

РАЗДЕЛ 3

РАДИАЛЬНО-ЗОНОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

3.1. РАЗВИТИЕ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ: РАДИАЛЬНЫЕ, ЗОНОВЫЕ, МНОГОЗОНОВЫЕ, СОТОВЫЕ

Системы связи с одной базовой станцией, обеспечивающей работу системы на всей обслуживаемой территории (называемые радиальными), имеют два основных недостатка. Во-первых, при большом удалении от базовой станции сигнал на мобильную станцию приходит с большим ослаблением. Это вынуждает увеличивать мощность радиопередатчиков и чувствительность радиоприемников, что, в свою очередь, вызывает нежелательный рост веса и габаритов абонентской станции и сокращения цикла работы ее источника питания. Во-вторых, увеличение количества обслуживаемых абонентов приводит к пропорциональному росту необходимых радиоканалов. При дефиците частотного ресурса это тормозит дальнейшее развитие системы. В сотовых системах связи вся обслуживаемая территория делится на относительно небольшие зоны (ячейки). Наилучшая форма такой зоны имеет вид правильного шестиугольника (при такой форме центры соседних ячеек находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, и в любую точку на границе между соседними ячейками сигналы от соответствующих базовых станций будут приходить одинакового уровня). Организация системы связи в этом случае напоминает рисунок сот в пчелином улье, и такие системы называют сотовыми.

В 1947 году Д. Рингом, сотрудником знаменитой лаборатории, созданной изобретателем телефона Беллом (США), была выдвинута замечательная идея сотового принципа организации сетей подвижной связи. В таких сетях зоны обслуживания отдельных базовых станций (БС) образуют соты, размер которых определяется территориальной плотностью абонентов сети. Частотные каналы, используемые для работы одной из БС сети, могут повторно распределяться по определенному закону для работы других БС, входящих в эту же сеть. Это обеспечивает высокую эффективность использования частот. В сотовых сетях абонент, перемещаясь из зоны действия одной БС в другую, может поддерживать непрерывную связь как с подвижным абонентом, так и с абонентом телефонной сети общего пользования (ТфОП). Такие сети охватывают обширные территории, и абонент, если он находится в зоне действия хотя бы одной из БС, входящей в общую сеть, может выйти на связь или его может вызвать другой абонент независимо от своего местоположения (услуга роуминга).

Развитие наземных систем подвижной связи началось с 20-х годов, когда радиостанции стали устанавливать на автомобилях полиции, пожарной и медицинской служб. Эти радиостанции работали в режиме выделенного канала. Это значит, что пользователю постоянно выделяют определенную полосу частот для передачи радиосигналов. Очевидно, что

при такой связи радиочастотный ресурс используют нерационально, так как абонент занимает канал связи для передачи телефонии или данных ограниченное время, а паузы между сеансами связи превышают время передач. Поэтому после Второй мировой войны в подвижной связи получили развитие системы с предоставлением каналов по требованию. В этом случае абонент на время сеанса связи получает один из свободных в данный момент каналов из группы каналов, выделенных сети. Таким образом использование канального ресурса происходит в зависимости от трафика, т.е. объема передаваемой информации. Вероятность одновременной работы всех пользователей или их большей части достаточно мала, поэтому число пользователей, которых может обслужить такая сеть, значительно превышает число предоставленных сети каналов. Задача обслуживания ограниченным частотным ресурсом большого числа абонентов является статистической. Разумеется, есть некоторая вероятность, что при запросе пользователя все каналы окажутся занятыми, но эта вероятность не должна превышать единиц процентов.

Системы с предоставлением каналов по требованию строят по зонавому принципу (рис. 3.1). В центре зоны расположена БС, которая обеспечивает связь с абонентскими станциями (АС), расположенными внутри зоны. Рядом с базовой станцией устанавливают коммутатор (К) для связи абонентов, находящихся в зоне, друг с другом. Коммутатор может иметь выходы на ТФОП, что позволяет части абонентов подключаться к ТФОП. Площадь зоны обслуживания абонентов определяется мощностью передатчиков, характеристиками антенн АС и БС и условиями распространения радиоволн в зоне.

Развитием зонавых систем явились многозонавые структуры, где несколько БС обеспечивают связь с АС в нескольких отдельных зонах, а коммутаторы, объединенные в единую сеть, связывают абонентов, находящихся в различных зонах, друг с другом. Среди отечественных систем зонавой связи можно назвать системы "Алтай" и "ВОЛЕМОТ". Сейчас зонавые системы относят к транкинговым системам (от английского слова trunk, означающего "пучок", поскольку речь идет о пучке выделенных каналов). Транкинговые системы получили широкое распространение для организации профессиональной связи на транспорте, в добывающей промышленности, энергетических комплексах, силовых структурах и т.д.

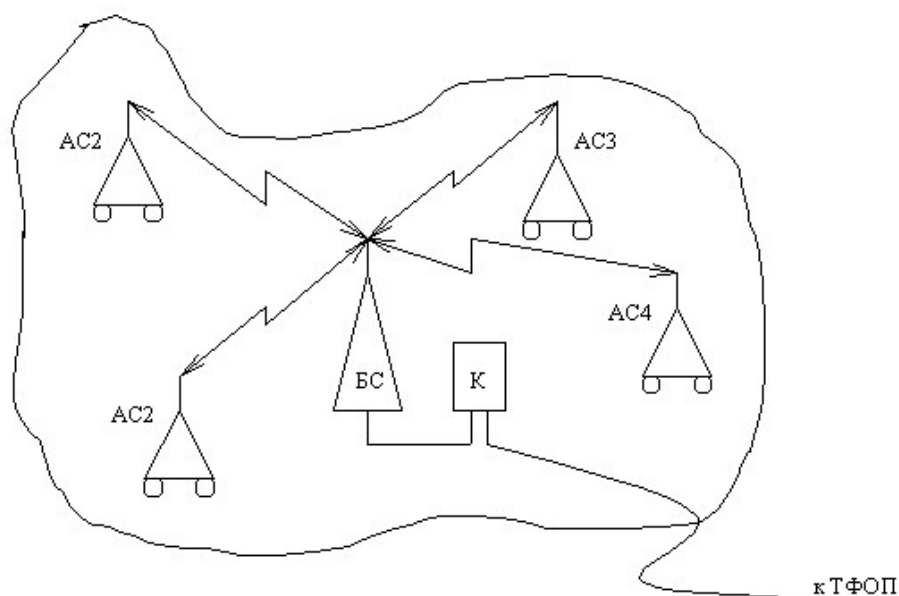


Рис. 3.1. Принцип зоновой связи

Транкинговые системы в значительной мере вытеснили системы с выделенными каналами, которые продолжают применять в ограниченной мере для диспетчерской связи на транспорте (такси, общественный транспорт), частично в полиции, пожарной службе, в низовой связи в армии. При этом, как правило, радиосвязь идет в симплексном режиме, когда передачу и прием сообщений ведут поочередно в одной и той же полосе частот. И в обиходе, и в литературе часто вместо термина "полоса частот" используют термин "частота" f_i , подразумевая под этим полосу радиочастот $f_i \pm \Delta F/2$ с центральной частотой f_i (рис. 3.2а). Ширина полосы радиоканала ΔF зависит от спектра модулирующего сигнала (при передаче телефонных сообщений: 300 – 3400 Гц), вида и параметров модуляции. В аналоговых системах с частотной модуляцией (ЧМ) значение ΔF обычно составляет 10 – 30 кГц. При симплексной связи пользователь может либо принимать сигнал (слушать), либо передавать (говорить). Для перехода в режим передачи абонент нажимает на радиостанции специальную кнопку – тангенту.

В транкинговой связи обычно используют дуплексный режим или полудуплекс. При дуплексной связи с частотным разделением каналов передача идет одновременно в двух направлениях в разных разнесенных частотных полосах (рис. 3.2б). В дальнейшем, говоря о радиоканале, будем иметь в виду дуплексный режим работы, т.е. фактически две полосы частот, выделяемые для организации одного канала радиосвязи. Кроме дуплекса, в транкинговых системах часто используют режим полудуплекса, когда для каждого канала радиосвязи выделяют две полосы частот, однако АС работает на передачу и прием попеременно. Перевод АС в режим передачи осуществляют нажатием тангенты. Использование полудуплекса упрощает АС, позволяет экономить энергию батареи АС (передатчик включают только во время передачи информации), улучшает помеховую обстановку в зоне, но

требует манипуляций пользователя. Поэтому режим полудуплекса используют только в служебной связи.

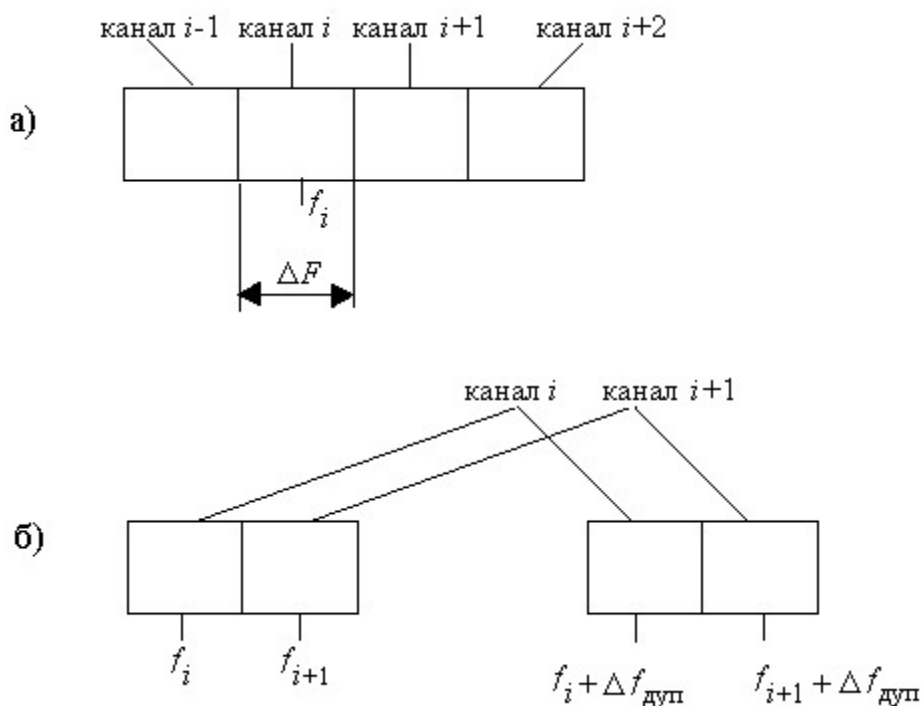


Рис. 3.2. Полосы частот для симплексного (а) и дуплексного (б) каналов

Через двадцать лет эта идея нашла свое воплощение в сотовых сетях подвижной связи общего пользования. Внедрение таких сетей начинается с 70-х годов, вначале в США, а позже в европейских странах, в Японии и в других регионах мира. Благодаря их созданию новые услуги подвижной связи стали доступными для сотен миллионов людей многих стран мира.

В начале 80-х годов в наземных системах радиосвязи произошли качественные изменения, оказавшие существенное воздействие на развитие телекоммуникационных систем в целом. Это было появление на рынке связи коммерческих сотовых систем.

В основу технологии сотовых систем положен принцип повторного использования частот. Необходимость повторного использования частот вызвана тем, что число радиоканалов в сети всегда ограничено. Например, при 100 радиоканалах можно обеспечить связью 2000–3000 абонентов, в то время как в коммерческих системах подвижной связи речь идет о десятках, сотнях тысяч и даже миллионах абонентах, сконцентрированных в современных мегаполисах. Сотовые технологии позволяют при ограниченном частотном ресурсе в сотни и тысячи раз увеличивать трафик (теоретически неограниченно). Поясним сотовую технологию распределения частот на примере цифровой системы GSM. Каждому дуплексному каналу¹ соответствуют две полосы частот (рис. 3.2б). Пусть оператору сети выделено 72 дуплексных радиоканала, пронумерованных от 1 до 72.

Распределим эти каналы по трем группам:

группа 1 – каналы 1, 4, 7, 10,..., – всего 24 канала;

группа 2 – каналы 2, 5, 8, 11,..., – всего 24 канала;

группа 3 – каналы 3, 6, 9, 12,..., – всего 24 канала.

Каждую группу каналов используем в отдельной соте, которую для построения регулярной структуры представим правильным шестиугольником (рис 3.3). В центре каждой соты расположена БС, организующая радиосвязь с АС, находящимися в соте. Структура из 3-х сот образует 3-сотовый кластер. Под кластером понимают объединение сот с неповторяющимися частотами. На рис. 3.3 показано, как кластеры, сцепляясь друг с другом, покрывают территорию, где развернута сотовая сеть. При этом в соседних сотах используют только разные частоты.

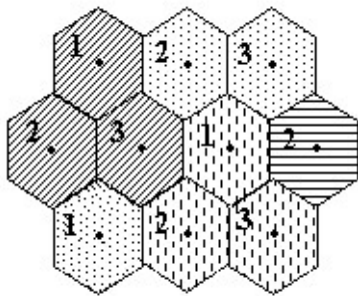


Рис. 3.3. Структура с 3-сотовыми кластерами

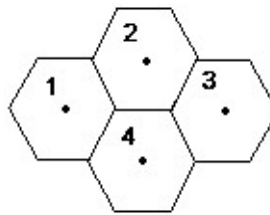


Рис. 3.4. 4-сотовый кластер

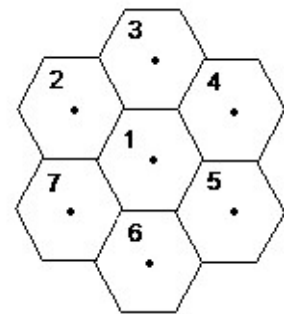


Рис. 3.5. 7-сотовый кластер

Продолжим рассмотрение примера с распределением частотного ресурса. Можно построить 4-сотовый кластер с 18 каналами в каждой соте (рис. 3.4) и 7-сотовый кластер с 10 каналами в соте (рис. 3.5). Возникает естественный вопрос: из каких соображений производят выбор кластера на практике? Важнейшими являются два следующих критерия:

- обеспечение необходимого отношения сигнал/помеха (суммарная) в точке приема,
- обеспечение требуемого трафика.

Каждая АС может качественно работать только при определенном защитном отношении мощности принимаемого сигнала P_c к мощности суммарных помех $P_{\Sigma\text{пом}}$, создаваемых мешающими станциями. В системе GSM должно выполняться условие $P_c/P_{\Sigma\text{пом}} > 9$ дБ. Напомним, что $P_c/P_{\Sigma\text{пом}} [\text{дБ}] = 10 \lg (P_c [\text{Вт}]/P_{\Sigma\text{пом}} [\text{Вт}])$. Для АС, находящейся в конкретной соте, помехи прежде всего создают БС, работающие на той же частоте в сотах соседних кластеров. Чем больше число сот в кластере, тем дальше находятся от АС, мешающие БС. Поэтому с увеличением числа сот в кластере уровень соканальных помех уменьшается. Однако при возрастании числа сот в кластере сокращается количество каналов, приходящихся на одну соту, что приводит к снижению трафика.

На практике в городах и областях со сплошным сотовым покрытием применяют кластеры с секторизованными сотами. В несекторизованных

структурах (рис. 3.3 – 3.5) наибольшие помехи создают БС соседних шести кластеров. В секторизованной структуре каждую соту делят пространственно на 3 сектора, используя антенны направленного излучения с шириной диаграммы направленности 120° . Таким образом, в центре каждой соты расположены три БС. Структуры секторизованных кластеров 3/9, 4/12, 7/21 показаны на рис. 3.6 – 3.8. В этих структурах из-за направленности излучения антенн существенные помехи создают только две БС соседних кластеров, что значительно увеличивает отношение $P_c/P_{\Sigma пом}$ в точке приема. В городах при планировании сетей используют, как правило, кластеры 3/9 или 4/12. Несекторизованные соты применяют на границах зон охвата сотовой связью, в вытянутых структурах вдоль шоссе и т.п.

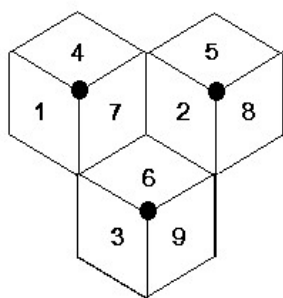


Рис. 3.6.
Кластер 3/9

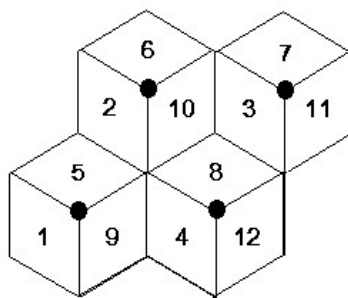


Рис. 3.7.
Кластер 4/12

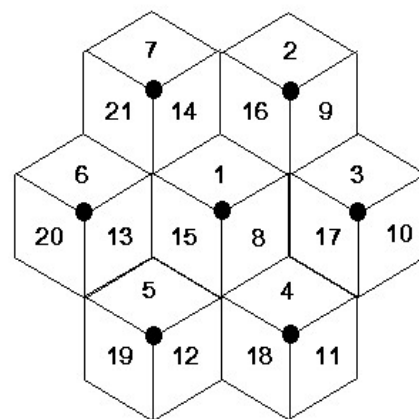


Рис. 3.8.
Кластер 7/21

Использование секторизованных кластеров ведет к сокращению числа каналов в секторе и к снижению трафика. Так, в кластере 4/12 рассматриваемого примера на один сектор приходится всего 6 радиоканалов. Для увеличения плотности трафика можно уменьшать размеры (радиусы) сот. Однако для каждой системы сотовой связи существует минимальный радиус соты, с дальнейшим уменьшением которого эффективность работы системы падает. Это не связано с помеховой обстановкой, как можно подумать; с уменьшением радиуса соты снижают мощности передатчиков БС и АС, так что отношение $P_c/P_{\Sigma пом}$ не меняется. Ограничение минимального радиуса сот обусловлено необходимостью организации эстафетных передач (хэндовера).

