b>
<b>Примеры приложений</b>	<b>Телефония, видеотелефония, видеоконференцсвязь</b>	<b>Мультимедиа</b>	<b>Интернет</b>	<b>Электронная почта, SMS, MMS</b>

- *Разговорный класс.* Основным приложением этого класса является передача речи. Сюда входит и новая услуга сотовой связи IP телефония, передача которой критична к реальному масштабу времени.
- Разговор в режиме реального времени осуществляется всегда между равнозначными конечными пользователями и характеризуется низкой задержкой и симметричным трафиком.
- Максимальная задержка видео и речи должна быть не более 150-200 мс, и неточность в обеспечении задержки приводит к неприемлемому качеству услуги.

- ***Потоковый класс.*** Потокковые мультимедийные приложения требуют передачи равномерного и непрерывного потока данных. Данная технология важна при загрузке больших мультимедиа файлов. При потоковой передаче данных пользователь может начать отображение данных ещё до того, как файл будет принят до конца.
- Интернет-видеопродукты и сопутствующую медиаиндустрию можно разделить на сетевое вещание и потоковое видео.
- ***Сетевое вещание*** обычно производится на большую аудиторию пользователей, которые соединяются с интернетом через сервер сети мобильной связи.
- ***Потоковое видео по запросу*** в большинстве случаев предоставляется большими корпорациями, которые хранят видеоклипы на серверах, доступ к которым одновременно

- **Интерактивный класс.** Интерактивный (диалоговый) трафик характеризуется передачей данных пользователю в ответ на его запрос.
- **Фоновый класс.** К фоновому (низкоприоритетному) классу относятся передача электронной почты, SMS и MMS сообщений (англ. *Short Message Service* - служба коротких сообщений; *Multimedia Message Service* - служба мультимедийных сообщений), загрузка баз данных и получение данных, т.е. приложения, которые не требуют мгновенной активации, и задержка которых может составлять секунды и даже минуты.

- Примером таких (*фоновых*) услуг являются услуги, связанные с определением местоположения мобильного абонента (одно из новых направлений в сетях мобильной связи). Эти услуги обеспечивает оператор, который будет использовать доступную информацию о местонахождении абонентского терминала.

Знание местоположения пользователя позволит предлагать:

- «навигационные» услуги (предварительный заказ билетов и прием различных заказов с привязкой к текущему местоположению пользователя);
- справочную информацию, привязанную к текущему местоположению пользователя;
- соединение пользователя со службами обеспечения безопасности и службами экстренной помощи;
- биллинговые услуги, учитывающие местоположение источника и адресата информации и др.

- В последнее время быстро растет интерес к Web-вещанию через интернет. Характеристики и цены, наравне с мобильностью, обеспечивающей доступ к услугам из любого места, являются ключевыми факторами в конкурентной борьбе в секторах видео и аудиоразвлечений.
- Мобильность может открыть новые возможности разработчикам игр и поставщикам игровых услуг, предоставляя пользователям широкий выбор игр с любыми партнерами по всему миру.

- Через системы мобильной радиосвязи можно экономически эффективно предоставлять услуги в области дистанционного обучения в тех регионах, где прокладка фиксированных линий связи обойдется слишком дорого, например, в сельских районах с малой плотностью населения.
- Важным преимуществом здесь может оказаться способность систем обеспечить большую пропускную способность сети и поддержку интерактивности в сочетании с малыми затратами на создание инфраструктуры.
- Необходимо отметить также важную роль мобильной радиосвязи в реализации технологий групповой работы в сети, интенсивно развивающихся в условиях глобализованной экономики.

- Системы мобильной радиосвязи относятся к многоканальным системам массового обслуживания (СМО), которые обеспечивают услуги связи большому числу мобильных абонентов при ограниченном числе каналов на базовых станциях.
- По типу организации процесса обслуживания они относятся к СМО *с отказами* или *с очередями*.
- Процесс обслуживания в СМО характеризуется принятой дисциплиной обслуживания и отказа в обслуживании (блокировании вызова), средним временем ожидания в очереди и др.

- *В СМО с отказами вызов (заявка), поступивший с абонентской радиостанции (заявка на обслуживание) в момент, когда все каналы заняты, получает отказ и теряется.*
- *В СМО с очередями в случае занятости каналов вызов ставится в очередь на обслуживание и ожидает, когда освободится хотя бы один канал. При этом в случае системы с ожиданием это время ничем не ограничивается (чистая система с ожиданием).*
- *В системах же смешанного типа время нахождения в очереди ограничивается определенными условиями. Если эти условия не выполняются, заявка получает отказ в обслуживании. В противном случае заявка ожидает своей очереди на обслуживание. Ограничения, накладываемые на ожидание, чаще всего бывают двух типов: ограничение на время нахождения в очереди и ограничение на число заявок в очереди.*

- Для СМО с очередями могут иметь место разные дисциплины обслуживания очереди в порядке очередности либо по приоритетам абонентов.
- При оценке показателей эффективности (например, пропускной способности) и при определении основных параметров систем мобильной радиосвязи (числа базовых станций в сети, основных характеристик радиоканала, приемопередающего оборудования и др.) важным является характеристика (профиль) обслуживаемого трафика.
- Трафик в системах мобильной радиосвязи является случайным, образуется суммированием отдельных потоков заявок (вызовов) от многих абонентов и близок к пуассоновскому потоку

# показатели и критерии

## качества услуг

качество обслуживания абонентов мобильной связи  
(QoS - Quality of Service)

критерии качества - требование потребителя к услуге

показатели качества – численные характеристики услуги:

• доступность связи

• непрерывность связи  
• качество передачи информации  
• скорость установления соединения

Реклама

мнения пользователя относительно качества обслуживания

• удовлетворенность абонентов обслуживанием  
• правильность тарификации  
• скорость ремонта

Удовлетворение пользователя

**технические**

**организационные**

Качественные характеристики работы сети

Качественные характеристики терминала

Пункт продажи

Обслуживание пользователей

# Концепция управления QoS

**основа** Концепции QoS - служба обмена данными на сети

**архитектура** службы обмена многоуровневая, основные службы:

- *обмена данными сети радиодоступа*
- *обмена данными базовой сети*

**класс, параметры** обмена данными, их величину определяют классы трафика:

*речевой*  
*поточный*  
*интерактивный*  
*фоновый*

**Алгоритмы управления качеством:**  
*в плоскости управления*  
*в плоскости пользователя*



# **Управления качеством услуг при передаче мультимедийного трафика**

**Управления качеством услуг при передаче мультимедийного трафика должны осуществляться на основе:**

- 1. Стандартных процессов управления качеством обслуживания мультимедийным трафиком по принципам функционирования и характеру воздействия**

*ключевым фактором гарантированного предоставления требуемого качества пользователям различных видов услуг с мультимедийным трафиком является планирование и оптимизация сетей*

- 2. Алгоритмов управления качеством в рамках концепции QoS**

*совершенствование алгоритмов, позволяющих эффективно распределять ресурсы радиосети между услугами, обеспечивает повышение качества предоставления мультимедийных услуг передачи данных*

- 3. Методики мониторинга сети**

*необходимость в эффективном анализе функционирования и своевременного обнаружения неисправностей, высокий уровень обслуживания, ожидаемый абонентами, требует круглосуточного контроля состояния сетей с использованием современных средств наблюдения*

# Процессы управления

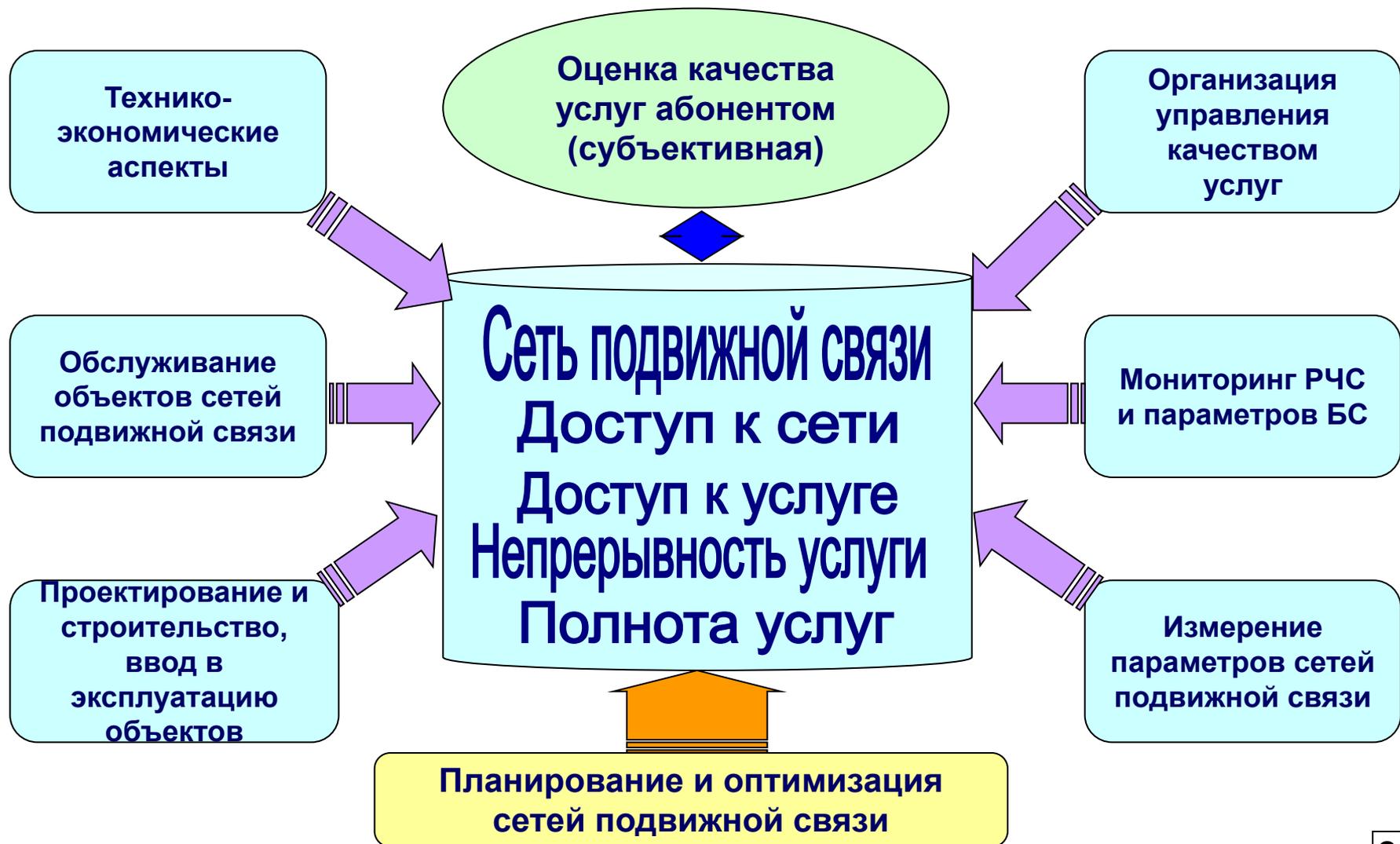
**Процессы управления мультимедийным трафиком различаются по принципам функционирования и характеру воздействия:**

- **стратегические** - планомерное развитие инфраструктуры сети с учетом распределения нагрузки и типов предоставляемых услуг
- **оперативные** - выполняемые службой управления сети (коррекционное воздействие для поддержания качества функционирования сети)
- **автономные автоматизированные** - обслуживающие каждое соединение

**Система управления сетью - циклическая многоуровневая структура, обеспечивающая:**

- заданный уровень обслуживания
- требуемую пропускную способность
- запланированный уровень покрытия



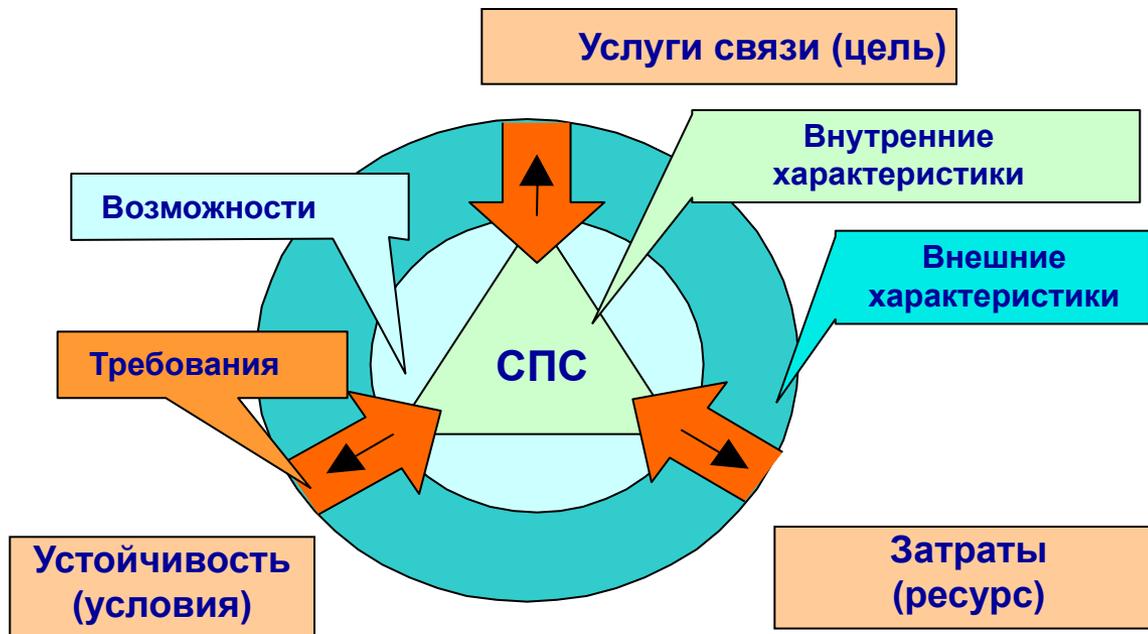


# *Содержание процесса управления качеством услуг*

- планирование нормативного уровня качества услуг (определение показателей, норм и методик измерений);
- предоставление услуг (выполнение работ по эксплуатации программно-аппаратных средств и обслуживанию абонентов);
- контроль качества услуг (проведение внутренних проверок качества услуг и сравнение достигнутых значений качества с нормативными значениями);
- улучшение качества услуг (анализ состояния процесса оказания услуг, планирование более высоких показателей качества услуг).

