

Лекция 3.

Техническое обеспечение (ТО) САПР включает в себя различные технические средства (hardware), используемые для выполнения автоматизированного проектирования, а именно **вычислительные системы, ЭВМ (компьютеры), периферийные устройства, сетевое оборудование**, а также оборудование некоторых вспомогательных систем (например, измерительных), поддерживающих проектирование.

Используемые в САПР технические средства должны обеспечивать:

- выполнение всех необходимых проектных процедур, для которых имеется соответствующее ПО (при наличии ЭВМ и их систем)
- взаимодействие между проектировщиками и ЭВМ (предполагает наличие интерактивного режима работы)
- взаимодействие между членами коллектива, выполняющими работу над общим проектом (объединение САПР в вычислительную сеть).

В результате общая **структура ТО САПР** представляет собой **сеть узлов**, связанных между собой **средой передачи данных**.

Узлами (станциями данных) являются компьютеры, контроллеры встроенного оборудования, рабочие места проектировщиков (АРМ) или рабочие станции (WS — Workstation), ими могут быть также большие ЭВМ (мейнфреймы), отдельные периферийные и измерительные устройства и аппаратура сопряжения со средой передачи данных - сетевые контроллеры.



Среда передачи данных представлена **каналами** передачи данных, состоящими из **линий связи** и коммутационного оборудования.

Линия связи — часть среды передачи данных, используемая для распространения сигналов в нужном направлении. Примерами линий передачи данных являются коаксиальный кабель, витая пара проводов, волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС). В вычислительных сетях используют как **индивидуальные линии** связи между компьютерами, так и **разделяемые (shared)**, когда одна линия связи попеременно используется несколькими компьютерами. В случае применения разделяемых линий связи возникают **электрические проблемы** обеспечения нужного качества сигналов при подключении к одному и тому же проводу нескольких приемников и передатчиков, и **логические проблемы** разделения во времени доступа к этим линиям. Классическим примером сети с разделяемыми линиями связи являются **сети с топологией «общая шина»**, в которых один кабель совместно используется всеми компьютерами сети. Внутри компьютера проблемы разделения линий связи между различными модулями также существуют - примером является доступ к системной шине, которым управляет либо процессор, либо специальный арбитр шины.

Рис. 1. Среда передачи данных

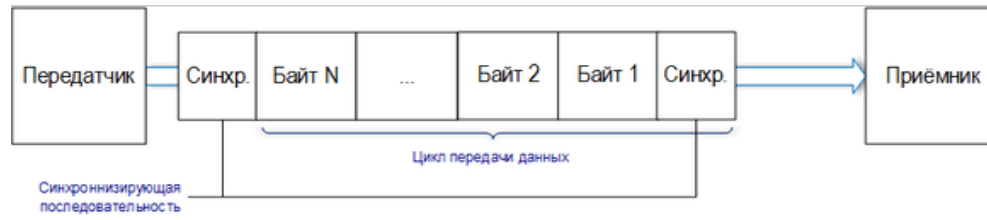
Канал передачи данных это средства двустороннего обмена данными, включающие аппаратуру сопряжения и линию связи. Примером канала связи может быть полоса частот, выделенная одному передатчику при радиосвязи. В линии можно образовать несколько каналов связи, по каждому из которых передается своя информация. При этом говорят, что линия разделяется между несколькими каналами. В зависимости от способа представления информации электрическими сигналами различают **аналоговые и цифровые каналы** передачи данных. В **аналоговых каналах** передачи данных обычно используют частотное разделение (FDM), а для согласования параметров среды и сигналов применяют **модуляцию**. Для **цифровых каналов** передачи данных характерно временное мультиплексирование, т.е. разделение каналов по времени (TDM), дискретные значения передаваемых данных представляют **перепадами (фронтами)** или **уровнями (импульсами)** электрического напряжения или тока. В зависимости от физической природы среды передачи данных различают **проводные и беспроводные каналы**. В зависимости от направления передачи различают **симплексные каналы** (односторонняя передача), **полудуплексные** каналы (возможность попеременной передачи в двух

направлениях) и **дуплексные каналы** (возможность одновременной передачи в обоих направлениях). Соответственно выделяют **симплексные, полудуплексные и дуплексные протоколы**.

Каналы передачи данных могут быть **коммутируемыми** (общего пользования) или **выделенными**. Канал общего пользования попеременно используется для соединения разных узлов. **Выделенный канал** монопольно используется одной организацией и обслуживает соединение двух определенных узлов коммутации. Под **коммутацией** понимается попеременное использование среды передачи данных между различными пунктами информационной сети. Различают следующие **способы коммутации данных**:

- **коммутация каналов** — осуществляется соединение двух или более станций данных и обеспечивается монопольное использование канала передачи данных до тех пор, пока соединение не будет разорвано;
- **коммутация сообщений** — характеризуется тем, что поддержание физического канала между оконечными узлами необязательно. Вместо физического канала имеется **виртуальный канал**, состоящий из физических участков, и между участками возможна буферизация сообщения, пересылка сообщений происходит без нарушения их целостности.
- **коммутация пакетов** — сообщение передается по виртуальному каналу, но оно разделяется **на пакеты**, при этом канал занят только во время передачи пакета (без нарушения его целостности) и по ее завершении освобождается для передачи других пакетов. Пакет имеет небольшие размеры, что бы в его пределах сохранить синхронизацию между передатчиком и приемником и уменьшить вероятность появления ошибок. Пакет имеет номер, что бы восстановить сообщение и «контрольную сумму», подтверждающую безошибочный прием информации. При коммутации пакетов увеличивается задержка за счет потерь времени на пакетизацию, из-за появления заголовков у всех пакетов, за счет буферизации пакетов и ожидания в очередях. Однако, при этом паузы, характерные для коммутации каналов, заполняются передачей пакетов других сообщений, т.е. **линии связи разделяются многими узлами более эффективно**.

Синхронизация – обеспечение того, что взаимодействующие процессы находятся в строго определенном состоянии. **Синхронный способ передачи данных** по последовательному интерфейсу, при котором приемнику и передатчику известно время передачи, частота и фаза данных, то есть, передатчик и приемник работают синхронно, в такт. **Тактовая синхронизация** – высокая точность подстройки фазы и частоты задающего генератора приемника; - малое время вхождения в синхронизм; - сохранение состояния синхронизма при кратковременных перерывах.



Синхронизация приемника и передатчика достигается либо путем ввода синхронизирующей последовательности (например, в начале передачи данных детерминированный сигнал с известным переключением состояний из «нуля» в «единицу» производит синхронизацию приемника и передатчика), либо путем применения способа кодирования с самосинхронизацией при передаче каждого бита данных (манчестерский код).

Разбиение сообщения на пакеты и последующая сборка пакетов называется **инкапсуляцией/декапсуляцией** порций данных. Так, сообщение, пришедшее на **транспортный уровень**, делится на **сегменты** (по 10 000 байт), которые получают заголовки и передаются на **сетевой уровень**. На сетевом уровне сегмент может быть разделен на **пакеты** (по 1500 байт), если сеть не поддерживает передачу сегментов целиком. Пакет снабжается своим сетевым заголовком (т.е. происходит **инкапсуляция сегментов в пакеты**). При передаче между узлами промежуточной ЛВС происходит **разделение пакетов на кадры** (т.е. инкапсуляция пакетов в кадры, например, по 576 байт). Структура образующегося кадра представлена на рис. 2. В приемном узле сегменты **декапсулируются** и восстанавливается исходное сообщение.

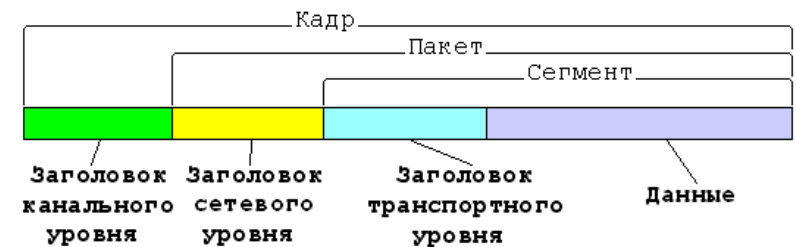


Рис. 2 Структура кадра

Поскольку среда передачи данных общая, а запросы на сетевые обмены у узлов появляются асинхронно, то возникает проблема разделения общей среды между многими узлами, **проблема обеспечения доступа к сети** - установление последовательности, в которой узлы получают право инициировать определенные действия. **Методы доступа** к сети могут быть **случайными** или **детерминированными**. Основным методом случайного доступа (сеть Интернет) является метод **множественного доступа с контролем несущей и обнаружением конфликтов** или **соревновательный (МДКН/ОК)**. Метод основан **на контроле несущей в линии передачи данных** (на слежении за наличием в линии электрических колебаний) и **устранении конфликтов**, возникающих из-за попыток одновременного начала передачи двумя или более станциями в шинной структуре узлов сети. Наложение сигналов друг на друга называется **коллизией**, а часть сети, узлы в которой конкурируют за общую среду передачи — **доменом коллизий**.

=====

Разработчики каналов связи сталкиваются с постоянной **проблемой ограниченного ресурса среды передачи**, будь то время, пространство, частота или код. Другими словами, необходимо спроектировать такой алгоритм, чтобы лучшим образом организовать связь в имеющихся условиях, уплотнить потоки, что бы обеспечить **множественный доступ к среде передачи**.

Пространственное разделение потоков можно считать относительно простым решением задачи. Заключается в использовании нескольких проводных либо радиоканалов (за счет антенн, диаграммы направленности которых обеспечивают пространственное разделение потоков информации между приемниками и передатчиками).

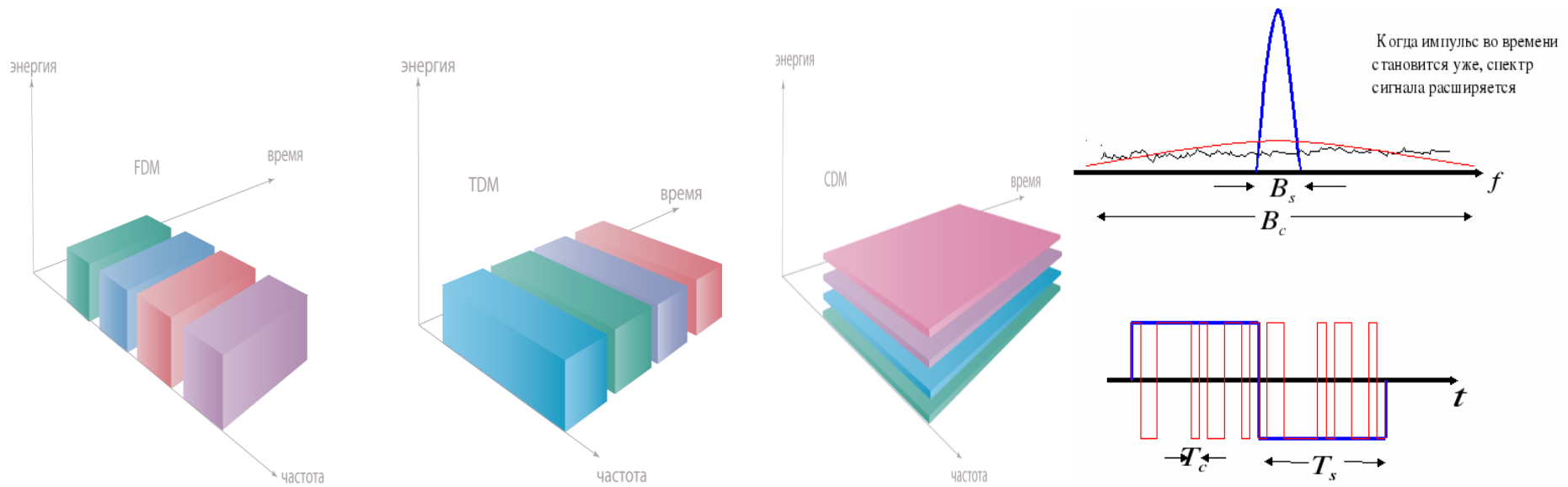
Более распространённой является методика **частотного уплотнения** или **FDM** (Frequency Division Multiplexing). Благодаря ей огромное количество устройств функционируют на одной территории. Диаграмма ниже показывает, как распределяется частотно-временной и энергетический ресурс между потоками, обозначенными разными цветами. Одним из минусов является необходимость между потоками оставлять частотные промежутки, чтобы исключить взаимные помехи, что не лучшим образом использует частотный ресурс.

При **временном разделении** или **TDM**, передатчик использует только одну частоту, но для каждого потока используется свой интервал времени. Данная методика очень требовательна к синхронизации между приёмником и передатчиком. TDM удобна для динамического изменения потоков, например, если какому-нибудь потоку (абоненту) нужно повысить трафик, то достаточно лишь для него сделать интервал подлиннее. Наиболее известным стандартом, использующим TDM, является GSM. Говорят, что при временном мультиплексировании каждому каналу периодически выделяется некоторый квант времени, а при частотном разделении — некоторая полоса частот.

Кодовое уплотнение или **CDM** (Code Division Multiplexing). Потоки сосуществуют в одном частотно-временном интервале. Для кодирования каждого потока применяются специальные коды. Принцип CDMA заключается в расширении спектра исходного информационного сигнала (в нашем случае речевого), которое может производиться двумя различными методами, которые называются "скачки по частоте" и "прямая последовательность". Для того чтобы радиообмен нельзя было перехватить или подавить узкополосным шумом, было предложено:

а) вести передачу с постоянной сменой несущей в пределах широкого диапазона частот. В результате мощность сигнала распределяется по всему диапазону и прослушивание какой-то определенной частоты дает только небольшой шум. Последовательность несущих частот псевдослучайна, известна только передатчику и приемнику.

б) весь частотный диапазон занимает не за счет постоянных переключений с частоты на частоту, а за счет того, что каждый бит информации заменяется N-битами, составляющими m-последовательность, так что тактовая скорость передачи сигналов увеличивается в N раз. Если свертка m-последовательности происходит (код известен), принимается сигнал, иначе – шум. Оба эти метода предусматриваются стандартом 802.11 (Radio-Ethernet). Коды CDM представляют собой ортогональные сигналы, на которые раскладываются символы первоначальной последовательности. Каждый «единичный» бит в передаваемых данных заменяется двоичной последовательностью из N бит, которая называется расширяющей последовательностью. Информацию принимает лишь владелец кода.

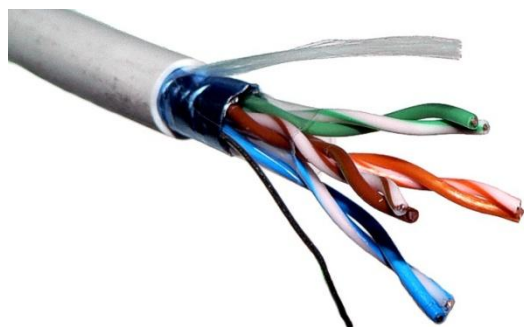


Существуют различные модификации методики CDM. К примеру, смесь CDM и FMD дают FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) которая применяется в Bluetooth. Методики уплотнения с целью множественного доступа к среде нескольких пользователей именуют в англоязычной литературе как **multiple access**, поэтому такие техники называются **FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA** и т.д.

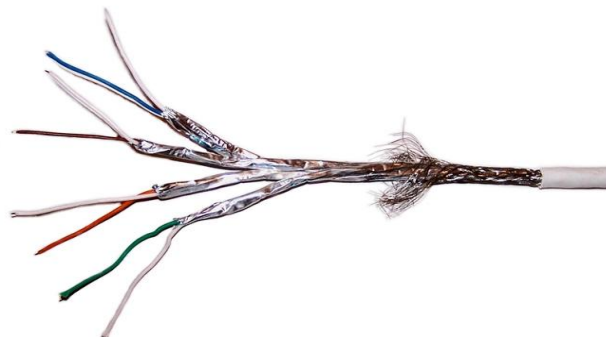
Проводные каналы.

Для организации проводных каналов в сетях передачи данных использовали **коаксиальные кабели** двух видов, чаще всего это "толстый" (thick) кабель диаметром 12,5 мм и "тонкий" (thin) кабель диаметром 6,25 мм. "Толстый" кабель имеет меньшее затухание, лучшую помехозащищенность, что обеспечивает возможность работы на больших расстояниях, но он плохо гнется, что затрудняет прокладку соединений в помещениях, и дороже "тонкого".

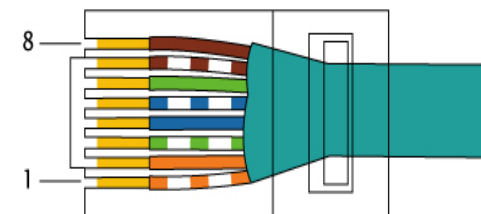
В ВТ преимущественное применение находят **витые пары** проводов. Среди витых пар различают экранированные и неэкранированные пары. Экранированные пары сравнительно дороги, их используют реже. Неэкранированные пары подразделяют на несколько категорий (типов). Обычный телефонный кабель — пара категории 1. Пара категории 2 может использоваться в сетях с пропускной способностью до 4 Мбит/с. Для сетей Ethernet (точнее, для ее варианта с названием 10Base-T) была разработана пара категории 3 (10Мбит/с), а для сетей Token Ring — пара категории 4. В высокоскоростных каналах используют более совершенную витую пару категории 5, которая применима при частотах до 100 МГц на расстояниях в десятки метров. Кабели категории 6 имеют частоту до 200 МГц, а кабели категории 7 до 600 МГц и обязательно экранируются. Стоимость такой кабельной системы получается выше ВОЛС, а характеристики хуже.



