

## **Лекция 2. Организация сотовых сетей**

**Цель лекции** – ознакомить студентов с основными компонентами и принципами организации сотовых сетей, включая мобильные устройства, базовые станции, цифровые коммутаторы и центры управления. Также будет рассмотрен процесс планирования и проектирования сотовых систем связи с учетом различных технологий и методов управления частотами для обеспечения качественной связи и мобильности пользователей.

### **Введение**

Сотовые сети представляют собой одну из ключевых технологий в области мобильной связи, обеспечивая пользователей возможностью оставаться на связи независимо от их местоположения. Основная идея сотовой системы заключается в делении обслуживаемой территории на небольшие зоны, называемые ячейками или сотами, каждая из которых обслуживается базовой станцией (БС). Это позволяет эффективно использовать ограниченные частотные ресурсы и обеспечить качественное покрытие.

В данной лекции мы подробно рассмотрим архитектуру сотовых сетей, включая их основные компоненты: мобильные устройства, базовые станции, цифровые коммутаторы и центры управления. Мы обсудим, как эти элементы взаимодействуют друг с другом для обеспечения стабильной и качественной связи. Также будет затронут процесс проектирования сотовых сетей, учитывающий различные технологии множественного доступа и особенности каждой из генераций мобильной связи, таких как GSM, W-CDMA и LTE.

### **Структура сотовой сети**

Оборудование сетей включает в себя несколько ключевых элементов. Во-первых, это мобильные устройства, такие как телефоны и смартфоны, которые позволяют пользователям подключаться к сети и обмениваться данными. Во-вторых, базовые станции (БС) обеспечивают связь между мобильными станциями и остальными элементами сети, принимая и передавая сигналы. Цифровые коммутаторы отвечают за маршрутизацию данных внутри сети, обеспечивая эффективное распределение трафика. Также важен центр управления и обслуживания, который координирует работу всех элементов сети, контролируя их функционирование и обеспечивая качественное обслуживание пользователей. Кроме того, существуют различные дополнительные системы и устройства, которые расширяют функциональность сети, такие как системы безопасности, аналитики и управления трафиком. Для эффективной работы всех этих компонентов необходимо функциональное сопряжение, которое достигается с помощью различных интерфейсов. Эти интерфейсы обеспечивают взаимодействие между элементами сети, позволяя передавать данные, контролировать состояние устройств и управлять ими. Одним из ключевых аспектов современных сетей является мобильность. Она реализуется через радиointерфейс, связывающий мобильные станции с подсистемой базовых станций. Благодаря этому пользователи могут свободно перемещаться, оставаясь на связи и получая доступ к необходимым услугам.

Обобщенная схема сотовой сети представлена на рис. 2.1.