# Взаимосвязь внешних и внутренних факторов воздействия на сеть подвижной связи

Функциональное назначение: предоставление пространственно распределенным абонентам услуг достоверного и своевременного обмена сообщениями заданного вида и объема



# Классификация показателей эффективности функционирования сетей

## Показатели эффективности функционирования СПС

### Качество услуг

#### Доступ к сети

$$P(P_{\text{сигнала}} \geq P_{\text{PЧ}})$$

#### Доступ к услуге

$$P_{\text{Д.У.}} = 1 - P_{\text{отк}}$$

$$P_{\text{Д.У.}}^i =$$

$$P \left( \begin{array}{l} V_{\text{MIN}}^i \leq v_i \leq V_{\text{MAX}}^i; \\ t_i \leq T_{\text{ДОП}}^i; \\ \overline{d_i} \leq D_{\text{ДОП}}^i \end{array} \right)$$

#### Непрерывность услуг

$$\frac{N_{\text{обрывов}}}{N_{\text{соедин}}}$$

#### Полнота услуг

Данные – объем переданных/принятых данных  $V_{\text{данн}}$   
 Речь – качество в баллах  $MOS$

### Системные

#### Пространственно-технические параметры

- Кол-во и коорд. БС
- Конфигурация и ТХ БС и АФУ

#### Функциональные

- Режимы работы TRX
- Распределение частотных полос и ресурсных блоков
- Параметры хэндовер
- Списки соседей
- Пороги доступа

#### Тематические карты

- Ср. мощности сигнала на вх. ПРМ
- Покрытия с заданной вероятностью
- Зон сервирования
- Интерференции
- Видов модуляции и скор. передачи
- Трафика

#### Площадные и табличные данные

### Экономические

#### Расходы

- CAPEX – капитальные расходы
- OPEX – операционные расходы

#### Доходы

- ARPU – средний доход на абонента
- EBITDA – объем прибыли до вычета расходов
- OIBDA – операционный доход до вычета износа осн.средств

#### Эффективность бизнеса

- Прибыль - превышение доходов над затратами
- Рентабельность - отношение прибыли к активам.

### Эксплуатационные

#### Организационные

- Система управления и структура службы эксплуатации;
- Уровень квалификация персонала
- Организация гарантийного и послегарантийного обслуживания и ремонта

#### Функциональные

- Сбор и анализ статистики
- Время выявления, принятие решения и устранения аварий

#### Материально-технические

- запасы и подменный фонд оборудования
- измерительное оборудование

# Общие положения(1)

Анализ состояния и перспектив развития сетей мобильной радиосвязи вскрывает ряд проблем, носящих общий характер, основными из которых являются:

- объективная необходимость увеличения диапазона используемых радиочастот для повышения канальной емкости оборудования и пропускной способности систем обуславливает дополнительные трудности при планировании сетей (выборе мест развертывания базовых станций и обосновании параметров их элементов);
- длительный срок окупаемости вложенных средств вызывает необходимость определения рациональной стратегии развития подвижных служб связи с учетом особенностей конкретного района;
- увеличение числа и динамики пользователей на ограниченной территории требует обеспечения эффективного управления сетью.

# Общие положения(2)

Указанные проблемы в значительной мере могут быть разрешены путем широкого использования *технологий геоинформационных систем (ГИС-технологий)* при планировании сетей подвижной радиосвязи, которые обеспечивают повышение качества решений, принимаемых при выборе мест размещения БС, и дают возможность оптимизации структурно-топологических и технических характеристик сетей подвижной радиосвязи. ГИС могут также применяться для оптимального планирования и организационно-технического управления системами подвижной радиосвязи.

Система планирования должна обеспечивать построение сетей сотовой наземной мобильной радиосвязи в диапазонах частот их использования. В качестве геоинформационных систем целесообразно использовать системы, позволяющие работать на различных платформах (Windows и др.) и создавать приложения, ориентированные на конкретные задачи пользователя.

# Общие положения(3)

- Инструменты системы планирования должны обеспечивать построение ЗО и ЗП как с учетом значений уровня поля внутри зоны, так и без него. В последнем случае строится только граница зоны, в которой поле сигнала передатчика BS превышает заданный уровень.
- План размещения BS сети и их параметры (мощность передатчика, потери в антенном фидере, диаграмма направленности антенны, высота ее установки и ориентация) являются исходными для расчета и вводятся пользователем. План размещения BS сети и результаты расчетов ЗО и ЗП отображаются на карте. Уровни поля в зонах отображаются цветом.

# Общие положения(4)

Система должна обеспечивать расчет:

- *зон обслуживания (ЗО)* базовых станций (BS) по заданному уровню поля на их границе с контролем возможности обеспечения радиосвязи в пределах зоны;
- *зон покрытия (ЗП)* BS, где уровень радиосигнала не ниже заданного, но при этом не гарантируется возможность радиосвязи во всей зоне покрытия;
- *зон покрытия по связи (ЗПС)* BS, на которых выполняются требования по качеству связи;
- *зон взаимных помех (ЗВП)* по основному и побочным каналам приема, определяемых наложением ЗП на ЗО базовых станций, где отношение сигнала к помехе меньше защитного соотношения.

# Общие положения(5)

- Для расчета основных потерь при распространении радиоволн должен учитываться рельеф местности, план жилой застройки, наличие водоемов и лесных массивов.
- Система должна быть ориентирована на обязательное использование моделей распространения радиоволн, описанных в Рекомендациях МККР, МСЭ и др.

# Общие положения(6)

Зона покрытия совпадает с зоной обслуживания в случае, если излучаемая мощность мобильных (абонентских) радиостанций (MS) превышает излучаемую мощность базовой станции. При этом дальность связи определяется мощностью излучения базовой станции.

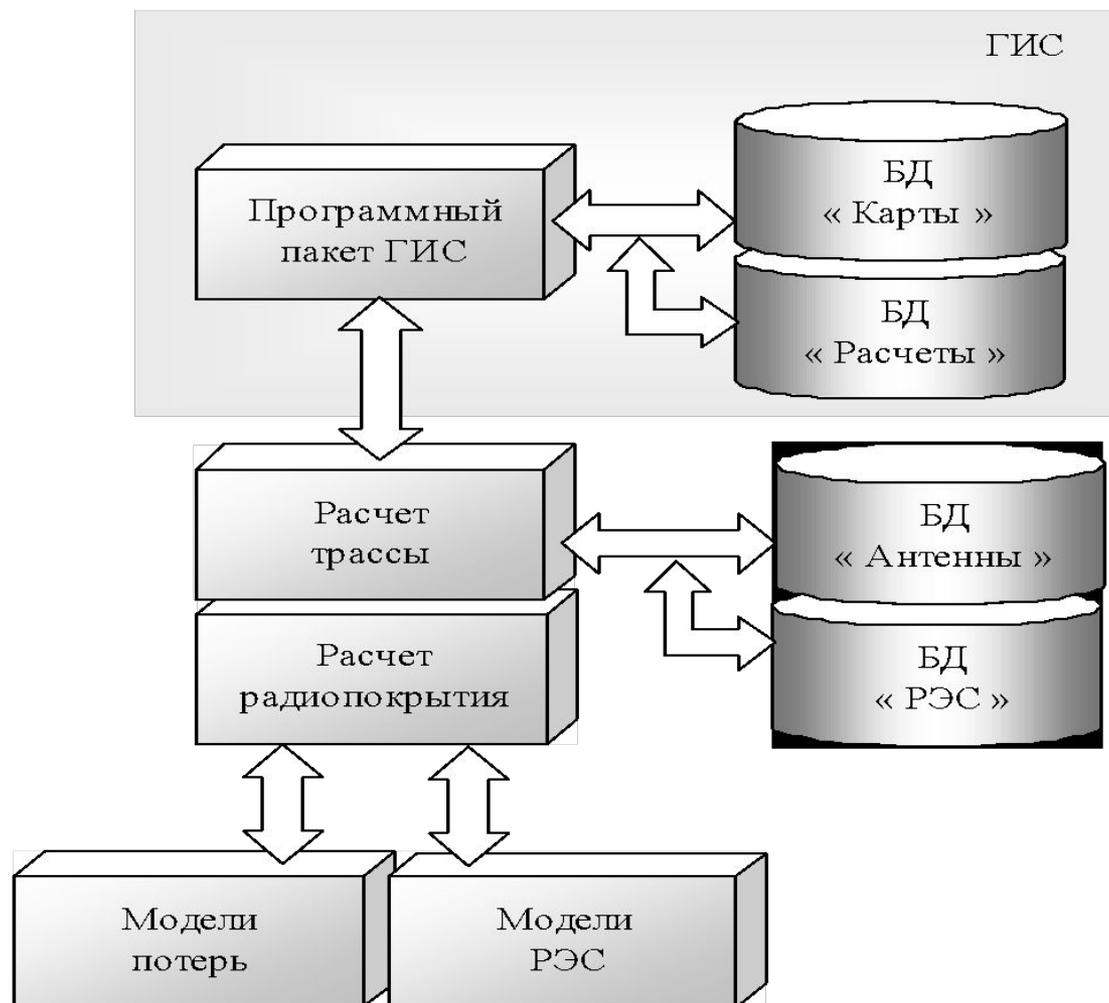
В противном случае, если мощность излучения MS меньше мощности излучения BS, то MS не сможет обеспечить необходимый уровень сигнала на входе приемника BS, находясь на границе ЗП ее передатчика, и дальность связи ограничивается мощностью излучения MS.

# Общие положения(7)

В системе должна быть предусмотрена возможность расчета зон помех от всех BS планируемой сети. Зона помех оценивается в виде зоны покрытия передатчика BS, в которой уровень электромагнитного поля превышает минимальный допустимый уровень напряженности поля, уменьшенный на величину защитного отношения сигнал/помеха в совмещенном (соседнем) канале приема.

Достаточным условием полного исключения помех в паре BS является отсутствие взаимных пересечений ЗО и ЗВП.

# Обобщенная функциональная схема системы планирования



# Обобщенная функциональная

## схема системы планирования (продолжение)

Обобщенная функциональная схема системы частотно-территориального планирования содержит три каталога:

- 1. **Системный каталог**, который содержит приложения ГИС, системные библиотеки и файлы проектов.
- 2. **Каталог электронной карты местности текущего проекта**, включающий следующие таблицы:
  - линии уровня;
  - кварталы жилой застройки;
  - дороги (в расчетах не используется);
  - водоемы;
  - лесные массивы.
- 3. **Каталог текущего проекта**, содержащий таблицы исходных данных, и результаты расчетов по частотно-территориальному плану текущего проекта.

# Характеристики радиоканала

# Модель многолучевого распространения сигналов

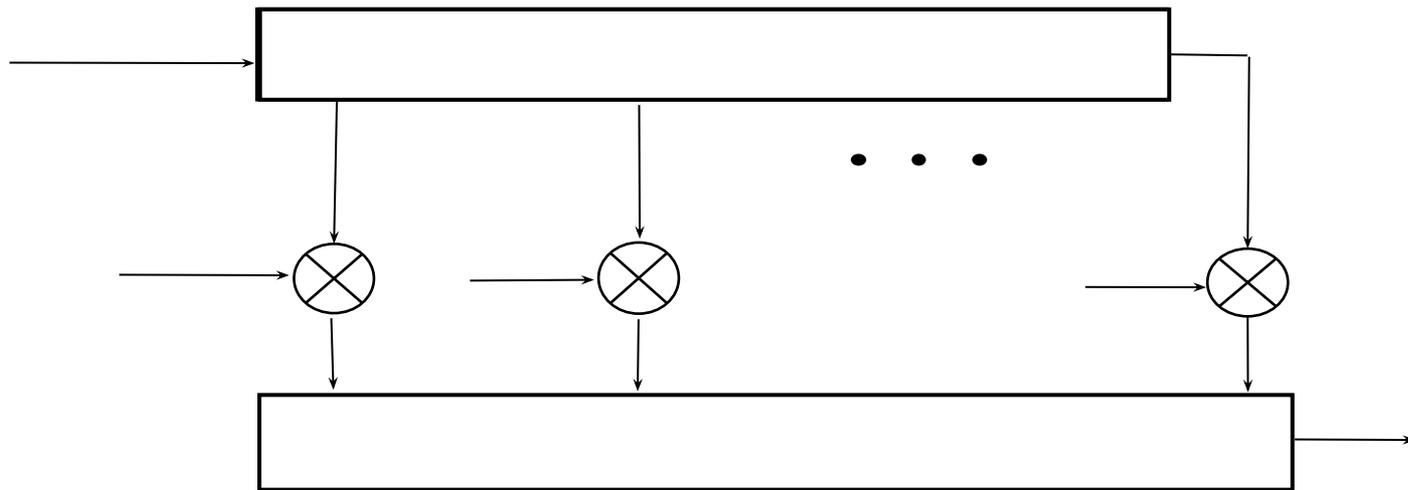
- Определение параметров радиоканала имеет ключевое значение при разработке систем мобильной радиосвязи. Свойства канала, вносимые искажения и помехи, а также допустимая ширина спектра передаваемого сигнала определяют максимальную скорость передачи данных при заданном уровне достоверности передачи информации.
- Используемые в сотовых системах мобильной связи радиосигналы дециметрового диапазона поступают в место приема по многим путям (лучам) различной длины вследствие многократных отражений от препятствий на пути распространения.