UTP



FTP



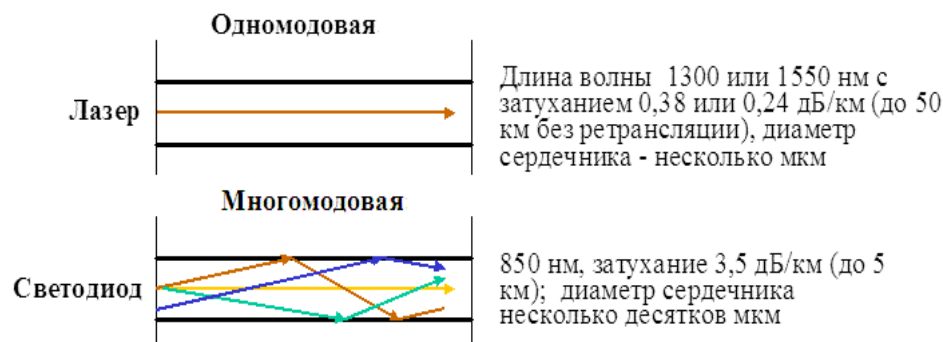
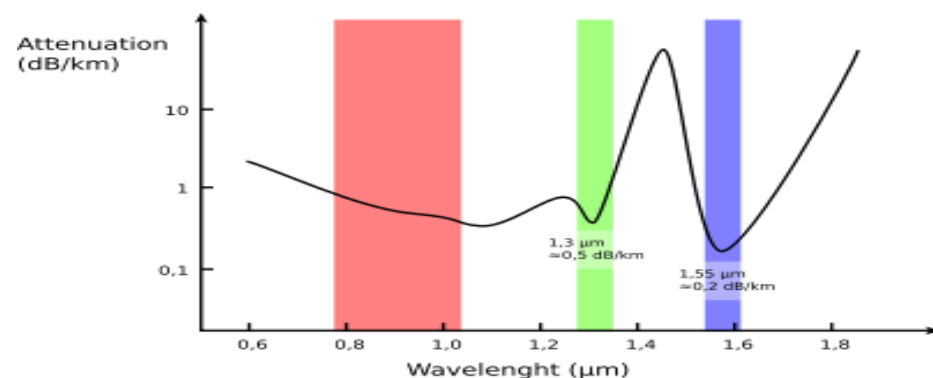
EIA/TIA-568B

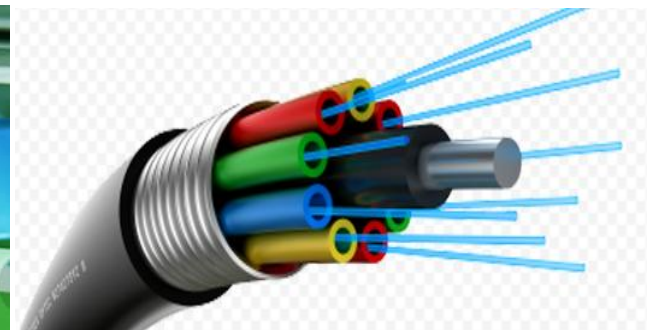
разъем

Оптические линии связи реализуются в виде **волоконно-оптических линий связи (ВОЛС)**. ВОЛС являются основой высокоскоростной передачи данных, особенно на большие расстояния. Конструктивно ВОЛС представляет собой кварцевый сердечник, заключенный в отражающую оболочку. Различают одно- и многомодовые ВОЛС. В **одномодовых ВОЛС** диаметр сердечника составляет 5...10 мкм. Когерентное излучение от лазера распространяется по сердечнику практически без отражений от оболочки, что обуславливает малое затухание сигнала и возможности связи без ретрансляции на расстояниях до 50 км. Используются длины волн 1300 или 1550 нм.

В **многомодовых ВОЛС** в качестве источников излучения используются светодиоды с длиной волны 850 нм. Многомодовость означает наличие многих лучей, которые при своем распространении вдоль сердечника многократно отражаются от оболочки, что увеличивает затухание. Но многомодовый оптический кабель значительно дешевле одномодового, так как имеет диаметр сердечника 50...62,5 мкм и, следовательно, его легче изготовить и проще осуществить соединение с источником излучения. Предельное расстояние передачи данных без ретрансляции составляет около 5 км.

Сигнал, соответствующий логической единице, формируется оптическим импульсом, длительность которого равна периоду следования символов $T = 1/B$ (где B – скорость передачи). Нулю соответствует отсутствие оптического сигнала или сигнал меньшего уровня (до скорости < 2.5 Гбит/с). В формате с «возвращением к нулю» (RZ) три уровня – отсутствие света, «слабый» свет, «сильный» свет) скорости > 2.5 Гбит/с.





Основными характеристиками **канала** или **линии передачи** данных являются **АЧХ, затухание сигнала, помехозащищенность, волновое сопротивление, пропускная способность**.

Амплитудно-частотная характеристика показывает, как затухает амплитуда синусоиды на выходе линии связи по сравнению с амплитудой на ее входе для всех возможных частот передаваемого сигнала. Чем больше несоответствие между полосой пропускания линии и шириной спектра передаваемых сигналов, тем больше сигналы искажаются и тем вероятнее ошибки в распознавании информации, а значит, скорость передачи информации на самом деле оказывается меньше, чем можно было предположить. Если основная гармоника сигнала не попадает в полосу пропускания канала связи, то цифровой сигнал практически невозможно восстановить.

Затухание зависит от частоты сигнала и длины линии между связываемыми узлами. на входе и выходе линии соответственно.

$$d \text{ (дБ)} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ где } P_1 \text{ и } P_2 \text{ — мощности сигнала}$$

Помехоустойчивость линии определяет уровень защиты линии от внешних помех. **Перекрестные наводки на ближнем конце (Near End Cross Talk - NEXT)** определяют помехоустойчивость кабеля к внутренним источникам помех. Показатель NEXT обычно используется применительно к кабелю, состоящему из нескольких витых пар, так как в этом случае взаимные наводки одной пары на другую могут достигать значительных величин. Чем меньше значение NEXT, тем лучше кабель.

Достоверность передачи данных характеризует вероятность искажения для каждого передаваемого бита данных. Иногда этот показатель называют **интенсивностью битовых ошибок (Bit Error Rate, BER)** - % от количества принятых бит одного потока данных в канале связи, которые были изменены из-за шума, помех, искажений или плохой синхронизации, искажений формы сигнала.

Величина BER для каналов связи без дополнительных средств защиты от ошибок (например, самокорректирующихся кодов или протоколов с повторной передачей искаженных кадров) составляет, как правило, 10^{-4} - 10^{-6} , в оптоволоконных линиях связи - 10^{-9} .

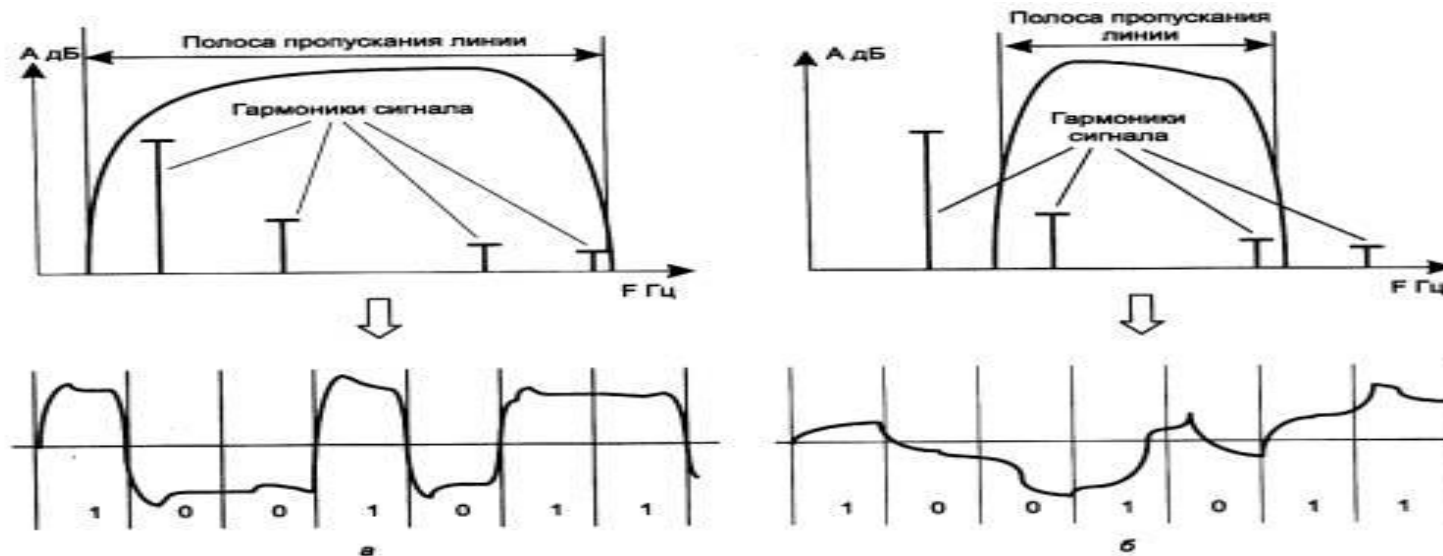


Рис. АЧХ

Пропускная способность определяет возможность передачи информации в канале связи. Связь между полосой пропускания линии и ее максимально возможной пропускной способностью, вне зависимости от принятого способа физического кодирования, установил **Клод Шеннон**:

$$C = F \log_2 (1 + P_c/P_{\text{ш}}),$$

например, для телефонного канала с полосой 3.1 кГц при отношении сигнал/шум 30 дБ максимальная пропускная способность примерно равна 30 кбит/с. Реальная пропускная способность зависит от ее характеристик линии связи, таких как АЧХ, и от спектра передаваемых сигналов.

Реальная скорость передачи всегда меньше пропускной способности. Различают **бодовую** (модуляционную, символьную) и **информационную скорости** передачи данных. **Бодовая скорость** (измеряется в бодах), - число изменений дискретного сигнала в единицу времени, а информационная скорость определяется числом битов информации, переданных в единицу времени. Бодовая скорость определяется полосой пропускания линии $V_b = 2F$. Для АМ это указывает число полувольт максимальной частоты в единицу времени.

Информационная скорость V связана с полосой пропускания канала связи **формулой Хартли-Шеннона** $V = 2F \log_2 k$ (бит/с), где k — число возможных дискретных значений сигнала, которые могут нести информацию.

Заметим, что **телефонный канал** (медный провод) изначально для передачи цифры предназначен не был, а предназначен был для передачи голоса, то есть - звука в полосе частот от 300 до 3400 Гц (на цифровых каналах - до 4000 Гц). Чтобы "засунуть" внутрь цифры - нужно превратить цифру в звук (промодулировать), а на другом конце демодулировать - проанализировав дошедший туда звук понять, что же там хотели сказать. Поэтому - а), поговорим о модуляции. **Способ модуляции играет основную роль в достижении максимально возможной скорости передачи информации в ограниченном по частоте канале** при заданной вероятности ошибочного приема.

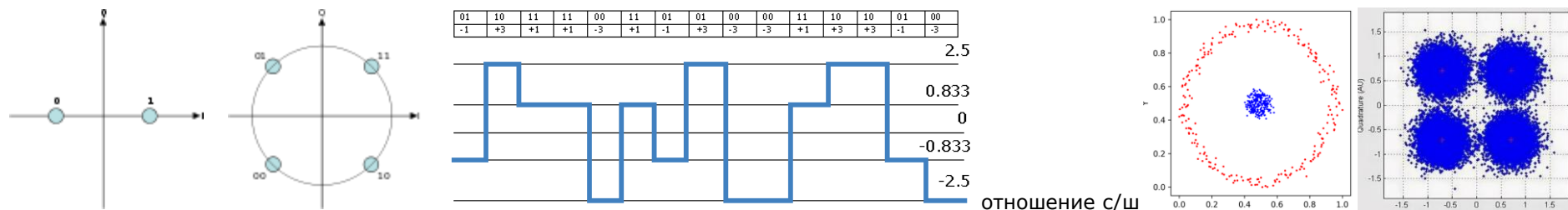
Модуляция "дискретно-частотная" (FSK, frequency shift keying), каждый бит передается своей частотой. Поскольку в телефонной розетке всего два провода, чтобы отличить передачу удаленной стороны от своей собственной используется четыре частоты: две "туда" и две "обратно" (+ полосы разделения). Скорость модемного протокола v.21 была 300 бит/с или 300 бод (максимальная до 600 бод).

Модуляция "дискретная фазо-разностная" (DPSK, differential phase shift keying), то есть бит кодируется "переворотом" фазы несущей на 180 градусов, в остальном все на месте - частотное разделение каналов, один бит за один "элемент модуляции", рабочая скорость 600 бод, максимальная 1200. На этом возможности простых видов модуляции заканчиваются.

При "простых" видах модуляции, когда у сигнала просто переворачивается фаза или меняется частота, скорость жестко ограничена только частотной полосой. Даже если мы на своем конце попытаемся "перевернуть" фазу, скажем, 5000 раз в секунду - на другой конец придет неразличимая "каша", полученная после обрезания полосы сигнала. Практический предел скорости передачи находится где-то в районе 1000 бод из-за обрезания спектра и из-за необходимости формирования двух каналов (туда-обратно).

Способы увеличения информационной скорости: а) - если нарезать фазу на четыре положения, 0, 90, 180 и 270 градусов и передавать ими по два бита - 00, 01, 10, 11 - это позволит передавать данные в два раза быстрее - при бодовой скорости 600 бод иметь 1200 бит/с каналную. Аналогичный результат получится и при использовании 4-х уровней сигнала. Потенциальный код 2B1Q - название отражает его суть - каждые два бита (2B) передаются за один такт сигналом, имеющим четыре состояния (1Q) см. рис.

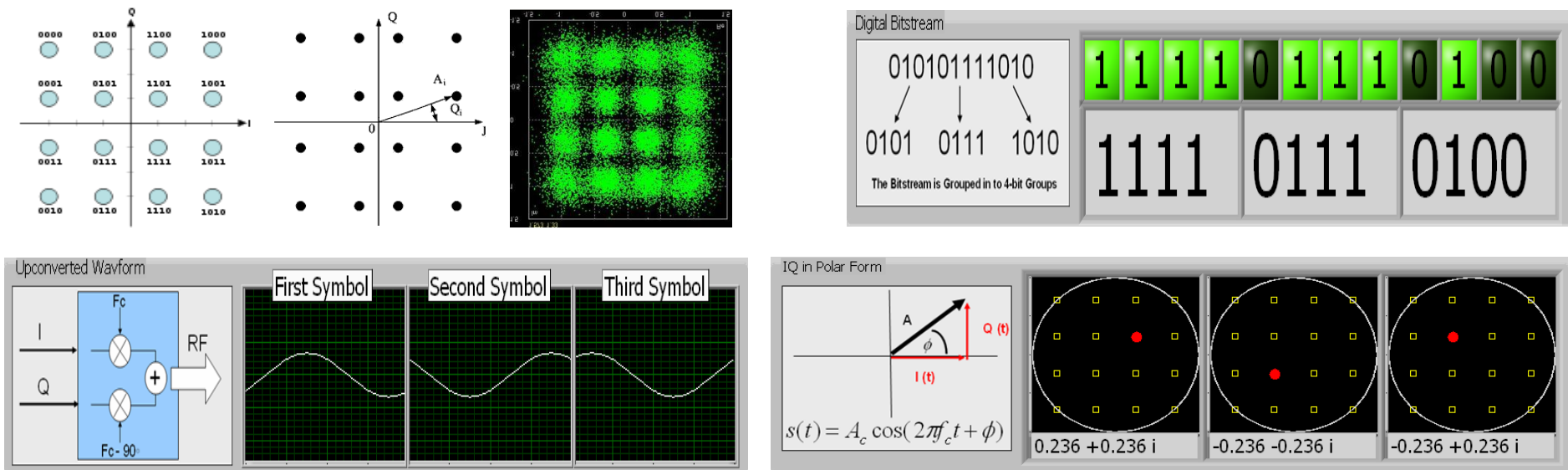
Тот факт, что за "**один акт модуляции**" (сдвиг фазы/амплитуды/частоты/еще чего?) можно передать более одного бита информации, если передавать их **блоками**, стимулировал идеи, развитие которых постепенно привело к скоростям вроде 33600 бит/с в рассматриваемом звуковом канале. Частота этих самых "актов модуляции" ограничена частотной полосой канала, а скорость передачи данных зависит и от соотношения сигнал/шум, определяющим, насколько мелко можно нарезать единицу модуляции, не боясь, что разница потонет в шумах.



Нарезаем фазу по 45 градусов (на 8 кусочков), амплитуду - на четыре уровня (итого 32 комбинации фазы и амплитуды записываются 5 разрядным битовым числом=5 бит на бод), и получаем информационную скорость в $3+2=5$ раз больше бодовой, $600 \times 5 = 3000$ бит/с. Маловато для интернета, но достаточна для почты, а простота протокола определяет его неприхотливость. Можно передавать данные на более высокой скорости путём увеличения количества символов в группе. По соглашению, число символов M на символьной карте (**созвездие**), называется "**M-арным**" способом модуляции. Другими словами, QAM-4 имеет $M = 4$, QAM-8, $M = 8$, а QAM-256, $M = 256$. Кроме того, количество бит, которое может быть представлено символом, имеет логарифмическую взаимосвязь с M. Например, каждый символ в QAM-256 использован для того, чтобы представить 8-битовый цифровой набор. Обобщая, получим следующее уравнение: **Бит на символ = $\log_2 (M)$** - Увеличение скорости передачи определяется степенью, в которую надо возвести 2, что бы получить общее число символов в созвездии.

Давайте теперь нарежем амплитуду на, ... 32 уровня, и фазу на 32 уровня - и получим сразу $5 + 5 = 10$ бит за бод и скорость $600 \times 10 = 6000$ бит/с ! Ан нет..... При малых амплитудах шумы будут сильно мешать определению точной фазы отсчета, и как следствие - нарезку и по фазе и амплитуде

придется уменьшить... Но шумы воздействуют не на амплитуду и фазу "по отдельности", а на это число целиком -- > по действительной и мнимой оси комплексного числа, где отложены фаза и амплитуда, рисуются оси координат, вокруг центра рисуется окружность единичного радиуса. Точка внутри окружности соответствует сигналу с амплитудой, равной расстоянию от начала координат, фаза - углу между отрезком от точки до нуля и осью абсцисс. **Voila** – и мы имеем так называемую "**квадратурную**" (QAM - quadrature-amplitude modulation) модуляцию, практически идеально использующую шумовые характеристики звукового канала. Рис. Шумовая составляющая при отношении $P_c/P_{ш} = 20$ dB представляется в виде окружности с радиусом $1/10$. Созвездие - это совокупность точек с разными значениями амплитуды и фазы.



QAM

Квадратурное представление заключается в выражении колебания линейной комбинацией двух ортогональных составляющих — синусоидальной и косинусоидальной: $S(t) = x(t)\sin(\omega t + (p)) + y(t)\cos(\omega t + (p))$, где $x(t)$ и $y(t)$ — биполярные дискретные величины. Такая дискретная модуляция (манипуляция) осуществляется по двум каналам из несущих, сдвинутых на 90° друг относительно друга, т.е. находящихся в **квадратуре** (отсюда и название представления и метода формирования сигналов). В двухканальной схеме есть и сложности - например, перед передачей битового потока он прогоняется через специальный алгоритм, что бы QAM-кодер не "запутался" в точках, соответствующих малой амплитуде.

б) Следующий шаг - **введение эхогашения**. Если мы имеем полосу в 3кГц в среднем шириной и хотим передавать информацию в обе стороны - придется либо делить полосу на две половинки ("туда" и "обратно"), либо... пытаться устранить собственное эхо, то есть, попытаться "вычистить" из входа приемника сигнал собственного передатчика, орущего ему "в ухо". Вычитание собственного сигнала делается в **DigitalSignalProcessor (DSP)**, и "настройка эхогашения" становится обязательным этапом установки соединения. В результате скорость достигает 6000 бит/с. **Алгоритм компенсации основан на вычислении спектральных характеристик эха с тем, чтобы затем вычистить его из входного сигнала. Вычитание происходит в КИХ (конечная импульсная характеристика) фильтре. Анализ сигнала основан на операциях со спектром сигнала в цифровой форме, получаемым с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) в реальном масштабе времени. Алгоритм расчета коэффициентов фильтра реализован на DSP-процессоре. КИХ фильтр работает в режиме реального времени и реализуется, например, на ПЛИС.**

Протокол с «нормальной» QAM + **эхогашение** + **ретрейн** (адаптивность) - вырезание «мертвой полосы» в пределах 3100Гц - из 10-11 полос и предкоррекция АЧХ в каждой полосе + Треллис-кодирование (избыточность и возможность быстрого восстановления потерянного кода) быстро привели к скоростям 9600 (все кратны 2400) bit/s, потом до 19200бит/с (V32bis) и далее до 33600 – модем V34bis – все это в полосе 3100 Гц!