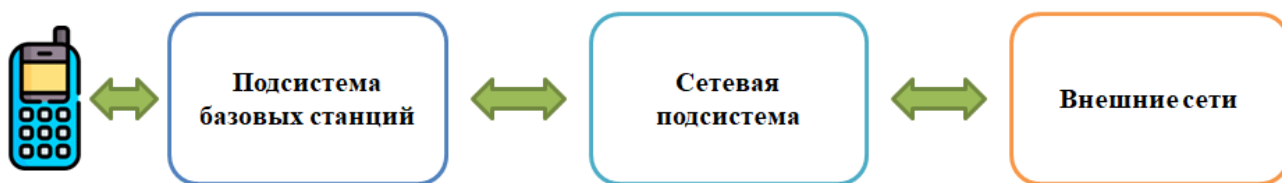


Рисунок 2.1. Обобщенная схема сотовой сети

В каждой соте функционирует базовая станция (БС), которая обеспечивает прием и передачу радиосигналов абонентам. БС состоит из приемопередающего устройства, антенно-фидерного устройства, которое формирует радиоканалы с мобильными станциями (МС), и управляющего устройства, или контроллера. Контроллер отвечает за обработку соединений МС с остальной сетью и прослушивает соседние БС, чтобы оценивать качество приема сигнала. Это позволяет ему своевременно переключать МС на подходящую БС при необходимости. Для централизованного управления системой все БС соединяются через выделенные проводные или радиорелейные каналы с центром коммутации подвижной связи (ЦК). ЦК осуществляет коммутацию и маршрутизацию вызовов, направляя их к нужным абонентам, включая внешние сети. В базе данных ЦК хранятся сведения о местоположении пользователей, технических характеристиках МС и данных для идентификации пользователей. При планировании сотовых сетей обслуживаемая территория делится на небольшие зоны, называемые ячейками. Чтобы обеспечить наиболее эффективное покрытие и приблизить их форму к круговой, ячейки представляют собой правильные шестиугольники. Организация системы связи в таком случае напоминает рисунок сот в пчелином улье, и такие системы называют сотовыми. Приблизительно в центре каждой соты устанавливается базовая станция.

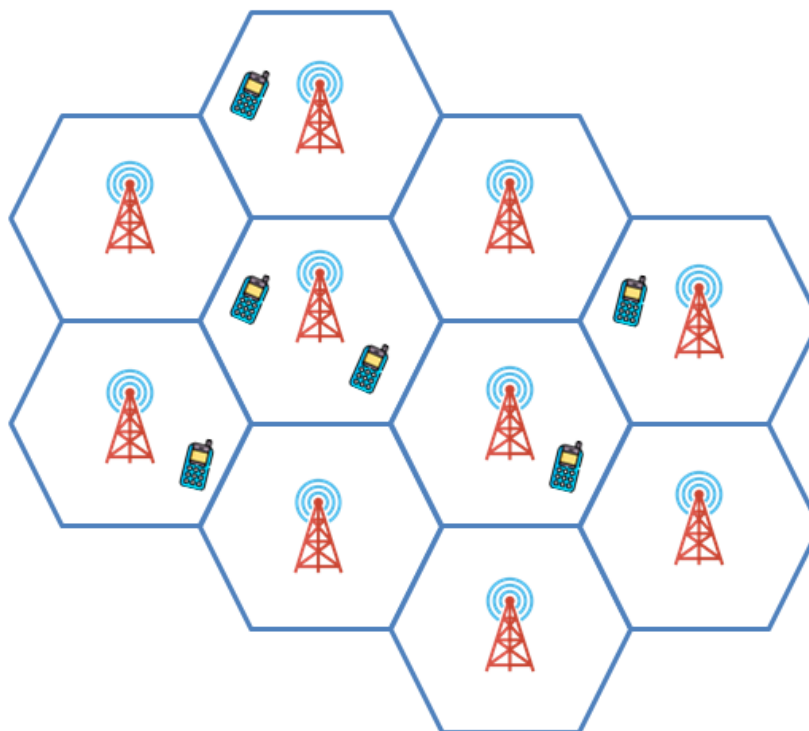


Рисунок 2.2. Разделение зоны обслуживания на соты

Основная идея организации системы сотовой связи (ССС), обслуживающей определенную территорию, заключается в обеспечении доступа к сети для множества пользователей при ограниченном частотном ресурсе. Подходы к планированию и построению территориальных сетей зависят от технологий множественного доступа и отражаются в разных поколениях сотовой связи. При выборе размера минимальной территориальной структурной единицы сети, или соты, учитывается ряд факторов, таких как абонентская нагрузка на соту, уровень взаимных помех и связность системы. Эти аспекты играют ключевую роль в оптимизации работы сети и обеспечении качественной связи для пользователей.

## Сети GSM

Для сетей GSM характерно наличие регулярной структуры и частотное распределение каналов между БС. В таких сетях размер соты (радиус описанной вокруг периметра соты окружности) определяется из соотношения:

$$R = k \cdot \sqrt{\frac{S_0}{\pi \cdot K_{BS}}} \quad (2.1)$$

где  $S_0$  – площадь сети;  $K_{BS}$  – количество базовых станций в сотовой сети;  $k$  – коэффициент, учитывающий взаимное перекрытие сот для обеспечения хэндовера.

