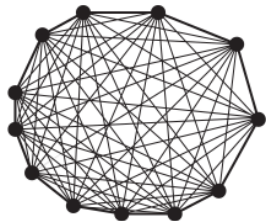


# Физический уровень 3

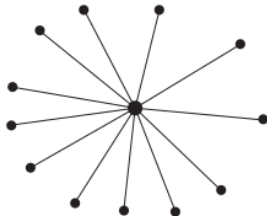
17 апреля 2026 г.

# Коммутируемая телефонная сеть общего пользования

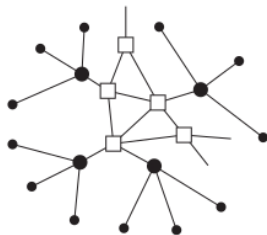
В 1876 Александр Бэлл получил патент на изобретение телефона. Покупатели первых телефонов сами должны были тянуть провода от одного телефона к другому. Города были покрыты проводами, беспорядочно опутывающими дома и деревья



(a)



(б)



(в)

Рис.: (а) Полносвязная сеть (б) Централизованная коммутация (в) Двухуровневая иерархия

# Централизованная коммутация

Коммутационные станции. От коммутатора тянулись провода в дома и офисы всех абонентов. Чтобы позвонить кому-то, абонент вращал рукоятку телефона, на коммутаторе раздавался звонок, и оператор вручную соединял звонившего с вызываемым абонентом с помощью короткого гибкого кабеля.

Коммутаторы разных городов сначала соединяли попарно, потом стали создавать коммутаторы второго уровня.

К 1890 году телефонная система состояла из трех основных составляющих: коммутаторов; проводов, соединяющих абонентов с коммутаторами (теперь уже симметричных изолированных витых пар, а не голых проводов с землей в качестве обратного провода); и наконец, междугородних соединений коммутаторов.

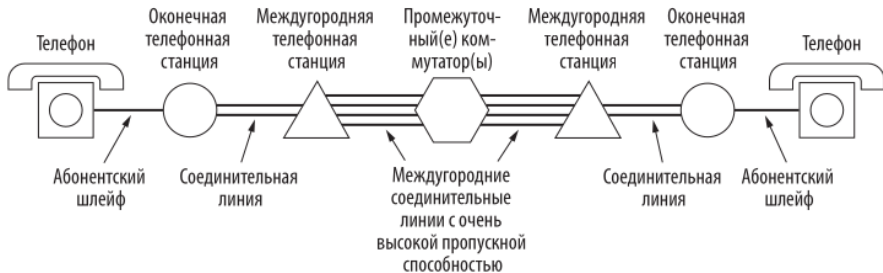
Из каждого телефона выходит два провода, непосредственно ведущих в оконечную телефонную станцию (end office), называемую также местной центральной АТС (local central office). Расстояние между станциями обычно составляет от 1 до 10 км. Линия из двух проводов между телефоном абонента и оконечной станцией называется абонентским шлейфом (local loop)

Когда абонент, подключенный к местной АТС, звонит другому абоненту, подключенному к той же станции, механизм коммутации создает прямое электрическое соединение двух абонентских шлейфов, поддерживаемое на протяжении всего звонка.

Каждая конечная станция имеет несколько исходящих линий к одному или нескольким расположенным поблизости коммутационным центрам, называемым междугородними телефонными станциями (toll offices) либо транзитными (узловыми) телефонными станциями (tandem office), если они расположены в одном районе. Эти каналы называются соединительными линиями (toll connecting trunk).

Если линии АТС как вызывающего, так и вызываемого абонента ведут к одной междугородней станции (что весьма вероятно, если они расположены по соседству), то соединение можно произвести внутри этой станции.