Обеспечение требуемого трафика определяется скоростью передачи (бит/с) и временем передачи, т.е. числом переданной информации в битах. В телефонии единицей измерения трафика является эрланг (названа в честь датского инженера Эрланга, разрабатывавшего в 20-е годы теорию трафика в телефонии). 1 Эрл – это занятость одного телефонного (ТФ) канала в течение часа. На рис. 3.9 представлены различные варианты трафика ТФ каналов.



Рис. 3.9. Варианты трафика

Расчет допустимого трафика, а следовательно и максимального числа обслуживаемых абонентов при заданном числе каналов, является статистической задачей и производится на основе моделей Эрланга с учетом предоставляемых абонентам величин планируемой нагрузки на сеть, генерируемой ими. Модель Эрланга В (модель с отказами), принятая для ТфОП и сотовых сетей, выражается следующей формулой:

$$p_{\text{отк}} = \frac{A_{\text{сек}}^{N_{\text{сек}}} / N_{\text{сек}}!}{\sum_{i=0}^{N_{\text{сек}}} \frac{A_{\text{сек}}^i}{i!}}$$

Результаты расчетов по этой модели той суммарной нагрузки, которая может быть обеспечена в сети при определенном числе каналов и вероятностей отказов в обслуживании, сведены в таблицы, на основе которых можно рассчитать число абонентов в соте на следующем примере: при 29 каналах в соте и вероятности отказа 2% общая обслуживаемая нагрузка составит по таблице Эрланга 21,04 Эрл, тогда число абонентов (при генерируемой каждым абонентом нагрузке в 0,025 Эрл (1,5 мин. в час) = 21,04 / 0,025 = 840.

АС систем сотовой связи могут находиться в одном из трех состояний:

- выключена;
- зарегистрирована в сети и находится в состоянии ожидания (idle mode); в этом режиме работает приемник АС, принимая канал вызова (пейджинга); радиоканал АС не занимает;
- находится в активном состоянии, когда идет сеанс связи; АС выделен рабочий канал (канал трафика).

Если инициатором соединения является сеть, то она обращается к АС, посылая ей специальное сообщение, называемой сообщением пейджинга. Для передачи пейджинга сеть должна знать местонахождение АС.

Невыгодно передавать пейджинг по всем сотам города (например, Санкт-Петербурга), так как при большом числе абонентов придется значительную часть канального ресурса использовать для передачи сигналов пейджинга. Каналы управления, а к ним относится и канал пейджинга, выделяют из общего канального ресурса, что сокращает возможное число пользовательских каналов. Поэтому сотовые структуры разбивают на отдельные зоны, объединяющие группы сот (секторов), обычно не совпадающие с границами кластеров. Зона – это объединение сот (секторов), где одновременно передают сигналы пейджинга абонентским станциям, находящимся в состоянии ожидания.

Следовательно, сеть должна знать местоположение АС (или, другими словами, АС должна быть локализована) с точностью до зоны. Эти данные хранят в специальном визитном регистре. В процессе роуминга (roaming), т.е. перемещения АС, находящейся в состоянии ожидания, из соты в соту при пересечении границы зоны должна происходить процедура локализации АС с обновлением данных о зоне ее местонахождения.

Необходимость эстафетной передачи – хэндовера (handover) появляется, когда АС, пребывая в активном состоянии, перемещается из одного сектора (соты) в другой. При этом происходит переключение пользовательского канала от одной БС к другой, сопровождающееся, за исключением систем с кодовым разделением каналов, сменой частоты. В процессе эстафетной передачи в течение некоторого времени оказываются занятыми два радиоканала в соседних секторах, происходит задержка при передаче данных или кратковременное ухудшение телефонной связи. С уменьшением радиусов сот число эстафетных передач растет, качество связи ухудшается, надежность работы сети снижается.

3.2. ПЕРЕХОД ОТ 1-ГО ПОКОЛЕНИЯ СОТОВЫХ СЕТЕЙ К GSM И СИСТЕМАМ 2G+

Начальный этап развития сотовых систем характеризуется возникновением и внедрением сотовых стандартов 1-го поколения – аналоговых, рассчитанных на передачу только каналов телефонии. Первая из них - сеть стандарта AMPS, предназначенная в основном для предоставления услуг телефонии, была развернута в США в 1979 году. Это была система с частотным дуплексом и МДЧР. Она получила распространение во многих странах мира. С некоторыми изменениями она была также позже внедрена в Великобритании и Японии. Система AMPS работает в диапазоне 800 МГц и использует две полосы частот шириной 25 МГц с дуплексным разносом 45 МГц.

В 1981 году в Скандинавских странах в диапазоне 450 МГц разрабатывается сотовая система связи первого поколения стандарта NMT-450, принципы построения которой подобны системе AMPS. В 80-х годах создаются национальные системы сотовой связи первого поколения в Германии, Италии, Франции и происходит быстрый рост количества

абонентов сотовых сетей. Для их развития начинает использоваться также и диапазон частот 900 МГц:

- TACS – Total Access Communications System, стандарт, принятый в Великобритании, ряде стран Европы и Британского Содружества,
- C-NET – Cellular Network, аналоговый стандарт ФРГ.

Аналоговые стандарты сотовой связи до 1991 г. определяли развитие коммерческой радиотелефонии. Благодаря им произошел психологический перелом в сознании массового пользователя, быстро оценившего удобства подвижной связи. Однако очень скоро проявились недостатки систем 1-го поколения. Аналоговых стандартов было много, но они имели несовместимые протоколы, что ограничивало свободу передвижения абонентов национальными границами. Вторым недостатком состоял в том, что в этих стандартах не было специальных каналов передачи данных, и поэтому аналоговые сотовые сети было невозможно подключить к различным сетям передачи данных, например, к ISDN (Integrated Services Digital Network – цифровой сети с интеграцией услуг). Поэтому в 80-е годы в Европе, США и Японии были разработаны универсальные цифровые стандарты сотовой связи 2-го поколения, появившиеся на рынке в 1991 г.:

- общеевропейский GSM – Global System for Mobile Communications,
- американский D-AMPS – Digital AMPS, пришедший на смену аналоговому AMPS,
- японский PDC – Personal Digital Cellular System, ранее называвшийся JDC.

В 1982 году Скандинавские страны и Голландия выходят с предложением разработки в диапазоне 900 МГц регионального европейского цифрового стандарта сотовой связи. Это предложение было поддержано всеми странами Западной Европы, и в 1989 году в ETSI (Европейский институт телекоммуникационных стандартов) был разработан стандарт на систему GSM. В следующем году, учитывая перспективы развития сотовой связи в Европе и во всем мире, этот же стандарт был принят для диапазона 1800 МГц. В 1991 году создаются опытные сети стандарта GSM и начинается его глобальное распространение по всему земному шару. С 1992 г. началось развертывание сетей GSM в Европе, с 1994 г. – в России.

С технической точки зрения GSM – цифровая система подвижной радиосвязи с частотно-временным разделением каналов. Понятие "цифровая система" означает, что все информационные сигналы, включая речевой телефонный сигнал, передают по каналам связи в цифровом виде, т.е. в виде потока целых чисел в двоичной системе счисления. Для того, чтобы представить непрерывный во времени сигнал телефонии в виде массива чисел, его заменяют множеством дискретных отсчетов $u(i)$, следующих друг за другом с интервалом $TS = 125$ мкс (рис. 3.10,а). Величина, обратная TS , частота выборок $f_S = 1/TS = 8$ кГц.

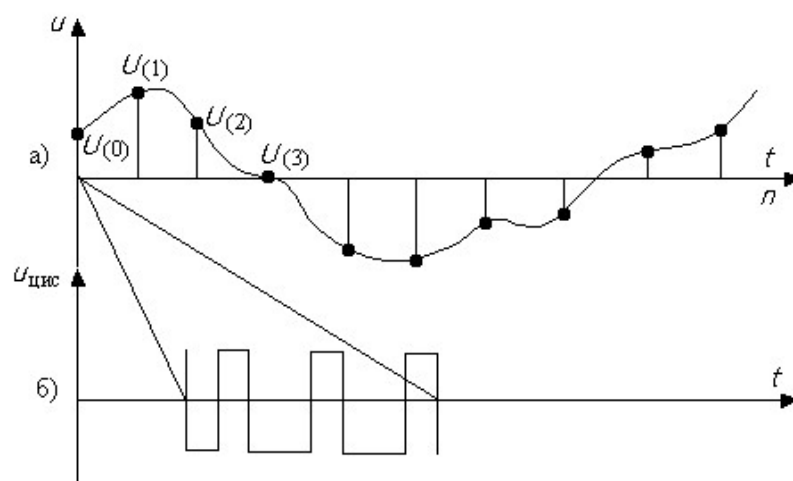


Рис 3.10. Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму

Далее каждую выборку в соответствии с ее значением в вольтах заменяют двоичным 8-разрядным числом (рис. 3.10,б), состоящим из единиц и нулей – всего 8 бит. Этот процесс называют первичным кодированием сигнала и выполняют в аналого-цифровых преобразователях (АЦП). 8 бит информации должны быть переданы за 125 мкс до прихода следующей выборки. Таким образом, скорость передачи цифрового сигнала телефонии составляет $8/TS = 64000 \text{ бит/с} = 64 \text{ кбит/с}$. С такой скоростью ТФ сигнал передают по внутрисистемным каналам связи. Для передачи по радиоканалу сигнал телефонии сжимают, снижая его скорость в несколько раз. При передаче сигналов по радиоканалу прибегают к временному уплотнению и пакетированию информации. Для формирования пакетов поток двоичных чисел разбивают на сегменты длительностью $T_{\text{кадр}}$, состоящие из n бит (рис. 3.11,а).

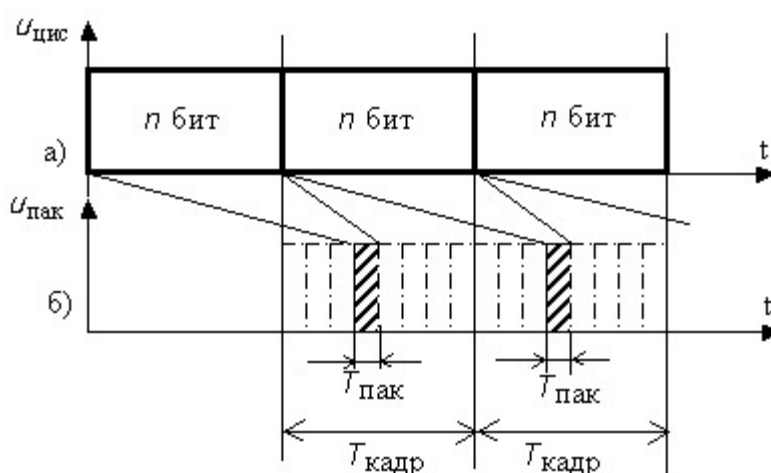


Рис 3.11. Принцип временного уплотнения сигналов

Каждый сегмент записывают в оперативную память, а затем передают по радиоканалу с бóльшей скоростью за время $T_{\text{пак}} < T_{\text{кадр}}$ (рис. 3.11,б). Если отношение $T_{\text{кадр}}/T_{\text{пак}} = m$, то за время $T_{\text{кадр}}$ можно передать m информационных пакетов разных пользователей. Интервал времени $T_{\text{кадр}}$ называют длительностью кадра, так что информационные пакеты одного пользователя отстоят друг от друга на $T_{\text{кадр}}$ и разделены пакетами других пользователей. На приемной стороне принятые пакеты записывают в память, а затем считывают с исходной скоростью.

В GSM длительность кадра составляет $60/13 \approx 4,615$ мс; каждый кадр состоит из 8 информационных пакетов, которые размещены в 8 временных интервалах ВИ (Time Slot - TS) (рис. 3.12). Друг от друга пакеты отделены небольшими защитными промежутками.

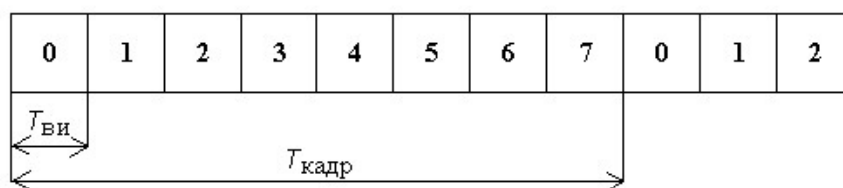


Рис 3.12. Кадр, состоящий из 8 временных интервалов

Длительность одного ВИ $T_{\text{ВИ}} = T_{\text{кадр}}/8 = 0,577$ мс. Таким образом, каждый физический радиоканал GSM характеризуют два параметра: частота и номер ВИ. Для системы GSM-900 выделено 124 дуплексных частотных канала в диапазонах 890 – 915 МГц (передача $MS \Rightarrow BTS$) и 935 – 960 МГц (передача $BTS \Rightarrow MS$), а для системы GSM-1800 374 частотных канала в диапазоне 1800 МГц. Каждый частотный канал имеет полосу 0,2 МГц. В одном частотном канале размещают 8 пользовательских каналов, по одному в каждом ВИ.

Мощность передатчика АС регулируют для обеспечения надежного приема информации и вместе с тем снижения соканальных помех для абонентов соседних кластеров. Мощность можно регулировать от ее максимального (номинального) уровня до 13 дБм (20 мВт). Мощность в дБм связана с мощностью в милливаттах соотношением $P(\text{дБм}) = 10 \lg P(\text{мВт})$.

Для улучшения качества связи в сетях GSM используют режим прыгающей частоты (рис. 3.13). Режим прыгающей частоты означает, что от кадра к кадру частоту передачи пакетов пользователя меняют по псевдослучайному алгоритму, заложенному в программное обеспечение АС и БС. Тогда, если в каком-либо из частотных каналов сигнал сильно ослаблен, то в других частотных каналах его уровень скорее всего будет находиться в допустимых пределах. Поэтому, если пакет в одном из кадров не принят или принят с большим числом ошибок, то хороший прием пакетов в других кадрах позволит восстановить исходную информацию.

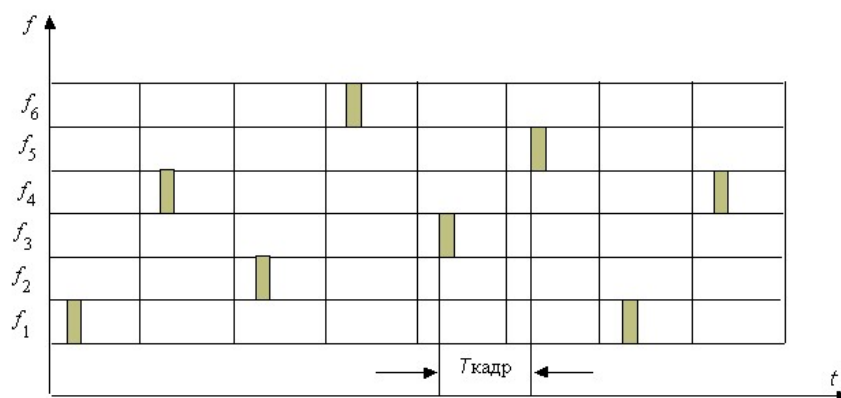


Рис 3.13. Пояснение режима прыгающей частоты (в соте 6 частотных каналов)

Архитектура сети GSM представлена на рис. 3.14 и состоит кроме отдельную подсистему абонентских станций (MS – Mobile Station) из следующих станционных подсистем.

Подсистема базовых станций BSS (Base Station Subsystem), состоит из контроллера базовых станций BSC (Base Station Controller), приемопередающих базовых станций BTS (Base Transceiver Station) и транскодеров (Transcoder and Rate Adaptation Unit - TRAU).

BSC выполняет следующие основные функции:

- распределяет каналный ресурс, т.е. назначает радиоканалы MS и выделяет каналы для передачи сигналов управления;
- коммутирует каналы к MS через соответствующие BTS;
- организует эстафетную передачу (handover);
- управляет мощностью и корректирует временную синхронизацию MS, находящихся в зоне его действия.

Соединения BSC $\leftrightarrow$ BTS, BSC $\leftrightarrow$ TRAU $\leftrightarrow$ MSC выполнены на основе цифровых потоков E1 (скорость 2048 кбит/с). Один поток позволяет с временным разделением передавать 30 каналов трафика со скоростью 64 кбит/с в каждом. Если в каждом канале организовать 4 независимых потока по 2 бита в кадре, то по стыку E1 можно будет передавать 120 каналов трафика со скоростью 16 кбит/с.