# Модель многолучевого распространения сигналов

- Аналитический сигнал, соответствующий сигналу, поступающему на антенну подвижной станции и является суммой сигналов, приходящих по  $M$  путям различной длины с различным числом переотражений.
- Каждый из аналитических сигналов в  $k$ -ом луче приема, в свою очередь, соответствует сумме  $N$  сигналов, являющихся результатами рассеяния и отражений в непосредственной близости от подвижной станции.
- Можно полагать задержки ( $i=1, \dots, N$ ) поступления сигналов в  $k$ -ом луче приема практически одинаковыми и равными средней задержке.
- Реальные значения доплеровских смещений частоты не превышают 100...200 Гц, а максимальное значение величины задержек не превышает порядка единиц мкс.

# Модель многолучевого распространения сигналов

Модель рассматриваемого многолучевого радиоканала может быть представлена в виде линии задержки (ЛЗ) с отводами, соответствующими каждому из  $M$  лучей приема, взвешиванием в соответствии с коэффициентами и последующим суммированием



# Модель многолучевого распространения сигналов

- Как средние значения задержек сигналов в различных лучах приема, так и значения параметров, коэффициентов зависят от времени вследствие перемещения приемной станции и соответствующего изменения морфоструктуры местности в точке приема.
- Поскольку расположение объектов, вызывающих отражения и рассеивание сигналов в непосредственной близости от точки приема, является случайным, все перечисленные параметры оказываются случайными величинами

# Модель многолучевого распространения сигналов

- При достаточно большом числе  $N$  рассеянных и отраженных сигналов, что и имеет место при приеме сигналов в условиях сильно пересеченной местности и городской застройки, коэффициенты могут рассматриваться как случайные процессы, вещественные и мнимые части которых статистически независимы и распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями.
- При излучении передатчиком немодулированного гармонического колебания с частотой  $\omega$ , сигнал, принимаемый по  $k$ -му лучу, в соответствии с моделью Кларка, представляет собой узкополосный гауссовский процесс, огибающая которого описывается законом Рэлея, а фаза распределена равномерно в интервале  $(0, 2\pi)$ .

# Затухание радиосигналов в процессе распространения

- Одним из последствий рассмотренного выше явления многолучевого распространения оказывается увеличение степени затухания уровня средней мощности сигнала с ростом расстояния от передающего устройства по сравнению с затуханием в свободном пространстве.
- В последнем случае, как известно, средняя мощность принимаемого сигнала обратно пропорциональна квадрату этого расстояния, в то время как в системах мобильной связи, в зависимости от условий распространения, этот показатель может достигать значений 3...5.
- Получение достаточно точных аналитических оценок величины энергетических потерь при распространении сигнала в различных условиях не представляется возможным, поэтому при проектировании современных систем используют различные *статистические модели* таких потерь, полученные в результате анализа и обобщения результатов многочисленных экспериментов.

# Затухание радиосигналов в процессе распространения

- Моделью удовлетворительно описывающей потери средней мощности на расстояниях свыше 1 км и в диапазоне частот до 1,5 ГГц, является *модель Окамура-Хата (Okumura-Hata)*.
- Модель является модификацией *модели Окамура* на основе использования эмпирических зависимостей, аппроксимирующих экспериментальные графики *Окамура*, которая дает большие погрешности для условий сельской местности, особенно при больших перепадах высот.
- В области же частот 1,5 до 2 ГГц реальное затухание сигнала оказывается существенно выше, чем следует из *модели Окамура-Хата*. Специально для указанной области частот разработаны *модель COST231-Хата* (англ. *Cooperation for Scientific and Technical Research, COST*) и *модель COST231-Уолфиш-Икегами*.

# Затухание радиосигналов в процессе распространения

- Статистические модели не позволяют учесть специфические условия района развертывания сети связи (этажность строений, ширину улиц и т.п.). Эту специфику позволяет учесть *модель Ксиа-Бертони*.
- *Модель Ксиа-Бертони (Xia-Bertoni)* построена на основании уравнений волновой оптики и рассматривает различные механизмы распространения радиоволн в условиях городской застройки, а именно распространение в свободном пространстве, дифракцию на кромках крыш зданий, отражение от стен зданий. Интерферируя в точке приема, лучи, пришедшие по различным путям, формируют суммарный сигнал.
- Когда антенна БС расположена выше среднего уровня крыш зданий, на входе МС оказываются сигналы, распространяющиеся по двум лучам: один - в результате дифракции на кромке крыши здания, другой - после отражения от противоположной стены здания.

## Затухание радиосигналов в процессе распространения

Модель Ксиа-Бертони позволяет оценить средний уровень потерь в случаях, когда антенна БС расположена на уровне крыш или ниже уровня крыш (такие приемы используют, когда необходимо "засветить" ограниченную локальную область: площадь, сквер и т.д.).

Несмотря на то, что модель не учитывает ряд важных параметров (вид строительных материалов, ориентацию улиц и т.п.), она дает простой и удобный способ получения предварительных оценок уровня средних потерь в канале связи.

# Общие положения(8)

Решение задач планирования сетей подвижной радиосвязи осуществляется на основе прогнозирования возможных зон обслуживания и взаимных помех BS сети. Под *прогнозом* понимается вероятностное суждение, сделанное на основе специальных расчетов.

При этом с целью уменьшения пространственной неопределенности прогноза используются не конкретные местоположения подвижных станций в зоне ответственности сети, а элементы пространственного разрешения территории, называемые *элементарные площадки пространственного разрешения (ЭППР)* зоны покрытия сетей подвижной связи.

Для полевых условий размеры таких ЭППР больше, чем для городских условий, поскольку в последнем случае условия затенения изменяются более резко.

# Общие положения(9)

- ЭППР характеризуются определенными статистическими характеристиками медленных и быстрых замираний сигнала на входе радиоприемника мобильных станций.
- Зона покрытия базовой станции прогнозируется как совокупность ЭППР с заданными параметрами.
- Прогноз зоны покрытия базовой станции по связи определяется как вероятностное суждение о выполнении требований к связи в каждой ЭППР.

# Общие положения(10)

- Характер огибающей сигнала в зоне ЭППР определяется медианным значением уровня поля, среднеквадратическим отклонением его флуктуаций и параметром, характеризующим наличие или отсутствие условий прямой видимости между фазовыми центрами антенн базовой станции и абонентской станции по условиям распространения радиоволн на интервале связи.
- Для определения медианного значения уровня сигнала в ЭППР можно использовать методики расчета затухания сигнала в радиолинии УКВ диапазона прямой видимости. Методики расчета тесно увязаны с используемыми исходными данными. В этом случае с заданной точностью восстанавливается профиль трассы или ее трехмерная картина.

# Общие положения(11)

- Среднеквадратическое отклонение флуктуаций уровня поля относительно его медианного значения в пределах глобальной зоны, образуемой совокупностью ЭППР, определяется в соответствии с классификацией типа подстилающей поверхности в пределах ЭППР.
- Количество типов подстилающей поверхности зависит от многих факторов, характеризующих степень влияния типа подстилающей поверхности в ЭППР на параметры радиолинии. Факторами влияния могут быть диапазон частот, вид сигнала, используемые методы повышения качества и вероятности связи.

## Геоинформационная база данных при планировании радиосвязи(1)

- *Геоинформационной системой (ГИС)* принято называть совокупность компьютерных средств и программного обеспечения, позволяющую вводить, поддерживать, анализировать и показывать все виды географических и пространственных объектов, а также других данных, связанных с ними.
- ГИС позволяет выполнять комплексные пространственные операции над множеством объектов и связанными с ними данными.

# Геоинформационная база данных при планировании радиосвязи(2)

- Один из основных принципов создания ГИС подразумевает разделение содержания картографической базы на **информационные слои**.
- **Слоем** называется графический уровень представления данных таблицы в окне карты.
- Такой подход к созданию и использованию ГИС позволяет учитывать конкретные условия различных потребителей, предоставляя возможность заказывать необходимые слои информации и работать с ними.
- Произвольное комбинирование слоев позволяет удовлетворить требования самых разнообразных потребителей, а также ускорить широкое внедрение цифровых карт.

# Геоинформационная база данных при планировании радиосвязи(3)

Геоинформационная база данных может содержать следующие слои:

- данные о BS (координаты и характеристики);
- рельеф местности (рекомендуемый шаг изолиний 5–20 м);
- данные по типам застройки (городская, пригородная и сельская – дома или кварталы);
- водные объекты (морья, озера и реки);
- лесные массивы (тип леса, плотность и высота деревьев);
- данные почв;
- описание зон рефракции и субрефракции;
- дороги и спецмагистралы (ЛЭП, линии связи и т. п.);
- прочие объекты и обозначения.

# Геоинформационная база данных при планировании радиосвязи(4)

- Точность расчета затухания сигнала на трассе зависит от метода расчета и точности задания исходных данных.
- Для автоматизации расчетов целесообразно использовать геоинформационные системы на основе цифровых карт местности.
- Для условий среднепересеченной местности достаточным является горизонтальное разрешение пространственного распределения морфологических данных о местности до 250 м, точность задания высот 4 м и учет восьми типов подстилающей поверхности.
- В гористой местности горизонтальное разрешение уменьшается до 50 м.
- Для городских условий горизонтальное разрешение должно составлять 5 м, иначе не будут обозначены все проезды, хотя для проведения самих расчётов достаточно горизонтального разрешения в 10 м.
- Для целей планирования рекомендуется использовать электронные карты масштабов 1:100 000 или 1:200 000. Обязательным требованием к картам является

# Цифровые карты местности

## Матричные цифровые карты.

Оцифровка рельефа и типов подстилающей поверхности (водные объекты, леса, застройка и т. п.) производится квадратами  $N \times N$  метров, где  $N=(1, 2, 5, 10, 20, 25, 50 \dots 1000)$  м. .

Достоинства метода – простота и высокая скорость обработки данных.

Недостатками матричного метода являются:

- большой объем памяти для хранения информации (избыточность);
- разномасштабность исходных данных;
- трудность представления протяженных объектов (дороги, реки, ЛЭП и др.);
- трудность трансляции данных из исходного источника представления информации (например, топографические—на бумаге) в требуемую форму хранения;
- высокая трудоемкость сбора и стыковки разнородной информации;
- высокая трудоемкость сопровождения карт.

# Цифровые карты местности

## Векторные цифровые карты.

Информация хранится в виде описания *«кривых равных величин» (изолиний)*, например, кривые равных высот. Хранимая информация делится на смысловые части, каждая из которых может быть представлена в графическом виде в качестве отдельного **«слоя» карты** (например, могут быть выделены следующие слои карты – высоты местности, проводимость почвы, коммуникации, плотность размещения радиосредств и т. д.).

Достоинствами данного метода являются:

- небольшой объем памяти, требуемой для хранения информации (по сравнению с предыдущим методом);
- отсутствие проблемы совмещения различных слоев, в которых хранится информация, снятая с разной точностью (разным масштабом);
- удобство описания протяженных объектов;
- относительная простота создания и сопровождения карт.

К недостаткам метода можно отнести большой объем вычислений при обработке данных, что приводит к замедлению работы системы на ЭВМ с малой производительностью.

# Инструментальные средств создания ГИС

Успешно применяются в мировой практике при решении широкого круга задач цифровой картографии и геоинформатики следующие ГИС:

- многофункциональная графическая оболочка *MicroStation*
- модульная геоинформационная среда *MGE* для РС (Windows и др.) и рабочих станций (UNIX)
- геоинформационная система *MapInfo* (в том числе, русифицированная версия) позволяющая работать на различных платформах РС и создавать приложения, ориентированные на конкретные задачи пользователя, снабженные меню, разработанными специально для этого приложения (благодаря наличию встроенного языка программирования *MapBasic*).
- и др.

# Структура локальной отраслевой геоинформационной системы





## Алгоритм частотно-территориального планирования

# Первый этап планирования

- заключается в подготовке электронной карты местности (ЭКМ), содержащей данные, описывающие рельеф местности, застройку территории, лесные и водные массивы, и в получении надежных данных в отношении:
- высоты местности;
- морфоструктуры (землепользование);
- распределения населения, транспортных потоков и других факторов, влияющих на плотность трафика;
- прогноза числа абонентов;
- требований к рабочим характеристикам для обеспечения соответствующего качества радиосвязи;
- вероятности блокировки;
- бюджета потерь;
- рекомендуемых участков для размещения базовых станций, отвечающих требованиям по наличию линий привязки к сети связи общего пользования, электропитанию, возможности размещения оборудования, установки антенн и др.;
- имеющихся в распоряжении полос частот;
- совместимости с другими системами;
- сетевых интерфейсов.
- Очевидно, для планирования сети требуется довольно обширный набор исходных данных, достоверность которых может существенно повлиять на адекватность принимаемого решения.
- На этом этапе производится оценка *бюджета потерь* – показателя, характеризующего допустимые потери в радиолинии для заданного стандарта сотовой мобильной связи.