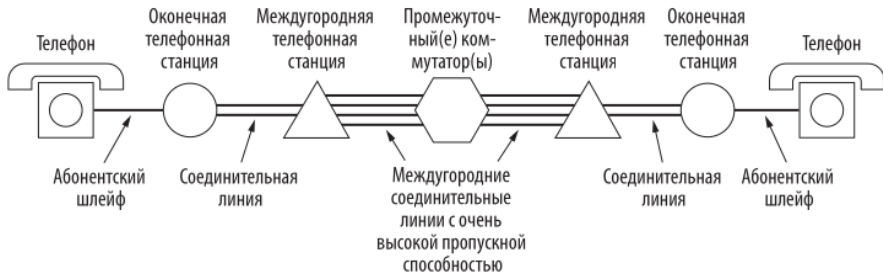
Если соединительные линии АТС абонентов не ведут к одной междугородней телефонной станции, необходимо построить путь между двумя междугородними станциями. Они взаимодействуют друг с другом посредством высокоскоростных междугородних соединительных линий (intertoll trunks, interoffice trunks).



Абонентские шлейфы к жилым домам состоят в основном из витых пар категории 3 (хотя встречается и оптоволокно). А для соединения коммутаторов широко используются коаксиальные кабели, микроволны, а главным образом оптоволоконные кабели.

Для отправки битов через абонентский шлейф или любой другой физический канал необходимо преобразовать их в аналоговый сигнал. Это преобразование производится при помощи методов цифровой модуляции.

За преобразование потока цифровых битов в соответствующий им аналоговый сигнал и обратно отвечает модем (modem) — сокращение от «модулятор/демодулятор».



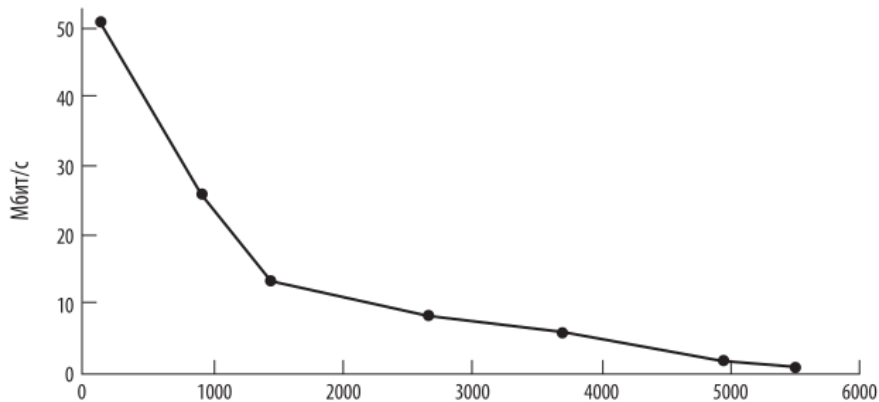
Телефонные модемы применяются для обмена битами между двумя компьютерами по каналам передачи голоса (вместо обычных разговоров). Основная проблема состоит в том, что эти каналы ограничены полосой пропускания 3100 Гц, вполне достаточной для передачи разговора. Скорость передачи до 56Кбит/с.

## Цифровые абонентские линии (DSL)

В точке подключения абонентского шлейфа к оконечной телефонной станции провод проходит через фильтр затухания, ослабляющий все частоты ниже 300 Гц и выше 3400 Гц.

Хитрость, благодаря которой работает xDSL, заключается в том, что при подключении абонента входящий канал связи соединяется с особым сетевым коммутатором без вышеупомянутого фильтра. Это позволяет использовать всю пропускную способность абонентского шлейфа. Теперь ограничивающим фактором становятся физические характеристики линии, а не фильтр, и мы получаем около 1 МГц против искусственно созданного лимита в 3100 Гц.

# Цифровые абонентские линии (DSL)



# Цифровые абонентские линии (DSL)

Для удовлетворения технических требований имеющийся диапазон в 1,1 МГц абонентского шлейфа разбит на 256 независимых каналов, по 4312,5 Гц каждый.