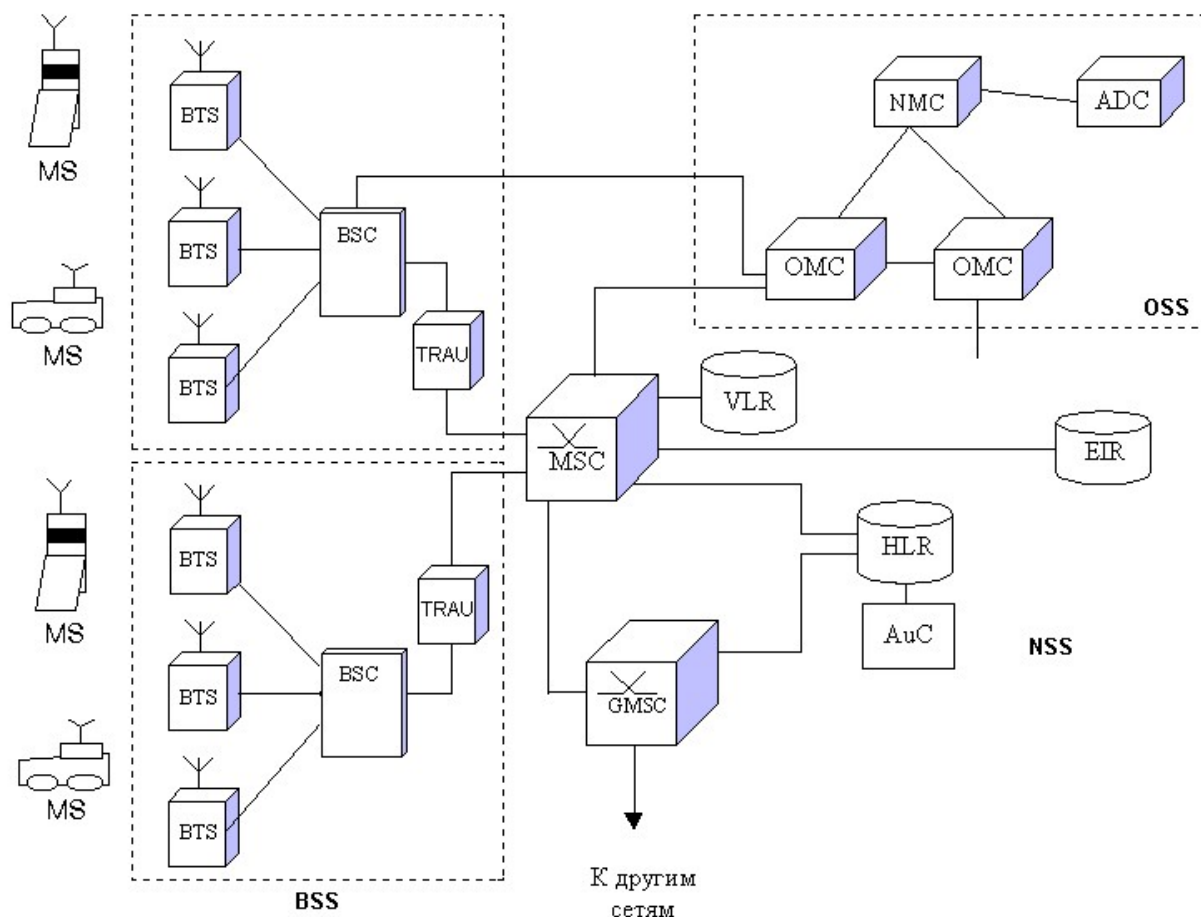


Рис 3.14. Архитектура сети GSM

Так как скорость передачи трафика (телефонии и данных) в одном радиоканале (одном ВЧ) меньше 16 кбит/с, то каждый канал трафика на радиоинтерфейсе прикрепляют к одному каналу 16 кбит/с на линии E1. В то же время действующие коммутаторы (MSC) коммутируют потоки данных со скоростью 64 кбит/с. Поэтому рядом с коммутатором размещают транскодеры, где производят сжатие телефонных сигналов в направлении от коммутатора MSC к BSC со снижением скорости передачи с 64 кбит/с до 16 (13+3) кбит/с и восстановление речи с увеличением скорости до 64 кбит/с в обратном направлении. транскодер выполняет упорядочение скоростей передаваемых потоков данных. Управление транскодером осуществляет BSC.

Подсистема коммутации состоит из одного или нескольких центров коммутации подвижной связи MSC (Mobile Services Switching Center), центра аутентификации AuC (Authentication Center) и баз данных:

- адресного регистра HLR (Home Location Register),
- визитного регистра VLR (Visitor Location Register),
- регистра идентификации аппаратуры EIR (Equipment Identity Register).

MSC и VLR представляют неразрывное целое - каждому MSC соответствует свой VLR. В сети одного оператора, как правило, один HLR и один AuC, но несколько MSC/VLR. MSC организуют:

- связь с другими сетями передачи информации, непосредственно или через шлюзовой коммутатор GMSC (Gateway Mobile Switching Center);
- коммутацию MS, находящихся в сотах, обслуживаемых данным MSC, с корреспондентами ТФОП, сетей подвижной связи и других сетей;
- совместно с VLR контроль за перемещением MS по зонам.

HLR сохраняет все данные, необходимые для обслуживания абонентов данного оператора независимо от их местонахождения. Визитный регистр VLR содержит данные о местонахождении и доступных услугах всех MS, находящихся в области управления данного MSC.

Центр аутентификации непосредственно связан с HLR. В нем хранят данные и генерируют соответствующие параметры, необходимые для аутентификации абонента при установлении соединения с сетью и для работы в режиме шифрования.

Регистр идентификации аппаратуры EIR служит для проверки MS, используемой абонентом. Каждая MS имеет индивидуальный заводской номер. EIR содержит "белый" список с номерами сертифицированных MS, "черный" список, где перечислены заводские номера MS, снятых с обслуживания, номера утерянных, украденных и неисправных MS, и "серый" список, в котором указаны номера MS, пригодных к ограниченному использованию. Все нормально работающие MS должны находиться в "белом" списке; MS из "черного" списка система не обслуживает.

Подсистема управления и обслуживания состоит из трех центров. Центр управления и обслуживания OMC (Operation & Maintenance Center) собирает и обрабатывает информацию о работе всех функциональных узлов сети, организует профилактические и ремонтные работы. Центр управления сетью NMC (Network Management Center) решает общие задачи развития, планирования и управления сетью. Административный центр ADC (Administration Center) по сути дела представляет директорат компании со всеми коммерческими и техническими подразделениями, куда входит и биллинговый центр.

На пути перехода к сотовым сетям 3-го поколения система GSM претерпела ряд усовершенствований, которые заложили основу формирования технологий третьего поколения сотовой связи. Дадим краткую характеристику этим – в свое время – новациям, которые суммарно именуют поколением 2+.

Высокоскоростная передача данных по коммутируемым каналам и реализующая ее технология HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) основана на выделении абоненту не одного, а нескольких ВИ в кадре. На рис. 3.15 приведен пример, когда MS предоставлены в кадре 2 ВИ. Следует обратить внимание на то, в соответствии со спецификациями GSM начала кадров приема сигнала MS (строка MS RX) и передачи сигнала (строка MS TX) сдвинуты на 3 ВИ. Кроме того, при передаче начало передаваемых пакетов должно быть сдвинуто на время упреждения. В строке Monitor

показан интервал времени, в течение которого MS оценивает уровень сигнала BTS одной из соседних сот.

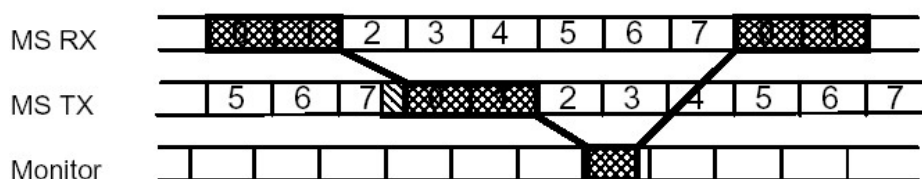


Рис. 3.15. Задачи приема и передачи сигналов MS при HSCSD

Теоретически при занятии всех 8 ВИ можно достичь скорости $8 \cdot 14,4 = 115,2$ кбит/с. Однако, из-за ограничений в работе действующих MSC и линий связи, соединяющих BTS, BSC и MSC, скорость обычно не превышает $4 \cdot 14,4 = 57,6$ кбит/с. Кроме того, ограничены и возможности MS. Так при занятии для приема и передачи в сумме более 5 ВИ, MS должна иметь возможность принимать и передавать одновременно, что существенно усложняет MS. HSCSD обеспечивает скорость, достаточную для передачи видеотелефонии, видеоконференций или Интернета. Однако, при передаче Интернет-приложений информационные пакеты разделены большими, неопределенными по времени промежутками. Использование HSCSD в этом случае крайне расточительно. Дело в том, что сети HSCSD, как и классические сети GSM, основаны на технологии коммутации каналов: за абонентом закрепляют дуплексный канал на все время сеанса связи. Из-за пауз при передаче каналный ресурс расходуют нерационально, что сокращает число обслуживаемых абонентов. Сеанс связи получается длинным, дорогим и может неожиданно прерываться. Поэтому основную нагрузку по передаче данных принимают на себя сети GSM с коммутацией пакетов, использующие технологию GPRS.

Целью технологии GPRS является эффективное использование каналного ресурса, создание комфортной среды для абонента при работе с Интернетом, при передаче и получении мультимедийных сообщений MMS – Multimedia Messages Service.

Основные свойства GPRS можно описать следующим образом.

GPRS поддерживает протоколы пакетной передачи данных, прежде всего IP (Internet Protocol) и X.25.

Физический каналный ресурс выделяют группе абонентов; занятие канала производят по мере поступления пакетов в соответствии с качеством услуг QoS (Quality of Service), предоставляемых абоненту; каждый пакет содержит идентификатор абонента и предназначен для конкретного пользователя.

Абонент передает и получает информацию пакетами; во время пауз канал связи занимают другие абоненты.

Скорость передачи данных в пакете может изменяться, достигая 160 кбит/с (абоненту могут выделять до 8 ВИ на одной частоте).

Скорости передачи в направлениях “вверх” и “вниз”, как правило, разные, например, 36,2 кбит/с в направлении BSS⇒MS и 3 кбит/с в направлении MS⇒BSS, причем асимметричные каналы обычно выделяют при доступе в Интернет.

Оплата услуги зависит от объема переданной информации, QoS сеанса связи и общего времени подсоединения к сети.

Мобильная станция виртуально подключена к сети Интернет. Абонент на время сеанса связи получает интернет-адрес.

Подсистема GPRS (рис. 3.16) представляет структуру "параллельную" подсистеме коммутации классической GSM. Роль MSC/VLR в пакетной сети подвижной связи выполняет SGSN - Serving GPRS Support Node (обслуживающий узел GPRS). Шлюзы с пакетными сетями передачи данных строят в виде GGSN - Gateway GPRS Support Node (шлюзовых узлов GPRS). При сетевом подходе к организации обмена информацией структура GPRS (SGSN, GGSN и другие элементы) является подсетью внешних пакетных сетей, где GGSN выполняют роль маршрутизаторов. Со стороны SGSN подсеть GPRS связана с подсистемой базовых станций.

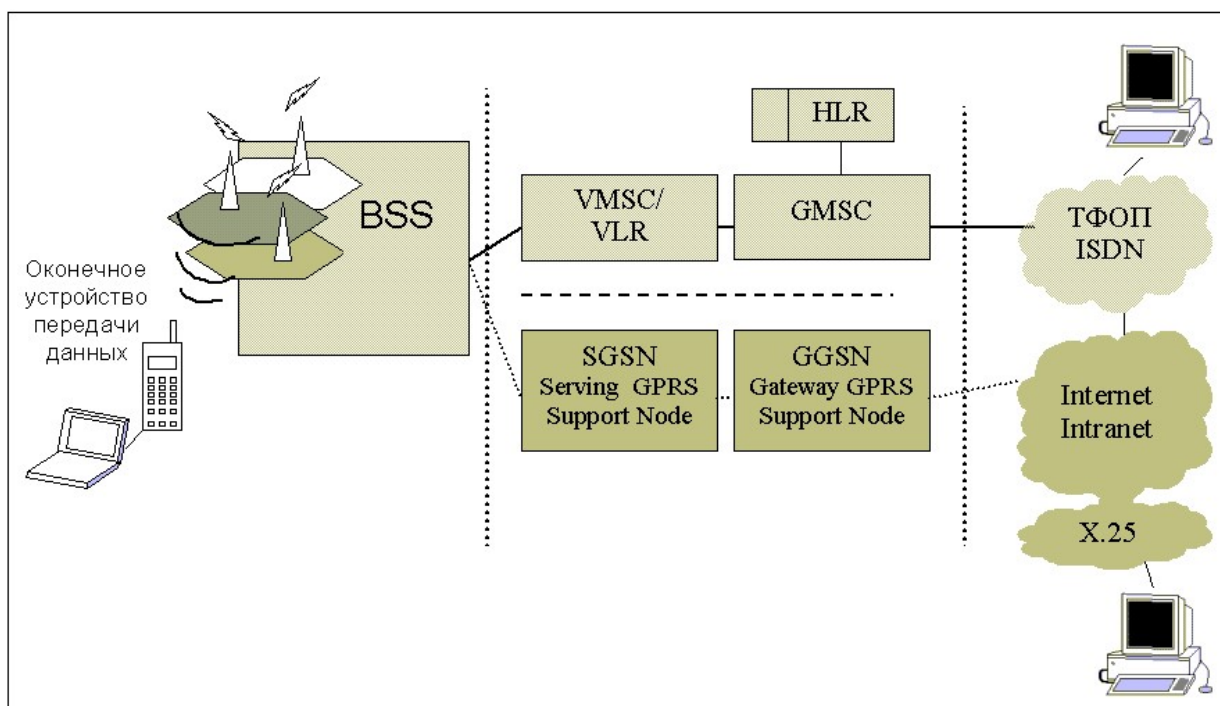


Рис. 3.16. Укрупненная структура сети GSM с поддержкой GPRS

Для увеличения скорости передачи данных в радиоканале предназначена технология EDGE (Enhanced Data Rates over Global Evolution), предусматривающая замену вида модуляции: Гауссовой ЧММС на 8-ФМ. Это позволяет при сохранении символьной скорости передачи в радиоканале 271 ксимв/с увеличить скорость передачи данных в 3 раза, поскольку сигнал 8-ФМ имеет 8 позиций и каждая из них соответствует

комбинации из 3-х бит (рис. 3.3). В результате появляются новые каналы передачи данных E-TCH (Enhanced Traffic Channel) со скоростями 28,8, 32 и 43,2 кбит/с в одном ВИ, которые в сочетании с избыточным кодированием и технологией GPRS позволяют достичь скоростей до 400 кбит/с. Однако модуляция 8-ФМ обладает меньшей помехозащищенностью, чем Гауссова ЧММС, поэтому ее следует использовать в каналах с высоким отношением сигнал/помеха. Если в классической GSM требовалось защитное отношение сигнал/помеха в 9 дБ, то при применении 8-ФМ необходимое защитное отношение возрастает до 15 – 17 дБ. Поэтому в сетях GSM – EDGE обеспечивают адаптивное изменение скорости передачи в соответствии с вариациями характеристик канала связи.

3.3. КODOBEE УПЛОТНЕНИЕ И ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ СОТОВЫХ СЕТЕЙ

В 1990 году в МСЭ (Международный союз электросвязи) и в региональных организациях стандартизации (ETSI - Европа, ARIB - Япония и ANSI - США) начинаются работы по созданию единого общемирового стандарта на оборудование систем подвижной сотовой связи третьего поколения. В 1992 году было принято решение о выделении на всемирной основе в диапазоне 2 ГГц полосы частот для развития систем сотовой подвижной связи третьего поколения. Для передачи сообщений по радиоканалу в этих сетях используются системы с кодовым уплотнением – CDMA.

Принцип кодового разделения каналов поясняет рис. 3.17. Передаваемый биполярный сигнал $u(t)$ (рис. 3.17,а), т.е. последовательность логических нулей и единиц с уровнями -1 и $+1$, умножают на биполярную кодовую последовательность $c_1(t)$, такую, что на каждый информационный бит приходится m бит (чипов) кодовой последовательности. На рис. 3.17,б эта последовательность для простоты состоит из 8 чипов; на практике $m = 4...256$. В результате умножения получают последовательность $v(t) = u(t) \times c_1(t)$ (рис. 3.17,в), которую и передают по каналу связи. В приемнике принятый сигнал вновь умножают на последовательность $c_1(t)$ и в результате получают $u_{пр}(t) = v(t) \times c_1(t) = u(t)$ (рис. 3.17,г, сплошная линия). Этим, однако, не ограничиваются и проводят интегрирование сигнала $u_{пр}(t)$ на интервале передачи каждого бита. В конце каждого промежутка времени (0-1, 1-2, 2-3) проводят оценку значения интеграла, после чего интегратор обнуляют и начинают процесс интегрирования заново (рис. 3.17,г, пунктирная линия). Таким образом, вычисляют корреляционную функцию принятого сигнала. В результате в конце каждого промежутка времени, соответствующего передаче одного бита, получают отрицательное или положительное число в соответствии с переданным информационным битом.

Теперь рассмотрим случай, если в приемнике принятый сигнал умножить не на последовательность $c_1(t)$, а на некоторую другую, $c_2(t)$, рис. 3.17,д. Произведя операцию $u'_{пр}(t) = v(t) \times c_2(t)$, получаем

последовательность (рис. 3.17,е). Так как за время передачи одного бита суммы отрицательных и положительных площадок компенсируют друг друга, после интегрирования в конце каждого бита получаем результат, равный нулю. Аналогичную картину имеем при умножении сигнала в приемнике на кодовую последовательность $c_3(t)$ (рис. 3.17,ж и рис. 3.17,з). Так приемник фильтрует эти сигналы.