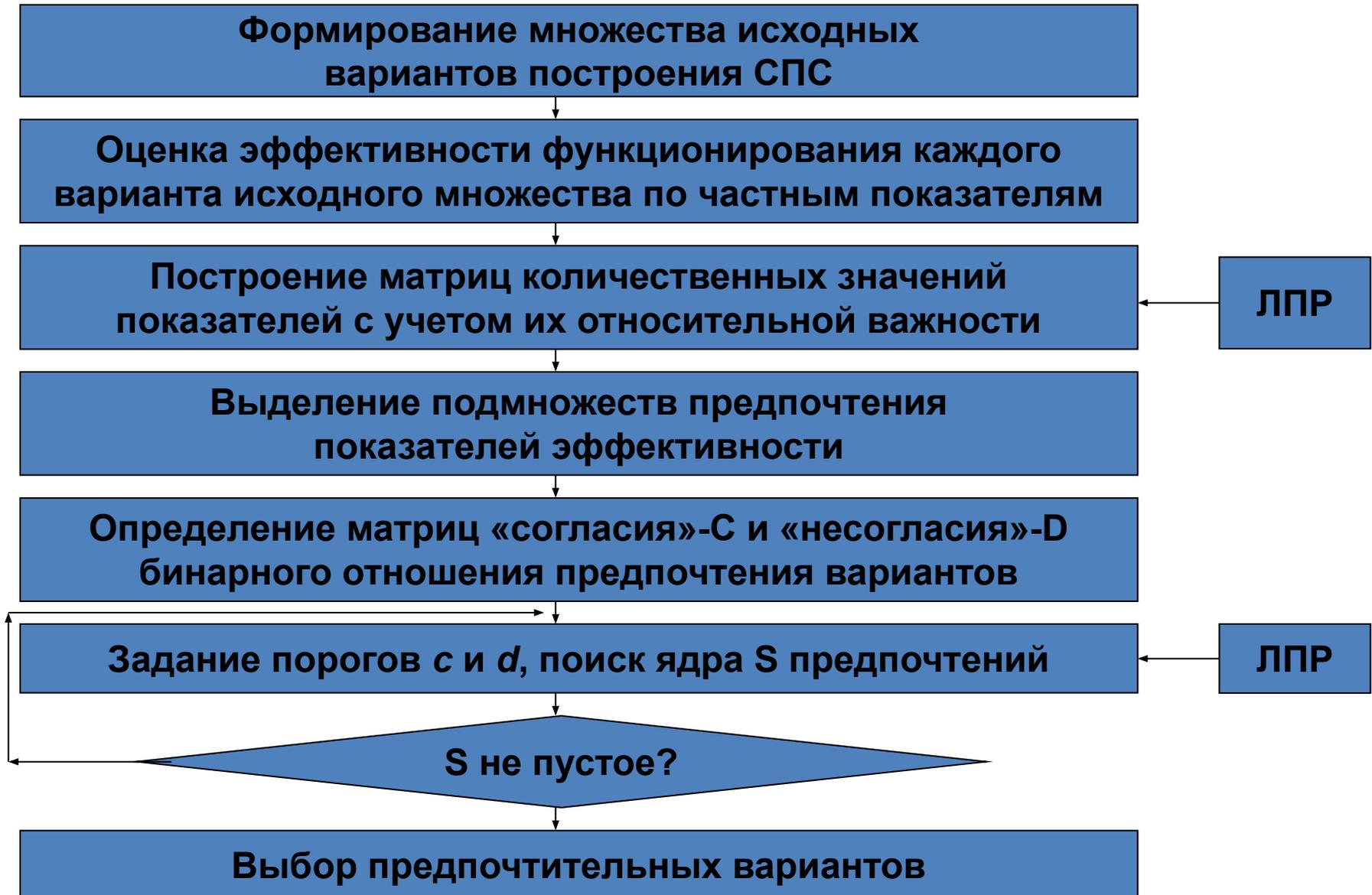
## Второй этап планирования

- состоит в построении исходной сети (*сети начального приближения*). На этом этапе вся сеть декомпозируется на однородные фрагменты на основе значений плотности трафика, применительно к которым находятся распределения базовых станций по зонам обслуживания, параметры базовой сети и распределение частотного ресурса (кодových сдвигов).
- Такой подход к построению сети (на основе абонентской емкости) приводит к одинаковым размерам сот в пределах фрагмента сети и необходимости решения задач по стыковке неоднородных фрагментов сети на их границах, т.е. к необходимости решения задач по расщеплению сот. При использовании расщепления возможно два типа сот: с одинаковыми секторами ("большие" и "малые" соты) и с разными секторами ("переходные" соты).
- Решение, полученное на этапе построения исходной сети, является важнейшим этапом планирования и должно представлять собой частотно-территориальный план сотовой сети радиосвязи, который может быть использован в качестве сети начального приближения.

# Третий этап планирования

- включает привязку участков развертывания базовых станций к карте местности и итеративную оптимизацию параметров базовой сети с использованием геоинформационной базы данных и специального программного обеспечения, позволяющего произвести расчет напряженности поля сигнала в зоне действия сети.
- Итеративная оптимизация параметров базовой сети начального приближения проводится с целью повышения эффективности сети при широком использовании методов моделирования с использованием электронных карт местности.
- В процессе оптимизации все введенные на этапе построения начального приближения допущения снимаются, и производится уточнение параметров под условия реальной сети, производится анализ сети, адаптация плана развертывания радиосети к условиям территориальных ограничений зоны обслуживания, улучшение ее конфигурации, структуры и параметров в целях наращивания емкости сети и повышения качества услуг.
- Оптимизация сетевой структуры предполагает минимизацию числа BS при удовлетворении заданных системных параметров и обеспечении качества услуг.
- Оптимизация может заключаться в перемещении некоторых BS на новое место или увеличении числа секторов. В последнюю очередь рассматриваются варианты, требующие увеличения числа BS, так как это ведет к удорожанию сети.

# Алгоритм оптимизации сети (вариант)



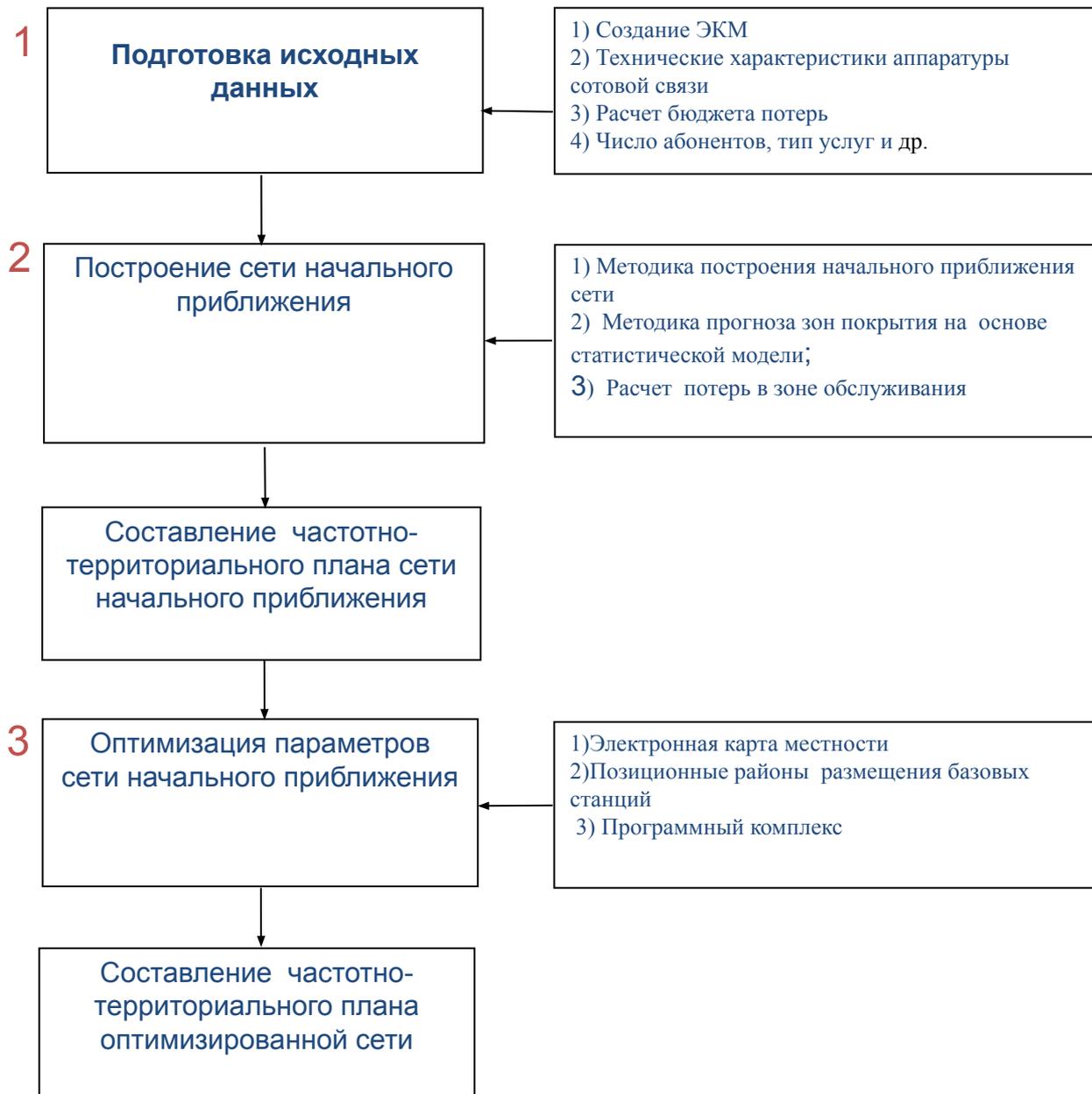
# Отличия в планировании сетей GSM, WCDMA и LTE

Стандарт	Этапы планирования
GSM	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Выбор типа частотного кластера</li><li>2. Определение пространственных параметров сети</li><li>3. Определение параметров базовых станций (исходя из бюджета потерь)</li><li>4. Составление частотного плана</li></ol>
WCDMA	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Определение числа каналов трафика на соту в зависимости от внутрисистемных помех (загрузки сети)</li><li>2. Определение пространственных параметров сети</li><li>3. Расчет параметров базовых станций (исходя из того, что сигнал групповой; расчет по пилотному сигналу)</li><li>4. Распределение кодовых сдвигов по секторам</li></ol>
LTE	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Определение пространственных параметров сети</li><li>2. Частотное планирование</li><li>3. Оценка пропускной способности при заданном профиле трафика</li><li>4. Уточнение параметров базовых станций и зоны обслуживания, исходя из трафика</li></ol>

# Отличия в планировании сетей GSM, WCDMA и LTE (продолжение)

Наименование	LTE	GSM	WCDMA
Планирование частотного ресурса	Распределение фрагментов полосы системы между пользователями базовых станций	Распределение частотных каналов между базовыми станциями	Не требуется
Наличие регулярной методики планирования	Нет	Существует	Существует для высокоскоростной и низкоскоростной передачи
Коммутация	Пакетов (все через IP)	Каналов, пакетов	Каналов, пакетов
Передача информации	OFDM	Узкополосный сигнал	Широкополосный сигнал
Профиль трафика	VoIP, потоковое видео, мобильный интернет, фоновый трафик	Речь, мобильный интернет, фоновый трафик	Речь, потоковое видео, мобильный интернет, фоновый трафик
Дисциплина обслуживания	VoIP – СМО с отказами, Мобильный интернет – СМО с очередями и приоритетами, Потоковое видео – СМО без задержек	Речь – СМО с отказами, Мобильный интернет – СМО с очередями и приоритетами	Речь – СМО с отказами, Мобильный интернет – СМО с очередями и приоритетами, Потоковое видео – СМО без задержек

# **ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ GSM**



## Алгоритм планирования сети сетей GSM

## GSM

### Этап 1. Определение числа каналов трафика на сектор

Сеть сотовой связи строят, повторяя одни и те же частотные кластеры в пределах однородных фрагментов зоны обслуживания сети. Это позволяет снизить дефицит радиочастот за счет их повторного использования. Исходя из числа рабочих частот, выделенных оператору –  $nf$  и размерности кластера –  $C$ , находим число каналов, используемых для управления сигнализацией –  $N_u$  и число трафика каналов, приходящихся на одну несущую.

### Этап 2. Определение пространственных параметров сети.

$N_{a.БС} = M \cdot \text{int}\left(\frac{A_c}{A_{cp}}\right)$  число абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией в час наибольшей нагрузки

$K = \text{int}\left(\frac{N_a}{N_{a.БС}}\right)$  число базовых станций в сети

$R_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi \cdot K}}$  – радиус соты, исходя из площади требуемой зоны обслуживания сети и необходимого числа BS

Таким образом, на этом этапе планирования находится число базовых станций и максимальный радиус сот, исходя из абонентской плотности (нагрузки).