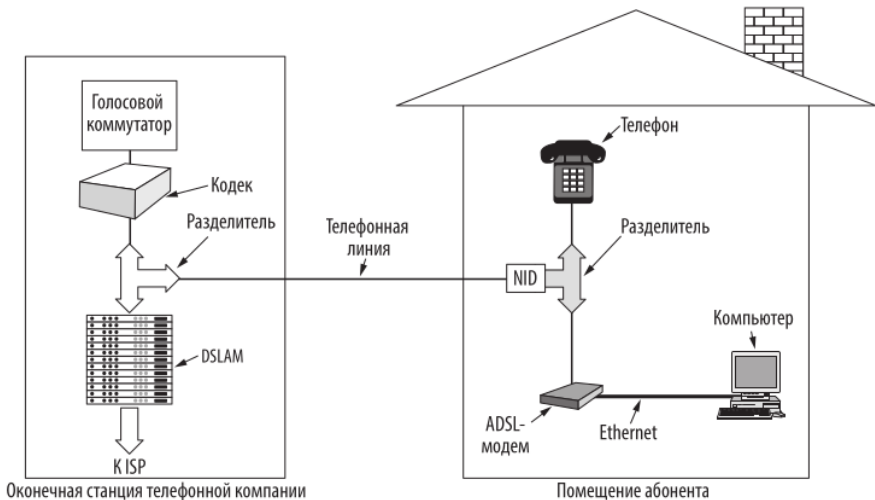
# Цифровые абонентские линии (DSL)

Канал 0 используется для обычной телефонной связи (Plain Old Telephone Service, POTS). Каналы 1–5 не используются, чтобы голосовые и информационные сигналы не мешали друг другу. Из оставшихся 250 каналов один служит для управления входящим трафиком, еще один — для управления исходящим. Остальные каналы доступны для пользовательских данных.

Количество каналов, доступных для входящего и исходящего потоков данных, выбирает поставщик услуги. Технически можно распределить их в соотношении 50/50, но большинство ISP отдает около 80–90 % пропускной способности входящему каналу, поскольку большинство пользователей скачивает больше данных, чем отправляет. Отсюда и «А» в ADSL. Распространенный вариант: 32 канала на исходящий поток данных, а остальные — на входящий.

Международный стандарт ADSL — G.dmt — был одобрен в 1999 году. Он допускает входящую скорость до 8 Мбит/с и исходящую до 1 Мбит/с. В 2002 году его заменили более совершенным стандартом второго поколения, ADSL2, с входящей скоростью до 12 Мбит/с и исходящей до 1 Мбит/с. Стандарт ADSL2+ еще в два раза повысил входящую скорость, до 24 Мбит/с, за счет удвоения полосы пропускания (2,2 МГц через витую пару).

Следующим шагом, в 2006 году, стал VDSL. Входящая скорость передачи данных по коротким абонентским шлейфам достигала 52 Мбит/с, а исходящая — 3 Мбит/с. В период с 2007 по 2011 год появился ряд новых стандартов под общим названием VDSL2. При полосе пропускания 12 МГц на высококачественных абонентских шлейфах входящая скорость достигала 200 Мбит/с, исходящая — 100 Мбит/с. В 2015 году для шлейфов короче 250 м был предложен стандарт Vplus. Теоретически он позволяет достичь входящей скорости до 300 Мбит/с и исходящей до 100 Мбит/с, но реализовать это непросто.



Устройство сопряжения с сетью (Network Interface Device, NID). Эта маленькая пластмассовая коробочка отмечает точку, где заканчивается оборудование, принадлежащее телефонной компании, и начинается собственность абонента. Неподалеку от NID (а иногда они даже совмещаются) располагается разделитель (splitter) — аналоговый фильтр, отделяющий полосу POTS (0–4000 Гц) от каналов данных. Сигнал POTS направляется к телефону или факсу, информационный сигнал — в ADSL-модем, реализующий OFDM при помощи цифрового обработчика сигналов.

А поскольку большинство ADSL-модемов — внешние, компьютер подключается к модему по высокоскоростному соединению. Обычно для этого используется Ethernet, USB-кабель или 802.11.

На другом конце провода, на стороне телефонной станции, устанавливается аналогичный разделитель. Сигнал с частотой выше 26 кГц направляется к специальному устройству — мультиплексу доступа к цифровой абонентской линии (Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM), включающему такой же цифровой сигнальный процессор, как и ADSL-модем. DSLAM преобразует сигнал в биты и отправляет пакеты в сеть интернет-провайдера.