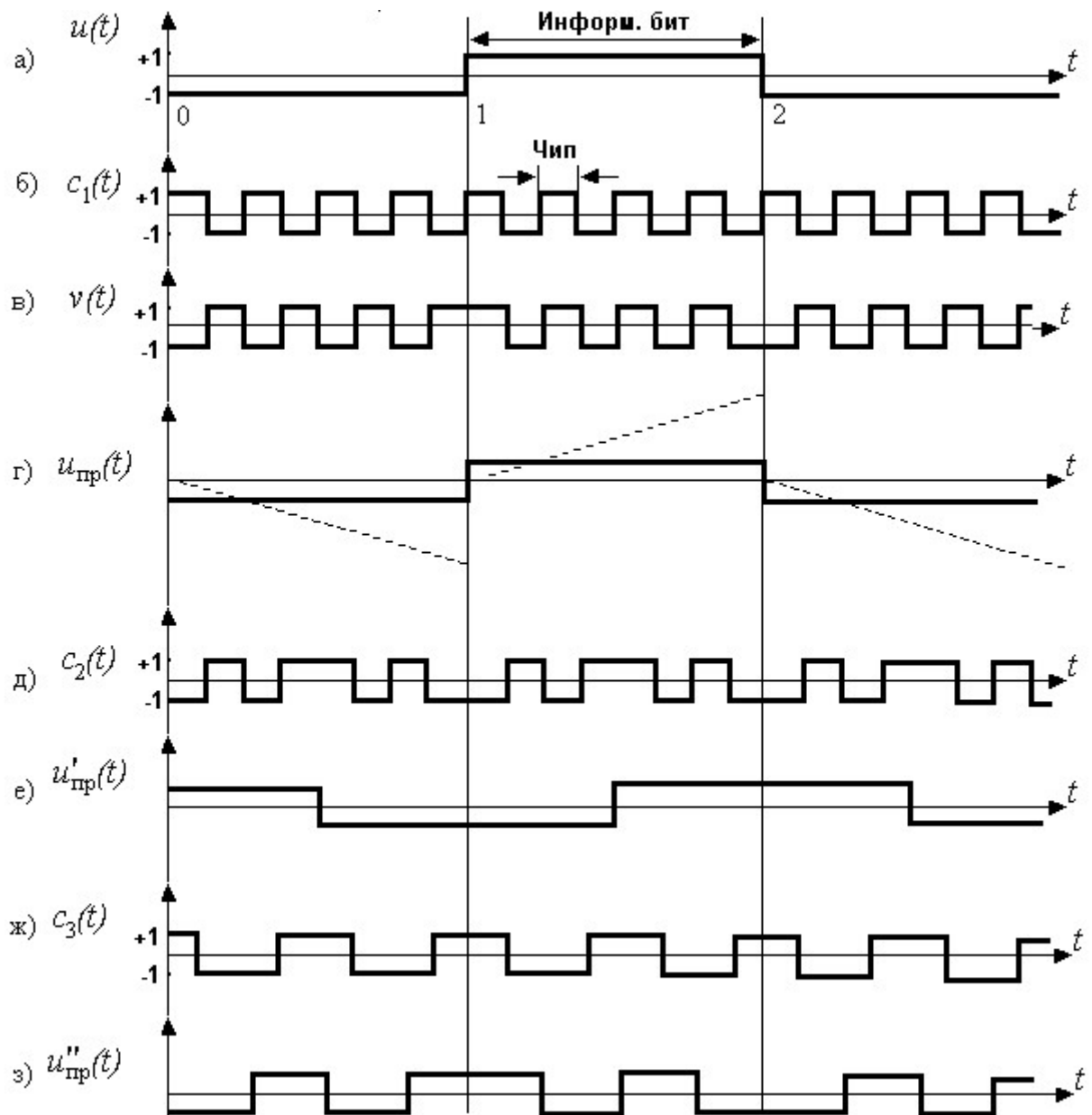


Рис. 3.17. Принцип CDMA

Кодовые последовательности $c_1(t)$, $c_2(t)$, $c_3(t)$ образуют группу ортогональных последовательностей. Они обладают следующим свойством

$$\sum_{i=1}^n c_j(i) \times c_k(i) = \begin{cases} n, & \text{если } j = k \\ 0, & \text{если } j \neq k \end{cases}$$

Используя для каждого канала связи свою последовательность из набора ортогональных последовательностей, можно, передавая все каналы одновременно на одной частоте, выделить в приемнике определенный канал, фильтруя все остальные.

Если один символ информационного потока со скоростью $V_{\text{симв}}$ закрывают 64 чипами с чиповой скоростью $V_{\text{чип}}$, то коэффициент расширения спектра (отношение $V_{\text{чип}}/V_{\text{симв}}$) $SF=64$.

В направлении вниз ($BTS \Rightarrow MS$) для разделения каналов в соте используют 64 ортогональные последовательности функций Радемахера-Уолша ($k=0 \dots 63$), обозначаемые как RW. Это позволяет в одной соте организовать одновременную передачу 18...23 каналов (теоретически 64, но более 23 не получается из-за ухудшения шумовых характеристик). Эти коды называют каналообразующими.

Кодовые последовательности RW образуются из столбцов или строк матрицы Адамара, которые обладают ортогональностью:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad A_{i \times 2} = \begin{pmatrix} A_i & A_i \\ A_i & -A_i \end{pmatrix}$$

Использование каналообразующих кодов позволяет передавать в одной полосе сигналы множества пользователей, но не повышает эффективности использования частотного ресурса. Действительно, при заполнении битов сигнала n чипами полоса сигнала расширяется в n раз, поскольку $V_{\text{чип}} = n \cdot V_{\text{симв}}$. Выигрыш при переходе на CDMA получают из-за использования скремблирующих кодов, которыми закрывают каждую базовую станцию.

В качестве скремблирующих кодов в стандартах с кодовым разделением каналов используют m -последовательности. m -последовательность отличается тем, что ее автокорреляционная функция имеет один узкий максимум при нулевом сдвиге чипов ($dk = 0$). Если $dk \neq 0$, то $R(dk) = -1$ (рис. 3.18). Обычная m -последовательность содержит $L = 2^{m-1}$ элементов, где m – число триггеров в генераторе кода. Меняя конфигурацию обратных связей в генераторе, можно получить до $(L-1)/m$ различных m -последовательностей. Чиповые скорости каналообразующих и скремблирующих кодов одинаковы.

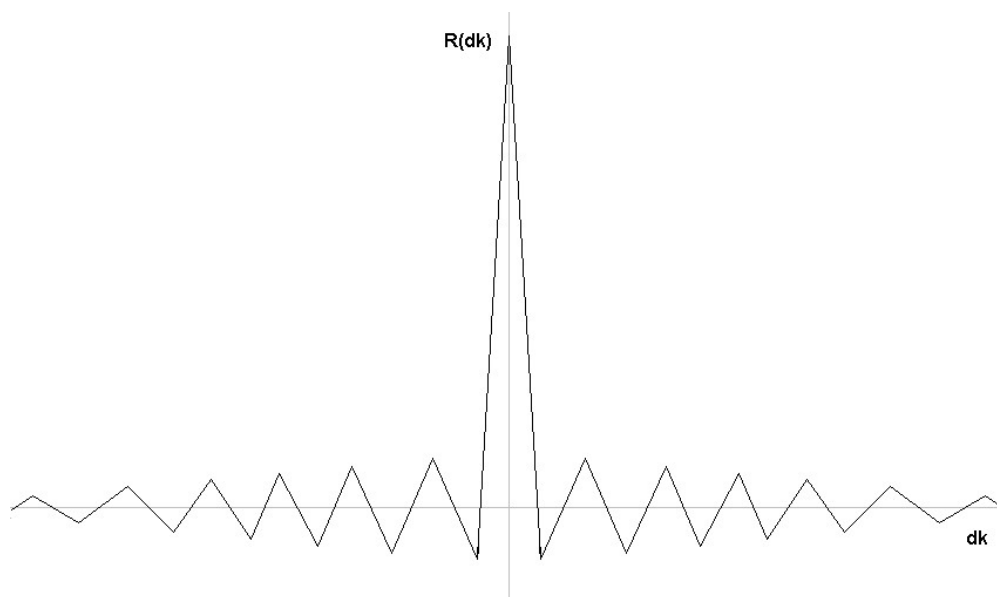


Рис. 3.18. Функция корреляции m -последовательности

Однако реализация сетей с кодовым разделением каналов сопряжена со значительными сложностями. Прежде всего, число каналов трафика существенно ниже величины SF. Рассмотрим передачу “вверх”, от мобильной станции к базовой безотносительно к стандарту сотовой связи с CDMA. Реальная ситуация представлена на рис. 3.19.

Так как мобильные станции MS находятся на разном удалении от базовой станции, то сигналы с MS1, MS2 и MS3 приходят на приемник базовой станции с разными случайными временными задержками и, следовательно, в отличие от передачи “вниз” они некогерентны. Это значит, что на входе приемника базовой станции, выделяющего сигнал с MS1, сигналы с MS2 и MS3 можно расценивать как помехи. На входе приемника сигнала с MS2 сигналы с MS1 и MS3 являются помехами и т.д.

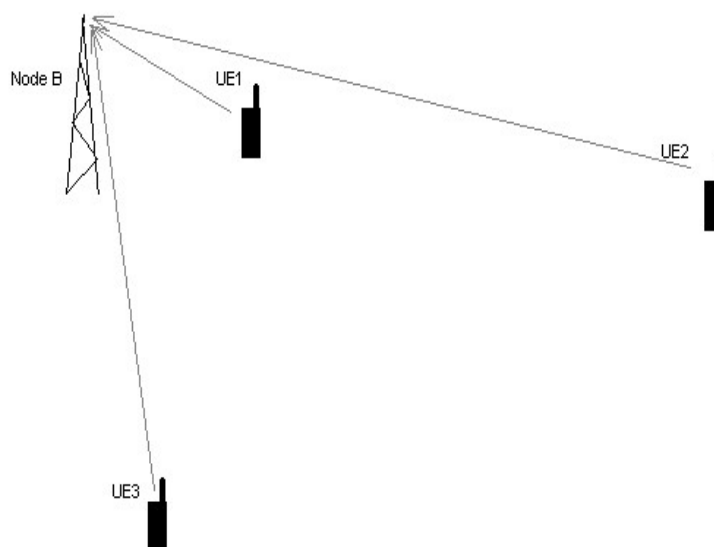


Рис. 3.19. Сложение сигналов на приемнике базовой станции

Суммарный сигнал мобильных станций на входе приемника базовой станции представляет собой квазишумовой сигнал, его спектр показан на рис. 3.20. Из этого сигнала следует выделить и обработать сигналы отдельных MS. Положим, что по каналам “вверх” все MS передают информацию с одной скоростью и мощности сигналов отдельных мобильных станций на входе приемника BTS одинаковы. Тогда энергетический спектр на рис. 3.20 состоит из суммы спектров одинаковой интенсивности. При этом порядок сложения спектров сигналов неважен.

В приемнике BTS каждого канала происходит когерентная обработка сигнала каждого отдельного MS. При этом запускают скремблирующий и каналообразующий коды соответствующего канала и производят сжатие спектра сигнала в SF раз. Мощность каждого канала, представленного на рис. 3.20, сохраняется, но теперь она сосредоточена в узкой полосе (рис. 3.21). Сигналы всех остальных MS создают в этой полосе помехи в виде некоррелированного шума.

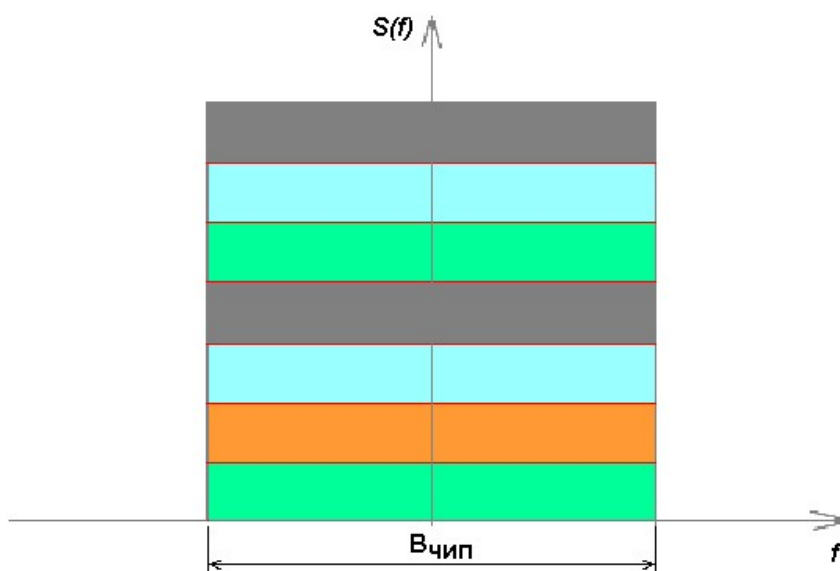


Рис. 3.20. Спектр сигнала на входе приемника BTS

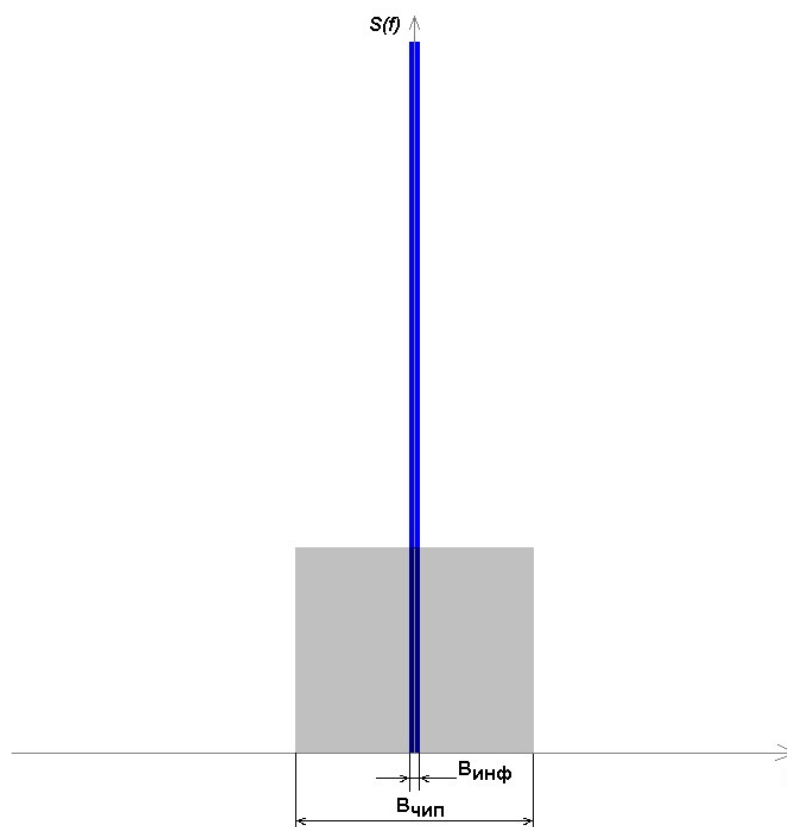


Рис. 3.21. Спектры сигнала и помех на выходе приемника

Для успешного приема сигнала должно быть обеспечено требуемое для конкретного вида передачи информации отношение сигнал/помеха, которое определяется выражением:

$$\frac{E_b}{N_0} \leq \frac{SF \cdot P_j}{P_{ui} + \alpha \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_j \right) + \sum_{l=1}^m P_l}, \quad (3.1)$$

где $\frac{E_b}{N_0}$ - требуемое отношение сигнал/помеха для данного вида передачи,

SF - коэффициент расширения спектра,

P_j - мощность сигнала j -го абонента на входе приемника,

P_{ui} - мощность тепловых шумов, приведенная к входу приемника,

$\alpha \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_j \right)$ - суммарная мощность всех $(n-1)$ сигналов абонентов своей соты,

α - коэффициент активности абонентов,

$\sum_{l=1}^m P_l$ - мощность мешающих сигналов абонентов соседних сот.

Произведем численную оценку выражения (3.1). Пусть $SF = 64$, а по всем каналам передают телефонию. При приеме телефонного сигнала требуется обеспечить отношение сигнал/помеха, равное 5 дБ (3 раза). Если

пренебречь помехами из соседних сот и собственными шумами приемника, то тогда допустимое число абонентов в соте с передачей телефонии будет $SF/3 = 21...22$. Важно отметить, что максимальное число абонентов в соте всегда меньше, чем SF , примерно в 2...3 раза (в зависимости от требуемого отношения сигнал/помеха).

Рассмотренный простой пример позволяет сделать дополнительные важные выводы. Прежде всего, мощности всех сигналов на входе приемника BTS, передаваемых с одинаковой скоростью, должны быть равными (иначе более сильные сигналы подавят более слабые). В условиях передачи сигналов на трассах с быстрыми замираниями в сетях с CDMA необходима регулировка мощности передатчиков UE в реальном времени, фактически каждую микросекунду. Во-вторых, требуемая мощность сигнала на входе приемника напрямую связана с коэффициентом расширения спектра SF . Графически это показано на рис. 3.22, 3.23. При увеличении скорости передачи мощность сигнала на входе приемника возрастает.

:

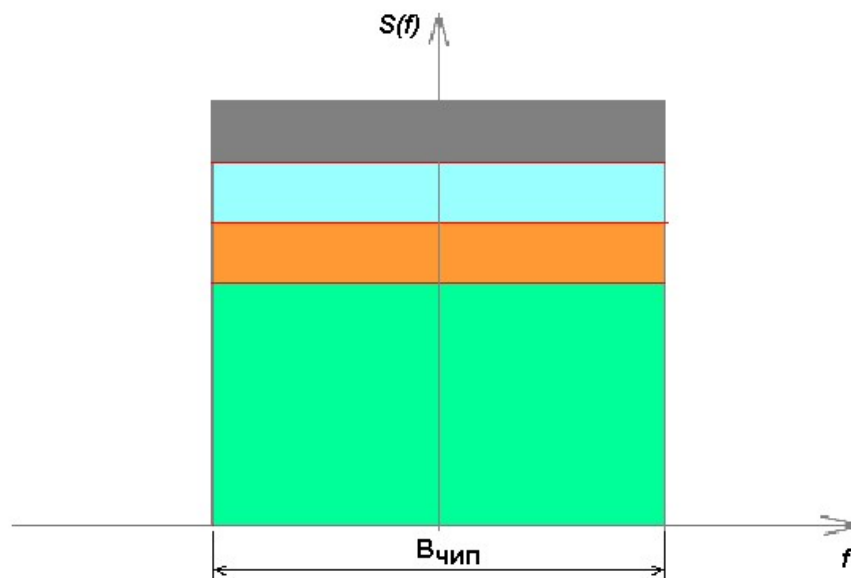


Рис. 3.22. Спектр сигнала на входе приемника

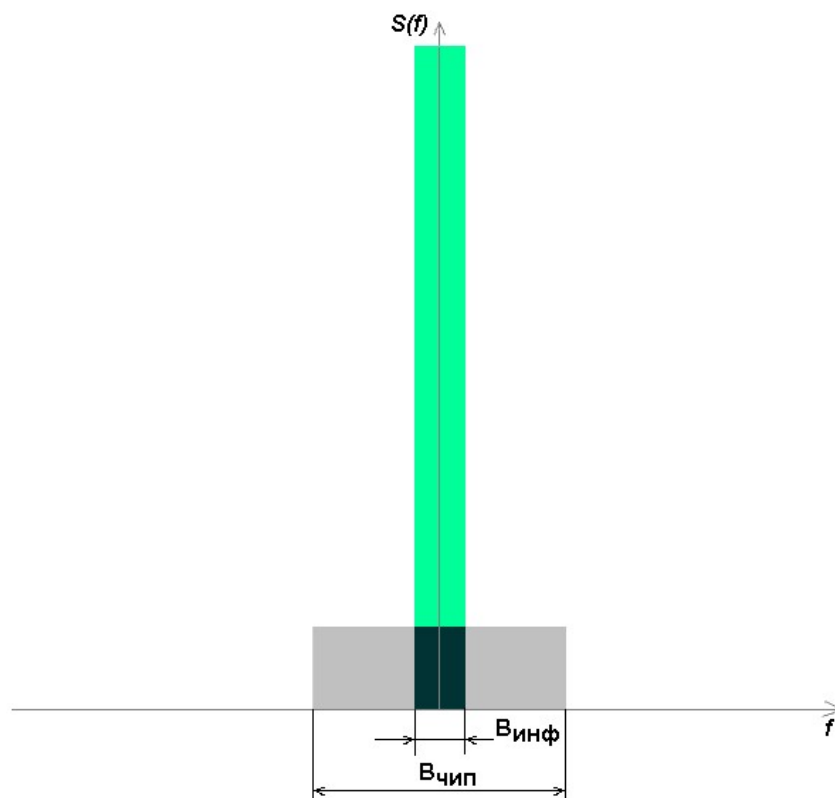


Рис. 3.23. Спектры сигнала и помех на выходе приемника

На рис. 3.22 и 3.23 проиллюстрирована ситуация, когда одному абоненту был выделен канал с $SF=16$, а другим с $SF = 64$. Видно, что энергетический вклад UE первого абонента в общую энергетическую композицию увеличился в 4 раза ($64/16=4$). Ситуация на выходе приемника этого абонента показана на рис. 3.23.