# Построение начального приближения сети GSM(продолжение)

## Этап 3. Определение параметров базовых станций

При определении параметров базовых станций сети (мощности передатчиков  $P_{БС}$  (Вт) и высот антенн  $H_{БС}$ ) необходимо использовать технические данные радиооборудования сети, в частности: чувствительность приемников абонентских станций  $P_{АС}$  (дБ(Вт)), высоты их антенн  $H_{АС}$ , коэффициенты усиления антенных устройств базовых станций  $G_{БС}$ , потери в антенно-фидерном тракте и комбайнерах базовых станций, а также потери на трассе распространения радиоволн. Мощность передатчика базовой станции  $P_{прдБС}$  при заданных параметрах антенно-фидерного тракта находится из по формуле

$$P'_{прдБС} = 10^{C/10},$$

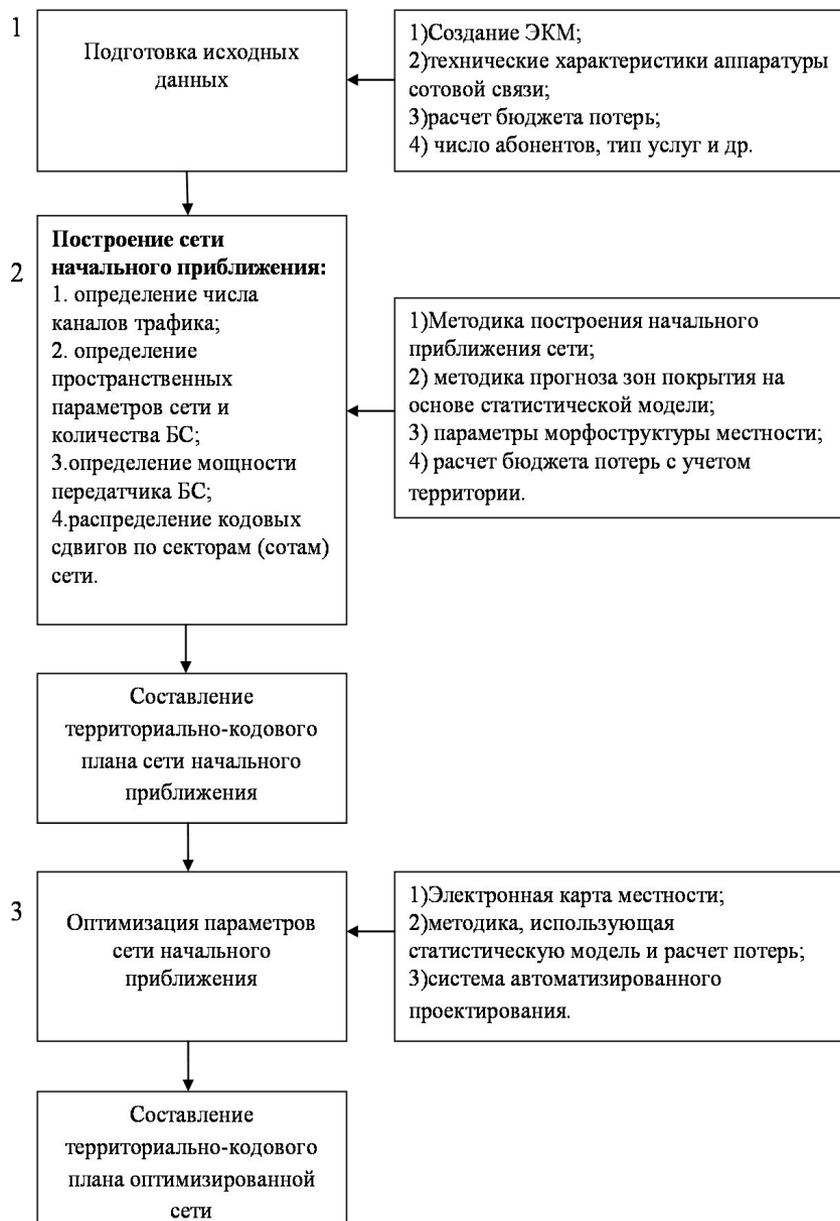
## Этап 4. Составление частотного плана

Зная число частотных каналов, приходящихся на каждую базовую станцию, распределяем номиналы частот по группам частотного кластера. Распределение частотного ресурса по группам, базовым станциям и их секторам производится с учетом:

- минимального частотного разнеса радиоканалов в составе одной стойки базовой станции, определяемого требованиями использования устройств сложения мощности канальных передатчиков (комбайнеров) для работы на общую передающую антенну,  $DF_{БСmin}$ , кГц;
- минимального частотного разнеса радиоканалов смежных секторов, в том числе одной базовой станции,  $DF_{Сmin}$ , кГц;
- минимального разнеса радиоканалов, используемых в одном секторе базовой станции, с позиций их интермодуляционной совместимости (не должны создаваться в приемниках базовой станции помехи интермодуляционного характера при приеме нескольких сигналов абонентских станций, работающих в одном секторе).

# ТЕРРИТОРИАЛЬНО-КОДОВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ WCDMA

# Алгоритм территориально-кодowego планирования сети WCDMA



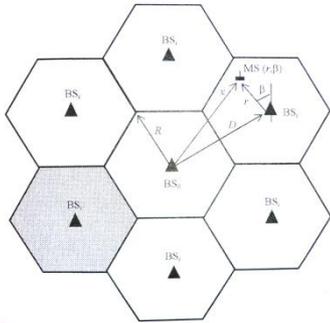
**При построении сети начального приближения предполагаются следующие допущения:**

- - плотность абонентского трафика по территории обслуживания постоянна;
- - соты одинаковых размеров;
- - активность абонентов постоянна от одной соты к другой;
- - обеспечивается быстрое управление мощностью передатчиков, как в обратном, так и в прямом направлениях связи;
- - морфоструктура местности однотипна;
- - параметры приемопередающих станций одинаковы.

# Методика построения начального приближения сети

## Этап1: Определение числа каналов трафика

- Для повышения точности построения начального приближения сети применяется модель сотовой сети, используемая при анализе внутрисистемных помех, воздейс приемник BS:



Количество каналов трафика, приходящихся на сектор (соту) для однородной речевой нагрузки:

$$M_s = \text{int}\left[2\left(\frac{2B}{q^2} + 1\right)\frac{1}{1 + \delta}\right],$$

Для передачи однородных данных:

$$M_s = \text{int}\left[\left(\frac{2B}{q^2} + 1\right)\frac{1}{1 + \delta}\right],$$

- Основное уравнение CDMA для текущего отношения с/п на символ в обратном канале связи:

$$q^2 = \frac{2P_{RX \min}^{BS} B}{k_6 T_0 (K_u - 1) \Delta F + (M_s - 1) P_{RX \min}^{BS} + \delta M_s P_{RX \min}^{BS}}.$$

Стандарт	Загрузка сот окружения	Количество каналов трафика
CDMA 2000	- 100% - загрузка;	- 24 канала;
	- 50% - загрузка;	- 29 каналов;
	- 25% - загрузка.	- 33 канала.
WCDMA	- 100% - загрузка;	- 80 каналов;
	- 50% - загрузка;	- 98 каналов;
	- 25% - загрузка.	- 111 каналов.

## Этап 2: Определение пространственных параметров сети

Исходные данные для расчета пространственных параметров сети с точки зрения абонентской емкости:

- число каналов трафика на сектор (соту)  $N_{анет}$ ;
- вероятностью блокировки вызова  $P_{bl}$ ;
- активность одного абонента в ЧНН

Эрл;  $A_a = 0,03...0,04$

- число абонентов сети  $M^s$ ;
- число секторов на БС –  $D$ ;
- площадь зоны обслуживания  $S_{net}$ .

Максимально-возможное число абонентов, которое может обслужить сектор базовой станции:

$$N_{асект} = \frac{A_s}{A_a}$$

Число секторов в сети:

$$N_{сект} = \frac{N_{анет}}{N_{асект}};$$

Число БС в сети:

$$N_{BS\ net} = N_{сект} / D,$$

где  $D$  - число секторов на БС.

Площадь БС:

$$S_{BS} = \frac{S_{net}}{N_{BS\ net}}.$$

Дальность связи (радиус соты с точки зрения абонентской нагрузки):

$$R = k \cdot \sqrt{\frac{S_{BS}}{\pi}},$$

где  $k = 1.25$  – коэффициент, учитывающий необходимость взаимного перекрытия сот для обеспечения хэндовера.

Для среднего и малого города с высотой антенны  $BS$  30м, высотой антенны  $MS$  1,5м и несущей частотой 1950МГц допустимые потери на трассе с помощью модели COST231-Hata:

$$L_p = 137.4 + 35.2 \log(R)$$

Откуда радиус соты с точки зрения бюджета потерь:

$$R = 10^{\frac{L_p - 137.4}{35.2}}, \text{ км.}$$

Если  $R$  ( по потерям)  $\approx R$  ( по абонентской емкости), то выполняются требования по покрытию и емкости сети и ресурсы используются наиболее рационально, а если данное требование не выполняется, то надо произвести расчет заново для улучшения ситуации, изменяя определенные параметры.

### Этап 3: Определение мощности передатчика БС

Расчет линии «вниз» аналогичен расчету линии «вверх», однако имеется ряд отличий. Ограничения по уровню сигнал/помеха для конкретного пользователя:

$$q^2 = \frac{P_{RX \min}^{MS} \cdot SF}{P_{ш} + P_{пом.соб.} + P_{пом.сосед.}}$$

Каждая базовая станция излучает сигналы, состоящие из каналов трафика и общих каналов. Мощность общих каналов управления составляет 0.2 от максимальной мощности сигнала. Мощность каналов трафика при телефоном трафике:

$$P_{trafic} = \alpha \cdot (n_k + n_x) \cdot P_{RX \min}^{MS}$$

Мощность сигнала:

$$P_{сигн} = \frac{\alpha \cdot (n_k + n_x) \cdot P_{RX \min}^{MS}}{0.8}$$

Для обеспечения уверенного приема сигналов синхронизации  $P_{сигн} = 1.5 \cdot P_{ш}$ .

Мощность шума на входе приемника мобильной станции:

$$P_{ш}^{RX} = kT_0 + 10 \lg \Delta F + K_{ш} \text{ дБм};$$

Мощность сигнала:

$$P_{сигн} = 10 \lg(1.5) + P_{ш} = 10 \lg(1.5) + P_{ш}^{RX} \text{ дБм.}$$

Мощность передатчика базовой станции:

$$P_{BS}^{TX} = P_{сигн} + Lp - G_{BS} + L_{каб} - G_{SHO} \text{ дБм.}$$

Средний уровень мощности группового сигнала на выходе передатчика базовой станции:

$$\bar{P}_{BS}^{TX} = \int_{S_{BS}} P_{BS}^{TX}(r) \cdot W(r, \beta) ds$$

Поскольку абоненты распределены по соте равномерно, плотность вероятности нахождения абонента в точке соты с координатами  $(r, \beta)$ :

$$W(r, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2}, & r \leq R, \\ 0, & r > R. \end{cases}$$

## Этап 4: Распределение кодовых сдвигов по секторам (сотам) сети

- Все BS в сети используют один короткий код, но с разными циклическими сдвигами. По циклическому сдвигу короткого кода можно выделять и различать сигналы, излучаемые BS в разных сотах и секторах.

- Сектора и соты сети группируются в кодовые кластеры,  $\text{int}[\frac{512}{m}]$  максимальная размерность которых ( , 512),  $m \in \{3, 6\}$

- количество сот, 512 – максимально возможное количество секторов в кластере, а - секторность сот.

Средний радиус кластера равен:

$$R_{clust} = \sqrt{\frac{\text{int}(512 / m) \cdot \pi R_{cell}^2}{\pi}} = R_{cell} \sqrt{\text{int}\left(\frac{512}{m}\right)}$$

Соты и сектора с идентичными кодовыми сдвигами будут разнесены на расстояние:

$$R_{clust} \cong 2R_{cell} \sqrt{\text{int}\left(\frac{512}{m}\right)} .$$

Назначение циклических сдвигов короткого кода может быть осуществлено подобно назначению частот в сотовых сетях с частотным и частотно-временным разделением каналов – на основе кластерных структур.

# Особенности технологии W-CDMA/HSDPA

- Технология HSDPA во многом близка к пакетной передаче данных, которая используется в стандарте GSM с использованием технологии GPRS/EDGE. Передача ведется отдельными пакетами, в зависимости от состояния трассы применяют различные модуляционно-кодированные схемы и повторную передачу неприятых пакетов.
- В технологии HSDPA отсутствуют две основные особенности W-CDMA: изменяемый коэффициент расширения спектра (*variable SF*) и быстрое управление мощностью. Вместо этого используется адаптивная модуляция и кодирование AMC (*Adaptive Modulation and Coding*), короткий размер пакета, мультикодовый режим и автоматический повтор запроса. AMC дает эффективный выигрыш в мощности за счет исключения расходов на управление мощностью.
- Коэффициент расширения спектра зафиксирован на  $SF = 16$ , это дает хорошее разрешение скорости. Размер пакета уменьшен с 10–20 до 2 мс (это соответствует трем TS), чтобы увеличить канальную скорость и повысить эффективность AMC.
- Для получения высоких пиковых скоростей используют модуляцию 16-QAM. При сочетании 16-QAM и канального кодирования со скоростью  $R_{код} = 3/4$  достигают пиковой скорости передачи данных 712 кбит/с. В наиболее помехозащищенном варианте передачи используют 4-QM со скоростью кодирования  $1/4$ , но при этом скорость передачи данных уменьшается до 119 кбит/с.