$K_{BS}$  определяется из соотношения:

$$K_{BS} = \text{int} \left( \frac{N_a}{N_{BS}} \right) \quad (2.2)$$

где  $N_a$  – количество абонентов сети,  $N_{BS}$  – количество абонентов, обслуживаемых одной БС. Определяется из соотношения:

$$N_{BS} = M \cdot \text{int} \left( \frac{A}{A_{ab}} \right) \quad (2.3)$$

где  $M$  – секторность соты;  $A$  – допустимая нагрузка на соту при заданной вероятности блокировки;  $A_{ab}$  – средняя активность абонентов. Допустимая нагрузка в соте зависит от числа каналов связи при обеспечении требуемой вероятности блокировки соединения  $P_B$ .

Для определения допустимой нагрузки в зоне соты используется следующее выражение в зависимости от значения  $P_B$ :

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left( P_B \sqrt{\pi \frac{n_0}{2}} \right)} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.4)$$

где  $n_0$  – число каналов связи.

Группа соседних сот с различными наборами частот образует кластер, в котором представлены все рабочие частоты, выделенные данному оператору связи. Количество сот

определяет размерность кластера. Распределение частотных каналов в сотах при построении кластеров и сети осуществляется с учетом минимизации соканальных помех. Соканальная помеха – это помеха, возникающая в результате приема МС сигнала от БС, находящейся в другой соте.

Уровень помех зависит от размерности кластера  $C$ , радиуса сот  $R$  и расстояния между сотами с повторяющимися частотами  $D$ . Для характеристики плотности плана повторного использования частот используются следующие характеристики:  $k_u$  – коэффициент повторного использования частот;  $q_s$  – расстояние между одноименными частотами, оцененное в радиусах сот  $R$ , которое определяется как

$$q_s = \frac{D}{R} \approx \sqrt{3k_u} \quad (2.5)$$

где  $D$  – минимальное расстояние между БС с одноименными частотами, удовлетворяющее заданному требованию интерференции по основному каналу  $C/I$  (сигнал/помеха).

В рекомендациях ETSI для стандарта GSM рекомендуется, чтобы величина  $C/I$  была не ниже 9 дБ. Соты с одинаковыми частотами должны быть разнесены в пространстве на расстояние не меньше чем  $3R$ . В системе GSM минимальное значение  $q_s$  принято брать равным 3. При проектировании систем сотовой связи с применением плана повторного использования частот можно брать за основу кластерную структуру с коэффициентом повторного использования  $k_u > 3$ .

### Сети W-CDMA

В сотовых системах, в которых все каналы связи в воздушном интерфейсе работают на одной частоте (W-CDMA), количество одновременно обслуживаемых пользователей влияет на уровень шумов в системе. Следовательно, планирование зоны обслуживания и емкости таких радиосетей (UMTS, cdmaOne, CDMA2000 и др.) не могут быть отдельными этапами планирования, в отличие от планирования радиосети GSM, где эти два этапа могут четко разграничиваться.

В случае планирования UMTS для каждого конкретного вида услуги необходимо определение и соответственно выполнение требований к качеству обслуживания (QoS). На практике это означает, что самые строгие требования должны определять плотность расположения базовых станций.

При расчете количества абонентов, обслуживаемых одной БС, важным является учет уровня интерференционных помех, т. к. в системе W-CDMA все используют одну частоту. Поэтому абонентская емкость соты и, следовательно, ее размер ограничены уровнем интерференции.

Максимальное количество абонентов в соте системы CDMA в зависимости от минимальной величины  $C/I$ , необходимой для нормальной работы системы, может быть оценено из соотношения:

$$N_{ab} = \left( \text{int} \left| \frac{SF}{E_b / (N_0 + I_{tr})} \cdot \frac{f_r}{A_{ab}} \right| + 1 \right) \cdot M, \quad (2.6)$$

где  $SF$  – коэффициент расширения спектра сигнала;  $E_b/(N_0 + I_{tr})$  – отношение сигнал/(шум + интерференция) в трафик-канале;  $f_r$  – коэффициент переиспользования частот.