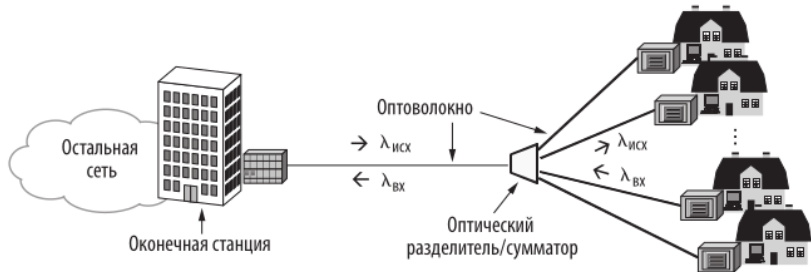
Связывание (bonding) — создание единого виртуального DSL-соединения за счет объединения двух или более физических DSL-соединений. Разумеется, при объединении двух витых пар пропускная способность также удваивается. В некоторых регионах в здания проводят телефонные кабели, состоящие из двойных витых пар. Изначально идея была в использовании двух отдельных телефонных линий с разными номерами в одном помещении. Но с помощью парной сцепки можно сделать на их основе одно высокоскоростное подключение к интернету.

В технологии G.fast используется парное связывание. Как и в случае с остальными DSL, быстродействие G.fast зависит от расстояния, на которое передается сигнал. Недавние тесты показали, что на расстоянии 100 м скорость передачи по симметричному каналу приближается к 1 Гбит/с. В сочетании с оптоволоком это дает технологию **FTTdp** (Fiber to the Distribution Point — «оптоволоконно до точки распределения»). Оптоволоконно прокладывается до точки распределения между несколькими сотнями абонентов, а на оставшемся участке (в случае VDSL2 — до 1 км, хотя и с меньшей скоростью передачи) используются медные провода.

# Оптоволокно до точки X (FTTX)

Скорость на последнем участке сети часто ограничена медными проводами, которые используются в обычных телефонных сетях. Следовательно, необходимо проложить оптоволокно как можно ближе к домам абонентов, то есть реализовать **FTTH** (Fiber to the Home — «оптоволокно до дома»). При использовании технологии **FTTN** (Fiber to the Node/ Neighborhood — «оптоволокно до узловой точки/микрорайона») кабель заканчивается в коммутационном шкафу на улице, иногда в нескольких километрах от дома абонента. В случае **FTTdp** оптоволокно оказывается еще ближе к домам, иногда буквально в нескольких метрах. Промежуточное положение между этими вариантами занимает **FTTC** (Fiber to the Curb — «оптоволокно до бордюра»).

Все эти виды FTTX иногда называют «оптоволокном в абонентском шлейфе», поскольку часть абонентского шлейфа составляет оптоволокно.



Как правило, ведущие из домов кабели объединяются, так что от группы из 100 зданий к оконечной станции доходит только один оптоволоконный кабель. В исходящем направлении передаваемый из коммутатора сигнал разбивается оптическими разделителями, чтобы попасть во все дома. Во входящем направлении оптические сумматоры соединяют сигналы от всех домов в один, который и поступает в оконечную станцию.

Как и медные провода, оптоволоконный абонентский шлейф пассивен, то есть не требует никакого оборудования для усиления или другой обработки сигналов. Называется пассивной оптической сетью (Passive Optical Network, PON). PON работает на высоких скоростях при расстоянии до 20 км.

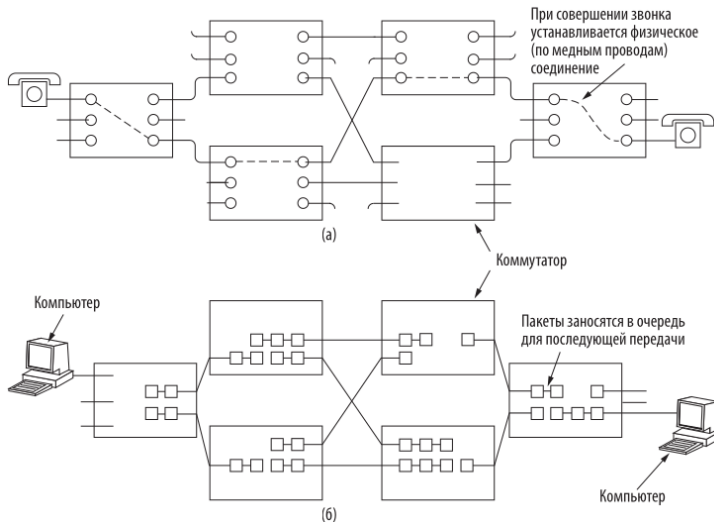
Наиболее распространены два вида: гигабитные PON (GPON) и Ethernet PON (EPON). Например, сети GPON обеспечивают входящую скорость 2,4 Гбит/с и исходящую — 1,2 или 2,4 Гбит/с.