Указанный абонент получает более высокоскоростной канал, однако, помеховая ситуация в рассматриваемой соте становится такой, что число каналов с $SF=64$ должно быть уменьшено.

Фактически это означает, что чем выше скорость передачи, тем больше должна быть мощность соответствующего передатчика и тем меньше дальность связи. Кроме того, требуемая мощность сигнала на входе приемника зависит от уровня суммарных помех, так что размеры соты меняются в зависимости от числа абонентов в данной и в соседних сотах. Поэтому в CDMA сетях соты “дышат”, т.е. меняют свои размеры в зависимости от нагрузки в сети.

Повышению качества связи способствует применение в BTS и MS Rake-приемников (рис. 3.24). Как правило, сигнал в точке приема представляет собой сложную интерференционную картину множества сигналов, пришедших по различным путям с разными задержками. Подбирая соответствующие задержки кодовых последовательностей в приемнике, можно выделить несколько (до трех) наиболее сильных сигналов (лучей).

Каждый такой сигнал обрабатывают отдельно, а результаты суммируют (SUM) с весовыми коэффициентами, пропорциональными мощности отдельных лучей. Использование Rake приемников позволяет говорить о микроразнесенном приеме.

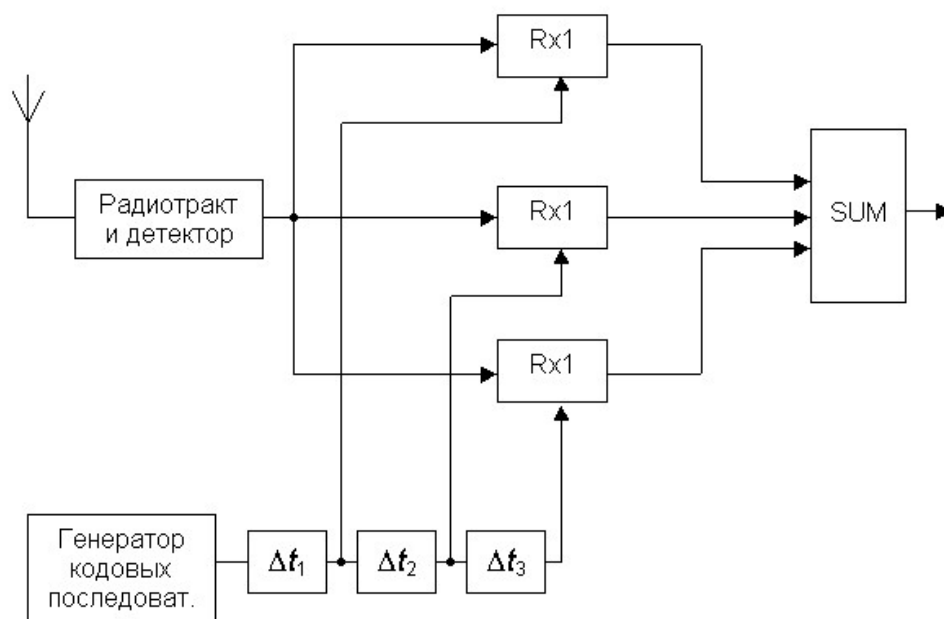


Рис. 3.24. Принцип построения Rake приемника

Параллельная обработка нескольких сигналов в приемнике MS позволяет организовать мягкий хэндовер. Так как все BTS сети работают на одних и тех же частотах, MS может одновременно принимать сигналы двух, а то и трех соседних BTS, а те, в свою очередь, поддерживать с ней связь. Поэтому переключение канала связи от одной BTS к другой при мягком хэндовере происходит без потерь информации, как, например, в стандарте GSM.

Европейский стандарт 3-го поколения UMTS, использующий кодовое разделение каналов, развертывают на базе действующих сетей GSM. Структура интегрированной сети приведена на рис. 3.25. К существующей в GSM подсистеме пользовательских услуг и коммутации, которая включает как коммутаторы каналов MSC/VLR, GMSC, так и коммутаторы пакетов SGSN, GGSN, и образует ядро сети CN (Core Network), подключены как действующие подсети базовых станций GSM BSS, так и наложенные на них новые сети радиодоступа UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network).

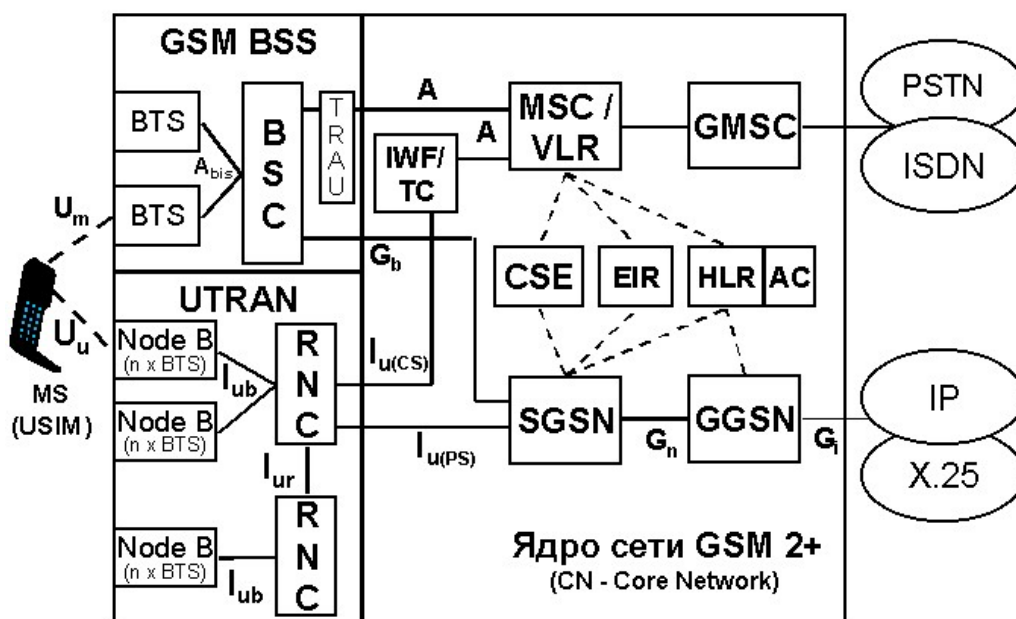


Рис. 3.25. Архитектура интегральной сети UMTS и GSM

Сети UTRAN могут использовать две взаимоувязанные технологии радиодоступа с кодовым разделением UTRA-FDD и UTRA-TDD (см. п. 3.3). В состав UTRAN входят контроллеры RNC (Radio Network Controller) и узлы базовых станций (Node B), каждый из которых может состоять из одной (в несекторизованных сотах) или 3-х (в секторизованных сотах) BTS. В MS, работающих в совмещенной сети GSM/UMTS, вставляют USIM (Universal SIM-карту).

При работе UTRAN с коммутируемыми каналами, следующими от MSC/VLR, включают промежуточный блок IWF/TC (Interworking Function/Transcoder). Этот блок выполняет функции сопряжения разных интерфейсов и преобразует скорости сигналов телефонии и данных.

Базовый вариант на основе технологии UTRA-FDD предусматривает передачу информации с чиповой скоростью 3,84 Мчип/с в полосе 5 МГц при дуплексном разносе сигналов двух направлений 190 МГц. Различным скоростям передачи информации соответствуют различные значения коэффициента расширения спектра SF.

максимальная скорость передачи при SF=4 составляет 480 кбит/с в направлении вверх и 936 кбит/с в направлении вниз. Если требуется организовать передачу с более высокими скоростями, то одному пользователю выделяют несколько параллельных каналов передачи при SF=4. Заметим, что скорости передачи вверх и вниз не обязательно должны быть равными. Наоборот, при передаче данных по большей части каналы будут асимметричными.

Для разделения каналов в UTRA применен ортогональный код с переменным коэффициентом расширения SF. Структура формирования кодовых последовательностей пояснена рис. 3.26.

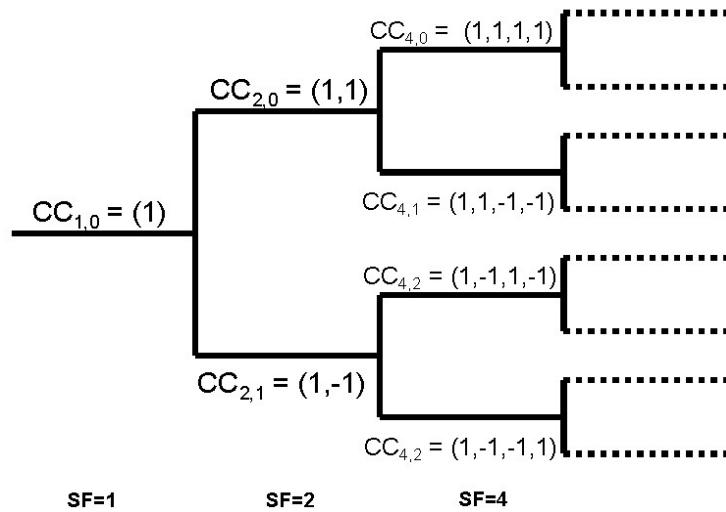


Рис. 3.26. Принцип формирования ортогональных кодов

При увеличении SF в 2 раза для образования следующей группы кодов используем алгоритм Адамара:

$$CC_n = \begin{bmatrix} CC_{n/2} & CC_{n/2} \\ CC_{n/2} & -CC_{n/2} \end{bmatrix}.$$

Так, при SF=4 получим 4 кода

$$CC_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

а при SF=8 будет 8 кодов

$$CC_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Коды в параллельных ветвях рис. 3.18 взаимно ортогональны. Это позволяет легко организовать каналы связи от BTS к различным MS с разными скоростями (коэффициентами расширения SF). Одна BTS может поддерживать на одной частоте 4 канала с SF=8, 32 канала с SF=128 и до 64 каналов с SF=256.

Кроме каналообразующих, в UTRA применяют различные скремблирующие коды. Например, для разделения абонентов (MS) в

направлении вверх и BTS (секторов) в направлении вниз используют коды Голда. Эти коды представляют собой сумму двух m -последовательностей сдвинутых друг относительно друга во времени. Чиповая скорость скремблирующих кодов, как и каналообразующих, составляет 3,84 Мчип/с.

При передаче трафика и сигнализации по радиоканалам информационный поток разбивают на отдельные кадры длительностью 10, 20, 40 или 80 мс. Базовым является 10 мс кадр, а 72 кадра по 10 мс составляют суперкадр, что по длительности соответствует 6 мультикадрам канала трафика в GSM. Так в сетях GSM/UMTS обеспечивают общую временную синхронизацию.

Для высокоскоростной пакетной передачи данных “вниз” в UTRAN предложена технология HSDPA – High Speed Downlink Packet Access. Для этого на одной частоте организуют каналы с коэффициентом расширения спектра $SF = 16$ и адаптивной модуляцией и кодированием. Из 16 теоретических каналов один оставляют для передачи пилотного сигнала, сигналов синхронизации и системного управления, а остальные используют под трафик. Если условия приема благоприятны, то одному пользователю могут быть выделено до 15 кодов, что позволяет достичь предельной скорости передачи данных в 10.8 Мбит/с. Однако такой режим возможен при отношении сигнал/помеха более 20 дБ.

3.4. СЕТИ LTE, LTE-A

Первые спецификации стандарта 4-го поколения LTE (E-UTRA) (Rel.8) были опубликованы в 2008г., а первые сети появились в 2009г. За прошедшие с этого времени годы вышли Rel.9 – Rel.14 спецификаций стандарта и со второй половины 2017 года рабочая группа 3GPP обещает сфокусироваться на разработке 15-го релиза. Строго говоря, на первом этапе сети LTE не удовлетворяли одному из требований, предъявляемых к сетям 4-го поколения, поскольку не обеспечивали скоростей в 1 Гбит/с для абонентов с низкой мобильностью (стационарных и пешеходов). В полосе 20 МГц без применения технологии MIMO предельная скорость передачи вниз составляет величину порядка 75 Мбит/с, а вверх при модуляции 16-QAM менее 30 Мбит/с. При использовании вниз технологии пространственного мультиплексирования теоретически при конфигурации антенн 4×4 могла быть достигнута скорость $4 \times 70 = 280$ Мбит/с, что более, чем в 3 раза ниже требуемой (1 Гбит/с). Стандартом 4 поколения LTE стал с появлением спецификаций Rel.10. Этот вариант получил название LTE-A (Advanced). LTE-A представляет собой развитие стандарта LTE. При этом аппаратура, которая поддерживает LTE-A, может работать в существующем варианте LTE (Rel.8/9). Расширение возможностей при передаче высокоскоростного трафика обеспечивают следующие технологические новшества: агрегация частотных полос, расширение вариантов MIMO, построение сети на основе неоднородных структур и использование структур с релейными станциями. Из этих технологий важнейшей является агрегация полос, поскольку для увеличения в разы скоростей передачи данных необходимо в разы

увеличивать полосу, предоставляемую абоненту. При организации неоднородных сетей предусмотрены меры по управлению многоуровневыми структурами с целью снижения взаимных помех.

Сети стандарта E-UTRAN (LTE) предназначены как для обмена пакетным трафиком между различными абонентами сетей радиодоступа, так и для доставки пакетов на абонентский терминал с интернет-серверов. Сети LTE относят к all-IP сетям, где внутрисетевые интерфейсы строят на основе IP-протоколов. Основная структура сети LTE представлена на рис. 3.27.

Сеть включает в себя мобильные терминалы (UE – User Equipment), сеть радиодоступа *E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network)* и новое ядро сети *Evolved Packet Core (EPC)*. Для обслуживания абонентов сеть имеет выход на сети с предоставлением услуг по IP-протоколу и на домашние сети абонентов (HSS – Home Subscriber Server).

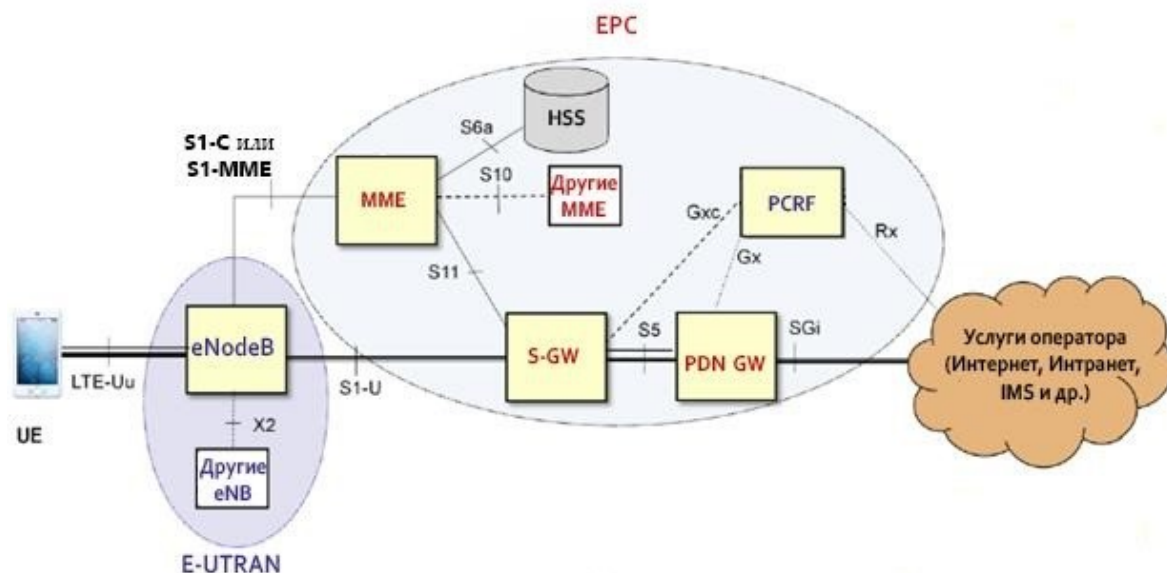


Рис. 3.27. Структура сети LTE

Сеть радиодоступа E-UTRAN построена как совокупность узлов базовых станций eNB (E-UTRAN NodeB или eNodeB). Ядро сети EPC (Evolved Packet Core) состоит из обслуживающего шлюза S-GW (Serving Gateway), шлюза для выхода на пакетные сети PDN GW (Packet Data Network Gateway), структуры управления по протоколу Mobility Management MME (Mobility Management Entity), связанной с S-GW и eNodeB сигнальными интерфейсами. На рис. 3.27 соединения для передачи данных показаны толстыми линиями, сигнальные соединения – тонкими.

eNB подключены к EPC посредством интерфейса S1. При этом интерфейс S1 в пользовательской плоскости S1-U (User Plane) непосредственно замыкается на обслуживающий шлюз S-GW (Serving Gateway), в то время как сигнальная часть интерфейса S1-C (Control Plane) следует на MME – Mobility Management Entity.