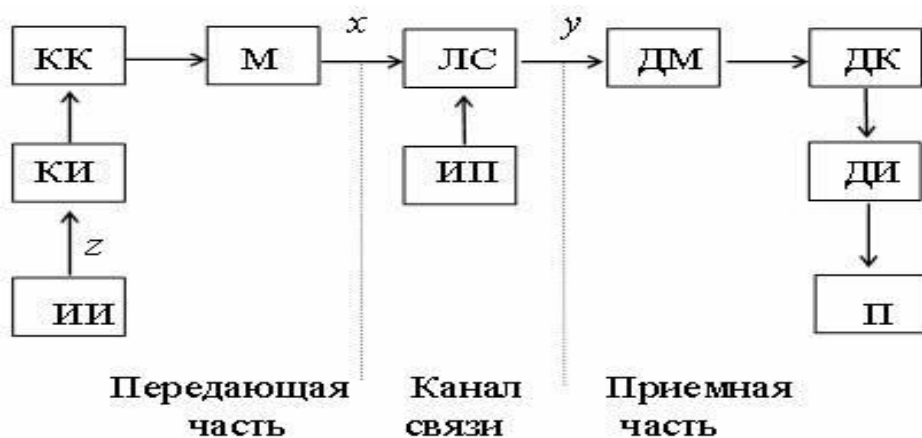
Треллис-модуляция, или решётчатое **кодирование** применяется в высокоскоростных модемах. Ценой небольшой избыточности (4В/5В, добавлением **треллис-бита**) — повышается помехоустойчивость передачи. Разрешенными являются не все группы битов и при приеме сбойных производится восстановление правильных «по решетке».

с) Линейное кодирование в канале связи.

В вычислительных сетях схемы кодирования применяют для того, чтобы эффективнее использовать **информационные магистрали**. Методы кодирования обеспечивают улучшения различения 0 и 1 и увеличение скоростей передачи данных без пропорционального увеличения тактовых частот. От выбранного кода прямо зависят также сложность сетевой аппаратуры и надежность передачи информации.

Кодирование обеспечивает: - минимальную спектральную плотность на нулевой частоте и ее ограничение на нижних частотах; - легкое выделение информации о тактовой частоте передаваемого сигнала; - узкополосность спектра для передачи информации через канал связи без искажений; - малую избыточность (для снижения относительной скорости передачи в канале связи); - низкую стоимость реализации и удобство (неполярность).

Структурная схема системы передачи информации. О каком кодировании идет речь?



Сообщению **z** на выходе источника информации (ИИ) необходимо поставить в соответствие определенный сигнал. Число возможных сообщений при увеличении времени стремится к бесконечности, поэтому сообщения складываются из букв, чтобы обойтись конечным числом образцовых сигналов, соответствующих отдельным буквам алфавита. После кодера канала (КК) сигнал поступает в модулятор (М). На выходе модулятора сигнал **x** подготовлен к передаче по конкретной линии связи. В линии связи (ЛС) на сигнал накладываются помехи (из источника помех - ИП). В демодулятор (ДМ) из канала связи приходит сигнал **y**, искаженный шумом. В демодуляторе сигналы декодируются в символы. В декодере канала (ДК) и декодере источника (ДИ) происходит преобразование символов в сообщение. Сообщение выдается получателю (П).

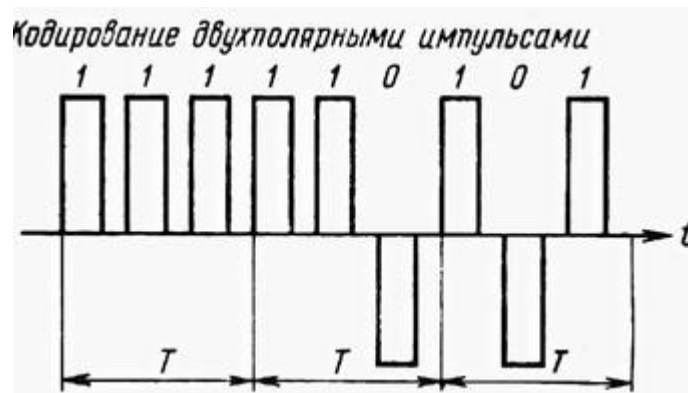
Рис. ИИ - источник информации; КИ - кодер источника; КК - кодер канала; М - модулятор; ЛС - линия связи; ИП - источник помех; ДМ - демодулятор; ДК - декодер канала; ДИ - декодер источника; П - получатель информации.

Клод Шеннон в своих теоремах обосновал эффективность введения в тракт кодирующих и декодирующих устройств, цель которых состоит в согласовании свойств источника сообщения со свойствами канала связи.

Кодер источника (КИ) имеет целью обеспечить такое кодирование (**сжатие** сигнала, подготовку для его дальнейшего преобразования (архивирование информации в ЭВМ)), при котором путем **устранения избыточности** существенно **снижается среднее число символов, требующихся на букву сообщения**. Большинство сообщений, формируемых источником, содержат избыточность. Например, импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в телевидении присуща значительная избыточность в передаваемой информации. Кодирование, которое осуществляет удаление или уменьшение избыточности из закодированных сообщений, называется **эффективным (оптимальным)**. Эффективное кодирование осуществляется с применением неравномерных кодов, в которых более короткие кодовые комбинации соответствуют более вероятным символам сообщения, а более длинные — менее вероятным символам.

С помощью второго кодера - **кодера канала (КК)** обеспечивается заданная достоверность при передаче или хранении информации путем **дополнительного внесения избыточности**, но уже по другим алгоритмам и с учетом статистических закономерностей действия помехи в канале связи. Такое кодирование получило название **помехоустойчивого**. Теория помехоустойчивого кодирования сформулирована Шенноном в виде теоремы: **- при производительности источника, меньшей, чем пропускная способность канала, всегда существует такой способ кодирования, который позволяет обеспечить передачу со сколь угодно малой вероятностью ошибки.**

В чем же необходимость устранения избыточности в сообщении путем оптимального кодирования, а затем и перекодирования помехоустойчивым кодом с внесением избыточности? Избыточность источника сообщения в большинстве случаев не согласована со статистическими закономерностями помехи в канале связи и не позволяет подобрать подходящий помехоустойчивый код для повышения достоверности принимаемого сообщения. Избыточность источника сообщений позволяет обнаруживать и исправлять ошибки только после декодирования всего сообщения, пользуясь сложными алгоритмами и интуицией. Выбор кодирующих и декодирующих устройств зависит от статистических свойств источника сообщений, а также от уровня и характера помех в канале связи.



Проблемы **ИКМ** заключаются в большом спектре частот, которые требуются для передачи и восстановления прямоугольного импульса. Наиболее плохо передаются однополярные прямоугольные импульсы. Наличие постоянной составляющей и асимметричность порождают искажение самих импульсов и их взаимовлияние.

Для передачи цифровых сигналов по линии применяются специальные **линейные коды**. Они формируют двухполярную структуру, аналогичную синусоидальному аналоговому сигналу. Резкие переходы в момент прохождения заднего и переднего фронтов все же остаются, но для таких кодов резко снижается затухание линии и занимаемая полоса частот, как следствие, возрастает дальность передачи.

Для устранения постоянной составляющей используют три уровня сигнала — нулевой, положительный и отрицательный, а для ускорения скорости передачи — многоуровневые коды. Для восстановления цифрового сигнала требуется меньше гармоник, чем при аналогового. Технология передачи и приема цифровых сигналов позволяет восстановить исходный сигнал по

несущей (она же первая) и второй гармонике.

Если представить себе, что **тактовая частота** — это обороты двигателя автомобиля, то скорость передачи данных — это скорость движения. Преобразование одного в другое обеспечивается кодированием (коробкой передач). Первая передача — коды RZ и Манчестер, Вторая передача — код

NRZ, Четвертая передача — код MLT-3, Пятая передача — код PAM 5, Редуктор — избыточное кодирование 4B/5B, Ширина магистрали — требуемая полоса частот, спектр - полосы движения, отношение сигнал/шум – неровности шоссе. Как и в аналогии с двигателем, совсем необязательно раскручивать его до максимальных оборотов, что бы увеличить скорость, целесообразнее включить передачу. Методы кодирования, применяющиеся при использовании витых пар, обеспечивают увеличение скоростей передачи данных без пропорционального увеличения тактовых частот среды передачи.

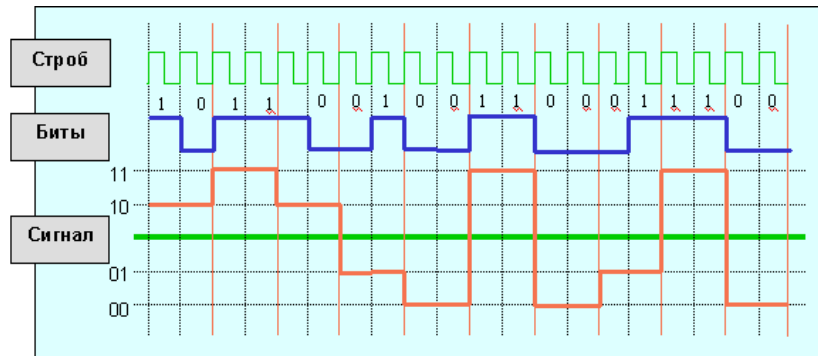


Рис. 5. Пятиуровневый код PAM 5

Один герц несущей передает один бит (1) при манчестерском кодировании, два бита (01) кода NRZ и четыре бита (1111) кода MLT-3, 2B1Q, PAM5. Обычный Ethernet на 100Base-T3 на витой паре UTP-3 использует логическое кодирование 4B/5B, три витых пары + метод передачи MLT-3. Скорость передачи в каждой паре будет 33.3 Мбит/с. Максимальное значение основной гармоники (она же считается несущей частотой) 8 МГц (MLT-3, передаче одних единиц), максимально возможная полоса UTP3 – 16 МГц (обеспечивается прием первой и второй гармоники), скорость передачи 100мбит/с. Без кодирования скорость передачи не превысила бы 10 Мбит/с.

Кодирование - процесс преобразования сигнала в форму, удобную для передачи, хранения или автоматической переработки. Код **NRZ** (Non Return to Zero - без возврата к нулю) - это простейший код, представляющий собой практически обычный цифровой сигнал. Потенциальный код NRZ обладает хорошим спектром с одним недостатком - у него имеется постоянная составляющая (НЧ помехи по питанию).

Код NRZI - смена сигнала происходит только при передаче единицы, передача нуля не приводит к изменению напряжения. Частота «изменений» и ширина спектра значительно ниже. Разные способы кодирования имеют разную ширину спектра (ширину информационной магистрали) или необходимую полосу частот. Чем меньше требуемая полоса частот, тем больше вероятность безошибочной передачи информации.

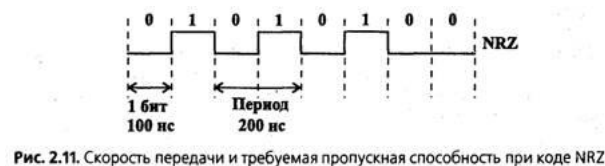
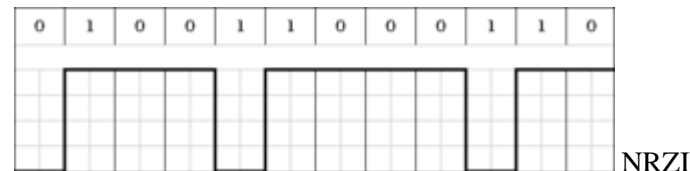
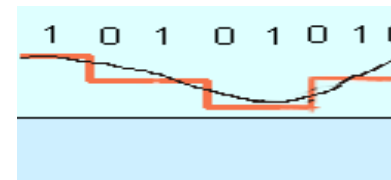
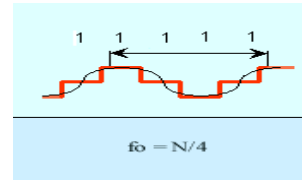
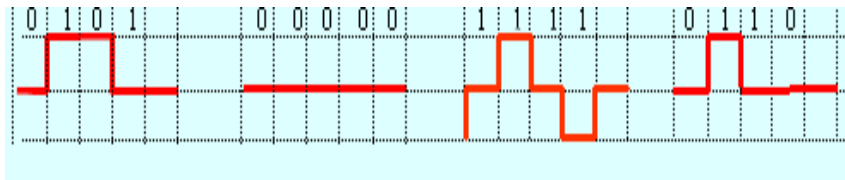


Рис. 2.11. Скорость передачи и требуемая пропускная способность при коде NRZ



Код трехуровневой передачи MLT-3 (Multi Level Transmission - 3) имеет много общего с кодом NRZI. Важнейшее его отличие - три уровня сигнала. Единице соответствует переход с одного уровня сигнала на другой. Изменение уровня линейного сигнала происходит только в том случае, если на вход поступает единица, однако, в отличие от кода NRZI, алгоритм формирования выбран таким образом, чтобы два соседних изменения всегда имели противоположные направления.

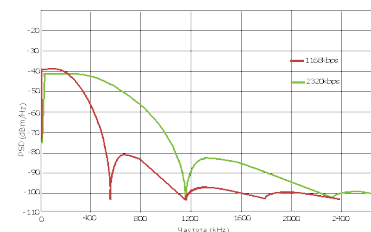
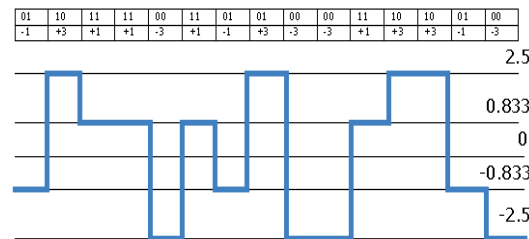


При передаче нулей (сигнал имеет постоянную составляющую) сигнал не меняется $f_0 = 0$ Гц. При передаче всех единиц информационные переходы фиксируются на границе битов, и один цикл сигнала вмещает четыре бита. В этом случае $f_0 = N/4$ Гц - максимальная частота кода *MLT-3* при передаче всех единиц. В случае чередующейся последовательности код *MLT-3* имеет максимальную частоту равную $f_0 = N/8$, что в два раза меньше чем у кода NRZI, следовательно, этот код имеет более узкую полосу пропускания. Применяется в протоколах 100Мбит/с.

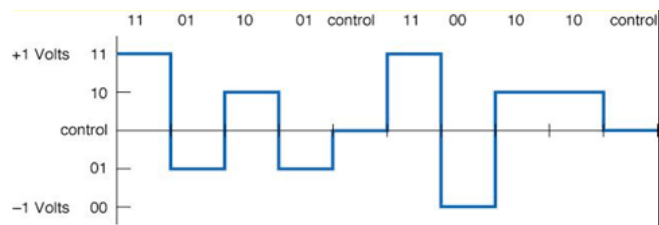
Потенциальный код 2B1Q - название отражает его суть - **каждые два бита (2B) передаются за один такт сигналом, имеющим четыре состояния (1Quarter)**. Скорость передачи данных в два раза превышает символьную. Паре бит 00 соответствует потенциал $-2,5$ В, паре бит 01 соответствует потенциал $-0,833$ В, паре бит 11 - потенциал $+0,833$ В, а паре бит 10 - потенциал $+2,5$ В. При случайном чередовании бит спектр сигнала в два раза уже, чем у кода NRZ, так как при той же битовой скорости длительность такта увеличивается в два раза. С помощью кода 2B1Q можно по одной и той же линии передавать данные в два раза быстрее, чем с помощью кода AMI или NRZI. Недостаток: реализация этого метода требует более мощного передатчика и более сложного приемника, который должен различать четыре уровня. Применяется в технологии DSL. В отличие от некоторых других алгоритмов линейного кодирования (например, AMI) рассматриваемый алгоритм не обеспечивает поддержание баланса положительных и отрицательных импульсов выходного напряжения и, следовательно, входной код 2B1Q должен быть **предварительно скремблирован**.

*) **Скремблирование** заключается в преобразовании исходного двоичного сигнала в сигнал, близкий к случайному, имеющий равновероятное появление символов 1 и 0 - рандомизация произвольного информационного сигнала.

Кодовая группа	Кодовый символ	Кодовое напряжение
00	- 3	- 2,5 V
01	- 1	- 0,833 V
10	+ 3	+ 2,5 V
11	+ 1	+ 0,833 V



Энергетический спектр сигнала и его огибающая соответствует конкретному значению символьной скорости, которая в данном случае в два раза меньше скорости передачи данных. На рис. представлены графики 2B1Q-модулированных сигналов, которые обеспечивают передачу данных со скоростью 1168 Кбит/сек (красная линия) и 2320 Кбит/сек (зеленая линия) в применении xDSL. Достоинством данного алгоритма является простота и дешевизна его реализации. Немаловажным фактором является стандартизация этого способа кодирования.

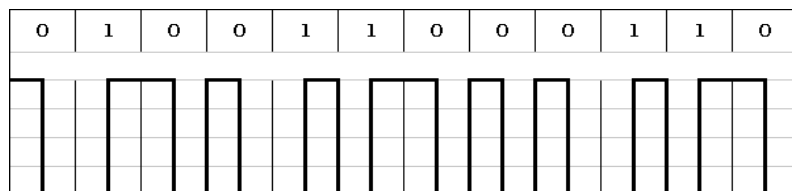


В пятиуровневом коде PAM 5 используется 5 уровней амплитуды и двухбитовое кодирование. Для каждой комбинации задается уровень напряжения. При двухбитовом кодировании для передачи информации необходимо четыре уровня (два во второй степени — 00, 01, 10, 11). Передача двух битов одновременно обеспечивает уменьшение в два раза частоты изменения сигнала. Пятый уровень добавлен для создания избыточности кода, используемого для исправления ошибок. Это создает дополнительный резерв соотношения сигнал / шум 6 дБ. Благодаря избыточности кодирования (вспомним, что каждому информационному биту ставится в

соответствие дибит, то есть избыточность кода равна 2) даже в случае возникновения ошибок приема (к примеру, вместо дибита 11 ошибочно принят дибит 10) исходная последовательность бит может быть безошибочно восстановлена.

Код PAM 5 используется в протоколе 1000 Base T Gigabit Ethernet. Данный протокол обеспечивает передачу данных со скоростью 1000 Мбит/с при ширине спектра сигнала всего 125 МГц. Данные передаются по всем четырем парам одновременно. Следовательно, каждая пара должна обеспечить скорость 250 Мбит/с. Максимальная частота спектра несущей при передаче двухбитовых символов кода PAM 5 составляет 62,5 МГц. С учетом передачи второй гармоники протоколу 1000 Base T требуется полоса частот до 125 МГц.

Манчестерский код (PE - Phase Encode, Manchester, фазовое кодирование, манчестерское кодирование). В локальных сетях до недавнего времени самым распространенным методом кодирования был **манчестерский код**. Он применяется в технологиях **Ethernet** и **Token Ring**. В манчестерском коде для кодирования единиц и нулей используется перепад потенциала, то есть **фронт импульса** и каждый такт делится на две части.



В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Единица кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а ноль - обратным перепадом. Ключевым свойством «манчестерского» кодирования является то, что при передаче каждого бита обязательно присутствуют оба состояния сигнала: «ON» и «OFF». Описанное свойство позволяет дополнительно синхронизировать приёмник с передатчиком при приёме каждого бита, определять — может ли вообще принимаемый код быть «манчестерским», диагностировать конец сообщения или «потерю» сигнала передатчика.