Чтобы несколько зданий могли совместно использовать возможности одного оптоволоконного кабеля, идущего из оконечной станции, необходимы дополнительные протоколы. Во входящем направлении проблем нет. Оконечная станция может отправлять сообщения в разные дома в любом порядке. А вот одновременная передача данных из нескольких домов в исходящем направлении приведет к конфликту сигналов.

Для решения этой проблемы устройства оконечной станции выделяют домовому оборудованию, по запросу последнего, интервалы времени для работы. Для успешного функционирования такой схемы необходимо выстроить хронометраж передачи данных от различных домов, чтобы синхронизировать все получаемые на оконечной станции сигналы.

Изначально при совершении человеком или компьютером телефонного звонка коммутационное оборудование строило физический маршрут между двумя абонентами и поддерживало его во время разговора. Эта методика называется **коммутацией каналов** (circuit switching).

# Коммутация каналов



Важная особенность коммутации каналов: необходимо сформировать сквозной путь между абонентами перед отправкой данных. Между окончанием набора номера и тем, когда зазвонит телефон, может пройти 10 с (или больше — при междугородних или международных разговорах). В это время телефонная система ищет путь

Как только путь между участниками разговора установлен, задержка данных зависит только от скорости распространения электромагнитного сигнала: примерно 1000 км за 5 мс. Кроме того, благодаря выделенному маршруту можно не бояться перегруженности — после соединения вы уже не услышите сигнала «занято».

Коммуникация пакетов. Перемещение каждого отдельного пакета до пункта назначения производят маршрутизаторы на основе передачи с промежуточным хранением данных. При коммутации пакетов фиксированного пути не существует. А значит, пакеты могут передаваться по разным маршрутам в зависимости от сложившихся в сети условий на момент их отправки и могут доставляться в произвольном порядке.

Сети с коммутацией пакетов ограничивают максимальный размер пакета, гарантируя тем самым, что ни один пользователь не сможет надолго (например, на большое число миллисекунд) полностью занять линию передачи.

При коммутации каналов, если канал зарезервирован для конкретного пользователя, а трафика нет, то полоса пропускания простаивает, хотя могла бы использоваться для другого трафика. При коммутации пакетов такого не бывает, а значит, этот метод эффективнее с точки зрения системы.

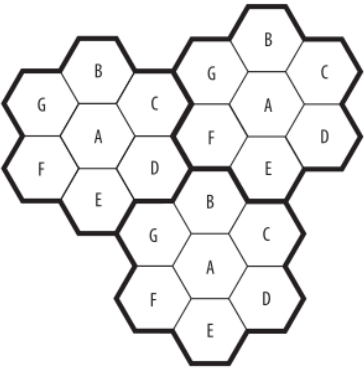
При коммутации пакетов можно перенаправить пакеты в обход неработающих сетевых коммутаторов.

<b>Пункт</b>	<b>С коммутацией каналов</b>	<b>С коммутацией пакетов</b>
Соединение	Необходимо	Не требуется
Выделенный физический путь	Да	Нет
Все пакеты следуют по одному пути	Да	Нет
Пакеты прибывают в порядке отправления	Да	Нет
Отказ коммутатора играет критическую роль	Да	Нет
Доступная полоса пропускания	Фиксированная	Динамическая
Время возможной перегруженности сети	Во время установления соединения	На любом пакете
Вероятность траты полосы пропускания впустую	Да	Нет
Передача данных с их промежуточным хранением	Нет	Да
Тарификация	Поминутно	Побайтно