# Особенности технологии W-CDMA/HSDPA(продолжение)

- При реализации HSDPA возрастает поток информации между Node B и RNC, меняется сигнализация по протоколу RRC. Существенно увеличивается объем программного обеспечения в Node B.
- Канальный ресурс в соте по-прежнему распределяет RNC. Он выделяет коды каналам HS-PDSCH и HS-SCCH, но пакеты для передачи по этим каналам расставляет BS. Кроме того, BS буферизирует пакеты, передаваемые абонентам, ведет учет их времени пребывания в буфере, организует их повторную передачу.
- Несомненным плюсом технологии HSDPA является то, что дальность связи практически равна зоне покрытия базовой станции.
- Минусом является то, что высокая скорость передачи данных доступна только в направлении от базовой станции к мобильным абонентам, а для отправки данных в направлении от мобильных абонентов к базовой станции возможна максимальная скорость передачи данных до 384 кбит/с.
- Этот недостаток планируется устранить в технологии HSUPA (англ. *High Speed Uplink Packet Access* – *высокоскоростной пакетный радиодоступ в линии «вверх»*).

# Варианты модуляции и кодирования W-CDMA/HSDPA

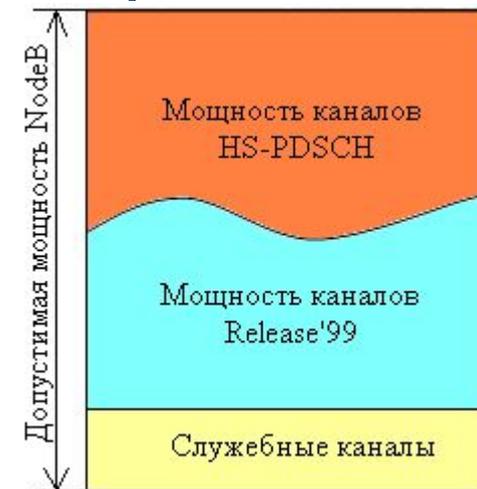
<b>TFRC</b> комбинация модуляции и кодирования совместно с канальным ресурсом	<b>Модуляция</b>	<b>Эффект. скорость кода</b>	<b>Скорость передачи данных (1 код) кбит/с</b>	<b>Скорость передачи данных (5 код) Мбит/с</b>	<b>Скорость передачи данных (15 код) Мбит/с</b>
<b>1</b>	<b>4-ФМ</b>	<b>1/4</b>	<b>119</b>	<b>0,6</b>	<b>1,8</b>
<b>2</b>	<b>4-ФМ</b>	<b>1/2</b>	<b>237</b>	<b>1,2</b>	<b>3,6</b>
<b>3</b>	<b>4-ФМ</b>	<b>3/4</b>	<b>356</b>	<b>1,8</b>	<b>5,3</b>
<b>4</b>	<b>16-КАМ</b>	<b>1/2</b>	<b>477</b>	<b>2,4</b>	<b>7,2</b>
<b>5</b>	<b>16-КАМ</b>	<b>3/4</b>	<b>712</b>	<b>3,6</b>	<b>10,7</b>

# Распределение ресурсов

## Кодовый ресурс

256	128	128	128	128	128			128		128					
256															
256	128	128	128	128	128			128		128					
256		CS						128							
64	128	128	128	128	128			128	PS	128					
	128	128		128	128			128		128					
			64												
256	128	128	PS	128	128			128	128	128					
256															
128	128	128	128	128	128			128	128	128					
128	128	128	128	128	128			128	128	128					

## Ресурс по мощности



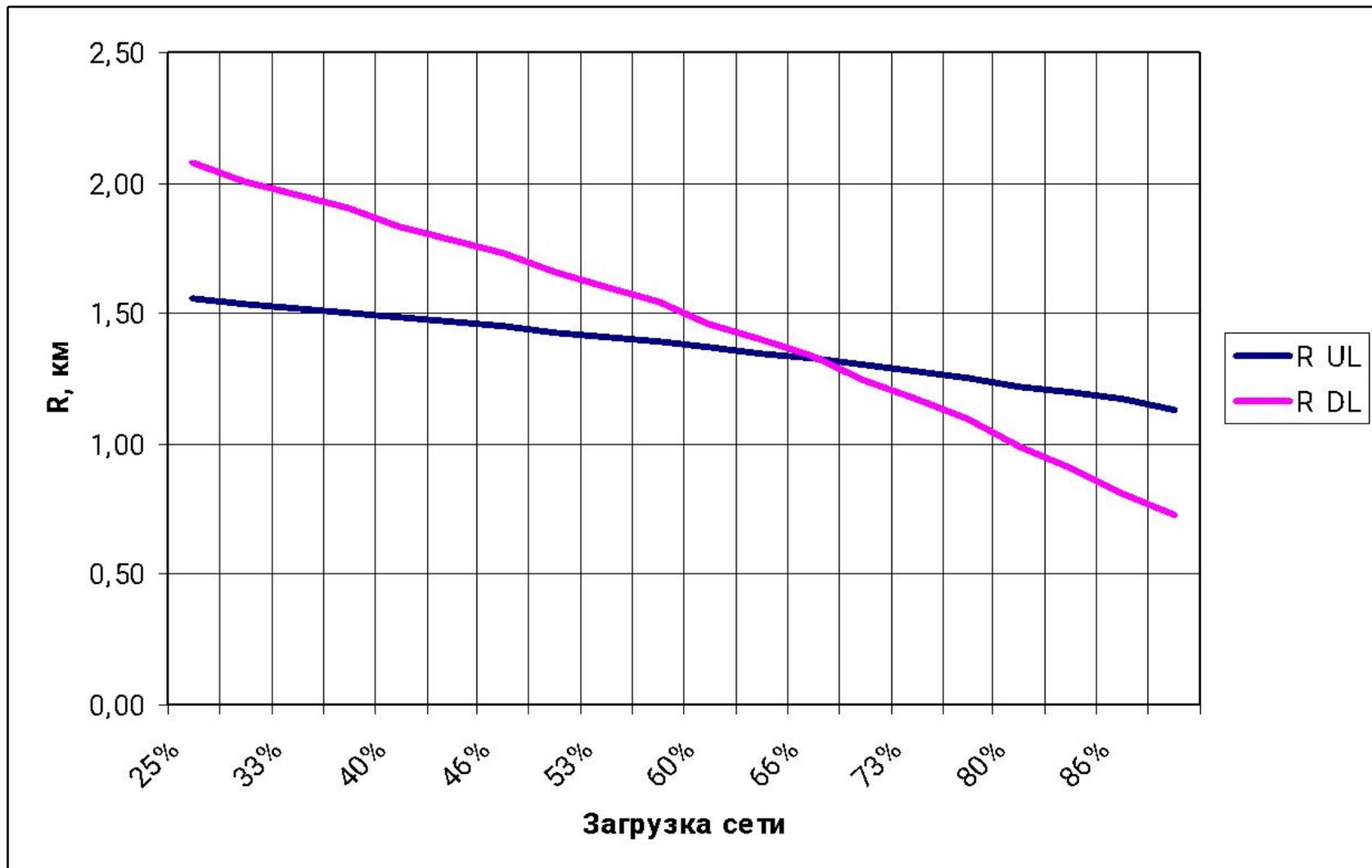
# Управление доступом в сетях W-CDMA/HSDPA



# Алгоритм планирования сети WCDMA-HSDPA



# Зависимость радиуса от загрузки сети



## Количество абонентов при различной загрузки сети WCDMA R'99

30%

Удаленность от базовой станции, км	CS	PS64	PS128	PS256	PS384
$R/3$	–	–	–	–	–
$2R/3$	11	5	2	1	0
$R$	2	1	0	0	0

70%

Удаленность от базовой станции, км	CS	PS64	PS128	PS256	PS384
$R/3$	–	–	–	–	–
$2R/3$	55	26	13	5	4
$R$	13	6	3	1	1

90%

Удаленность от базовой станции, км	CS	PS64	PS128	PS256	PS384
$R/3$	–	–	–	–	–
$2R/3$	–	–	–	–	–
$R$	46	22	11	5	3

## Расчет параметров сети

Параметры	30%	70%	90%
Радиус $R$ , км	1,53	1,24	0,72
Площадь соты $S_{BS} = \frac{9\sqrt{3}}{8} R^2$ , км <sup>2</sup>	4,6	2,9	1
Количество NodeB для HSDPA $N_{NodeBHSDPA} = \frac{S}{S_{BS}}$	6	9	25
Количество NodeB, которое необходимо добавить для новой сети WCDMA-HSDPA  $N = N_{NodeBHSDPA} - N_{NodeBR'99}$	1	4	20

# Характеристики прямого канала при работе в режиме мобильного Интернета

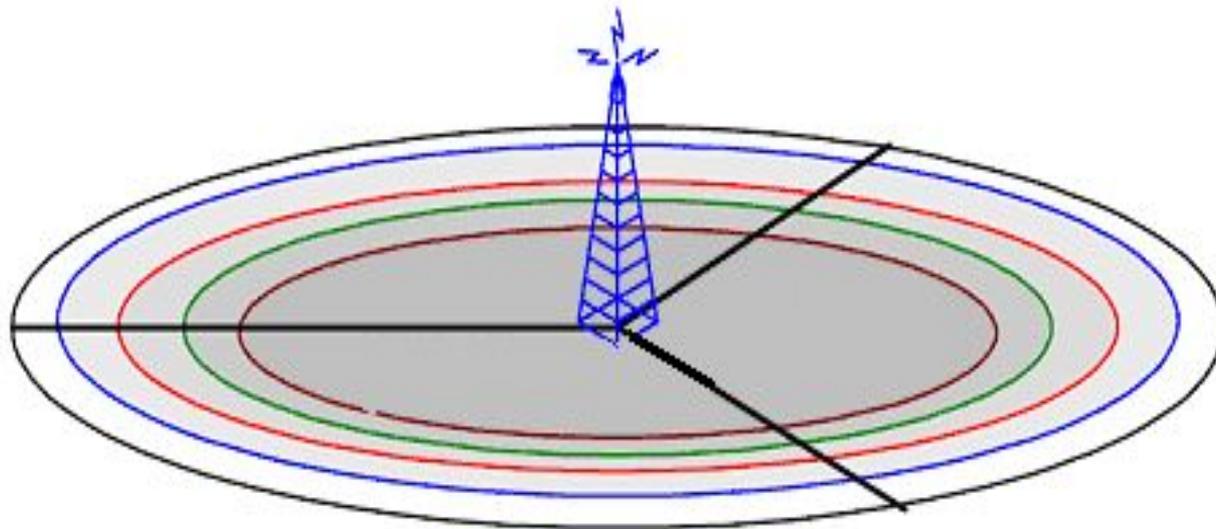
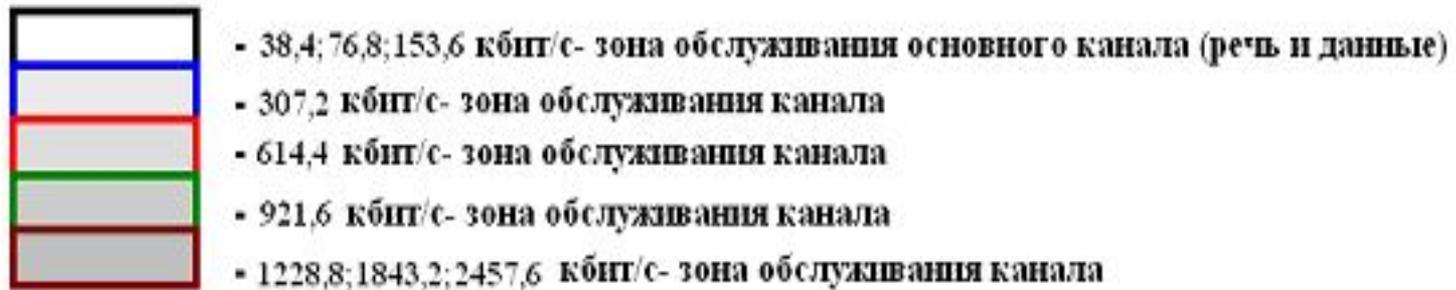
## Адаптивные схемы модуляции и кодирования

Показатель	Скорость передачи (Кбит/с)	Количество нужных слотов	Биты в пакете	Скорость кода	Тип модуляции
1	38,4	16	1024	1/5	QPSK
2	76,8	8	1024	1/5	QPSK
3	153,6	4	1024	1/5	QPSK
4	307,2	2	1024	1/5	QPSK
5	614,4	1	1024	1/3	QPSK
6	921,6	2	3072	1/3	QPSK
7	1228,8	1	2048	1/3	8-PSK
8	1843,2	1	3072	1/3	16-QAM
9	2457,6	1	4096	1/3	16-QAM