Так как сигнал изменяется по крайней мере один раз за такт передачи одного бита данных, то манчестерский код обладает **самосинхронизирующими** свойствами. У манчестерского кода нет постоянной составляющей (меняется каждый такт), а основная гармоника в худшем случае (при передаче последовательности единиц или нулей) имеет частоту N Гц, а в лучшем случае (при передаче чередующихся единиц и нулей) — $N/2$ Гц, как и у NRZ. В среднем ширина спектра при манчестерском кодировании в два раза шире, чем при NRZ или AMI кодировании. Пропускная способность линии требуется в два раза выше, чем при использовании простейшего кода NRZ (плата за синхронизацию).

В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Единица кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а ноль - обратным перепадом. Ключевым свойством «манчестерского» кодирования является то, что при передаче каждого бита обязательно присутствуют оба состояния сигнала: «ON» и «OFF».



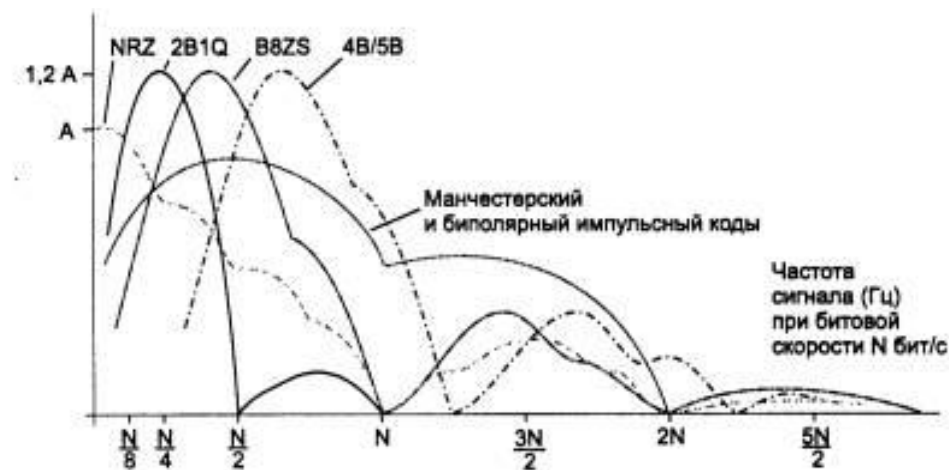
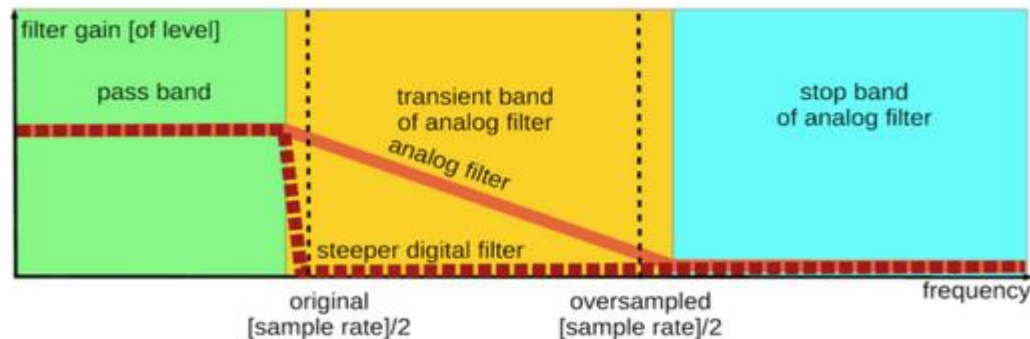


Рис. Спектры основных линейных кодов.

d) **Формирование поднесущих по методу OFDM.** Метод **OFDMA** (Orthogonal frequency-division multiple access, выполняется только в цифровом стандарте) является сочетанием модуляции и мультиплексирования и используется в ряде проводных и беспроводных стандартов: DVB-T (цифровое эфирное/ кабельное телевидение), xDSL, VDSL, WiMax, LTE для повышения скорости передачи информации в ограниченном диапазоне частот. Секрет раскрывается уже в названии: **Orthogonal Frequency**.



Ортогональность позволяет значительно увеличить количество поднесущих в заданной полосе частот без их взаимного влияния друг на друга. Если перемножить ортогональные функции, то получится нуль - **взаимная энергия между ортогональными сигналами равна нулю, т.е. они не взаимодействуют друг с другом.**

Рис. Сравнение аналогового и цифрового фильтров

=====

Модемы исчезают, но **идеи остаются** в применении к цифровым абонентским линиям **xDSL** (на примере провайдера Стрим):

В цифровых абонентских линиях используется телефонный кабель (медь), но не телефонная аппаратура. Значительно большие скорости передачи данных по сравнению с телефонными технологиями достигаются использованием **другой полосы сигнала, специальных методов модуляции, эффективного кодирования и адаптивных методов коррекции искажений линии.**

Нижняя граница диапазона частот находится на уровне 26 кГц. Верхняя же граница, исходя из требований к скорости передачи данных и возможностей телефонного кабеля, составляет 1,1 МГц. Эта полоса пропускания делится на две части — частоты **от 26 кГц до 138 кГц** отведены

исходящему потоку данных, а частоты от **138 кГц до 1,1 МГц** — входящему. Полоса частот от 26 кГц до 1,1 МГц была выбрана не случайно. Начиная с частоты 20кГц и выше, до 1 МГц, затухание имеет практически линейную зависимость от частоты.

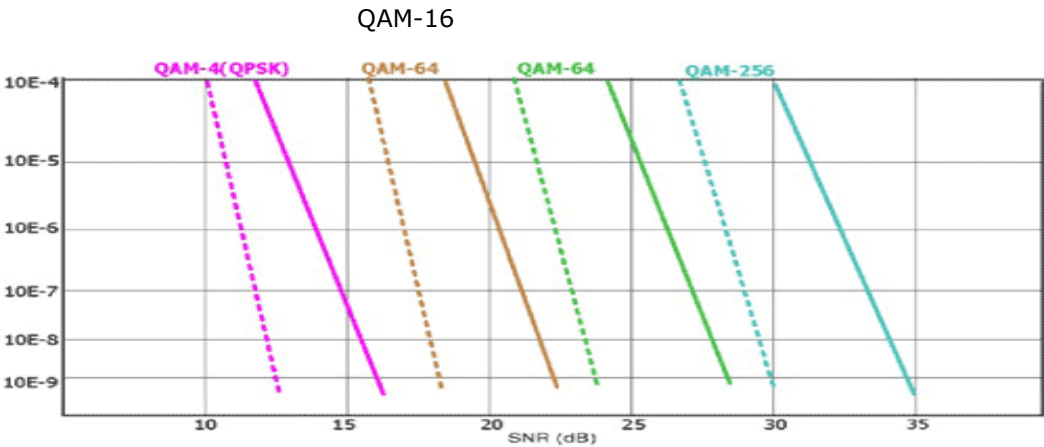
К специальным методам модуляции относятся **амплитудно-фазовой модуляция без несущей** (CAP - вариант квадратурной амплитудной модуляции QAM) и **дискретная многотоновая модуляции** (DMT). При DMT вся полоса пропускания DSL разбивается на 256 каналов. Каждый канал занимает 4,3125 КГц (4 кГц+312.5 Гц защитная полоса).

Первые шесть каналов (0-25 кГц) резервируются для полосы пропускания аналоговых телефонов и организации защитной полосы между аналоговым телефоном и сигналом DMT. Затем следуют 25 каналов исходящего потока с 7 по 31. Они используют спектр от 26 кГц до 138 кГц. Каналы с 32 по 256 используются для входящего потока.

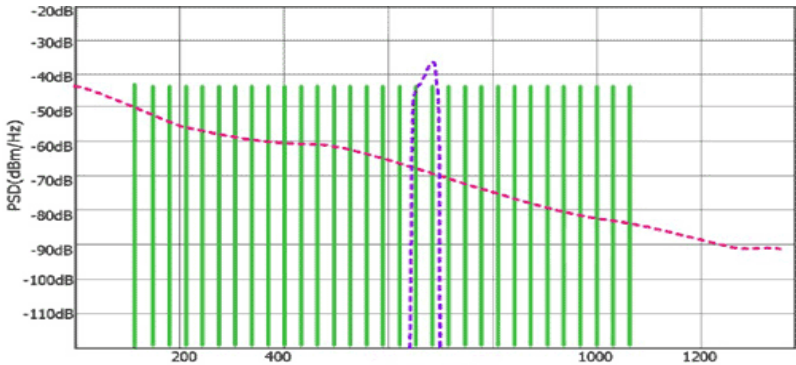
Данные передаются одновременно и параллельно во множестве параллельных каналов. В каждом из каналов используется амплитудно-фазовая модуляция (QAM). Для указания типа алгоритма QAM принята следующая схема обозначения: **QAM - <число>** (QAM-4, QAM-64, и т.д. где число характеризует вариации параметров, равные числу бит). Проводится тестирование подканалов и в зависимости от его результатов подканалы загружаются в разной степени. На чистых каналах с малым уровнем шумов могут быть использованы алгоритмы с большими скоростями, например, QAM 128, в то время, как на более зашумленных участках могут быть использованы более простые алгоритмы модуляции, например QAM-16.

Сигнал по-прежнему характеризуется частотой, амплитудой и фазой, а каждое состояние этой амплитуды и фазы описывается группой бит. Естественно, что бесконечно увеличивать количество узлов (а фактически различий в фазе и амплитуде) принимаемого сигнала не позволяют шумы, которые действуют и на амплитуду и на фазу одновременно. Поэтому с увеличением дробления сетки требуется улучшение отношения сигнал/ шум. Помехоустойчивость оценивается по критерию частоты появления ошибки (BER – Bit Error Rate) **BER≤10⁻⁷**.

Табл. Требуемое SNR для использования QAM - M							
Количество бит/символ	4	6	8	9	10	12	14
Разрядность QAM	16	64	256	512	1024	4096	16384
SNR (дБ) для BER<10 ⁻⁷	21.8	27.8	33.8	36.8	39.9	45.9	51.9



Влияние SNR на BER при различных QAM



DMT – удаление сосредоточенной помехи

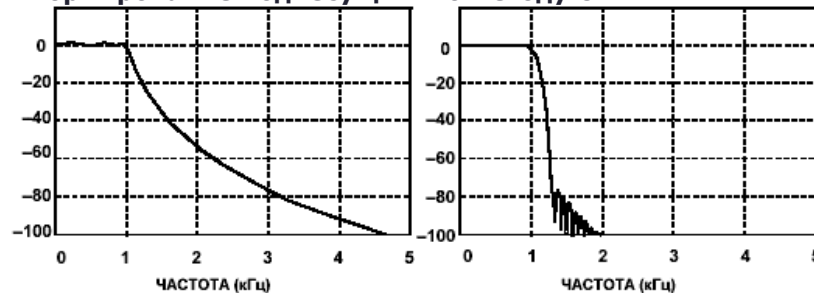
При максимальном соотношении сигнал/шум (SNR-Signal – Noise-Ratio) в каждом канале одним символом в каждый момент времени возможно передать 8-10 бит информации. Символьную скорость передачи примем 4000 симв/с. Отсюда теоретическая максимальная скорость в каждом канале $(8-10) * 4000 = 32-40$ Кбит/с.

Алгоритм квадратурной амплитудной модуляции (QAM), по сути, является разновидностью алгоритма гармонической амплитудной модуляции и поэтому обладает следующими важными свойствами: - ширина спектра QAM модулированного колебания не превышает ширину спектра модулирующего сигнала, - положение спектра QAM модулированного колебания в частотной области определяется номиналом частоты несущего колебания. При этом, одна полоса спектра дублирует другую, основная часть энергии тратится на неинформативную несущую. Поэтому данный алгоритм в чистом виде редко используется на практике. Больше распространение получили алгоритмы, которые используют основные принципы QAM и в то же время свободны от его недостатков, например - **алгоритм CAP (ОБП, SSB, single sideband modulation)**.

Особенность алгоритма CAP заключается в специальной обработке модулированного информационного сигнала перед его отправкой в линию. Из спектра модулированного сигнала исключается частота несущего колебания. Приемник же сначала восстанавливает частоту несущего колебания, смешивая однополосный сигнал и частоту специального гетеродина, а после этого восстанавливает информационный сигнал. Недостатком является усложнение приемника и трудности с осуществлением АРУ.

При использовании методов CAP и DMT в двухпроводной линии достигаются **скорости до 8-10 Мбит/с** (в направлении от роутера в полосе 1 МГц) **и 1 Мбит/с** (к роутеру, в полосе 100 кГц). Технология ADSL использует одновременную передачу TV сигнала абоненту с числом каналов до 256. Как и в случае с модемами, выигрыш от применения современного кодирования и модуляции примерно равен 10.

Формирование поднесущих по методу OFDM.

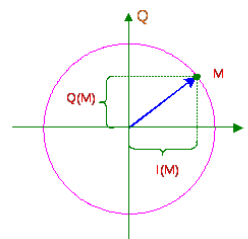
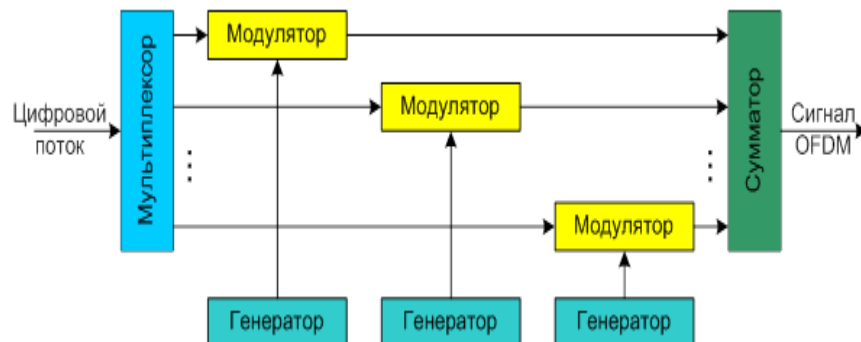


Провозгласить сетку из 256 частот в полосе 1104 кГц с каналами по 4 кГц и защитными полосами 312, 5 Гц легко, но как ее реально получить? Ясно, что использовать аналоговые методы проблематично.

Рис. Сравнение полосы аналогового и цифрового фильтров.

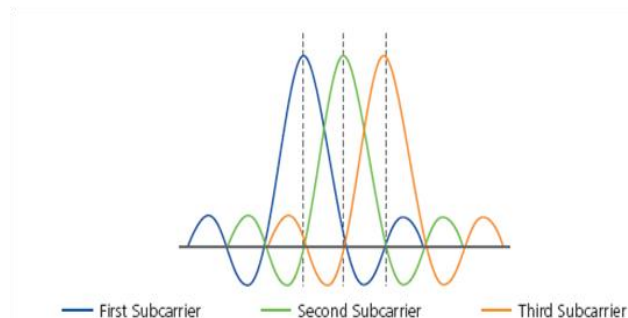
Метод **OFDMA** (Orthogonal frequency-division multiple access) является сочетанием модуляции и мультиплексирования и используется в ряде проводных и беспроводных стандартов: DVB-T (цифровое эфирное/ кабельное телевидение), xDSL, VDSL, WiMax, LTE для повышения скорости передачи информации в ограниченном диапазоне частот. Секрет раскрывается уже в названии: **Orthogonal**

Frequency. Ортогональность позволяет значительно увеличить количество поднесущих в заданной полосе частот без их взаимного влияния друг на друга и достигается применением цифровой фильтрации. Цифровой фильтр имеет не только более узкую переходную полосу, но и более крутой срез частоты, позволяющий "отрубать" частоты выше $\frac{1}{2}$ частоты дискретизации.



Передаваемый цифровой поток модулирующего сигнала «распараллеливается» и передается по нескольким каналам - путем модуляции нескольких поднесущих. Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (например, квадратурная амплитудная модуляция) на низкой символьной скорости. В технологии OFDM частотный диапазон разбивается равномерно между поднесущими (дополнительные несущие), количество которых может достигать до нескольких тысяч. Каждому

передаваемому потоку информации назначается несколько таких поднесущих, т.е. каждый поток разбивается на N поднесущих. Поднесущие между собой ортогональны.



С появлением быстрых вычислительных систем задача OFDM была реализована с помощью **цифровой обработки сигналов**. В основе подхода лежит алгоритм **быстрого преобразования Фурье**, который **связывает коэффициенты при разложении дискретных сигналов в ортогональные ряды во временной и частотной областях**. Преобразование Фурье – это некий линейный оператор (см. рис.), который преобразует входной сигнал $u(t)$ во временной области (t – это время) в сигнал $U(f)$ в частотной области (f – это частота).

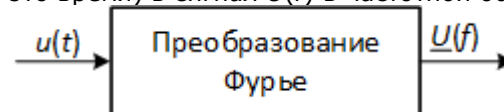
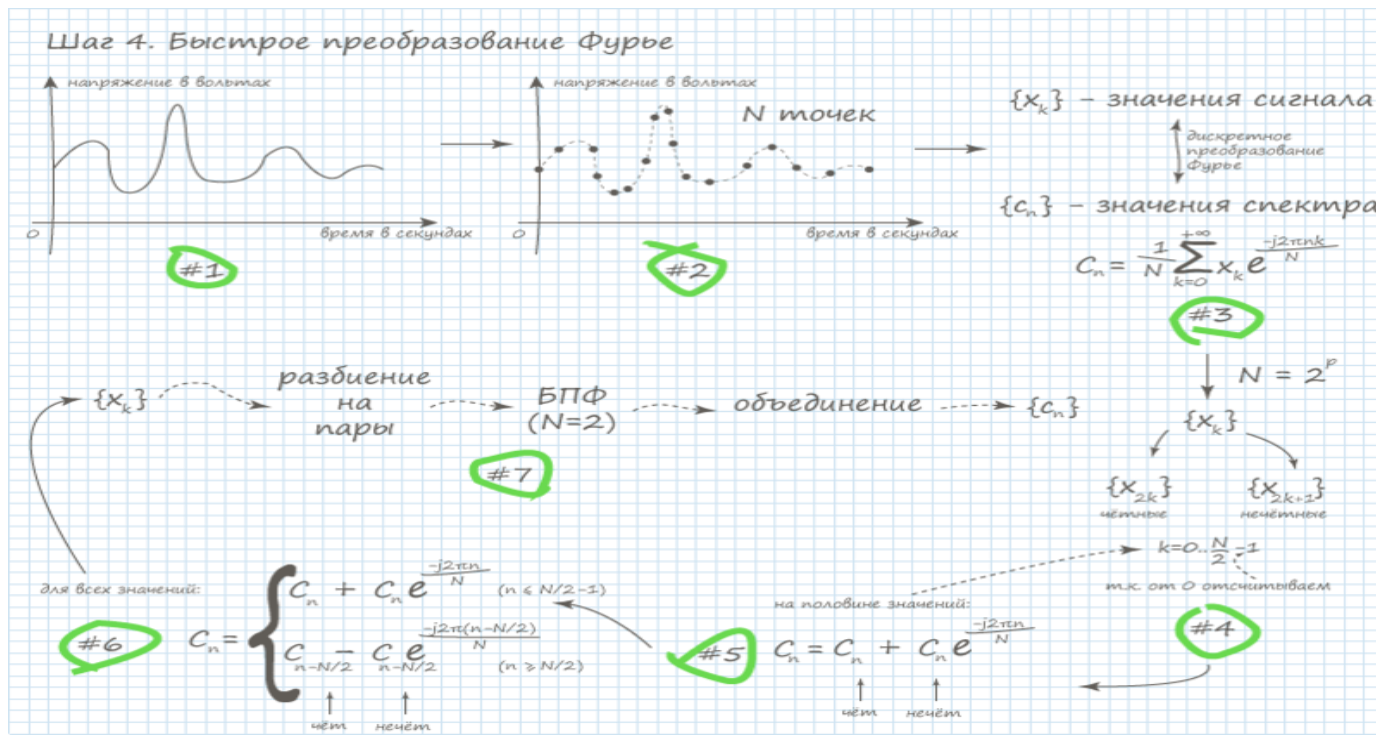


Рис. Преобразование Фурье как «чёрный ящик».