## Сети LTE

Технология LTE, в отличие от технологии GSM обеспечивает каждой БС сети возможность выборочно выделять полосы частот и мощность пользователям в зависимости от их расположения в соте. При этом могут применяться различные модели повторного использования полос частот и, соответственно, появляется возможность максимизировать пропускную способность соты при выполнении требований к качеству радиосвязи в условиях ограниченных ресурсов БС.

Выделяют следующие модели повторного использования полос частот:

- полное повторное использование полос частот каналов;
- жесткое повторное использование полос частот каналов;
- мягкое повторное использование полос частот каналов;
- дробное повторное использование полос частот каналов.

Полным повторным использованием полос частот каналов называют вариант, когда вся полоса частот полностью используется каждой сотой независимо от местоположения абонентов в соте. Распределение ресурсных блоков в этом случае осуществляет планировщик БС. Расписание о распределении ресурсов БС сообщает МС по специальному управляющему каналу. При этом возникают проблемы с межсотовой интерференцией. В LTE для уменьшения интерференционной связи между сотами применяется динамическая координация назначения полос частот. Применение полного повторного использования полос частот нецелесообразно с точки зрения абонентской емкости, поскольку растет объем служебной информации, необходимой для динамической диспетчеризации.

Жестким повторным использованием полос частот каналов называют вариант, когда вся полоса частот разделена на фиксированное количество полос, которые выделяются сотам в соответствии с некоторой определенной моделью повторного использования (по аналогии с GSM). Каждая из ячеек обслуживается своим передатчиком с невысокой выходной мощностью и ограниченным числом каналов связи. Это позволяет без помех использовать повторно частоты каналов этого передатчика в другой, удаленной на значительное расстояние, ячейке. Теоретически такие передатчики можно использовать и в соседних ячейках. Но на практике зоны обслуживания сот могут перекрываться под действием различных факторов, например, вследствие изменения условий распространения радиоволн. Поэтому в соседних ячейках используются различные частоты.

Мягким повторным использованием полос частот каналов называют вариант, когда вся полоса частот разделена на фиксированное количество полос. Для каждой соты одна из этих полос выделена абонентам, находящимся на границе соты, а остальные полосы используются абонентами, находящимся вблизи базовой станции. Пример мягкого повторного использования частот представлен на рис. 3.

При дробном повторном использовании полос частот каналов для обслуживания абонентов, которые находятся вблизи БС, используется общая полоса частот. Другие возможные полосы используются абонентами, удаленными от БС (находящимися на краю соты).

В сетях LTE используют только дробное и мягкое повторное использование полос частот каналов, поскольку данные технологии при правильном планировании позволяют увеличить емкость сети.