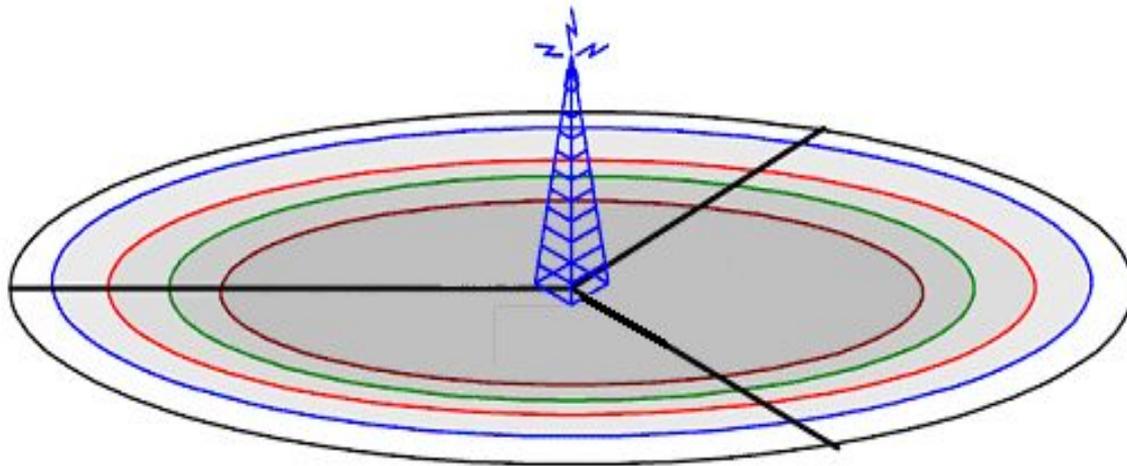
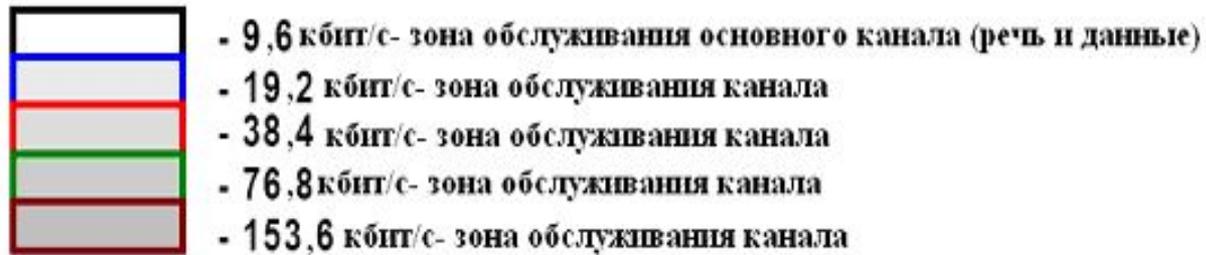
## Требуемое отношение сигнал/помеха в прямом канале

Скорость передачи данных	Требуемое отношение S/N [дБ]
38,4	-7
76,8	-3,5
153,5	-2,5
307,2	1,5
614,4	4
921,6	5,5
1228,8	8,5
1843,2	11
2457,6	12,5

# Распределение скоростей передачи данных в прямом канале в зоне обслуживания базовой станции при работе в режиме мобильного Интернета



# Распределение скоростей передачи данных в обратном канале в зоне обслуживания базовой станции при работе в режиме мобильного Интернета



# Распределение скоростей передачи данных в зоне обслуживания

## *Канал «вниз»*

Параметр	Скорость в каналах трафика, кбит/с					Средняя скорость передачи в секторе, кбит/с
	38,4; 76,8; 153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8; 1843,2; 2457,6	
Вероятность нахождения в зоне обслуживания	0,19	0,17	0,28	0,2	0,16	656,88

## *Канал «вверх»*

Параметр	Скорость передачи данных, кбит/с					Средняя пропускная способность в секторе, кбит/с	Количество абонентов на обслуживание, аб		
	9,6	19,2	38,4	76,8	153,6		δ, %		
							25	50	100
Вероятность нахождения в зоне обслуживания	0,05	0,05	0,1	0,4	0,4	97,44	455	359	207
Вероятность задержки доступа – 2%.									

## Пропускная способность сектора

	Скорость в каналах трафика, кбит/с					Параметр				
	38,4; 76,8; 153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8; 1843,2; 2457,6					
	$N_{аб123}$	$N_{аб4}$	$N_{аб5}$	$N_{аб6}$	$N_{аб789}$	$V_{\Sigma}$	$S$	$T_2$	$Z$	$V_{ср}$
аб	аб	аб	аб	аб	аб	кбит/с	аб	с	%	кбит/с
455	86	77	127	91	73	681,59	ПР. Т.		100	ПР. Т
359	68	61	101	72	57	538,94	3,6	2,688	85,5	113
207	39	35	58	41	33	313,06	0,4	0,54	49,3	287,8

Обозначения:  $N_{аб}$  – число абонентов в секторе в ЧНН,  $N_{аб*i*}$  – число абонентов в сегменте зоны обслуживания со скоростью  $i$ ,  $i$  – номер сегмента зоны обслуживания, которая соответствует определённой скорости передачи данных,  $V_{\Sigma i}$  – требуемая пропускная способность, приходящаяся на абонентов, передающих данные в своём сегменте зоны обслуживания,  $V_{\Sigma}$  – требуемая пропускная способность сектора,  $S$  – число пользователей в очереди на слот,  $T_2$  – время загрузки в очереди,  $Z$  – занятость временных слотов,  $V_{ср}$  – средняя скорость, приходящаяся на абонента в прямом канале, ПР.Т. – перераспределение трафика

# **ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ LTE**

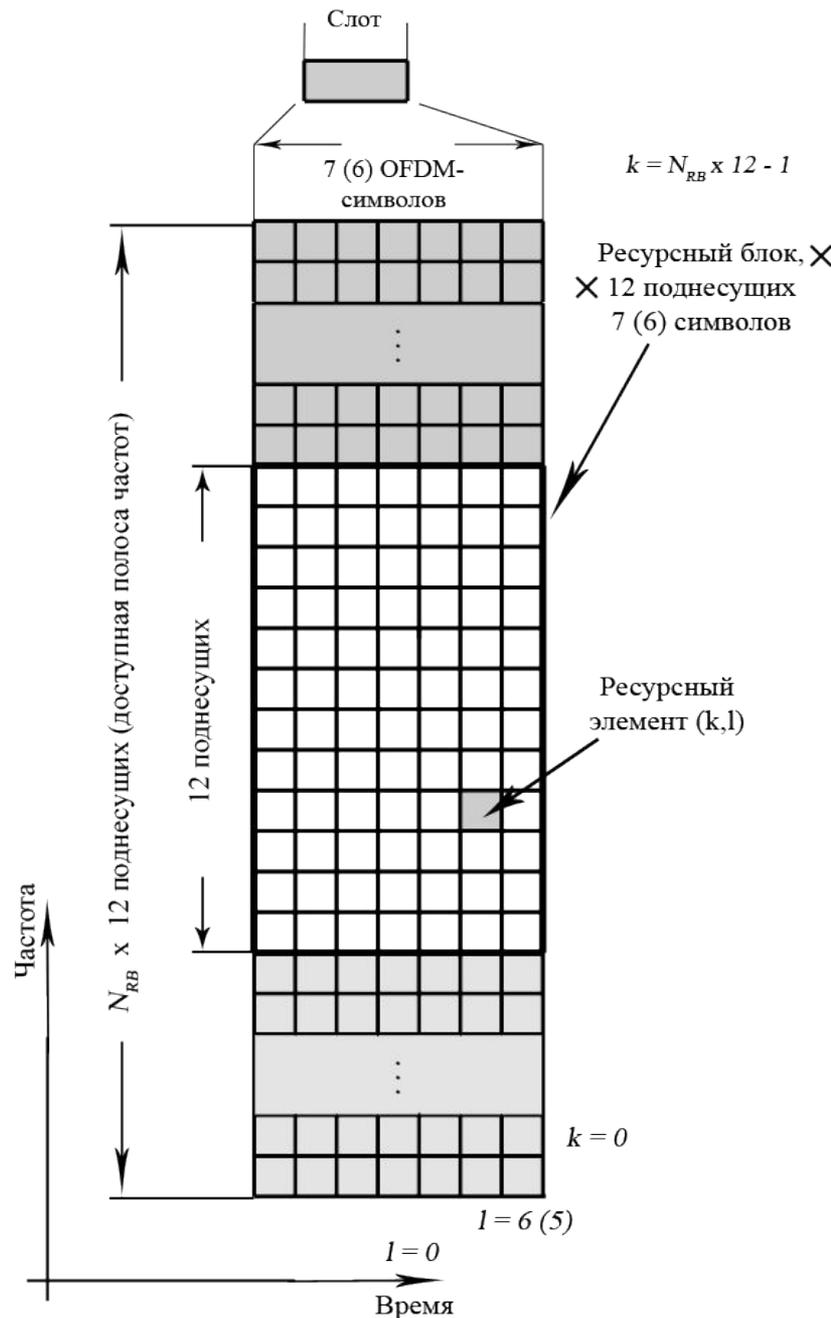
# Основные технические характеристики стандарта LTE

Характеристика		Значение
Полоса частот, МГц		1.4; 3; 5; 10; 15; 20
Метод многостанционного доступа	Нисходящий канал	OFDMA
	Восходящий канал	SC-FDMA
Символьная скорость		14000 символов/с
Помехоустойчивое кодирование		сверточные коды, турбо коды
Длительность радиокадра, мс		10
Минимальный интервал между кадрами, мс		1
Стандартный шаг между поднесущими, кГц (канал «вниз»)		15
Информационная единица в канале		ресурсный блок
Количество поднесущих на ресурсный блок (занимаемая ресурсным блоком полоса)		12 (180 кГц)
Циклический префикс, мкс	Стандартный	4,7 (5,2 – перед первым символом)
	Расширенный	16,7
Дуплексный режим		Частотный (FDD)
		Временной (TDD)
Модуляция сигнала		QPSK/16QAM/64QAM
Максимальная эффективная излучаемая мощность, дБм	UE	23
	eNodeB	46

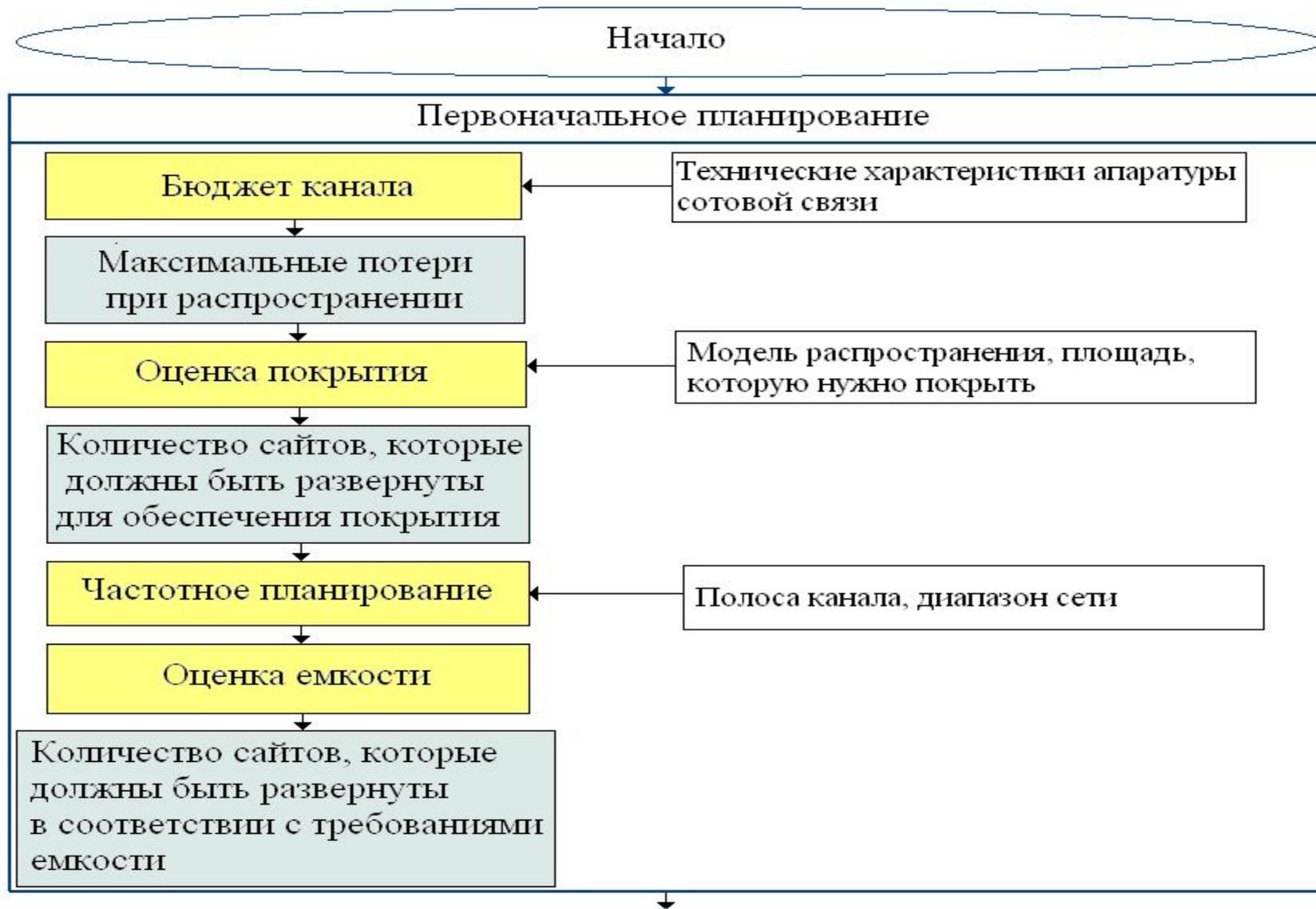
## Требуемое разнесение по частоте стандартов LTE и GSM, работающих в общей полосе частот.