Дискретный сигнал — это набор чисел, взятых через определённый промежуток времени из значений аналогового сигнала. Дискретизация сигнала выполняется по определённым правилам (теорема Котельникова (Шеннона)). Связь между временными и спектральными составляющими определяется достаточно простой формулой:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N}$$



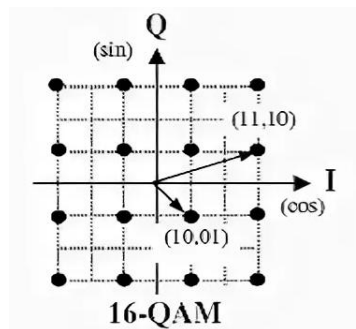
Проблемой является создание действительно быстрого алгоритма вычислений по этой формуле. На практике сигналы OFDM получаются путем использования **быстрого преобразования Фурье** - (Fast Fourier Transform, FFT).

1. Быстрое преобразование Фурье работает с дискретными сигналами - наборами чисел, взятых через определённый промежуток времени из значений аналогового сигнала.
2. Дискретизация сигнала выполняется по определённым правилам (теорема Котельникова - Шеннона).
3. Задача дискретного преобразования Фурье состоит в том,

чтобы получить **из комплексного массива временных отсчётов сигнала массив чисел спектра**. Эти числа являются коэффициентами при ортогональных функциях разложения, о которых говорилось выше (рис. 3).

4. **Алгоритм быстрого преобразования Фурье:** всю последовательность разбивают на две части - чётные и нечётные отсчёты. Длины полученных последовательностей составляют $N/2$.
5. Математическими преобразованиями показывается, что для отсчётов от 0 до $N/2$ справедлива одна формула (рис. 5). А для значений на второй половине отсчётов от $N/2$ до N справедлива другая формула. В итоге, полная формула для любого коэффициента показана на рис. 6.
6. Если из дискретного сигнала получать спектр «в лоб» (формула под номером 3 на рисунке), то на это потребуется выполнить N^2 умножений и N^2 сложений.
7. Если использовать выражение на рис. 6, то потребуется $2(N/2)^2 + N$ умножений. Это почти в два раза меньше. Разбиением каждой последовательности, вплоть до двухэлементных массивов, можно ещё больше уменьшить количество вычислений, рис. 7. Такая методика приводит примерно к $N \log_2 N$ операциям умножения. Например, для 1024 отсчётов количество операций умножения уменьшается в 100 раз!

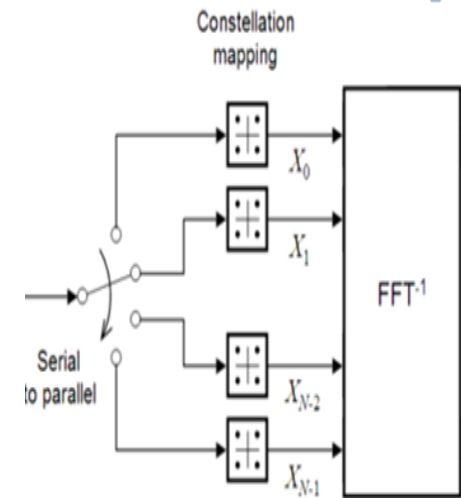
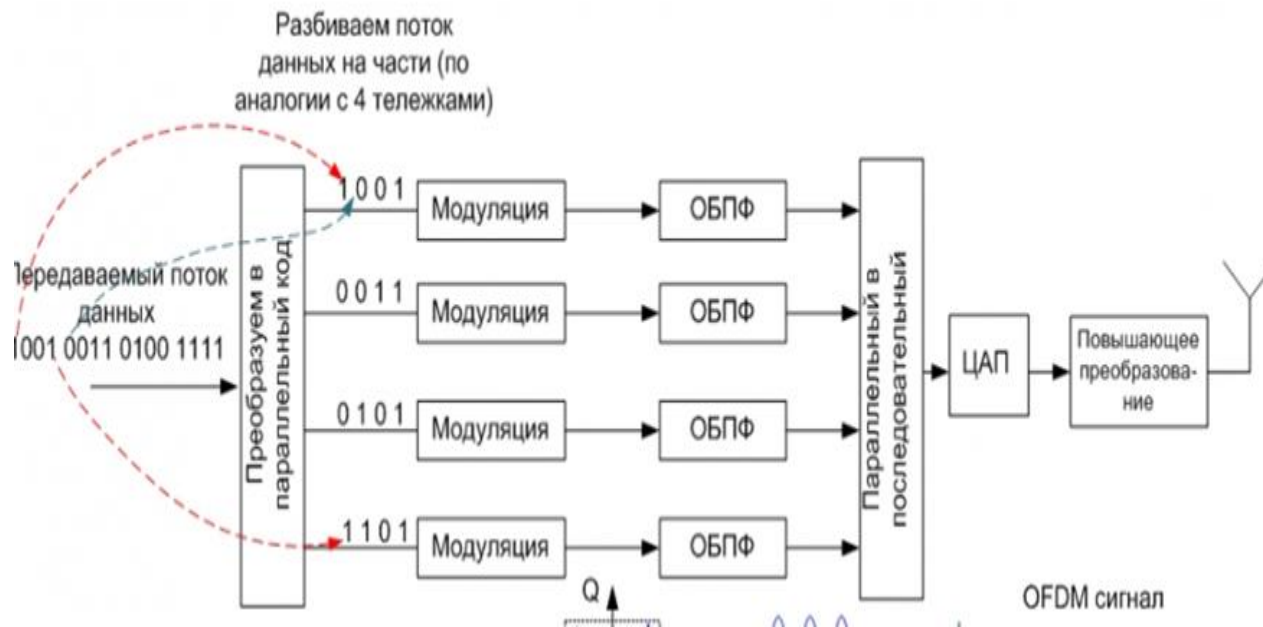
Получение OFDM с помощью **цифровой обработки сигналов** с БПФ: - создаётся искусственно спектр ортогональных сигналов, из которого обратным быстрым обратным преобразованием Фурье (IFFT) получается ортогональный временной сигнал - этот факт получается по определению преобразования Фурье. В отдельности формируются квадратурные сигналы как мнимая и реальная часть синтезируемого сложного сигнала, а затем происходит его «сборка» и передача в антенну.



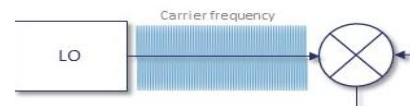
Для каждого из N подканалов DMT (от 6 до 256-го), соответствующие биты $4b_i$ (четыре при QAM16) транслируются кодером DMT в сложный символ созвездия QAM16 – X_{16} , с соответствующей амплитудой и фазой. Каждый символ X_{16} представлен на определенной частоте, с амплитудой и фазой соответствующими QAM модуляции и может быть рассмотрен как векторное представление процесса модуляции QAM на частоте несущей f_i . Каждая четверка бит представляют точку на сигнальной решетке QAM, присвоенную определенному каналу i в DMT символе. В результате получается N QAM векторов. Эти вектора по тактам ($T=1/40\,000$) изменяются в соответствии с очередной четверкой бит потока и «перемножаются» с цифровыми отсчетами генератора, образуя набор коэффициентов частотного спектра.

Далее, коэффициенты частотного вектора подаются на вход блока инверсного быстрого преобразования Фурье (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT, который выполняет роль модулятора). Данный набор преобразуется быстрым IFFT в коэффициенты временного разложения, т.е. сигнал из частотного преобразуется на временной интервал. И так для всех поднесущих. N выходов IFFT затем подаются на конвертер, преобразующий сигнал из параллельного в последовательный (уплотнение или мультиплексирование в 256 раз). Далее, осуществляется цифроаналоговое преобразование (ЦАП), аналоговая фильтрация и передача в тракт.

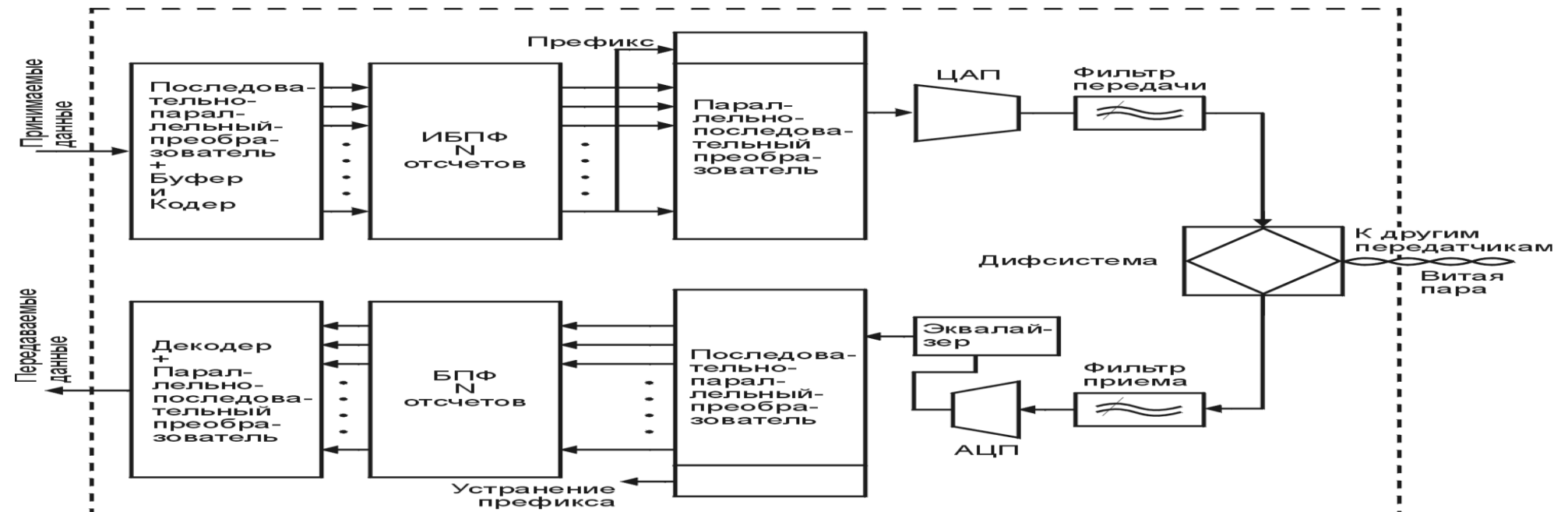
Сигнал OFDM — сумма нескольких ортогональных поднесущих, на каждой из которых передаваемые на основной частоте данные независимо модулируются с помощью одного из типов модуляции (BPSK, QPSK, 8-PSK, QAM и др.).



Перед обратным быстрым преобразованием Фурье (IFFT) этот поток преобразуется сначала в N параллельных потоков, скорость каждого в M раз меньше основного, после чего каждый из них модулирует i -ю цифровую поднесущую с помощью процедуры фазовой (BPSK, QPSK, 8-PSK) или амплитудно-фазовой квадратурной модуляции (QAM). Получается поток комплексных чисел. Потоки независимы, количество бит на символ в каждом потоке могут быть разными. Обратное FFT считается для N одновременно поступающих символов, создавая множество комплексных отсчетов во временной области. Далее, поток из параллельного превращается в последовательный и подается на цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП = DAC), которые преобразуют в аналоговый вид отдельно действительную и мнимую компоненты, после чего они модулируют, соответственно, радиочастотную косинусоиду и синусоиду. Эти сигналы суммируются и дают передаваемый сигнал.



Исходный сигнал после преобразования потока бит в спектр (в 4 амплитуды и 4 фазы на заданной частоте) и переданный в линию групповой сигнал имеют вид рис. ниже. Перед отправкой непосредственно в линию обработанный DMT- символ пропускается через **аналоговый полосовой фильтр**, который необходим для разделения по частоте направлений передачи от пользователя и к пользователю. С точки зрения направления передачи имеется система с частотным разделением каналов - FDM. Для приемника осуществляются обратные действия.



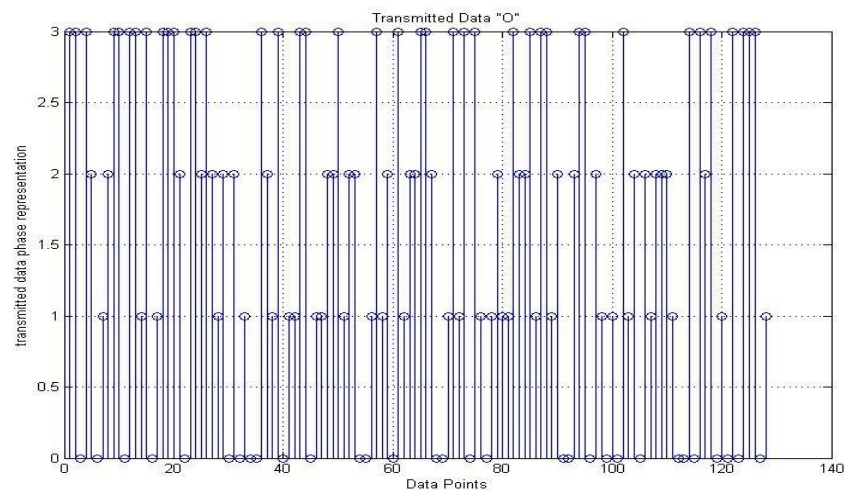


Рис. Для каждого из N подканалов DMT (от 6 до 256-го), соответствующие ему биты b_i (четыре при QAM16) транслируются кодером DMT в сложный символ X_i , с соответствующей амплитудой и фазой.
Рис. Приемопередатчик. **FEC**- избыточное кодирование

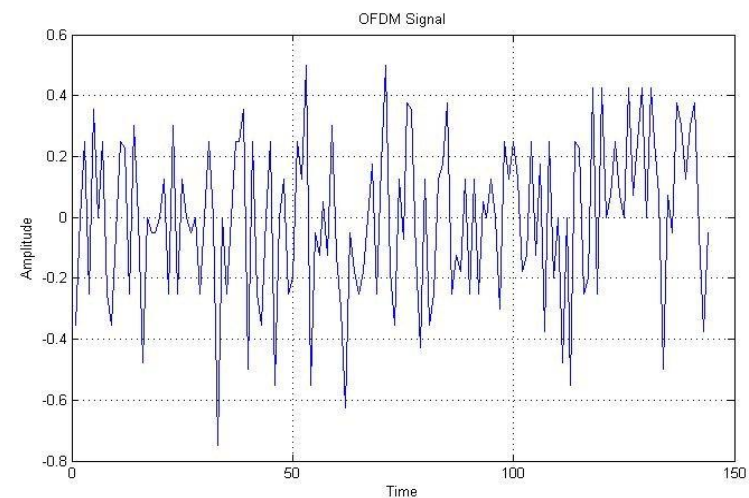
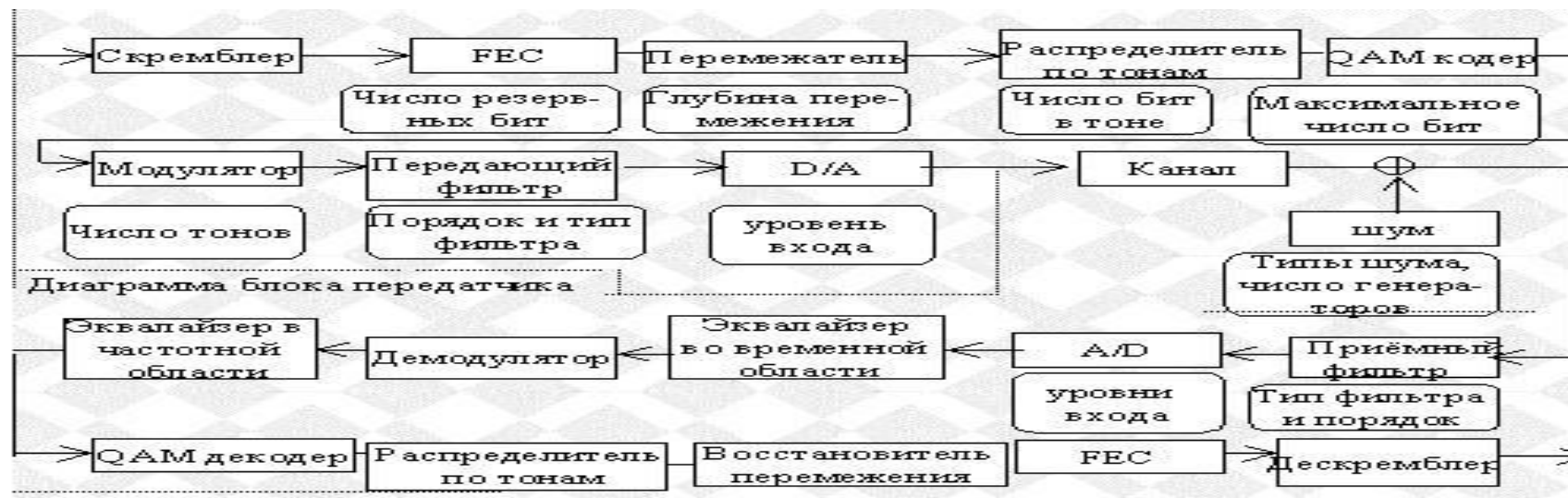
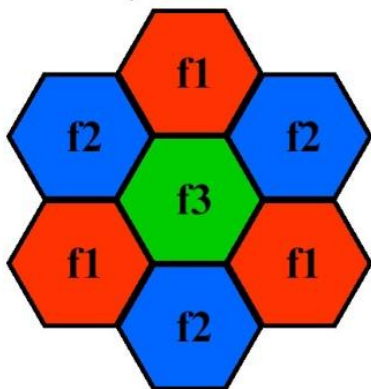


Рис. Сигнал, выдаваемый на линию



Кроме того, вводится **циклический префикс** — защита от нестабильности, ухода частоты и борьбы с переотражениями. Фактически, несколько десятков отчетов добавляются спереди и сзади к остатку DMT контейнера, чтобы исключить межсимвольные и межкадровые влияния. А после каждых 68 DMT символов передается один синхронизирующий для коррективки приёмника.

Итак, основные **приемы передачи цифрового сигнала** это: **передача бит группами** (для чего используют QAM, CAP), **кодирование** (обужение полосы, обрезание НЧ), **передача бит параллельными потоками (DMT, OFDM)**, не взаимодействующими друг с другом, **преобразование спектра сигнала, избыточное кодирование, скремблирование, цифровая фильтрация** и введение предискажений.



Проблемы цифровой беспроводной связи (на примере мобильных устройств).