UE (абонентский терминал) подключенный к сети LTE, может находиться в состоянии CONNECTED (ACTIVE) или в состоянии IDLE. В

состоянии CONNECTED идет обмен сообщениями (как сигнальными, так и пакетами трафика) по радиointерфейсу. В состояние IDLE станцию переводят на время пауз в сеансе связи. В этом состоянии абонент сохраняет свой IP-адрес, сеть поддерживает абонентские базы данных, а местоположение абонента определено с точностью до зоны слежения Tracking Area (аналог контролируемой VLR зоны локализации в GSM).

eNB (объединяет в себе функции базовых станций и контроллеров сетей 3-го поколения):

- обеспечивает передачу трафика и сигнализации в радиоканале,
- управляет распределением радиоресурсов,
- обеспечивает сквозной канал трафика к S-GW,
- выбирает обслуживающий MME и организует сигнальный обмен с ним,
- поддерживает синхронизацию передач и контролирует уровень помех в соте,
- обеспечивает шифрацию всех пользовательских сообщений и целостность передачи сигнализации по радиоканалу,
- производит обработку данных и сигнализации на уровне L2,
- организует хэндоверы,
- поддерживает услуги мультимедийного вещания.

MME:

- ведет базы данных абонентов, зарегистрированных в сети,
- выбирает S-GW и PDN GW при подключении абонентов к сети,
- обеспечивает передачу и защиту сигнализации NAS (Non Access Stratum) по протоколам MM (Mobility Management) SM (Session Management) между MME и UE,
- обеспечивает локализацию, аутентификацию и авторизацию абонентов,
- участвует в организации межсетевых связей и хэндоверов,
- организует вызовы UE, находящихся в состоянии IDLE,
- ведет сигнальный обмен с eNB при организации сквозных каналов.

S-GW (Serving Gateway) – обслуживающий шлюз:

- выполняет функции “якоря” в визитной сети, маршрутизируя трафик при перемещениях UE в состоянии CONNECTED от одного eNB к другому (хэндовере),
- ведет базу данных абонентов, зарегистрированных в сети,
- участвует в организации сквозных каналов с eNB и PDN GW, а также сигнальных соединений с MME при регистрации абонента в сети и при выполнении процедуры локализации,
- предоставляет учетные данные для тарификации и оплаты выполненных услуг.

PDN GW:

- является “якорем” при подключении к внешним IP-сетям; ведет базу данных абонентов, подключенных к нему,
- организует точку доступа к внешним IP-сетям,

- активизирует статический IP-адрес абонента; если абонент должен получить на время сеанса связи динамический IP-адрес, PDN GW запрашивает его с сервера DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) или сам выполняет необходимые функции DHCP, после чего обеспечивает доставку IP-адреса абоненту,
- обеспечивает качественные характеристики услуг на внешнем соединении через интерфейс SGi и фильтрацию входящих пользовательских пакетов данных,
- организует сквозные каналы и сигнальные соединения между S-GW и PDN GW,
- устанавливает требуемые качественные характеристики сквозных каналов на основе установок, полученных от PCRF, в том числе максимальные и минимальные скорости передачи данных в сквозных каналах в соответствии с качественными характеристиками передаваемого трафика QCI (QoS Class Identifier),
- ведет учёт предоставленных абонентам услуг.

PDN GW обычно находится в домашней сети абонента, а S-GW, MME и eNB – в визитной. Если абонента обслуживает домашняя сеть, то PDN GW и S-GW связаны интерфейсом S5, если S-GW находится в визитной сети, а PDN GW в домашней, то между ними интерфейс S8, представляющий собой межсетевой вариант S5.

Policy Control and Charging Rules Function (PCRF) по сути представляет собой управляющий сервер, обеспечивающий централизованное управление ресурсами сети, качество обслуживания учет и тарификацию предоставляемых услуг. Как только появляется запрос на новое активное соединение, эта информация поступает на PCRF. Он оценивает имеющиеся в его распоряжении ресурсы сети и направляет в PCEF (Policy and Charging Enforcement Function) шлюза PDN GW команды, устанавливающие требования к качеству услуг и к их тарификации. PCRF находится в домашней сети абонента. PCRF является центральным элементом подсистемы управления качеством обслуживания и тарификацией PCC.

HSS – Home Subscriber Server, ведет базу данных абонентов, включая подписки на услуги, обеспечивает выполнение процедур безопасности в сети LTE, исполняя функции HLR и AuC в сетях GSM/UMTS. HSS поддерживает сигнальную сеть при организации услуг. MME имеют прямой выход на HSS через интерфейс S6a по протоколу Diameter.

На физическом уровне (в радио-интерфейсе) в E-UTRA применяют технологию OFDM с модуляцией 4-ФМ, 16-QAM и 64-QAM. При этом число поднесущих частот в рабочей полосе 20 МГц составляет 1200.

Для взаимной синхронизации E-UTRAN и UTRAN используют тактирование с длительностью временной единицы $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ с. Передача по радиоканалу идет кадрами длиной 10 мс, что составляет $307200 T_s$. Кадр состоит из 20 временных слотов длиной $15360 \times T_s = 0,5$ мс,

пронумерованных от 0 до 19. Два последовательных слота составляют 1 субкадр – всего 10 субкадров, от 0 до 9 (рис. 3.28). Различают 2 структуры кадров: кадры типа 1 при работе с частотным дуплексом (FDD) и кадры типа 2 при работе с временным дуплексом (TDD). На рис. 3.29 показаны структуры кадров с FDD и TDD.

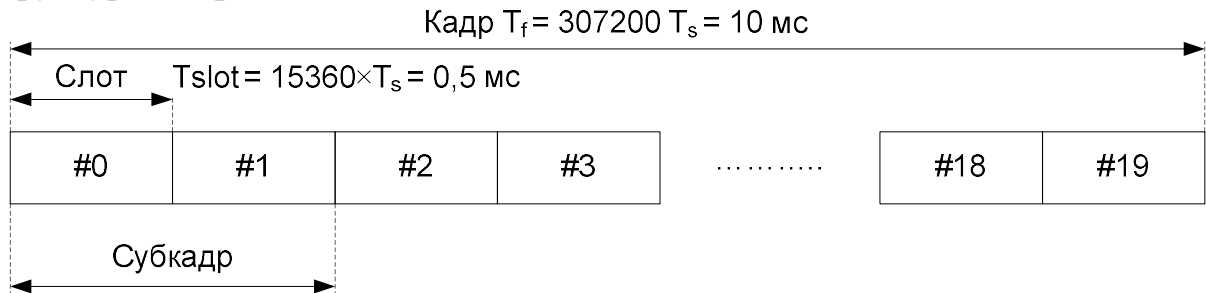


Рис.3.28. Структура кадра LTE

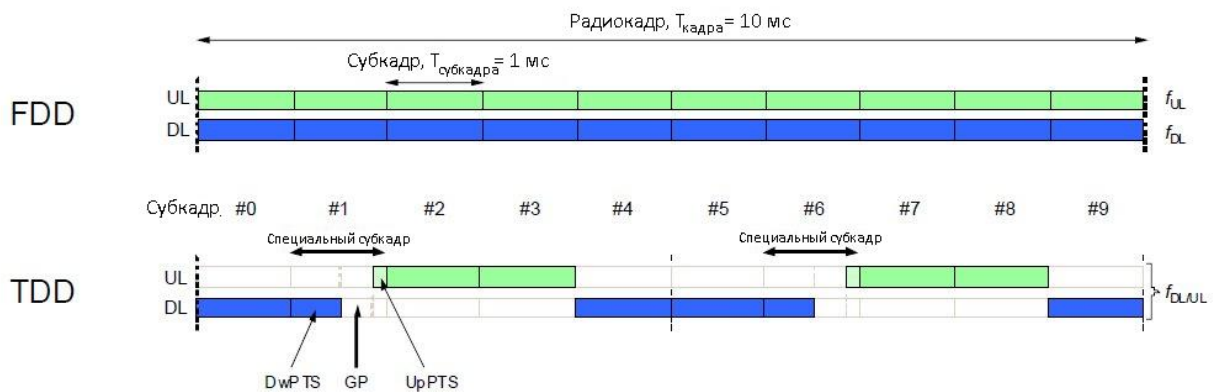


Рис.3.29. Конфигурация кадра при частотном и временном дуплексе

При частотном дуплексе в каждом субкадре идет одновременная передача вверх (UL) и вниз (DL) в разных частотных полосах. При временном дуплексе в некоторых субкадрах идет передача вниз (D), в других вверх (U). Кроме того, есть специальные (переходные) субкадры (S), состоящие из трех полей: DwPTS – поля передачи вниз, UpPTS – поля передачи вверх и защитного интервала (GP) (рис. 3.30).

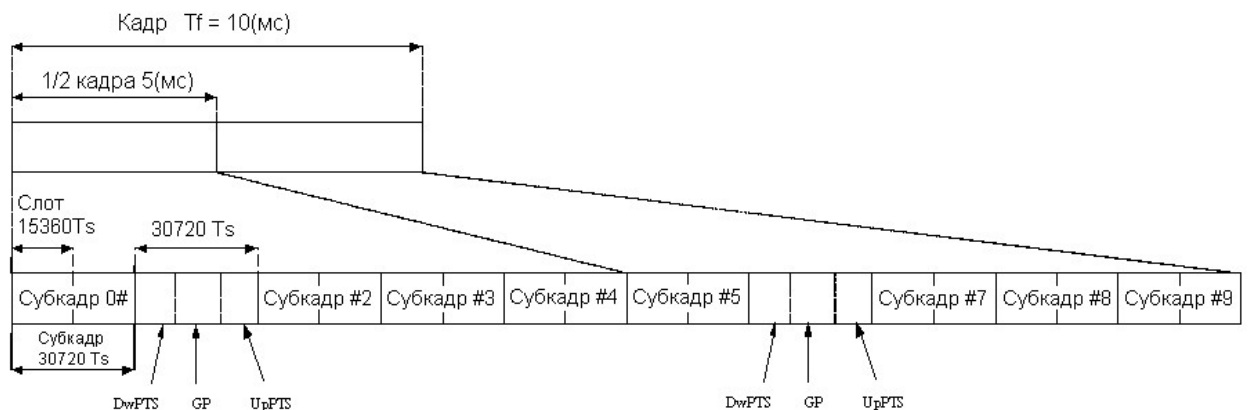


Рис. 3.30. Конфигурации кадра при временном дуплексе

Перейдем к частотно-временным характеристикам физического уровня стандарта E-UTRA. При расстоянии между поднесущими $\Delta F = 15 \text{ кГц}$ длина символа $T_u = 1/\Delta F \approx 66,7 \text{ мкс}$. В каждой половине субкадра (слоте длиной 0,5мс) на одной поднесущей передают 6 или 7 символов в зависимости от длительности циклического префикса CP (cyclic prefix) – активной паузы между символами. Длительность циклического префикса T_{CP} составляет $160T_s \approx 5,2 \text{ мкс}$ перед первым символом и $144T_s \approx 4,7 \text{ мкс}$ перед остальными символами. При заметной межсимвольной интерференции возможен вариант использования расширенного CP длительностью $512T_s \approx 16,7 \text{ мкс}$. В этом случае в одном субкадре размещают 6 символов (рис. 3.31).

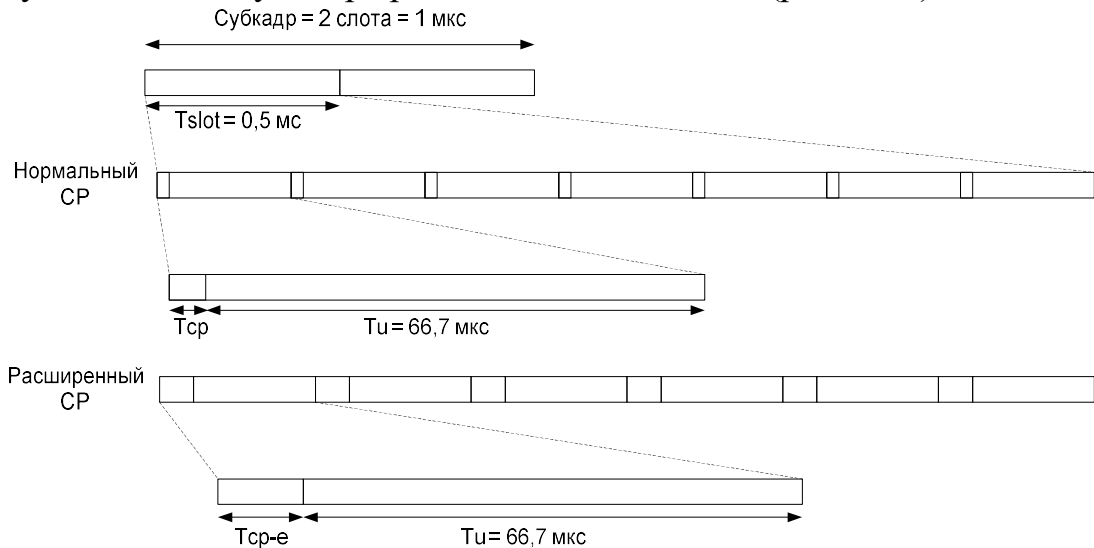


Рис. 3.31. Структура слота на физическом уровне

Как было сказано, в частотной области расстояние между поднесущими выбрано равным $\Delta F = 15 \text{ кГц}$ (опционально, 7,5 кГц). Выбор $\Delta F = 15 \text{ кГц}$ поддерживает взаимную синхронизацию устройств UMTS и E-UTRA. Так при числе поднесущих $N = 256$ тактовая частота $B = N/T_u = N \times \Delta F = 3,84 \text{ МГц}$, что совпадает с чиповой скоростью в стандарте UMTS. Взаимная синхронизация обеспечивается и с WiMAX. Напомним, что в WiMAX стандарта 802.16е расстояние между поднесущими составляет 10,94 кГц, что составляет 1/351 от частоты 3,84 МГц.

Весь канальный ресурс разделяют на **ресурсные блоки (РБ)**. Формально при передаче вниз ресурсный блок состоит из 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц и одного временного слота (7 или 6 символов на интервале 0,5 мс). Каждый символ является **ресурсным элементом (РЭ)**; его характеризуют 2 параметра $\{k, l\}$, где k определяет номер поднесущей, а l – номер символа в ресурсном блоке. При передаче вниз, от eNB к UE, в каждом блоке из $12 \times 7 = 84$ РЭ часть ресурсных элементов используют для передачи символов опорного сигнала (рис. 4.32).

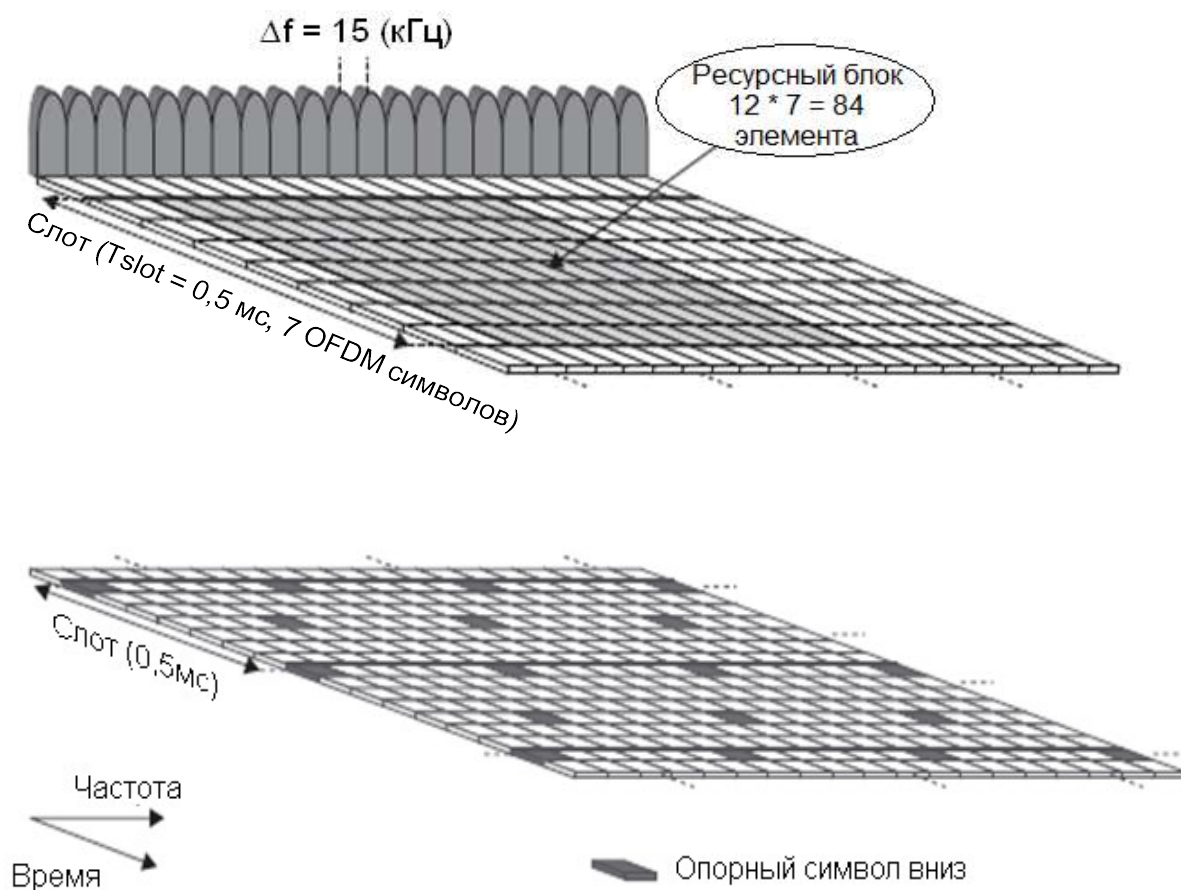


Рис. 3.32. Структура ресурсного блока при передаче вниз

Однако, поскольку выделение канального ресурса для передачи трафика производят в целом на субкадр, при расчетах пропускной способности понятие ресурсного блока расширим на 2 слота; при этом 1 РБ при нормальном СР состоит из 168 РЭ.