Полоса частот, занимаемая системой LTE	Разнесение по частоте
10 МГц (50 ресурсных блоков)	5 МГц
5 МГц (25 ресурсных блоков)	2.5 МГц
3 МГц (15 ресурсных блоков)	1.6 МГц
1.4 МГц (6 ресурсных блоков)	0.8 МГц

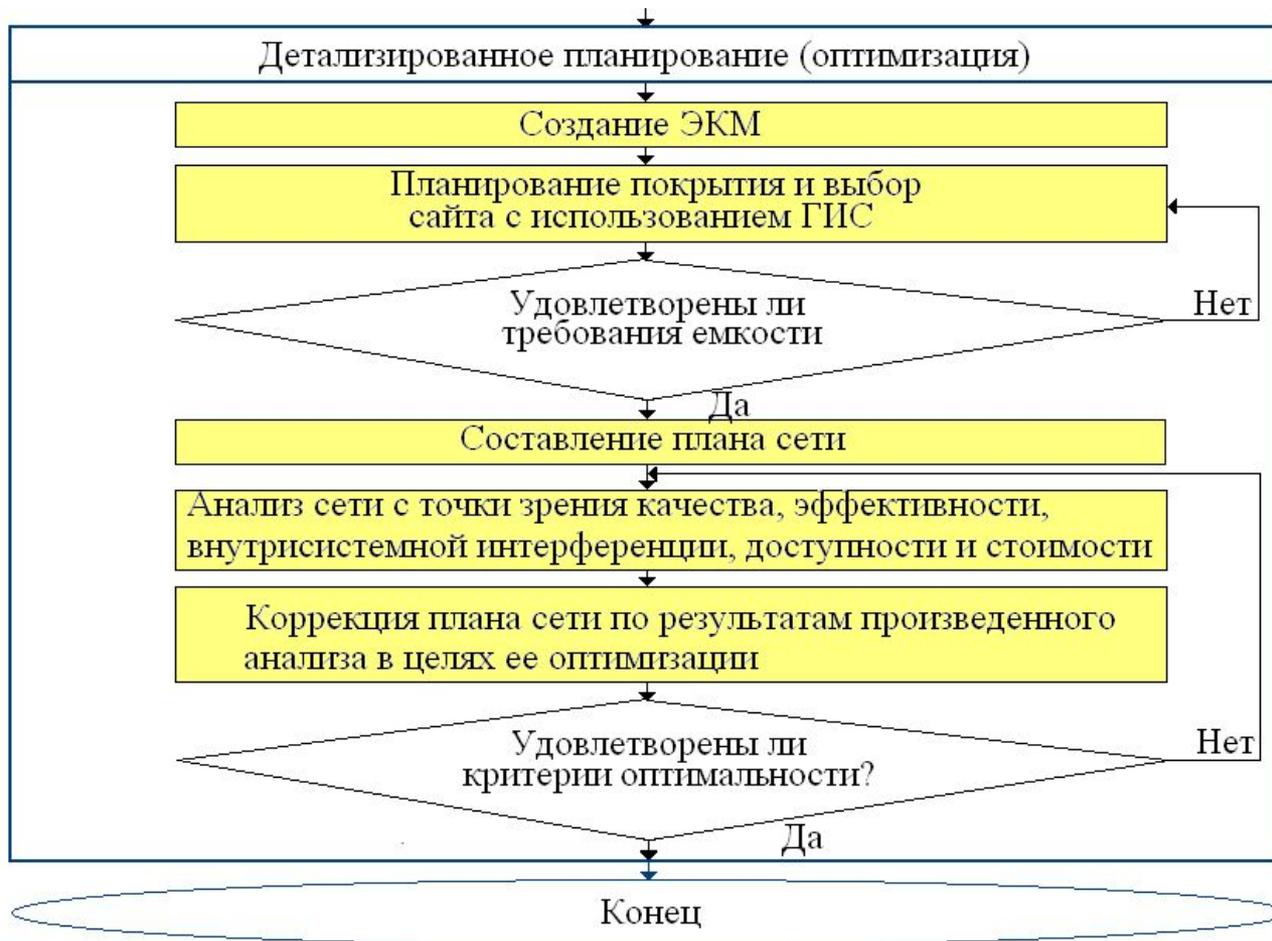
Ресурсная сетка LTE при стандартном шаге поднесущих  $\Delta f = 15$  кГц



# Алгоритм планирования сети LTE



# Алгоритм планирования сети LTE(продолжение)



# Методики оценки бюджета потерь и зоны покрытия

Тип передаваемых данных – VoIP, скорость передачи: 39,7 кбит/с

$\Delta f$  системы: 10 МГц

Высоты подъёма антенны абонентских станций 1.5 м, а базовых станций 30 и 50 м в городской и пригородной зоне соответственно

Максимально допустимые потери при распространении в канале равны:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fid} - IM - L_{slow},$$

где  $P_{TX}$  - мощность передатчика,  $G_{TX}$  - коэффициент усиления передающей антенны,  $P_{RX}$  - чувствительность приемника,  $B_{BODY}$  - потери в теле абонента,  $G_{RX}$  - коэффициент усиления приемной антенны,  $B_{fid}$  - потери в фидере,  $IM$  - запас по интерференции,  $L_{slow}$  - запас на медленные замирания, берется равным 10.3 дБ.

# Методики оценки бюджета потерь и зоны покрытия (продолжение)

Далее производится оценка зоны покрытия сети по моделям распространения Okumura–Hata и COST 231 – Hata.

Для GSM 1800 и LTE 1800 (город):

$$L = 45,5 - 13,82 \lg H_{BS} + 35,4 \lg F - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS} + (44,9 - 6,55 \lg H_{BS}) \cdot \lg R$$

$$R = 10^{\frac{L - 45,5 + 13,82 \lg H_{BS} - 35,4 \lg F + (1,1 \lg F - 0,7) H_{MS}}{(44,9 - 6,55 \lg H_{BS})}}$$

Для GSM 1800 и LTE 1800 (пригород):

$$L = 45,5 - 13,82 \lg H_{BS} + 35,4 \lg F - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS} + (44,9 - 6,55 \lg H_{BS}) \cdot \lg R$$

$$R = 10^{\frac{L - 45,5 + 13,82 \lg H_{BS} - 35,4 \lg F + (1,1 \lg F - 0,7) H_{MS}}{(44,9 - 6,55 \lg H_{BS})}}$$

Для GSM 900 и LTE 900 (город):

$$L = 74,52 - 13,82 \lg H_{BS} + 26,16 \lg F - 3,2 [\lg(11,75 \cdot H_{MS})]^2 + (44,9 - 6,55 \lg H_{BS}) \cdot \lg R$$

$$R = 10^{\frac{L - 74,52 + 13,82 \lg H_{BS} - 26,16 \lg F + 3,2 (\lg(11,75 \cdot H_{MS}))^2}{(44,9 - 6,55 \lg H_{BS})}}$$

Для GSM 900 и LTE 900 (пригород):

$$L = 63,35 - 13,82 \lg H_{BS} + 27,72 \lg F - 2 (\lg F / 28)^2 + (44,9 - 6,55 \lg H_{BS}) \cdot \lg R - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS}$$

$$R = 10^{\frac{L - 63,35 + 13,82 \lg H_{BS} - 27,72 \lg F + 2 (\frac{\lg F}{28})^2 + (1,1 \lg F - 0,7) H_{MS}}{(44,9 - 6,55 \lg H_{BS})}}$$

# Методики оценки бюджета потерь и зоны покрытия (продолжение)

## Результаты для линии «вниз»:

Параметр	GSM 1800	GSM 900	LTE 1800	LTE 900
Допустимые потери на трассе L, дБ	149.2		155.1	
Радиус зоны покрытия (город), км	1.9	4.4	2.8	6.5
Радиус зоны покрытия (пригород), км	2.5	5.8	3.5	10.5

## Результаты для линии «вверх»:

Параметр	GSM 1800	GSM 900	LTE 1800	LTE 900
Допустимые потери на трассе L, дБ	146		149	
Радиус зоны покрытия (город), км	1.6	3.6	1.9	4.3
Радиус зоны покрытия (пригород), км	1.9	4.6	2.3	6.4

# Методики оценки бюджета потерь и зоны покрытия (продолжение)

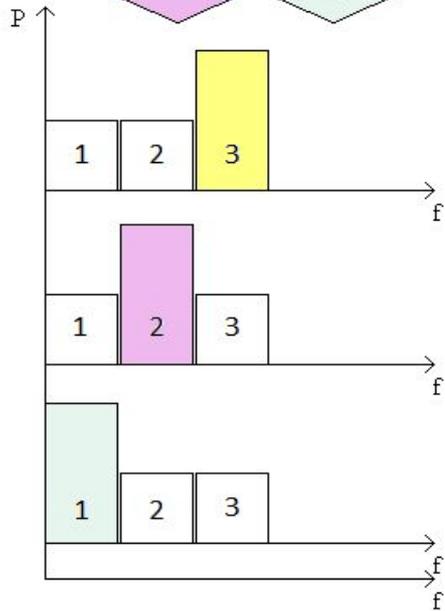
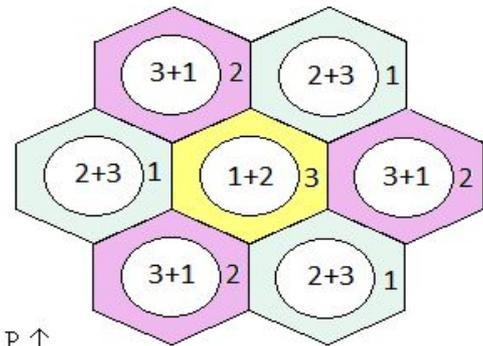
**Оценка бюджета потерь показывает, что сети GSM и LTE, которые развертываются в одном диапазоне, имеют близкие показатели допустимых потерь на трассе прохождения радиосигнала.**

**Стандарт LTE допускает возможность развертывания сегмента LTE в уже существующих диапазонах систем сотовой связи стандарта GSM.**

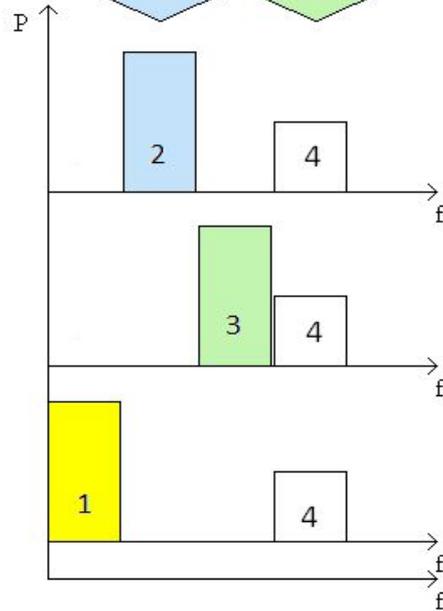
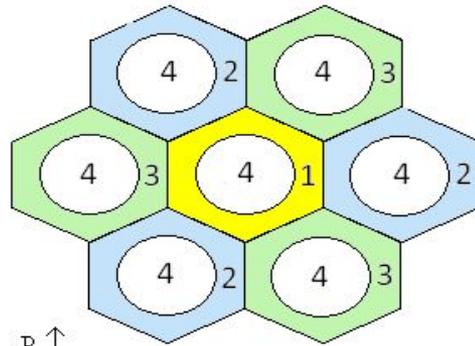
**«Гибкая» полоса LTE дает возможность производить реформирование спектра довольно просто, так как полоса начинается с 1.4 МГц или 3 МГц, а затем она может увеличиваться, при постепенном развитии сети LTE, и, соответственно, уменьшении трафика сети GSM на которую LTE накладывается.**

# Частотное планирование сети LTE

Технология OFDMA позволяет управлять мощностью передаваемых eNB поднесущих, в связи с чем становится возможным применение различных методов повторного использования частот. Наибольший интерес представляют мягкое и дробное, так как они повышают пропускную способность каналов. При мягком повторном использовании частот коэффициент повторного использования стремится к единице, то есть, в каждой соте может использоваться вся полоса системы. При дробном ПИЧ коэффициент меньше единицы.



а) Мягкое повторное использование частот с тремя поднесущими



б) Дробное повторное использование частот с четырьмя поднесущими



## Частотное планирование сети LTE(продолжение)

Линия	DL	UL
Оценка допустимой скорости передачи в канале для пользователей, расположенных в центре соты, Мбит/с	14.8	10.1
Оценка допустимой скорости передачи в канале для пользователей, расположенных на границе соты, Мбит/с	2.5	1.8
Оценка допустимой скорости передачи в соте, Мбит/с	17.3	12.9
Оценка допустимой скорости передачи БС, Мбит/с	51.8	38.7

**Расчет произведен без учета модуляционно-кодирующих схем, применение которых в LTE адаптивно (за назначение модуляционно-кодирующих схем отвечают планировщики; назначение производится динамически, в зависимости от качества канала в момент назначения и от заданных параметров QoS для заданного типа трафика).**

## Расчет абонентской емкости сети LTE

Необходимо произвести расчет абонентской емкости для тотальной услуги – VoIP. Каждой соте при мягком повторном использовании частот выделяется вся полоса системы.

Оценим абонентскую емкость для полосы 10 МГц. Примем в расчет то, что для организации речевого канала со скоростью 39.7 кбит/с необходим 1 ресурсный блок, в частотной области занимающий 180 кГц. Следовательно, можем организовать 55 каналов.

Для систем сотовой связи вероятность блокировки равна 1%, расчетная абонентская нагрузка составляет  $A_a = 0.025$  Эрл на абонента. По таблице Эрланга для системы с отказами получаем по исходным данным нагрузку, которую может выдержать сайт  $A_s = 42.4$  Эрл.

Посчитаем количество абонентов, которым будет предоставлена услуга VoIP в ЧНН:

$$N_a = \frac{A_s}{A_a} = \frac{42.2}{0.025} = 1696$$

Выделение ресурсов для других видов трафика производит планировщик в зависимости от имеющегося свободного ресурса и качества каналов связи.