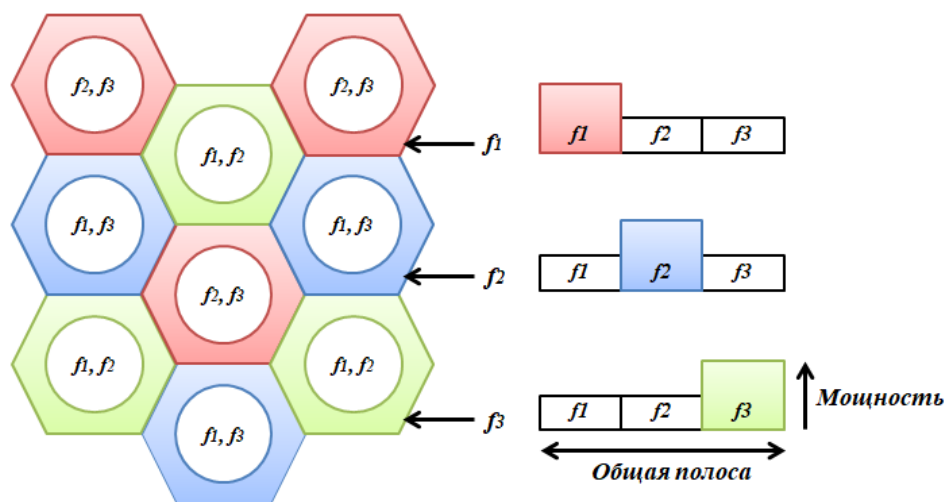


Рисунок 2.3. Мягкое повторное использование полос частот каналов

В сотовых системах между БС и мобильной станцией (МС) могут быть установлены каналы связи двух типов: каналы управления и информационные каналы. Каналы управления предназначены для обмена информацией, связанной с выполнением заявки на обслуживание, вызовом абонента и установлением соединения между вызывающим и вызываемым абонентом. В свою очередь канал управления делится на прямой (от БС) и обратный (от МС). Информационные каналы предназначены для передачи речи или данных между пользователями.

МС постоянно работает в режиме дежурного приема на канале вызова. Предварительно (при включении) выполняется инициализация мобильной станции: МС сканирует прямые каналы управления соседних БС и выбирает канал с самым сильным сигналом (ближайшую БС). По свободному обратному каналу управления МС передает в центр коммутации свои персональные данные, которые используются для регистрации МС. Операции обмена служебной информацией с БС регулярно повторяются, пока включена МС. Кроме того, МС следит за сигналами вызова.

В системах мобильной связи должна быть обеспечена непрерывность связи при перемещении абонента из одной ячейки в другую. Для этого МС постоянно сканирует каналы управления соседних БС и выбирает канал с самым сильным сигналом. Это позволяет следить за перемещением МС, и, если МС входит в другую ячейку, выбирается новая БС. Такая организация связи МС называется эстафетной передачей (хэндовер), которая выполняется без прерывания сеанса связи и незаметно для абонентов.

Заявка на сеанс связи от МС отправляется по свободному каналу управления через БС на ЦК. ЦК по данным регистрации МС определяет БС, в зоне действия которой в данный момент находится вызываемая МС, и направляет ей номер вызываемого абонента. БС по прямому каналу управления направляет звонок вызываемому абоненту.

Вызываемая МС в потоке служебной информации прямого канала управления распознает по номеру адресуемое ему сообщение и направляет ответ БС. По этому ответу ЦК устанавливает канал связи между БС, обслуживающими вызывающего и вызываемого абонентов, а также информационные каналы внутри соты, по которым обмениваются информацией БС и МС. Соответствующие сигналы от ЦК передаются на БС, а затем на МС, в результате чего МС перейдут на выделенные им информационные каналы. Если во время сеанса связи МС переходит в зону действия другой БС, то под управлением ЦК старый канал заменяется новым без прерывания сеанса связи.

В пределах каждой соты соблюдается условие связности, т. е. каждая БС обеспечивает устойчивую связь с любой МС, находящейся в пределах площади соты. Достоинствами сотовой системы мобильной связи являются высокое качество каналов с мобильными абонентами независимо от того, в какой точке территории они находятся, а также возможность создания больших зон обслуживания.

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие основные компоненты входят в структуру сотовой сети?
2. Какова роль базовой станции (БС) в сотовой системе связи?
3. Объясните понятие «эстафетная передача» (хэндовер) и ее значение в сотовых сетях.
4. Как происходит маршрутизация вызовов в сети сотовой связи?
5. Что такое кластер в контексте сотовых сетей, и как он влияет на распределение частот?
6. Как различаются подходы к планированию сотовых сетей GSM и W-CDMA?
7. Какие модели повторного использования частот используются в сетях LTE?
8. Как обеспечивается качество обслуживания (QoS) в сетях UMTS?
9. Что такое соканальная помеха и как она влияет на работу сотовых сетей?
10. Как осуществляется регистрация мобильной станции в сотовой сети?