В 1947 году произошло событие, которое послужило отправной точкой для создания **сотовой связи**. Сотрудник Bell Laboratories, Д. Ринг выдвинул идею сотовой организации сетей подвижной связи на основании принципа повторного использования частот. Именно он позволяет существенно повысить ее емкость и покрывать практически неограниченное пространство, применяя конечный набор частот. В распоряжении есть три частоты (f_1 , f_2 , f_3). В первой соте (ячейке) мы используем частоту f_1 . Во второй соте (ячейке) использовать ту же частоту мы не можем из-за явления интерференции — используем частоту f_2 . В третьей соте мы используем частоту f_3 , а в четвертой соте мы опять можем использовать частоту f_1 . Однако на практике реальный ландшафт, особенно городской, накладывает серьезные ограничения на геометрию зоны покрытия каждой базовой станции. Отсюда появление белых пятен на карте покрытия и мест с активной интерференцией, которая ведет к помехам.

«G1» — первое поколение беспроводных телефонных технологий и мобильных телекоммуникаций, **аналоговые** телекоммуникационные стандарты. Во

Характеристика	AMPS	TACS	NMT-450
Диапазон частот, МГц	825-845 870-890	935-950 (917-933) 890-905 (872-888)	453-457,5 463-467,5
Радиус соты, км	2-20	2-20	2-45
Мощность передатчика БС, Вт	45	50	-
Ширина полосы частот канала, кГц	30 (12,5)	25	25
Время переключения на границе соты, мс	250	290	1250
Минимальное отношение сигнал/шум, дБ	10 (6,5)	10	15

всех аналоговых стандартах применяется частотная (ЧМ) или фазовая (ФМ) модуляция для передачи речи и частотная манипуляция для передачи информации управления, никто не думал об услугах передачи данных. Первая коммерческая автоматизированная сотовая сеть (1G поколения) NTT (Nippon Telegraph and Telephone) была запущена в 1979 году в Японии, первоначально в столичном районе Токио. Фактическая эквивалентная скорость загрузки составляла от 2.9 Кбайт/с до 5.6 Кбайт/с. Первая в мире **автоматическая система мобильной связи** «Алтай» была запущена в Москве в 1963 году в виде полноценного телефона, устанавливаемого в автомобиле. По нему просто можно было говорить, как по обычному телефону (дуплексный режим).

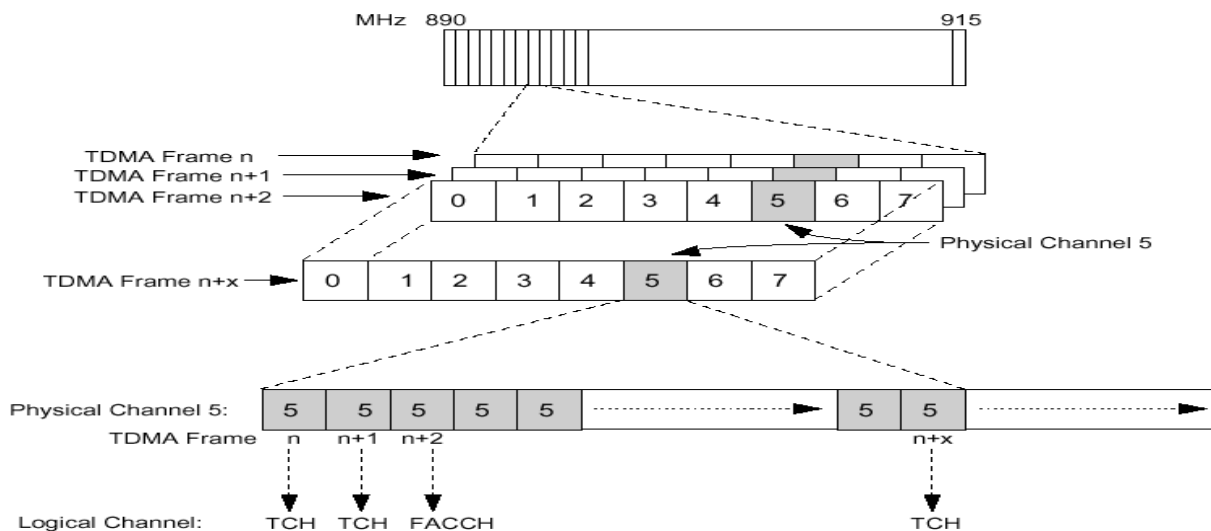
Чтобы позвонить на другой «Алтай» или на обычный телефон, достаточно было просто набрать номер — как на настольном телефонном аппарате.

Частоты передачи подвижной станции приема базовой станции, МГц	890-915
Частоты приема подвижной станции и передачи базовой станции, МГц	935-960
Дуплексный разнос частот приема и передачи, МГц	45
Скорость передачи сообщений в радиоканале, кбит/с	270, 833
Количество физических каналов TDM	8
Скорость преобразования речевого кодека, кбит/с	13
Ширина полосы канала связи, кГц	200
Максимальное количество каналов связи	124
Максимальное количество каналов, организуемых в базовой станции	16-20
Вид модуляции	GMSK
Индекс модуляции	BT 0,3
Ширина полосы предмодуляционного гауссовского фильтра, кГц	81,2
Количество скачков по частоте в секунду	217
Вид речевого кодека	RPE/LTP
Максимальный радиус соты, км	до 35

Основные характеристики «G2» - стандарта GSM (франц. Groupe Spécial Mobile). Телефонные разговоры были зашифрованы с помощью цифрового шифрования; система 2G представила услуги передачи данных, начиная с текстовых сообщений СМС. Емкость и дешевизна.

Стандарт GSM-900 предусматривает работу передатчиков в двух диапазонах частот. Полоса частот 890–915 МГц используется для передачи информации с мобильной станции. Полоса частот 935–960 МГц – для передачи информации с базовой станции на мобильную станцию. Разность между частотами передачи и приема постоянна и равна 45 МГц. Разнос частот между соседними каналами связи составляет 200 кГц. При этом в отведенной для приема/передачи полосе частот шириной 25 МГц размещаются 124 канала связи. Рассчитать частоту канала p можно по формулам:

$F_{tx} = 890 + 0,2 * n$ (МГц), где $1 < n < 124$; $F_{rx} = F_{tx} + 45$ (МГц), где F_{rx} и F_{tx} обозначают соответственно частоты приема и передачи. Мощность мобильного передатчика 1-2 Вт.



Мобильные телефоны системы GSM используют **принцип временного кодирования** сигналов с множественным доступом или TDMA (Time Division Multiple Access). Это значит, что при разговоре абонента сигналы от его телефона передаются короткими пачками импульсов — пакетами, которые включают помимо передаваемой информации и служебную. Соответственно, аналоговые сигналы перед подачей их на модулятор должны быть оцифрованы, и все сигналы — обработаны процессором, чтобы занять определенное для них в пакете место. На одном частотном

канале (в GSM ширина его полосы составляет 200 кГц) могут вести переговоры несколько абонентов одновременно с использованием еще и логического разделения каналов (по IP, MAC адресу). В пределах одной соты может быть задействовано 16-20 таких каналов.

Каналы в системе сотовой связи стандарта GSM делятся на два класса: логические и физические. **Физические каналы** характеризуются их частотными параметрами - диапазоном, частотами приема и передачи базовых и мобильных станций, временными параметрами используемых временных слотов при передаче информации от одного абонента к другому. Каждый физический канал это временной слот с определенным номером (от 1 до 8). Передача информации в канале организуется кадрами. Длительность кадра - 4,6 миллисекунды. В свою очередь кадр состоит из 8 слотов по 577 микросекунд, т.е. 8 физических каналов, разделенных по времени. Информационное сообщение передается по радиоканалу со скоростью 270,833 кбит/с. Длительность одного информационного бита $576,9 \text{ мкс} / 156,25 = 3,69 \text{ мкс}$.

Логический канал – правила разделения физического канала между абонентами, например, в одном диапазоне частот одновременно работают сотни сотовых телефонов, не особо мешая друг другу. Логический канал включает канал трафика, используемый для передачи речевой информации, и канал сигналов вызова, управления, синхронизации, идентификации соединения. Сигнал идентификации постоянно излучается каждой базовой станцией сотовой связи, а мобильная станция всегда ищет для соединения ту базовую станцию, принимаемый сигнал которой максимален.

Система синхронизации рассчитана на компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс, что соответствует максимальной дальности связи или максимальному радиусу соты 35 км. Пакеты формируются немного короче, чем интервалы (слоты 577 мкс), их длительность составляет 546 мкс, что необходимо для приема сообщения при наличии временной дисперсии в канале распространения. Сообщение, передаваемое в выделенном абоненту временном интервале TDMA кадра (577 мкс), **в каждом последующем кадре передается (принимается) на новой фиксированной частоте**. Скачкообразная перестройка частоты повышает эффективность кодирования при малой скорости перемещения мобильных станций, усредняет помехи одного канала между несколькими мобильными станциями и позволяет снизить требования к отношению сигнал/шум до 9 дБ. В процессе скачков по частоте постоянно сохраняется дуплексный разнос 45 МГц между каналами приема и передачи. В структуре GSM строго определены временные характеристики огибающей сигнала, излучаемого пакетами на канальном временном интервале TDMA кадра, и спектральная характеристика сигнала.

Обработка речи осуществляется в рамках принятой системы **прерывистой передачи речи (DTX)**, которая обеспечивает включение передатчика только при наличии речевого сигнала и отключение передатчика в паузах и в конце разговора. В качестве речепреобразующего устройства выбран речевой кодек с регулярным импульсным возбуждением/долговременным предсказанием и линейным предикативным кодированием с предсказанием (RPE/LTP). Речевой сигнал после цифро-аналогового преобразователя представляет собой цифровую последовательность, которая после преобразования ее в параллельный код, подается на синфазно-квадратурный модулятор. Последний позволяет получить сигналы с постоянной огибающей, отличающиеся от других высокими энергетическими характеристиками. Транскoder обеспечивает преобразование выходных сигналов канала передачи речи и данных MSC (64 кбит/с - ИКМ) к виду, соответствующему рекомендациям GSM по радиointерфейсу - 13 кбит/с.

Стандарт GSM содержит службы: основные службы и телеслужбы. Основные службы обеспечивают: передачу данных (асинхронно и синхронно) в дуплексном режиме со скоростями 300, 600, 1200, 2400, 4800 и 9600 бит/с через телефонные сети общего пользования, коммутируемые сети передачи данных общего пользования ISDN и DSL. Телеслужбы предоставляют следующие услуги: а) телефонная связь, б) служба сигнализации (охрана квартир, сигналы бедствия и пр.); в) передача коротких сообщений; г) доступ к службам "Видеотекс", "Телетекс", "Телефакс".

Межсимвольная интерференция и формирующий фильтр (предискажения).

В качестве исходного модулирующего сигнала выступает последовательность прямоугольных биполярных импульсов, рис. 1 для входного битового потока «10110100...». Однако такой модулирующий сигнал обладает спектром с очень низкой скоростью затухания боковых лепестков. Ширина главного лепестка $W=2 Br$, (где Br – скорость передачи цифровой информации (бит/с)), уровень максимального бокового лепестка -13 дБ, скорость затухания боковых лепестков $1/w$. Если же мы ограничим полосу исходного модулирующего сигнала, это в свою очередь приведет к более компактному спектру, но в результате фронты импульсов расширятся и появится **межсимвольная интерференция** (рис. 3). Она ухудшает качество передачи информации, но позволяет более компактно представить сигнал в частотной области.

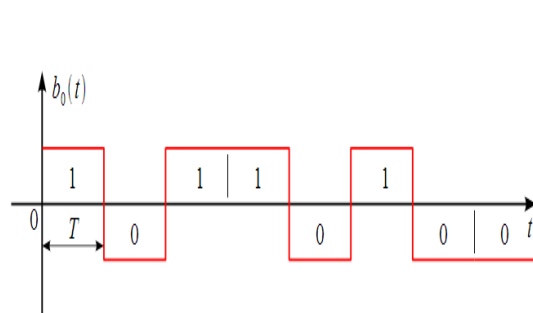


Рис. 1: Последовательность биполярных импульсов

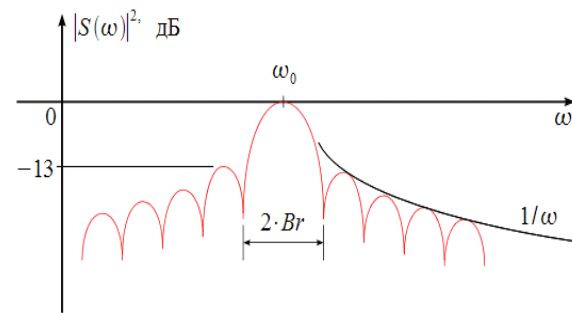


Рис. 2: Спектр сигнала

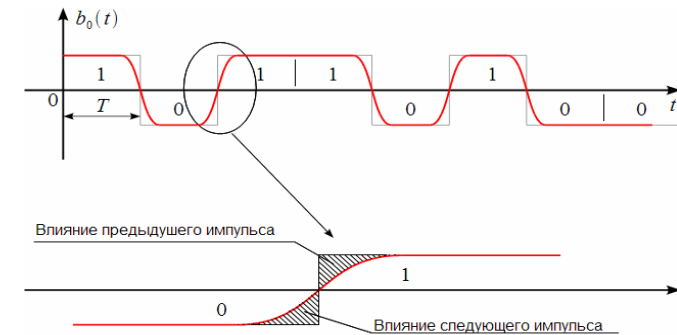


Рис. 3: Межсимвольная интерференция

Что бы сузить полосу сигнала, вносят предискажения в исходный модулирующий сигнал (импульсную характеристику $h(t)$ формирующего фильтра), с целью сужения его полосы. Оставляют лишь в определенные моменты времени значения сигнала неизменными и равными значениям передаваемой информации, чтобы на приемной стороне именно в эти моменты декодировать его без искажений.

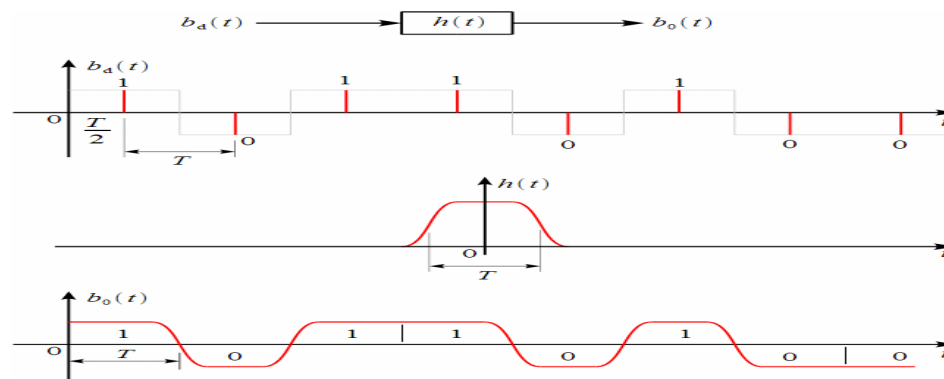


Рис. Декодирование искаженного сигнала

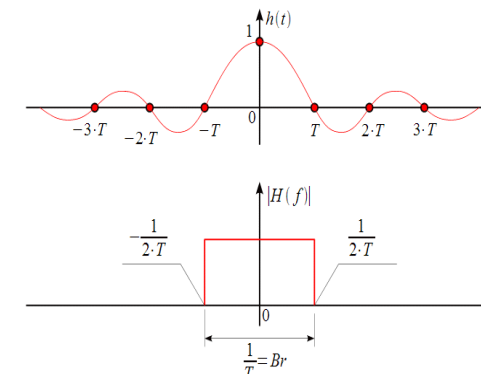
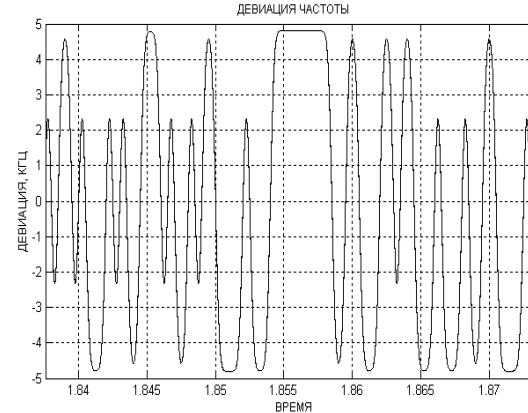
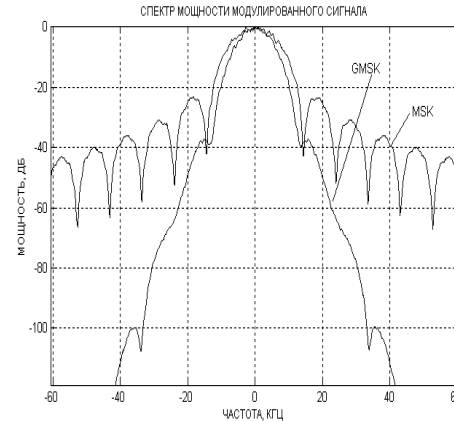
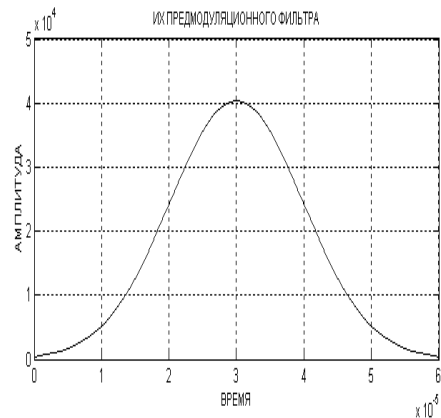


Рис. Идеальный фильтр

Идеальная импульсная характеристика является физически нереализуемой, ввиду бесконечных «хвостов», затухающих во времени как $1/t$, но она позволяет сформулировать теоретический предел передачи информации без МСИ. Для передачи информации без МСИ требуется не менее 1 Гц полосы на 1 бит/с скорости передачи информации. Например, в полосе 1 МГц без МСИ можно передать цифровой поток со скоростью не более 1 Мбит/с.

Гауссовская частотная модуляция с минимальным сдвигом (Gaussian Minimum Shift Keying-GMSK) использована в системах цифровой радиосвязи GSM, GPRS и др. и обеспечивает высокое качество передачи в относительно узкой полосе, занимаемой сигналом. Реализована в электронных компонентах Analog Devices, Texas Instruments, Infineon Technologies. **Имеет минимальный уровень излучения на боковых и зеркальных частотах и не мешает другим пользователям эфира.**



Девиация частоты сигнала

GMSK с $BT = 0.3$. Модулирующий сигнал получается путем преобразования информационного потока из вида 0/1 в вид $-1/+1$. Затем **последовательность из прямоугольных импульсов данных проходит через Гауссовский фильтр и подается на ЧМ модулятор** с индексом модуляции равным 0,5. Сужение полосы занимаемых частот достигается за счет предварительной фильтрации модулирующего сигнала фильтром низкой частоты с Гауссовской импульсной характеристикой. Ширина спектра сигнала GMSK определяется произведением длительности передаваемого символа на полосу пропускания Гауссовского фильтра - $BT = 0,3$, где B - ширина полосы фильтра по уровню минус 3 дБ, T - длительность одного бита цифрового сообщения.