Реальная скорость передачи данных уменьшается из-за передачи опорных сигналов и управляющих каналов. Символы опорных сигналов CRS используют для организации когерентной демодуляции и оценки каналов. Передача CRS специфицирована при использовании на eNB в секторе до 4 передающих антенн. Каждой антенне выделены определенные РЭ для передачи опорных символов. Расположение CRS в ресурсном блоке при работе eNB с 4 антеннами показано на рис. 3.33. В LTE передающим антеннам присваивают номера логических антенных портов. Символы, помеченные R0, передает порт 0, символы R1 – порт 1, R2 – порт 2, R3 – порт 3. CRS базовые станции передают постоянно и с номинальной мощностью.

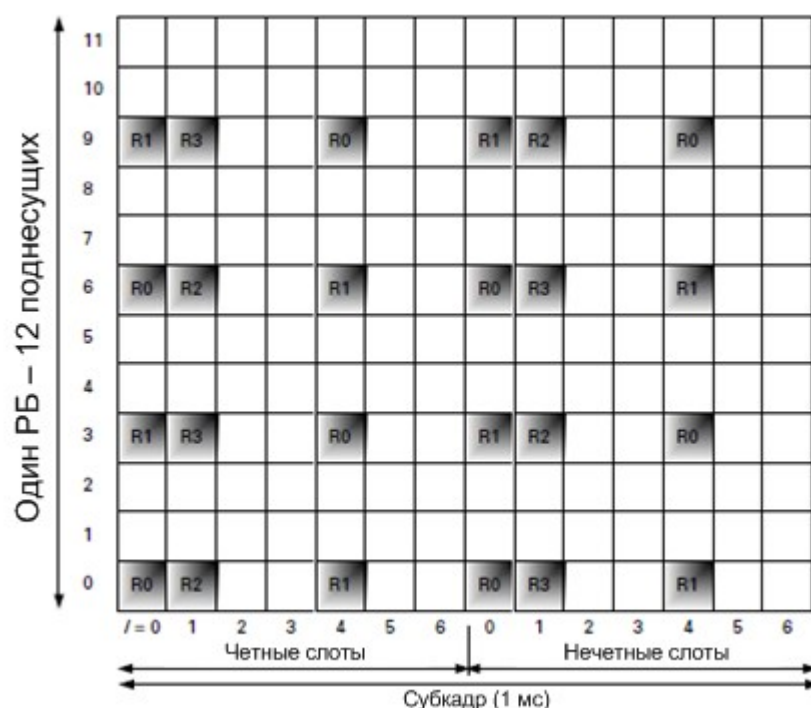


Рис.3.33. Позиционирование символов CRS в ресурсном блоке при передаче Вниз

При выделении канального ресурса вверх используют те же понятия ресурсного блока (12 поднесущих с общей полосой 180 кГц в слоте), и субкадров длительностью 1 мс с 7 или 6 символами на поднесущей в каждом слоте. Пример распределения канального ресурса между разными абонентами (User) проиллюстрирован рис. 3.34.

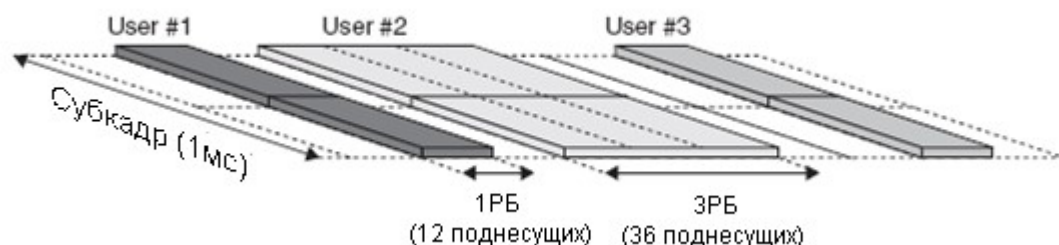


Рис. 3.34. Распределение канального ресурса вверх

В E-UTRA специфицированы 6 полос частот для развертываемых сетей и соответствующее им максимальное число ресурсных блоков в одном субкадре (таймслоте) при передаче вниз:

Полоса частот (МГц)	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100

Важнейшей задачей, стоящей перед операторами сетей радиодоступа, является повышение пропускной способности сетей. В сетях LTE эту проблему решают путём развертывания неоднородных сетей и добиваясь снижения внутрисистемных помех. Размещение большого числа

маломощных eNB, особенно в зданиях, а также в местах скопления абонентов, существенно повышает ёмкость сети. Однако при этом может ухудшаться помеховая ситуация.

В сетях LTE используют **технологии внутрисотовой координации помех ICIC (Inter-cell Interference Coordination)**, направленную на снижение уровня помех в целом и ослабления их влияния в отдельных точках сети для конкретных абонентов. Основные задачи ICIC предписаны стандартом и предусматривают управление каналным ресурсом в частотной и временной областях. В частотной области задачи ICIC состоят в координации использования отдельных участков рабочего диапазона соседними eNB. Во временной области возможно снижение уровня мощности (или полное прекращение передач) в отдельных субкадрах соты “агрессора” с тем, чтобы существенно снизить создаваемые ею помехи в сотах “жертвах”. Такие субкадры для соты-агрессора называют почти пустыми субкадрами ABS (Almost Blank Subframes). Практически важной задачей ICIC является сокращение числа соединений с абонентскими терминалами, находящимися на границе соты, так как эти соединения требуют увеличения мощности передаваемых сигналов, вследствие чего возрастает помеховый фон. Речь идет о переключении этих абонентов на другие eNB.

Решение задач ICIC прежде всего связано с оптимизацией распределения частотного ресурса между соседними eNB и секторами одного узла. Существует несколько вариантов распределения частотного ресурса, которые поясняет рис.3.35:

1. кластер состоит из трех eNB, каждая из которых использует свой частотный ресурс;
2. жесткое дробное распределение частотного ресурса ($N=3$);
3. все eNB используют весь частотный ресурс, выделенный сети;
4. мягкое повторное разделение частотного ресурса; в каждом секторе eNB на границах сот использует $1/3$ частотного ресурса, а вблизи станции – весь ресурс, выделенный сети.

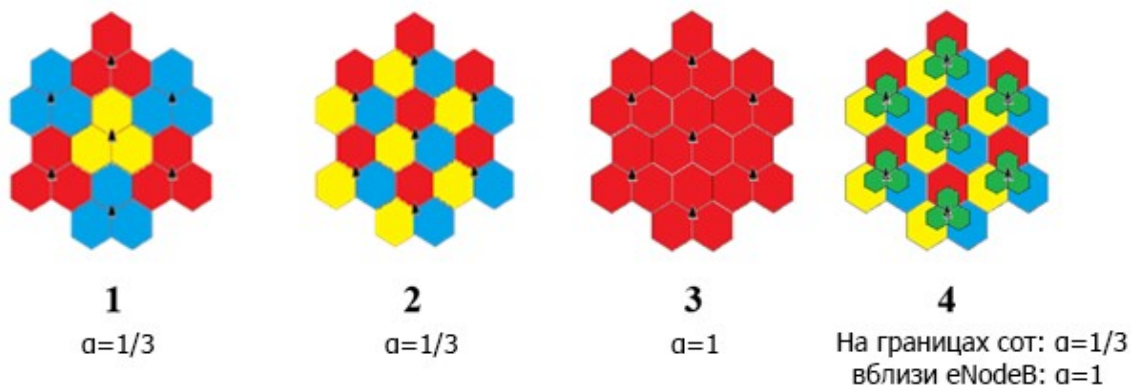


Рис.3.35. Варианты распределения частотного ресурса

Агрегация (объединение) частотных полос является основным способом увеличения скорости передачи данных на пользовательский

терминал. В LTE Rel. 8/9 максимальная ширина частотного канала 20 МГц. Дальнейшее расширение канала технологически затруднено, так как сложно обеспечить необходимую точность синхронизации при когерентном приеме сигналов на поднесущих с большими номерами.

Для увеличения ширины полосы (начиная с Rel. 10) предлагается технология агрегация полос. Это означает, что одновременно с передачей в базовой полосе частот появляется возможность вести одновременно передачу еще в нескольких полосах. При этом в каждой новой полосе формируют индивидуальный сигнал OFDM, где поднесущие номеруют от 1 до максимальной. В результате UE принимает несколько независимых сигналов в разных частотных полосах. Повторную передачу неприятых пакетов также осуществляют независимо в каждой полосе.

В спецификациях LTE при агрегации полос используют понятия первичных и вторичных сот. Каждому UE выделяют первичную соту (Primary Cell или PCell). Все другие соты подключают как вторичные (Secondary Cells или SCells). В первичной соте передают всю системную информацию: синхронизирующие сигналы, канал PBCH, SIB'ы, пейджинг, ответы eNB на запросы на доступ к сети, поскольку этот канал используют все UE, обслуживаемые данным eNB. UE, использующие агрегацию полос, получают в первичной соте индивидуальные сообщения каналов управления, включая сигнализацию. В этой полосе UE производят запросы на доступ к сети и выполняют измерения, связанные с хэндовером. Процедура хэндовера также ориентирована на работу с первичными сотами. Вторичные соты выделяет новый eNB после завершения хэндовера

Рабочие полосы могут быть смежными в одном частотном диапазоне, как показано на рис. 3.36а, несмежными в одном частотном диапазоне, как показано на рис. 3.36б, или находиться в разных частотных диапазонах, как показано на рис. 3.36в. Агрегированные полосы могут иметь разную ширину: 1,4; 3, 5, 10, 15 и 20 МГц. Число присоединенных полос вниз и вверх также может быть разным (асимметричный трафик), но число полос вверх не может быть больше их числа вниз. Общее число агрегируемых полос теоретически может достигать 5. Соты, которые должен поддерживать UE, определяют посредством процесса конфигурации работы UE и динамической процедуры активации/деактивации частотных полос.

Сконфигурированные SCells подвергают процедуре активации/деактивации на протокольном уровне MAC или процедуре деактивации SCell по таймеру, срабатывающему в UE. Эта процедура показана на рис. 3.36г. Например, вторичную соту SCell деактивируют при снижении объёма передаваемого трафика. Это позволяет терминалу UE отключить часть приемопередатчиков, что снижает энергетические затраты. Число подключенных вторичных сот может динамически меняться. В результате управление радиоканалом поддерживают только через первичную соту (PCell), что позволяет избежать введение дополнительных опорных сигналов. Несмотря на это, повышается сложность декодирования

физического канала управления вниз (PDCCH) и синхронизация передач трафика в первичной и вторичной соте.

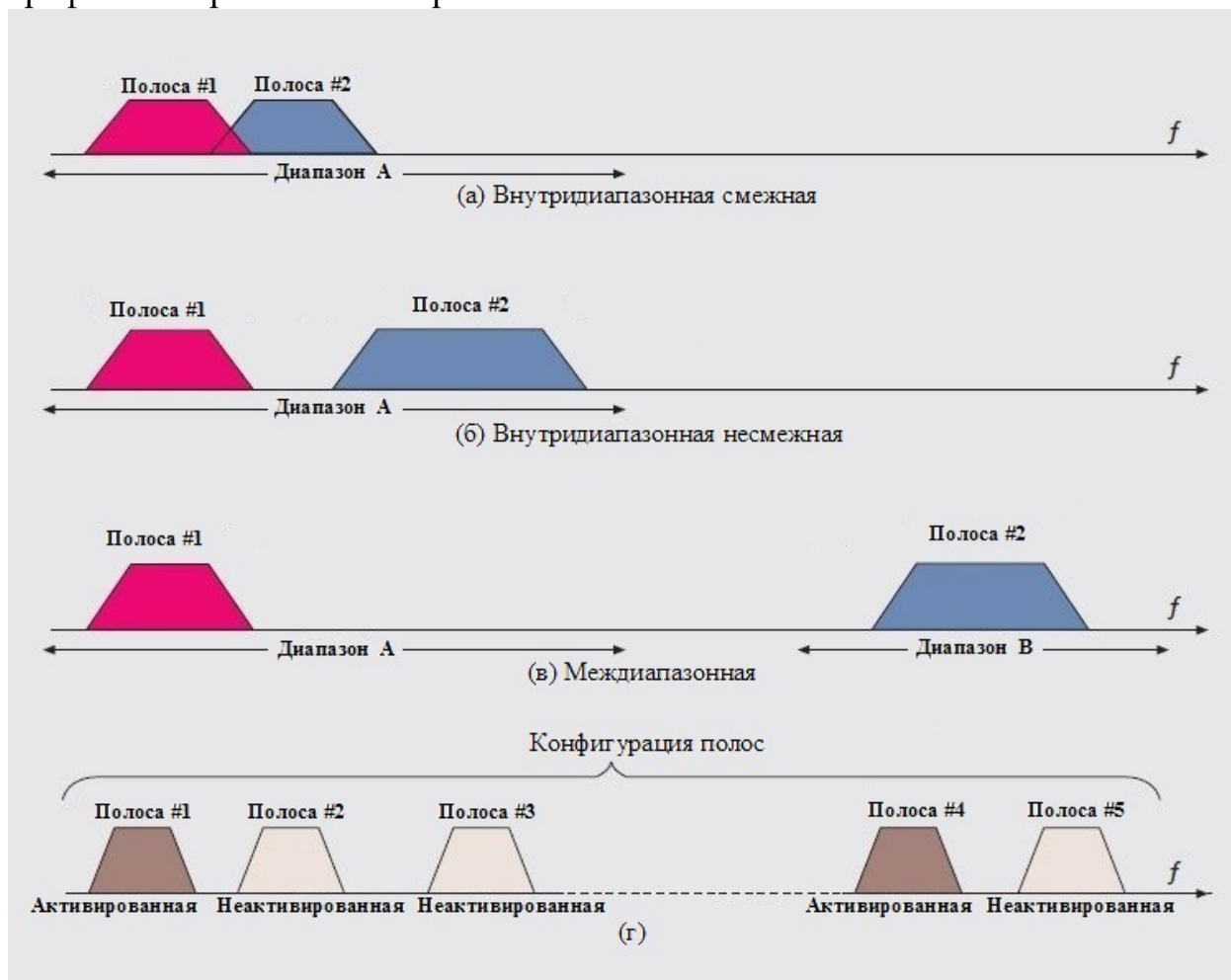


Рис. 3.36. Виды агрегации полос

Для сетей LTE характерно использование **неоднородных структур**. Неоднородность состоит в том, что наряду с регулярным покрытием территорий макро и микросотами в “горячих точках” (прежде всего, на рабочих местах, в жилых домах, кампусах), где наблюдаются всплески запрашиваемого трафика, размещают большое число маломощных eNB, физически приближая их к пользовательским терминалам. Это позволяет организовывать высококачественные каналы связи для получения высокой пропускной способности сети. По существу речь идет о создании локальных беспроводных подсетей, связанных с глобальной сетью оператора. При этом могут возникать сложные соединения UE с несколькими eNB одновременно. Варианты неоднородных структур проиллюстрированы рис. 3.37, а их сравнительные характеристики приведены в таблице:

Тип узла.	Максимальная мощность передатчика	Размещение
Микро eNB	30 дБм в полосе 10 МГц	вне помещения

Вынесенные радио модули	30 дБм в полосе 10 МГц	как вне, так и внутри помещений
Пико eNB	30 дБм в полосе 10 МГц	как вне, так и внутри помещений
Home eNB	20 дБм в полосе 10 МГц	внутри помещений
Релейные станции	30 дБм в полосе 10 МГц	Вне помещений

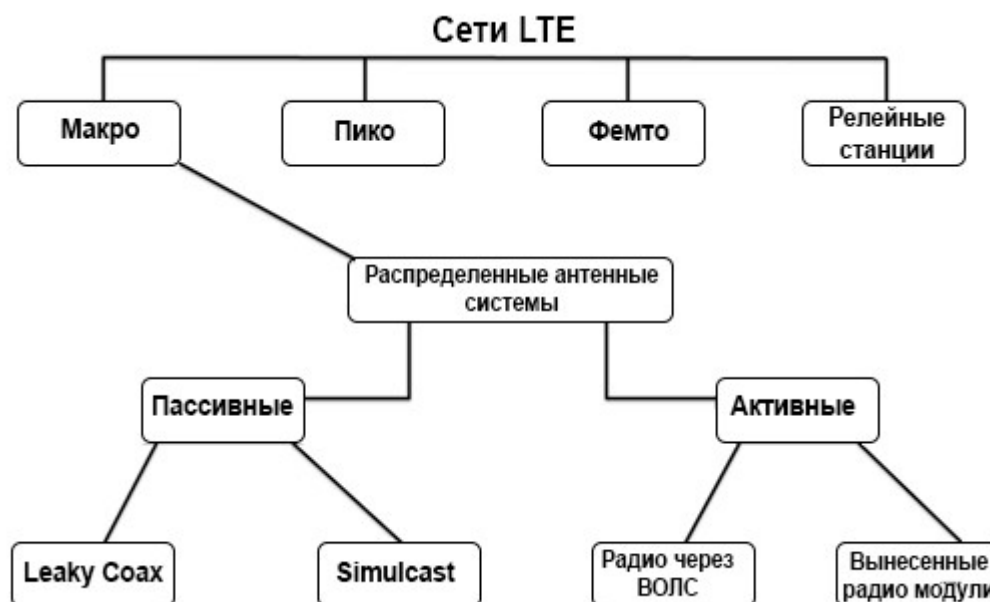


Рис. 3.37. Варианты неоднородных структур сетей LTE

Пикосоты являются небольшими по радиусу сотами, наложенными на основную сеть. В результате балансировки нагрузки между eNB в сетях LTE можно переключать абонентов с макро на пикосоты и обратно. Фемтосоты предназначены для обеспечения большой плотности трафика в зданиях. В них работают домашние базовые станции (Home eNB), для которых разработаны специальные интерфейсы подключения к основной сети оператора.

Распределенные антенные системы, указанные на рис. 3.37, разделяют на 2 класса: пассивные и активные.

К пассивным относят системы с утечкой сигнала из коаксиальных кабелей Leaky Coax и систему Simulcast.