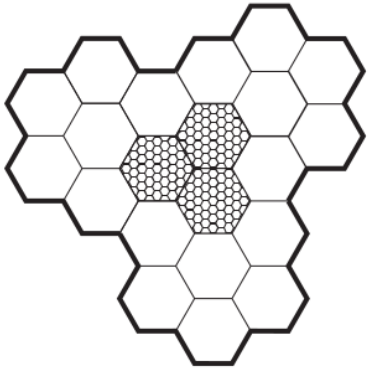
Во всех мобильных телефонных системах географические области делятся на соты (cells), именно поэтому переносные телефонные аппараты иногда называют сотовыми телефонами. Смежные соты используют разные наборы частот.

Чем меньше соты, тем выше пропускная способность системы и тем экономнее потребление электроэнергии. В итоге передатчики и переносные телефонные аппараты становятся компактнее и дешевле.

Каждый набор окружен буфером в две соты толщиной, в котором используются другие частоты. Это обеспечивает эффективное разделение частот и низкий уровень помех.



(a)



(б)

Слишком большое количество пользователей может вызвать перегрузку системы. Чтобы этого избежать, можно снизить мощность и разбить перегруженные соты на микросоты. Иногда телефонные компании создают временные микросоты с помощью переносных вышек со спутниковыми каналами связи — на спортивных мероприятиях, рок-концертах и в других местах, где множество пользователей собирается на несколько часов.

В центре сот расположены базовые станции, на которые передаются данные со всех телефонов в соте. Базовая станция состоит из компьютера и передатчика/приемника, подключенных к антенне.

В маленьких системах все базовые станции подключаются к одному устройству, которое называется центром мобильной коммутации (Mobile Switching Center, MSC), или коммутатором мобильной связи (Mobile Telephone Switching Office, MTSO).

В больших системах могут понадобиться несколько MSC, подключенных к одному MSC второго уровня, и т. д. MSC, по сути, являются аналогами оконечных телефонных станций и фактически подключены по меньшей мере к одной такой станции.

MSC обмениваются информацией с базовыми станциями, друг с другом и с коммутируемой телефонной сетью общего пользования (Public Switched Telephone Network, PSTN), используя коммутацию пакетов.

В любой момент времени мобильный телефон логически относится к конкретной соте и контролируется ее базовой станцией. Когда телефон покидает эту соту, базовая станция замечает ослабление сигнала и «спрашивает» ближайшие станции, насколько хорошо они его «слышат». Получив ответы, станция передает обслуживание этого телефона той соте, в пределах которой он теперь находится. После этого телефон оповещается о смене соты.

Если это происходит во время разговора, он получает предложение о переключении на новый канал (поскольку старый не может использоваться в смежных сотах). Этот процесс, называемый **передачей обслуживания (handoff)**, занимает около 300 мс.

Распределением каналов занимается MSC — мозговой центр системы.  
Базовые станции представляют собой простые радиоретрансляторы.

В сотовых сетях обычно встречается четыре типа каналов. **Каналы управления** (control channels) — от базовой станции к мобильному устройству — используются для управления системой.

**Пейджинговые каналы** (paging channels) — от базовой станции к мобильному устройству — оповещают пользователей мобильных устройств о входных звонках.

**Каналы доступа** (access channels) — двунаправленные — используются для настроек звонков и распределения каналов. Наконец, **каналы данных** (data channels) — также двунаправленные — служат для передачи голоса, факсов или данных.

Мобильные радиотелефоны периодически использовались в морской и военной связи еще в начале XX века. В 1946 году в Сент-Луисе появилась первая система для автомобильных телефонов — с одним большим передатчиком на высотном здании и одним каналом для передачи и приема. Для разговора пользователям приходилось нажимать кнопку, включающую передатчик и отключающую приемник. Подобные системы «**нажал — говори**» (push-to-talk systems) устанавливались повсюду в начале 1950-х. Эта технология часто используется в такси и полицейских автомобилях.

В 1960-х начала внедряться **усовершенствованная система мобильной связи** (Improved Mobile Telephone System, IMTS). В ней также применялся мощный (200 Вт) передатчик, расположенный на возвышенности, но с двумя частотами — одна для передачи, вторая для приема, так что необходимость в переговорной кнопке отпала.