Преимущества стандарта GSM:

- Меньшие по сравнению с аналоговыми стандартами (AMPS-800) размеры и вес телефонных аппаратов при большем времени работы без подзарядки аккумулятора.
- Хорошее качество связи при достаточной плотности размещения базовых станций.
- Большая ёмкость сети, возможность большого числа (до 1000) одновременных соединений.
- Низкий уровень промышленных помех в данных частотных диапазонах.
- Возможность роуминга - абонент одной из сетей GSM может пользоваться сотовым телефонным номером не только у себя «дома», но и перемещаться по всему миру переходя из одной сети в другую не расставаясь со своим абонентским номером. Процесс перехода из сети в сеть происходит автоматически, и пользователю телефона GSM нет необходимости заранее уведомлять оператора.

Недостатки стандарта GSM:

- Связь на расстоянии не более 35 км от ближайшей базовой станции
- Недостаточная скорость для передачи изображений, работы в Интернете.

В стандартах **третьего поколения (3G)** главным требованием стало обеспечение **видеосвязи** хотя бы в разрешении **QVGA (320x240)**, для чего необходимо достичь пропускной способности передачи цифровых данных не менее **384 Кбит/с**. Для решения этой задачи можно использовать полосы частот увеличенной ширины (W-CDMA, Wideband CDMA) или большее количество задействованных одновременно частотных каналов с кодовым разделением (CDMA2000).

Физический уровень UMTS/WCDMA (3G) полностью отличается от решений, применяемых в GSM. Он использует технологию расширения спектра передачи в виде, применяемом в CDMA, а не технологию TDMA, которая применяется в GSM. Кроме того, UMTS работает в другом диапазоне частот. Шесть полос частот, кроме диапазонов 1885-2005 и 2110-2200 МГц. Каждый канал занимает диапазон 5 МГц. Для передачи информации от узла В к UE и в обратном направлении применяются различные способы модуляции. Для передачи от узла к пользователю применяется квадратурнофазовая манипуляция (QPSK). Для передачи в обратном направлении используются два отдельных канала для того, чтобы прямые и обратные линии передачи речи не влияли друг на друга. Передаваемые данные кодируются расширяющим кодом, конкретным для каждого пользователя. После такого кодирования информацию может расшифровать только желательный получатель. Все другие появляющиеся сигналы отделяются как шум. Это позволяет нескольким пользователям одновременно использовать один радиочастотный канал. Скорость передачи равна 3,84 Мчип/с. При использовании QPSK возможна передача двух бит на каждый символ (чип) - скорость в канале будет равна 7,68 Мбит/с. Имеются две ступени расширения: первая ступень — коды на основе ортогональных кодов с переменным коэффициентом расширения (OVSF — Orthogonal Variable Spreading Factor codes), и вторая — на основе псевдослучайных чисел.

Основные преимущества CDMA: отличное качество звука и крайне низкий уровень фоновых шумов; широкоэмиттерный сигнал CDMA обеспечивает охват большей территории; улучшает **качество связи в перенаселенных районах и местностях с холмистым рельефом**, где возникают помехи от отраженных сигналов; увеличивает емкость системы, "виртуально" отсеивая занятые, перекрестные и повисшие вызовы; **емкость CDMA в 3 раза больше чем у TDMA**; аппараты CDMA обычно работают на меньшей мощности, что позволяет использовать более портативные аппараты с более длительным временем работы без подзарядки. CDMA использует более 4,4 триллиона кодов для разделения индивидуальных вызовов, обеспечивая полную защиту и предотвращая несанкционированные подключения. Стандарт лучше других подходит для передачи цифровых данных; возможна передача голоса и факса по одному каналу, нет искажений речи при переходе от одной базовой станции к другой (мягкий handoff).

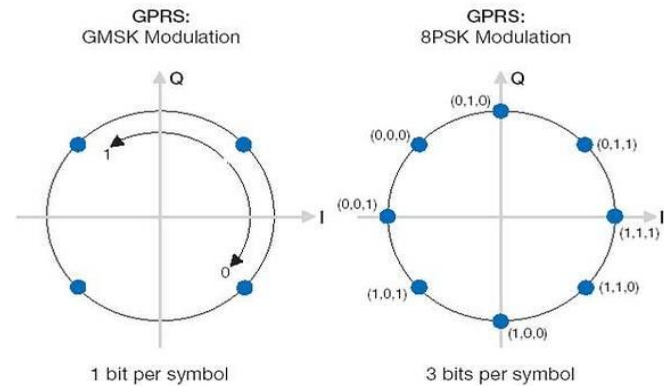
Однако, на сети третьего поколения почти никто не перешел. Причиной тому несовместимость с аппаратурой поколения 2G, дороговизна телефонных аппаратов и дороговизна эфирного времени, малое время автономной работы из-за чрезмерно высокой (по сравнению с аппаратами второго поколения) нагрузки при передаче больших объемов данных. Одновременно, стандарт второго поколения GSM получил поистине глобальное распространение. Не воспользоваться ситуацией было бы неправильно как с точки зрения операторов, которым хотелось бы увеличить среднюю выручку с одного абонента и обеспечить предоставление сервисов, конкурентоспособных с сервисами 3G-сетей, и пользователей, ожидающих дешевый мобильный доступ в интернет. Поэтому был придуман **эволюционный подход**, конечной целью которого было превратить GSM в стандарт третьего поколения. **LTE** (долгосрочная эволюция) - это переход к стандартам беспроводной мобильной связи 4-го поколения (4G). К физическому уровню **LTE** предъявляются высокие требования: скорость передачи до 100 Мбит/с в нисходящем канале и 50 Мбит/с в восходящем, эффективное использование спектра, несколько частотных каналов на полосе 1,25...20 МГц. Для выполнения этих требований была выбрана технология **мультиплексирования с ортогональным частотным разделением сигналов (OFDM)**. Кроме того, в сетях LTE используется технология MIMO

Сначала была внедрена технология передачи данных **GPRS** (General Packet Radio Service), закрепившая переход к пакетному подходу, а потом — технология **EDGE** (EGPRS). Стандарт GSM с технологией GPRS занимает промежуточное положение между вторым и третьим поколениями связи, по нему нередко называется вторым с половиной поколением (2,5G). Технология EDGE играет сразу две роли: обеспечивает более высокую пропускную способность для передачи и приема данных, и служит еще одним шагом на пути от GSM к 3G. EDGE не является новым стандартом сотовой связи, однако подразумевает дополнительный физический уровень, который может быть использован для увеличения пропускной способности сервисов GPRS до 384 Кбит/с с использованием новой модуляционной схемы, новых методов кодирования каналов и коррекции ошибок. По сути, EDGE является «надстройкой» к GPRS и подразумевает использование иных модуляционных и кодовых схем, сохраняя совместимость с сервисом голосовой связи. В

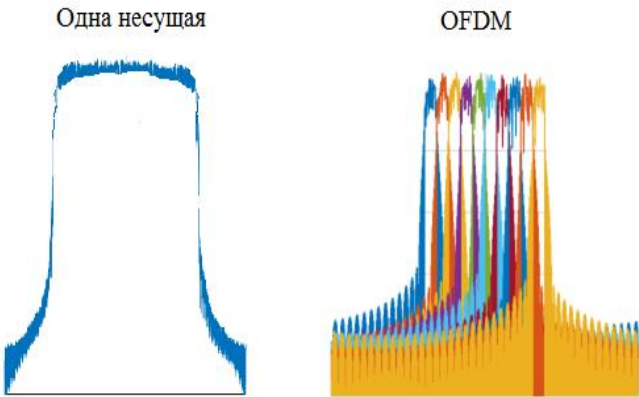
EDGE и в GPRS в единицу времени отправляется одинаковое число символов, однако благодаря использованию другой модуляционной схемы, число бит данных в EDGE втрое больше.

Таблица 1. Сравнительные характеристики EDGE и GPRS

	GPRS	EDGE
Модуляционная схема	GMSK	8-PSK/GMSK
Скорость передачи символов	270 тыс. в секунду	270 тыс. в секунду
Пропускная способность	270 Кбит/с	810 Кбит/с
Пропускная способность на тайм-слот	22,8 Кбит/с	69,2 Кбит/с
Скорость передачи данных на тайм-слот	20 Кбит/с (CS4)	59,2 Кбит/с (MCS9)
Скорость передачи данных с использованием 8 тайм-слотов	160 (182,4) Кбит/с	473,6 (553,6) Кбит/с

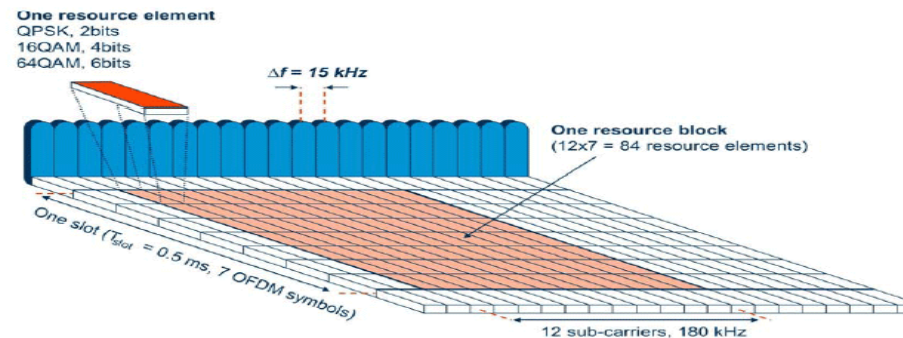
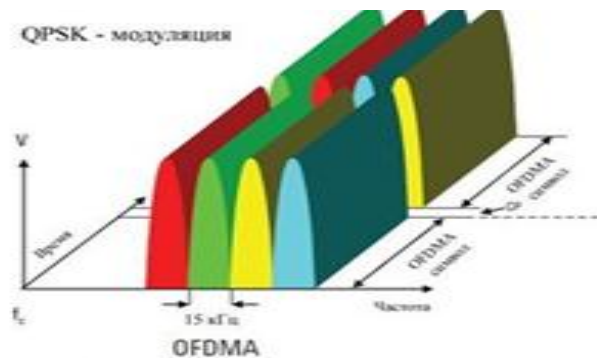


Стандарт G4 (LTE)



OFDM предполагает, что информационный битовый поток делится среди нескольких тысяч поднесущих, по которым данные передаются параллельно. Высокоскоростной битовый поток разделяется на несколько более медленных параллельных потоков. Расстояние между поднесущими 15 кГц, при соотношении сигнал/шум порядка 20 дБ пропускная способность одного подканала примерно 100 кбит/с. При 1024 поднесущих общая пропускная способность примерно соответствует 100 Мбит/с. Ортогональность поднесущих вытекает из свойств БПФ – если нет межсимвольной интерференции во временной области, то ортогональны и разложения в частотной.

Во временной области «**шеренги**» с разным частотным заполнением сменяют друг друга, образуя пакеты (слоты). Кадр состоит из 20 слотов.



Весь каналный ресурс разбивается на **ресурсные блоки (РБ - по частоте и времени)**. Один блок состоит из 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц, и одного временного слота, включающего 6 или 7 OFDM символов общей длительностью 0.5 мс. Каждый OFDM символ на каждой из поднесущих образует *ресурсный элемент (РЭ)*, который характеризуется парой значений $\{k, l\}$, где k - номер поднесущей, l - номер символа в ресурсном блоке. Ортогональность частот обеспечивает отсутствие межсимвольной интерференции. Частотные «шеренги» при помощи обратного преобразования Фурье преобразуются в временные последовательности, переводятся в последовательный поток в виде 2048 выборок, проходят ЦАП преобразование и излучаются.

МИМО (пространственное кодирования сигнала, позволяющее увеличить полосу пропускания канала, передача и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн), это позволяет увеличить емкость канала и повысить надежность сигнала. Техника Wi-Fi MIMO использует неоднородность помещений и эффекты отражения, что позволяет сделать потоки данных независимыми. В чистом поле MIMO даст гораздо меньше эффекта, чем в офисе.

На сетевом уровне **LTE** работает полностью на базе IP технологий, а на физическом уровне (в радиоканале) применяется **ортогональное частотное уплотнение с модуляцией 4-8-ФМ, 16-32-64-QAM**. Количество поднесущих N лежит в диапазоне 128—2048 в зависимости от ширины канала. На практике чаще всего используется 512 или 1024 поднесущих для полос 5 и 10 МГц, соответственно. Основной принцип OFDM заключается в разделении высокоскоростного потока данных на несколько низкоскоростных потоков и передача эти потоки одновременно, задействуя несколько поднесущих.

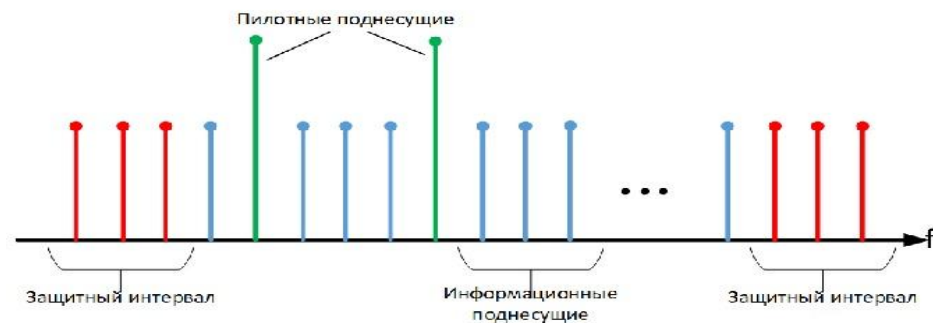
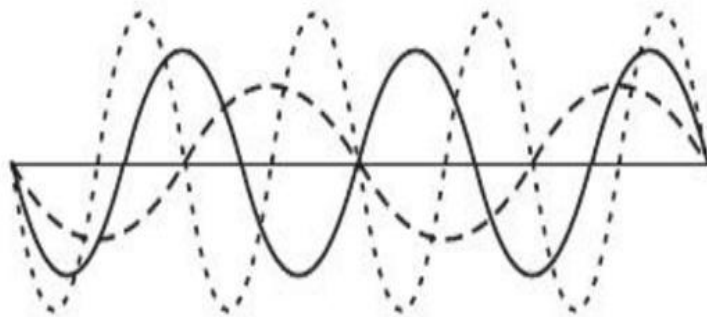
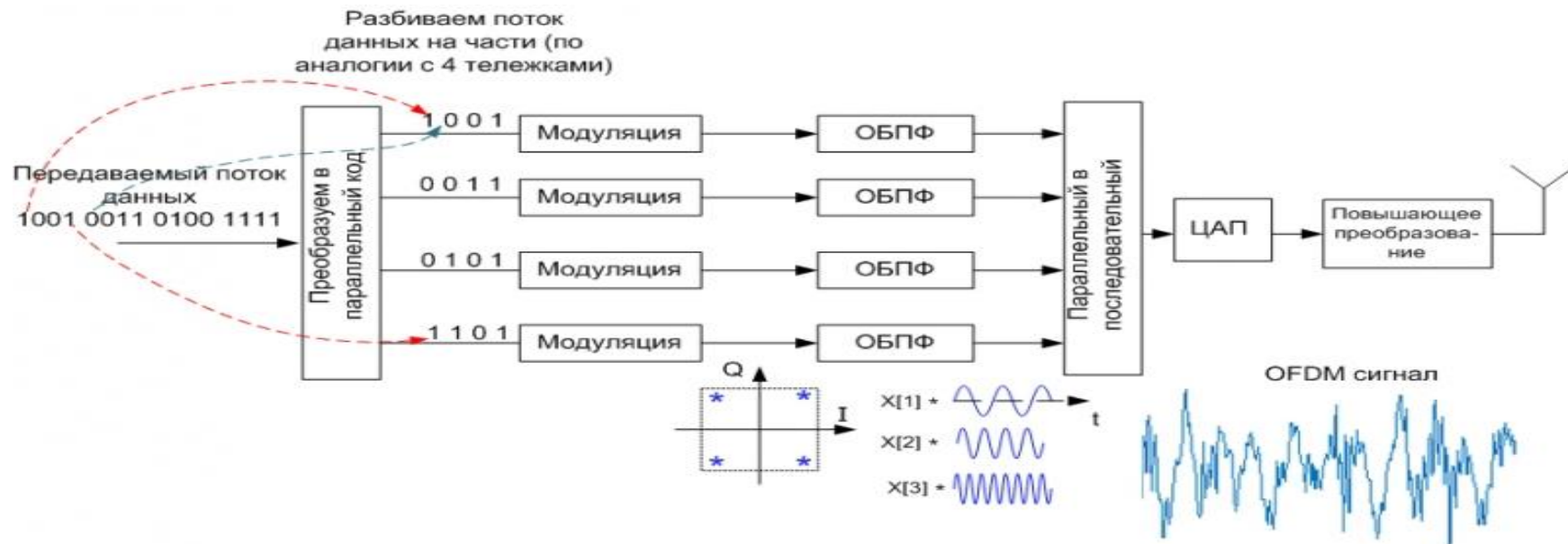


Рис. Структура OFDM-символа во временной области

Рис. Структура OFDM-символа в частотной области

Ввиду того, что ОБПФ работает эффективно с массивами размерности 2^k , количество поднесущих выбирается аналогичной кратности. Например, в WiMAX число поднесущих выбирается от 128 до 2048 и может занимать полосы частот от 1,25 МГц до 20 МГц. Для каждой из поднесущих используется свой формат модуляции в зависимости от величины помех в канале.

Таблица 1. Параметры нисходящего физического уровня LTE

Ширина канала, МГц	1,25	2,5	5	10	15	20
Длительность кадра, мс	10					
Длительность субкадра, мс	1					
Расстояние между поднесущими, кГц	15					
Частота выборки, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Размер БПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Количество поднесущих (в т. ч. постоянный сигнал)	76	151	301	601	901	1201
Защитные поднесущие	52	105	211	423	635	847
Количество ресурсных блоков	6	12	25	50	75	100
Ширина канала, МГц	1,140	2,265	4,515	9,015	13,515	18,015
Эффективность использования полосы, %	77,1	90				
OFDM символы/субкадр	7/6 (короткий/длинный префикс)					
Длина короткого префикса, мкс	5,2 (первый символ)/4,69 (остальные шесть)					
Длина длинного префикса, мкс	16,67					

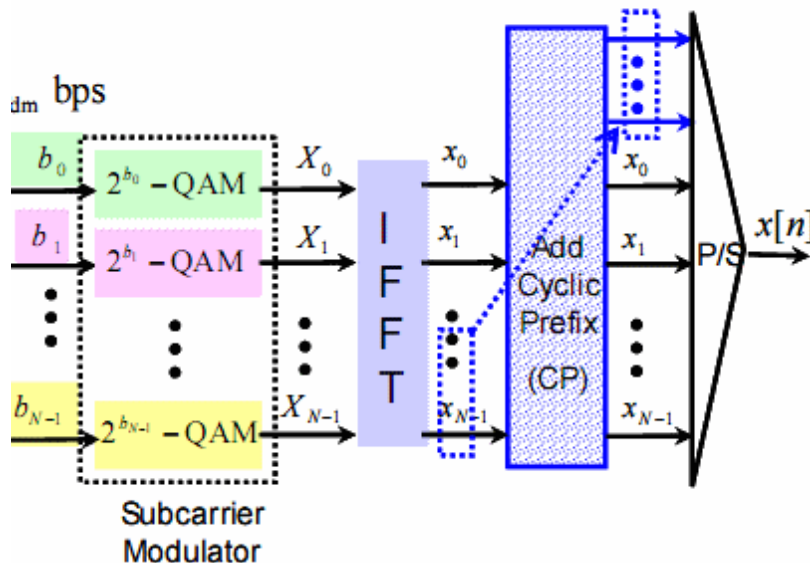
Преимущества OFDM:

- способность противостоять сложным условиям в радиоканале, устранять межсимвольную интерференцию и бороться с узкополосными помехами;
- высокая спектральная эффективность.
- адаптивность метода – возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих;
- простая реализация методами цифровой обработки;
- способность противостоять интерференции между поднесущими при многолучевом распространении.