Simulcast предусматривает использование множества антенн, распределенных в выделенных секторах, которые своими диаграммами излучения покрывают необходимую территорию. В результате большая сота оказывается разделена на несколько микро или пикосот. На практике число излучающих антенн варьируют от 8 до 3. При размещении антенн стараются выровнять затухания и потери в проводящих фидерных линиях.

При топологии Leaky Coax коаксиальный кабель выполняет функции длинной антенны. Во внешней оболочке кабеля делают разрезы так, чтобы в определенных местах происходила утечка радиосигнала. Такие структуры используют в туннелях, зданиях и на стадионах.

К активным многоантенным структурам относятся Радио через ВОЛС – волоконно-оптические линии связи (RoF – RF over Fiber) и вынесенные радио модули RRH (Remote Radio Head – удаленные радио головки).

В радио через ВОЛС сигналы центральной eNB передают группе периферийных базовых станций по оптическим кабелям. На периферии их снова преобразуют в сигналы радиодиапазона и после усиления излучают через соответствующие антенны. Достоинством RoF является малое затухание в ВОЛС, малая стоимость линий, высокая пропускная способность. Подобные системы используют, в частности, для покрытия «мертвых» зон.

Вынесенные радио модули (RRH) сегодня рассматривают как наиболее перспективный вариант распределенных антенных систем. Система содержит оборудование базовых станций, АЦП/ЦАП, преобразователи частоты вверх и вниз. Соединения между RRH и eNB осуществляют посредством антенного кабеля. RRH используют для покрытия «мертвых» зон, расширения покрытия в сельских районах, при реализации MIMO. Передача информации идет в основной полосе частот. Сами вынесенные радио модуль содержат необходимое приемо-передающее оборудование. Хотя разные RRH одной eNB обслуживают разные территории, все они передают одинаковый идентификатор соты.

Вариант использования макро и пикосот показан на рис.3.38. В зоне 1 уровень сигнала от eNB пикосоты превышает уровень сигнала от eNB макросоты. В зоне 2 потери на трассе до пикосоты меньше потерь на трассе до макросоты.

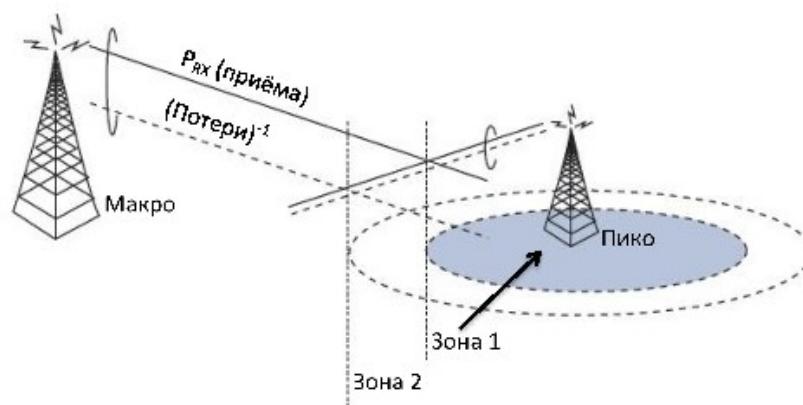


Рис.3.38. Неоднородная структура с макро и пикосотами

При совместной работе макро и пикосот возникает проблема оптимизации использования канального ресурса и снижение взаимных помех.

Фемтосота (femtocell) – это сота небольшого размера, устанавливаемая в квартире или офисе и обслуживаемая маломощной базовой станцией сотовой связи (мощность передатчика до 20 мВт). Таковую станцию называют домашней базовой станцией Home eNodeB (HeNB).

Архитектура сети E-UTRAN с фемтосотами приведена на рис. 3.39.

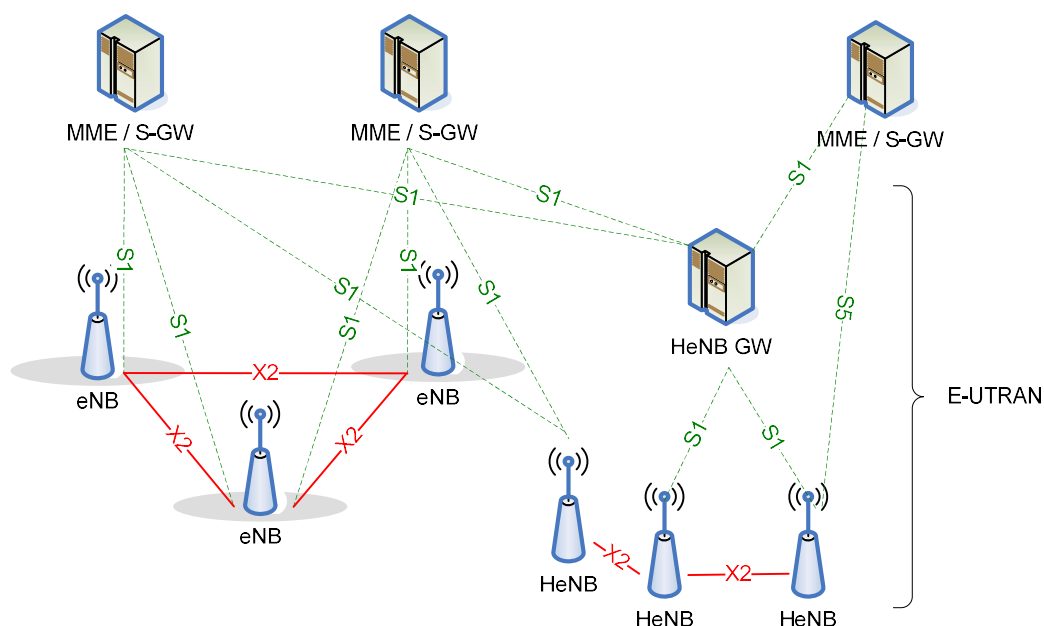


Рис.3.39. Архитектура E-UTRAN с фемтосотами

Так как домашняя базовая станция располагается близко от мобильного терминала, последний работает с пониженной мощностью передатчика и значительно медленнее расходует заряд батареи. Как правило, в пределах комнаты на приемники UE и HeNB приходят радиосигналы с низким затуханием, что обеспечивает высокие отношения сигнал/помеха на входах приемников. Это дает возможность широко использовать в радиоканале высокоэффективные модуляционно-кодирующие схемы и технологии пространственного мультиплексирования, что позволяют увеличить число подписчиков на высокоскоростные услуги 4G. Фемтосоты также применяют для локального расширения зоны действия сети в зонах сильного затухания сигнала или даже за пределами радиуса действия основной сети.

Существуют 2 разных способа подключения фемтосот к сети. В первом варианте фемтосоты (HeNB) соединены с ядром сети MME/S-GW (EPC) через специальный фемтошлюз HeNB GW посредством интерфейсов S1 (рис. 3.39, 3.40).

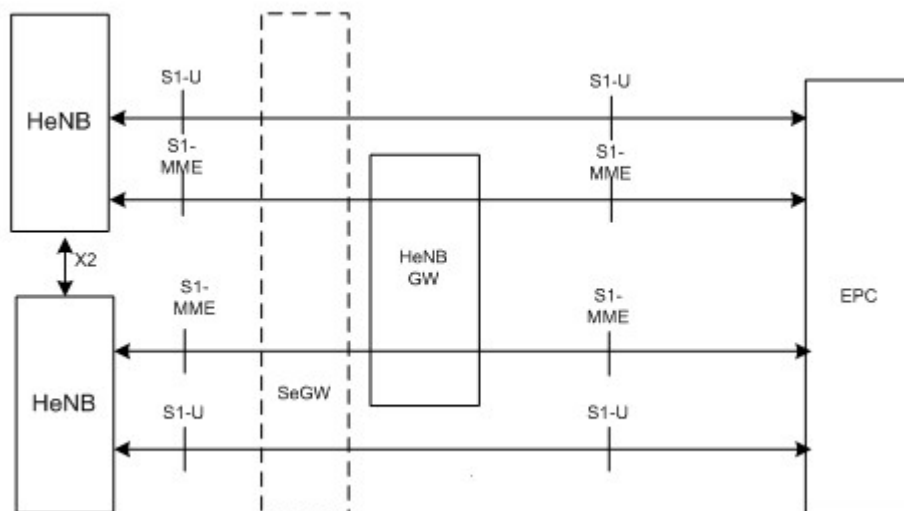


Рис.3.40. Подсоединение HeNB к ядру сети через фемтошлюз

Фемтошлюз обрабатывает только сообщения сигнализации, следующие по сигнальной части интерфейса S1 (S1-MME). Пользовательский трафик (S1-U) фемтошлюз пропускает без обработки (прозрачно). При этом для MME фемтошлюз выглядит как обычная eNB, а для HeNB как MME. Для обеспечения защиты трафика и сигнальных сообщений на S1 между UE и фемтошлюзом организуют туннель на основе протокола IPSEC, терминируемый непосредственно в фемтошлюзе либо перед ним, на шлюзе безопасности SeGW (Security Gateway). Один фемтошлюз способен обслуживать несколько десятков HeNB. Процедуры предоставления услуг при таком способе подключения фемтосот к ядру сети ничем не отличаются от аналогичных процедур в макросотах. Исключения составляют особенности обслуживания абонентов закрытых пользовательских групп (CSG).

Второй способ подключения фемтосот состоит в использовании локального доступа к IP-сети LIPA (Local IP Access), суть которого заключается в предоставлении доступа к внешним IP сетям не только через PDN-GW оператора, но и локально. При этом на стороне HeNB активируется функционал LIPA L-GW (Local Gateway), а с ядром сети организуют дополнительно интерфейс S5 (рис. 3.41). Одновременно с LIPA HeNB поддерживает связь с ядром сети через интерфейс S1-U для тех абонентов и соединений, для которых доступ к сети Интернет осуществляют через PDN GW. Спецификации LTE позволяют реализовывать разные сценарии, например, когда абонент скачивает на компьютер интерактивный трафик (файлы из Интернета) через PDN GW, а через LIPA принимает видео из локальной IP-сети.

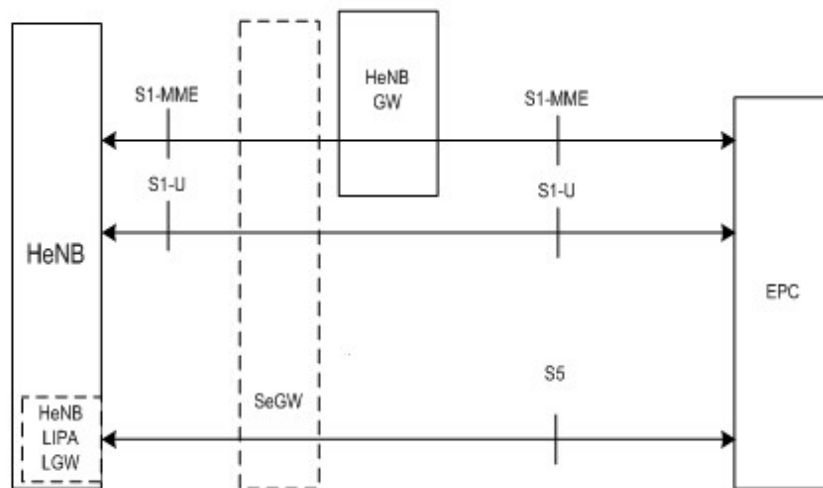


Рис.3.41. Использование LIPA в фемтосети

Шлюз LIPA L-GW в большинстве вариантов встроен в HeNB, но может представлять собой отдельное устройство и даже принадлежать другому оператору.

Релейные станции используют для покрытия «мертвых» зон и повышения уровня сигнала на границах сот. Релейные станции получают сигналы для обслуживания абонентов по радиоканалу. Основную сеть называют донорской, и eNB, которые передают сигналы через релейные станции, называют донорскими (DeNB). На рис 3.42 показаны донорская DeNB и релейная RS.

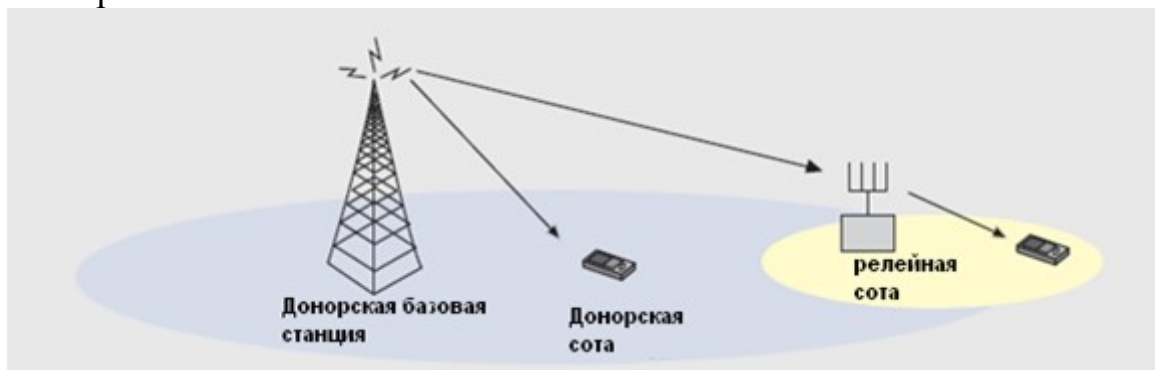


Рис. 3.42 Структура сети с релейной станцией

Существуют релейные станции двух типов. Релейные станции первого типа обслуживают собственные соты со своими сигналами синхронизации, опорными сигналами и отличается по своим характеристикам (скремблирующим кодам) от донорской сети. UE получает информацию о выделенном канальном ресурсе от релейной станции. Релейные станции второго типа не создают отдельных сот. Они прозрачны для передачи управляющих сигналов и передают (ретранслируют) только каналы PDSCH и PUSCH.

В зависимости от спектра, используемого в сети, возможны два сценария связи RS с DeNB (рис.3.43):

- inband: в той же частотной полосе, где работает DeNB,

- out-of-band: где соединения DeNB $\leftrightarrow$ RS, eNB $\leftrightarrow$ UE организованы в разных частотных полосах.

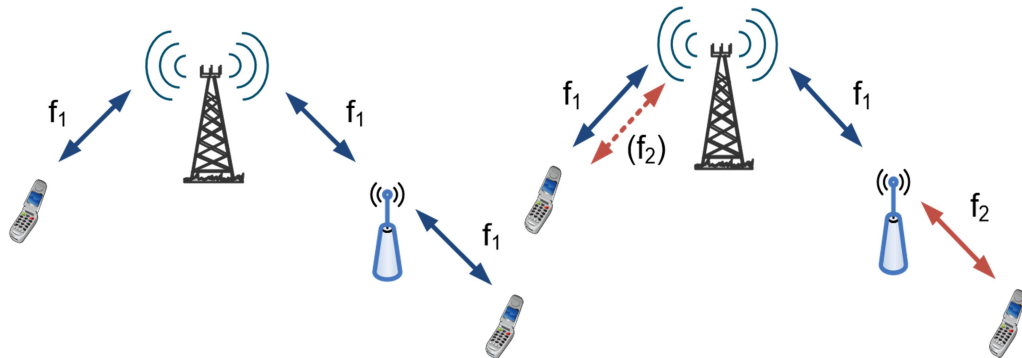


Рис.3.43. LTE-A. In-band (слева) и out-of-band (справа)

В варианте out-of-band снижается уровень взаимных помех. В то же время вариант inband позволяет увеличить пропускную способность сети в рабочем частотном диапазоне. RS располагают достаточно близко к абонентам, что позволяет использовать высокоэффективные модуляционно-кодированные схемы. В сетях с релейными станциями абонентские терминалы не знают, обслуживает их DeNB основной (донорской) сети или RS.

К достоинствам RS относятся их малые габариты и отсутствие необходимости организовывать кабельные соединения. Релейная станция подключена к донорской eNB через радиointерфейс LTE. DeNB обслуживает собственные UE, используя выделенные радиоресурсы совместно с релейной станцией.

При подключении к донорской соте RS первоначально ведет себя как UE. После того, как соединение установлено и ретрансляция настроена, RS начинает обслуживать собственных абонентов.

В соответствии с рекомендациями стандарта необходимо организовать сквозные интерфейсы S1, связывающие RS с MME/S-GW, и X2 для хэндоверов с соседними eNB (рис. 3.44). При этом на S1 и X2 для передачи трафика создают туннельные соединения. DeNB действует как промежуточное звено между базовой сетью и RS. Со стороны ядра сети соты RS как будто принадлежат донорской eNB. Использование туннельных соединений объясняется желанием свести к минимуму воздействия на базовую сеть от введения RS, а также обеспечить распределение радиоресурсов между DeNB и RS.

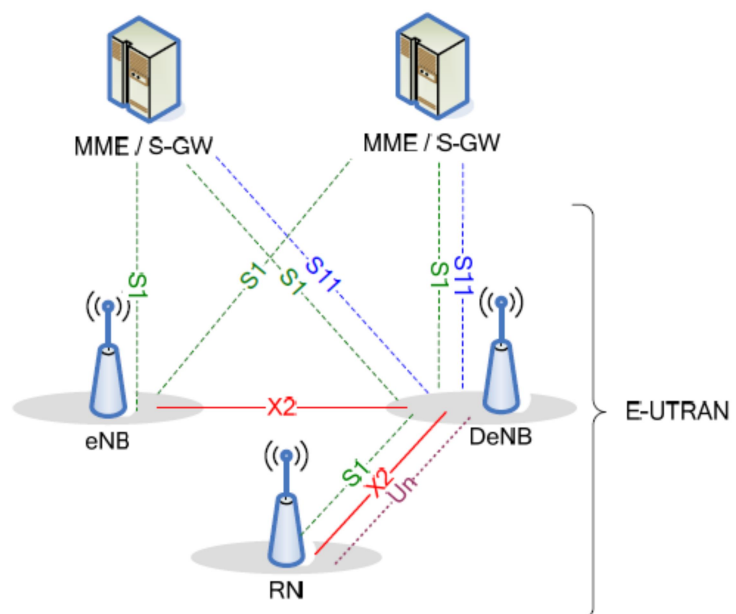


Рис.3.44. Интерфейсы в сетях с релейными станциями