Поскольку входящие и исходящие сигналы передавались по разным каналам, пользователи мобильной связи не могли слышать чужие разговоры (в отличие от систем «нажал — говори» в старых такси).

IMTS поддерживала 23 канала в диапазоне от 150 до 450 МГц. Из-за такого маленького числа каналов пользователям нередко приходилось долго ждать освобождения линии.

Пропускную способность сотовых сетей значительно увеличила **аналоговая продвинутая система телефонной мобильной связи (Advanced Mobile Phone System, AMPS)**, созданная Bell Labs и впервые развернутая в США в 1983 году.

В AMPS размер сот варьируется от 10 до 20 км в поперечнике; в цифровых системах соты обычно меньше.

В то время как в IMTS диаметром 100 км на каждой частоте мог выполняться лишь один звонок, в AMPS на ту же площадь приходится сто 10-километровых сот, благодаря чему она может обслуживать от 10 до 15 звонков на каждой частоте в удаленных друг от друга сотах.

Для разделения каналов в AMPS используется FDM. Система включает 832 полнодуплексных канала, каждый из которых состоит из пары симплексных каналов. Такая схема называется дуплексной связью с частотным разделением каналов (Frequency Division Duplex, FDD).

Для передачи данных с мобильного устройства на базовую станцию используется 832 симплексных канала в диапазоне 824–849 МГц; обратно данные передаются по 832 симплексным каналам в диапазоне 869–894 МГц. Ширина каждого симплексного канала — 30 кГц.

832 канала AMPS делятся на четыре категории. Поскольку повторно использовать одинаковые частоты в соседних сотах нельзя, а 21 канал в каждой соте резервируется для управления, фактически число доступных голосовых каналов в каждой соте намного меньше, чем 832 (обычно около 45).

В программируемой постоянной памяти каждого телефона в AMPS содержится уникальный 32-битный серийный номер и телефонный номер из 10 цифр.

Телефонный номер во многих странах содержит 10-битный код области из 3 цифр и 24-битный номер пользователя из 7 цифр.

При подключении телефона он сканирует заранее запрограммированный список из 21 канала управления в поисках наиболее мощного сигнала. Затем телефон транслирует свой 32-битный серийный номер и 34-битный телефонный номер. Как и вся управляющая информация в AMPS, этот пакет отправляется в цифровой форме, многократно, с использованием кода коррекции ошибок, несмотря на то что сами голосовые каналы — аналоговые.

Когда базовая станция получает оповещение, она передает информацию об этом MSC, который фиксирует появление нового абонента, а также сообщает домашнему MSC абонента о его текущем местоположении. В штатном режиме работы мобильный телефон регистрируется заново примерно каждые 15 минут.

Чтобы позвонить, пользователь включает телефон, набирает номер и нажимает кнопку вызова. Телефон передает вызываемый номер и его собственный идентификатор по каналу доступа. Получив запрос, базовая станция сообщает о нем MSC.

Если звонящий является абонентом компании данного MSC (или одного из ее партнеров), то MSC ищет свободный канал для звонка. Обнаружив канал, он отправляет его номер обратно по каналу управления. После этого мобильный телефон автоматически переключается на выбранный голосовой канал и ждет, пока вызываемый абонент не поднимет трубку.

Входящие звонки происходят иначе. Все телефоны в режиме ожидания непрерывно прослушивают пейджинговый канал на предмет предназначенных для них сообщений.

При звонке на мобильный телефон (со стационарного или с другого мобильного телефона) домашний MSC вызываемого абонента получает пакет с запросом о его местонахождении. Затем пакет отправляется на базовую станцию текущей соты, которая транслирует по пейджинговому каналу запрос вида: «Устройство 14, вы здесь?».

Телефон вызываемого абонента отвечает по каналу доступа «Да». После этого базовая станция сообщает ему нечто вроде: «Устройство 14, вам поступил вызов по каналу 3».

Далее вызываемый телефон переключается на канал 3 и начинает звонить (или проигрывать мелодию, полученную владельцем телефона в качестве подарка на день рождения).