Недостатки OFDM:

- требуется высокоточная синхронизация по времени и по частоте;
- использование защитных интервалов снижает спектральную эффективность метода;
- метод чувствителен к эффекту Доплера.

Текущее применение OFDM. В беспроводных системах связи Wi-Fi, WiMax, LTE, в наземных системах цифрового телевидения DVB-T, в системах кабельного телевидения DVB-C, в технологии кабельного интернета DSL .



Циклический префикс. Ясная и понятная идея FFT на практике выливается в довольно проблемную вещь - выделение тактовой частоты в условиях дрейфа, замираний, переотражений, наличие эффекта Доплера на подвижных объектах. Все это накладывает серьезные ограничения на OFDM. В частности, разнос частот должен быть хотя бы в 10 раз больше ожидаемого ухода частоты по любым причинам, включая и Доплер. Переотражения и нестабильность АЧХ-ФЧХ общего канала размывают начало смены символов, затрудняя тактовую синхронизацию.

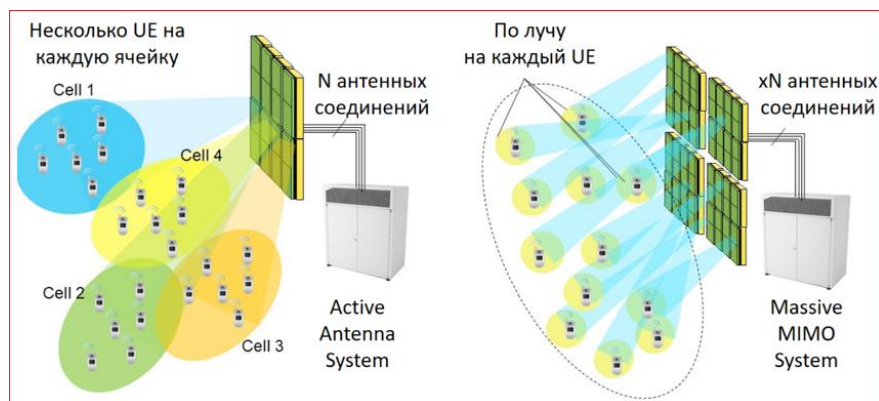
В качестве первой меры для борьбы с этим явлением, использовали **защитный интервал в виде дополнения нулей** в начало получающегося фрагмента вещественного сигнала после IFFT, это позволяло, во- первых, четко выделять такты,

во вторых во время "молчания" оценить шум общего канала. Второй мерой было предложено вместо нулей просто **копировать** (добавлять) часть отсчетов из конца сформированного вещественного сигнала после IFFT в начало следующего. Идея в том, что в результате искажений будет поражен префикс, а сам символ будет принят без искажений. Циклический префикс снижает реальную скорость передачи и выбор его величины это борьба противоречий. Чем он больше, тем надежнее сигнал и он лучше противостоит различным дестабилизирующим факторам, но тем ниже реальная скорость манипуляции и передачи в целом. Наличие циклического префикса "раздвигает" частоты на спектре OFDM и нарушает условия ортогональности, разнос сетки частот при его использовании не равен скорости манипуляции, но на приеме, после его удаления, статус - кво восстанавливается полностью.

Технологии 5G. В сетях 5G планируется работа колоссального количества устройств, начиная от кофемашин, холодильников и заканчивая автомобилями, поэтому необходимо серьезное улучшение основных параметров беспроводных сетей, увеличение скорости передачи данных к множеству абонентов, увеличение ёмкости сетей и уменьшение задержек. Ключевой особенностью для привлечения абонентов сетей четвёртого поколения (4G) стала высокая скорость. Но, не стоит также забывать о таких параметрах как ёмкость сети, задержки при передаче пакетов и прочих факторов. Добиться этого планируется

- а) **увеличением пропускной способности** сети более 10 Гбит/сек.; - количеством одновременных подключений до 100 миллионов устройств на 1 квадратный километр; - обеспечение уменьшения задержки в сети до 1 мс; - выделение каждому сервису определённой ёмкости ресурса.

- б) переходом к модели сети, где **главным является абонент, а не базовая станция**. В существующих сетях абоненту приходится самому подстраиваться под сеть: сигнал слишком слабый – передвинься. В сетях пятого поколения будут применяться умные антенны, способные менять диаграмму направленности в зависимости от потребностей абонентов в конкретных условиях. К примеру, если в соте в данный момент времени обслуживается один абонент, данные для него будут идти по узконаправленному каналу, что повысит отношение сигнал/шум и позволит повысить скорость передачи данных. **Технологии типа MIMO** - использование нескольких антенн на передающей и принимающей сторонах. Эта технология появилась еще в спецификациях, относящихся к третьему поколению. В большинстве сетей LTE MIMO работает в режиме 2x2, то есть две антенны на передачу, две на прием. Данные передаются сразу по двум независимым каналам, что позволяет увеличить скорость передачи почти в два раза. На данный момент существуют смартфоны, поддерживающие режим 4x4. К сожалению, увеличивать число антенн до бесконечности невозможно в силу небольших габаритов смартфонов и передачи служебных сигналов от каждой антенны, что снижает эффективность технологии.



- в) **переход в область миллиметровых волн**. Спектральный ресурс ограничен и найти необходимые частоты в традиционных для мобильной связи диапазонах крайне трудно. Естественно, что для значительного увеличения скорости передачи данных потребуются гораздо большие диапазоны частот. Логичным выходом из данной ситуации является переход в область десятков ГГц (не везде и не всегда).

- г) реализация **технологии device-to-device** для общения абонентов в десятках метров друг от друга. Через сеть оператора будет проходить только сигнальный трафик, позволяющий тарифицировать такие вызовы, а сами данные будут проходить напрямую между устройствами.

5G сети будут использоваться в местах, где есть **спрос на высокоскоростной Интернет**, в части городов. Для общего покрытия будут использоваться сети предыдущих поколений. Если представить схематично, это будет выглядеть так:

Сети 5G

Сети 3G 4G

Sky Office. На ранней стадии коммерческого развертывания 5G, за исключением смартфонов, ожидается, что ключевым 5G продуктом станет именно ноутбук с подключением к Sky Office. – концепция переноса вычислительных мощностей ноутбука в облако, при оснащении ноутбука встроенным 5G модемом. В облаке могут размещаться не только файлы пользователя (Cloud Drive), но и программное обеспечение, такое как MS Office 365 (Cloud Office) или игровые программные продукты (Cloud Games). В этой концепции ноутбук становится экраном с клавиатурой и камерой.

Виртуализация в 5G-сетях. Внедрение "Интернета вещей" в сети пятого поколения 5G позволит не только взаимодействовать в единой сети кругу бытовых гаджетов и устройств (смарт-часы, устройства VR, планшеты и смартфоны), но и позволит охватить все сферы деятельности человека (технология умный дом и умный город). Интернет вещей - это не просто множество различных приборов и датчиков, объединенных между собой проводными и беспроводными каналами связи и подключенных к сети Интернет, это более тесная интеграция реального и виртуального миров на основании технологий «беспроводные сенсорные сети» и метод автоматической идентификации объектов (RFID).

В основу всего этого будет положена **технология SDN** - сеть передачи данных, в которой уровень управления сетью отделен от устройств передачи данных и реализуется программно, и NVF - технологии виртуализации целых классов функций сетевых узлов в виде составных элементов, которые могут быть соединены вместе или связаны в цепочку для создания телекоммуникационных услуг (сервисов). За счет виртуализации сети появляется возможность организации такой функции как "сети по запросу". Под организацию конкретной задачи сети (сеть смартфонов, умный дом и т.д.) существуют уже готовые решения с набором параметров и конкретным оборудованием.



Рисунок 1 - Охват технологии 5G в жизни человека

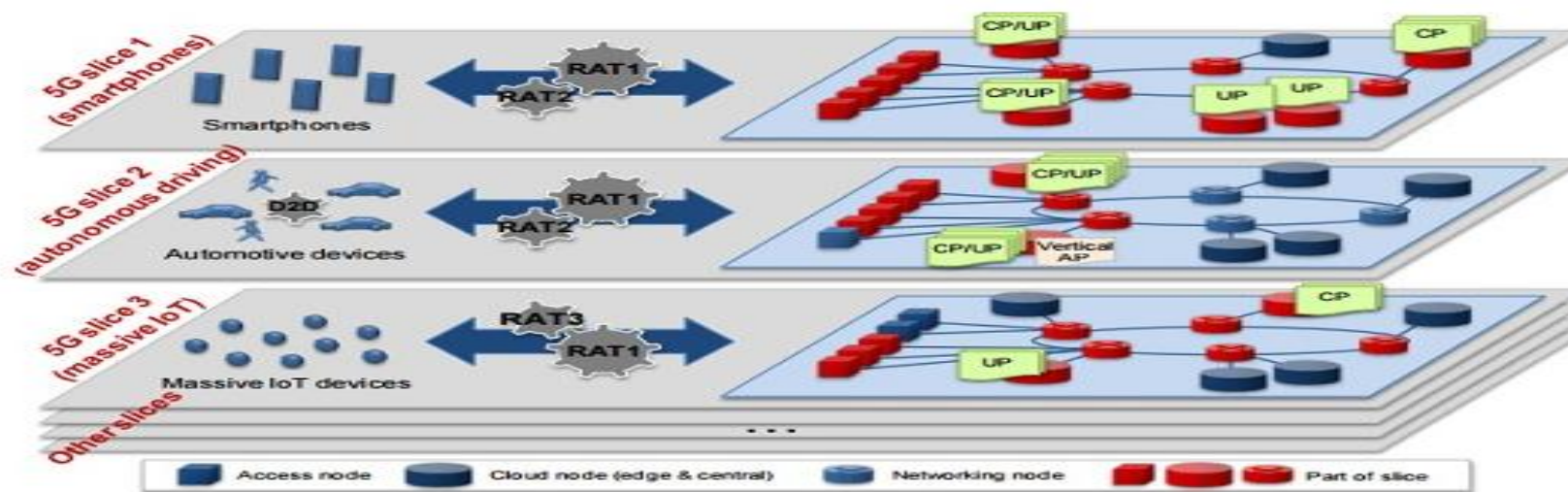
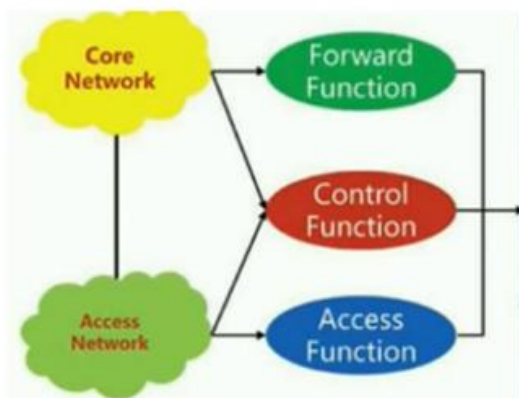


Рисунок 3 - Сети по запросу в 5G



Архитектура сетей пятого поколения. Радиопокрытие сети будет подстраиваться под нужды абонентов в отличие от сетей прошлого поколения. Планируется использование всего доступного частотного диапазона, в частности использование миллиметрового диапазона на коротких расстояниях. Предстоит выделить три подсистемы (облака):

Облако доступа (Access) - подразумевает включение как распределенных, так и централизованных технологий и систем доступа, совместимых с сетями 4G и 3G;

Облако управления (Control) - управление сессиями, мобильностью и качеством услуг;

Транспортное облако (Forward) - физическая передача данных в сеть с высокой надежностью, скоростью и балансировкой нагрузки.

Радиоинтерфейс. Что касается радиоинтерфейса 5G, то планируется увеличение спектральной эффективности в 3 раза по сравнению с сетями четвертого поколения (4G). Это способствует тому, что при одной и той же ширине полосы пропускания передается до 3 раз больше данных, то есть около **6 бит/сек на 1 Гц**. Новый радиоинтерфейс планируется быть гибким, легко конфигурируемым и обратно совместимым с сетями 4G и 3G. Компанией Huawei было предложено следующее решение для нового интерфейса:

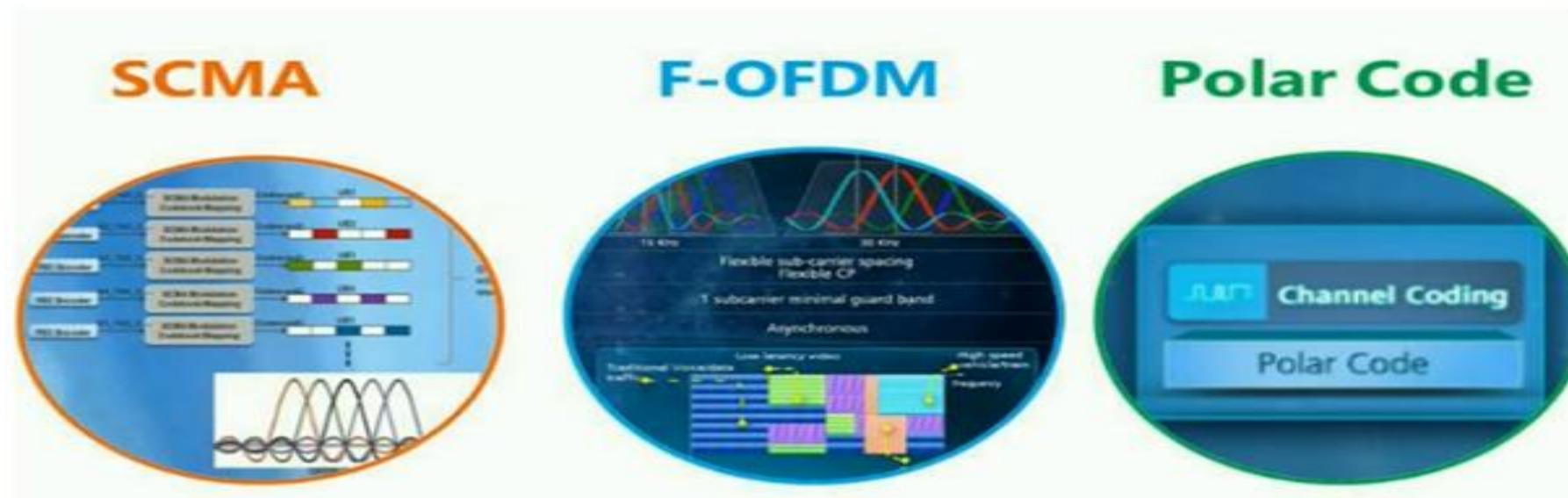


Рисунок 6 - Базовые технологии для радиointерфейса в 5G по мнению компании Huawei
Как видно из рисунка, предполагается применение следующих технологий:

SCMA (Sparse Code Multiple Access) - **разделение абонентов на базе разреженного кода**, при этом нет необходимости в подтверждении о доставке. В этой технологии битовые потоки разных пользователей в одном частотном ресурсе, напрямую преобразуются в кодовое слово при помощи кодовой книги из определённого набора. Эти коды условно называются квазиортогональными, количество этих кодов большое и имеет двухмерную структуру. Положительным эффектом помехоустойчивого кодирования является либо снижение вероятности ошибки, либо снижение энергетики передачи при той же вероятности ошибки, либо и то, и другое одновременно. Кодирование расширяет возможности компромисса между полосой и энергетикой канала, присущего любой системе связи.

Polar Code - линейный корректирующий код, основанный на явлении поляризации канала.

F-OFDM (Flexible OFDM) - усовершенствованная технология OFDM позволяющая организовать **гибкое разбиение на поднесущие**, гибкое изменение длины символов и гибкое изменение циклического префикса. То есть под каждую задачу будет использоваться свой набор параметров.

M2M/D2D - передача информации напрямую между устройствами (машинами, девайсами) без участия человека. Расширение покрытия за счет устройств абонентов Построение децентрализованной сети;

High frequency communication - частоты ниже 6 ГГц будут первичными диапазонами для сети 5G. Частоты выше 6 ГГц для универсального доступа и магистральной связи. Как видно из рисунка ниже, планируется задействовать частотный диапазон вплоть до 100 ГГц;



Рисунок 13 - Частотный план 5G

Управление сетями в 5G будет осуществляться за счет разрабатываемой **Telecommunication OS**. То есть различные отрасли и категории пользователей будут использовать одну операционную платформу для доступа к инфраструктуре сети.

Современный процессор — это система из **разных вычислительных ядер** (CPU - Cortex, Kryo и т.д.), графического ускорителя — **GPU**, блоков обработки видеоданных **VPU**, вывода на дисплей (**DPU**), модуля GPS, вычислителей для датчиков и обработки изображений с камер (обработки изображений **ISP**), нейронный процессорный модуль **NPU** с принципами машинного обучения, Встроенный модем **LTE ADVANCED PRO** поддерживает скорости свыше 1 гбит/с. Позволяет одновременно работать в сетях 4G сразу двум SIM-картам в комбинации 4G + 3G / 2G и в обратную сторону. Интерфейс поддерживает **видео формата 4K**, **возможности обнаружения лиц** и захват движения, гибридный **автофокус** и **четкая съемка движущихся объектов в условиях плохой видимости**.

В конце 2018 года, появился чип, который претендует на первое место по сумме всех своих качеств: **Kirin 970**

- 8 ядер: 4 из которых Cortex A53 и работают на частоте 1,8 ГГц, 4 других — Cortex A73 — 2,4 ГГц; - 10 нм технологии (980 – 7 нм).
- 12-ядерный видеоускоритель Mali G72MP12
- NPU 1.92T FP16 OPS – нейронный процессор, для обработки приложений, использующих технологии искусственного интеллекта.
- обработчик изображений Image DSP 512-бит SIMD
- оперативная память типа LPDDR4X
- модуль памяти UFS 2.1
- встроенный модем с поддержкой большинства современных полос LTE (Cat. 18, скорость до 1,2 Гбит/с)
- Hi-Fi аудиочип 32-бит / 384K

«Монстр» **Qualcomm** (Snapdragon 845, 865 - восьмиядерный чипсет, изготавливается по 10-нанометровому техпроцессу. Он имеет 4 ядра Kryo 385 Gold (Cortex-A75) на 2800 МГц и 4 ядра Kryo 385 Silver (Cortex-A55) на 1500 МГц) прыгнул по качеству исполнения на высоты для конкурентов недоступные, после чего Broadcom, Intel, Marvell, NVIDIA и Texas Instruments исчезли из поля зрения. Вычислительные модули для расчётов ИИ

— цифровой сигнальный процессор Hexagon 685 (DSP), графический процессор Adreno 630 или центральный процессор Kryo. Secure Processing Unit (SPU) имеет собственный процессор, аппаратный генератор случайных чисел и защищённая память для хранения важных данных. Snapdragon 845 работает на 25-30% быстрее и тратит при этом на 30% меньше энергии, чем 835-й.

