

Цифровые иерархии

Гордиенко В.Н., Ксенофонтов С.Н., Кунегин С.В., Цыбулин М.К. Современные высокоскоростные цифровые телекоммуникационные системы. Ч. 3. Группообразование в синхронной цифровой иерархии: Учебное пособие / МТУСИ. - М., 1999. - 76 с. http://kunegin.narod.ru/ref/metod/gsdh/#_Toc439475088

Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM). – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.: ил. (ISBN 5-256-01516-8)

<http://siblec.ru/index.php?dn=html&way=bW9kL2h0bWwvY29udGVudC80c2VtL2NvdXJzZTE2MS9rb25zdHBla3RfbGVjLmh0bQ==>

http://www.do.sibsutis.ru/magistr/courses_work/vosp_work/lec2.htm

Содержание (Слепов и другие)

1. Основы технологии передачи цифровых сигналов

- Емкость канала связи
- Стандартный телефонный канал (Канал ТЧ)
- Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)

2. Методы мультиплексирования потоков данных

- Частотное мультиплексирование (FDM)
- Временное мультиплексирование (TDM)
 - ✓ аналоговых сигналов
 - ✓ двоичных потоков данных
- Волновое мультиплексирование (WDM)

3. Кодирование цифровых данных в ИКМ системах

- Пример n-канального мультиплексора
- Методы двоичного кодирования (А,мю-законы) и ошибки квантования
- Методы линейного кодирования

4. Цифровые иерархии и технология PDH

- Три системы цифровых иерархий
- Структура цикла (кадра) E1
- Структура цикла T1
- Структура циклов E2, E3, T4
- Базовые топологии сетей PDH

Телефонные сети - историческая справка

<http://tss-vosp.narod.ru/tss/zan/z01/z01v00.htm>

- **1875 год - изобретение телефона, отправная точка в развитии телефонной связи, методов и технологий передачи голоса**
 - 1937 год - появление ИКМ как метода импульсно-кодовой модуляции
 - 1939 год – появились специализированные цифровые компьютеры и с начала 40-х годов интенсивно развивались Импульсные методы модуляции для радиолокации
- **Однако до середины 60-х (в России до середины 70-х годов) системы телефонной связи были аналоговыми**
 - причина - громоздкость цифрового оборудования для реализации ИКМ, вплоть до появления в 1959 году компьютеров второго поколения на транзисторах.
- **1962 год - первая коммерческая цифровая система передачи голоса, использующая ИКМ и методы мультиплексирования с временным разделением каналов (TDM), компании Bell System (США), установленную в Чикаго**
 - Эта система давала возможность передавать 24 голосовых канала по медному кабелю, проложенному между офисами компании Bell System.
 - Каждый голосовой канал использовал скорость передачи 64 кбит/с, все каналы с помощью *мультиплексора* объединялись в единый поток двоичных данных со скоростью 1536 кбит/с, а с учётом служебного канала (8 кбит/с) этот поток приобретал скорость 1544 кбит/с
 - Этот поток был стандартизирован и стал известен как канал DS1 или T1, принятый далее в США за *первый* (или *первичный*) уровень мультиплексирования для систем цифровой телефонии

Компьютерные сети – историческая справка (1/2)

Возникновение компьютерных сетей непосредственно связано с революционными разработками дорогостоящих суперкомпьютеров, к которым дешевле организовать удаленный доступ, чем ставить эти машины на местах.

- Ускорение разработок в области коммутации пакетов стимулировалось тремя главными направлениями деятельности в последнем столетии 20 века [Шварц]

1. В 1960-х годах появились ЭВМ с разделением времени (например, IBM System 360, 1963 год)

- Сформирована концепция канала ввода/вывода с развитой системой мультиплексоров ввод/вывода для удаленного доступа с терминалов
- Появились коммерческие компании, предоставляющие удаленный доступ. Примеры: Информационная служба фирмы Джeneral Электрик. Сеть TYMNET на территории США (Фирма Tymshare), первооткрыватель пакетной коммутации. Сеть Telnet (фирма GTE)

2. Середина 1960-х - первая половина 1970-х гг – производителями ЭВМ выполнены исследования и первые реализации сетей пакетной коммутации.

- (1) SNA (Systems Network Architecture) фирмы IBM: исследования начаты в конце 1960-х годов, первые промышленные изделия появились в 1974 г. (2) DNA фирмы Digital Equipment Corporation (DEC). (3) BNA фирмы Burrough

● 1979 - Международная организация стандартизации (ISO) разработала всемирный стандарт архитектуры связи, связывающий открытые системы, для преодоления барьеров связи между различными архитектурами связи различных производителей

- Эталонная модель Взаимодействия Открытых Систем (BOC) / basic reference model of Open Systems Interconnection (RM OSI)

Компьютерные сети – историческая справка (2/2)

3. В конце 1960-х годов начаты и в течении 1970 проводились и финансировались Агентством перспективных исследований (Advanced Research Projects Agency — ARPA, позднее переименованное в DARPA) Минобороны США **работы по объединению компьютеров в сеть.**

- Основная концепция этих работ - «использование ЭВМ»:
 - ✓ Большие главные ЭВМ, каждая из которых обладает специализированными возможностями, связываются между собой.
 - ✓ Пользователи в любом пункте США могут получить доступ к любой главной ЭВМ и воспользоваться ее специализированным программным обеспечением или ее «огромной» производительностью.
- Разработку сети ARPA поручила на конкурсной основе: Калифорнийскому университету в Лос-Анджелесе, Стэнфордскому исследовательскому центру, Университету штата Юта и Университету штата Калифорния в Санта-Барбаре.
- В декабре 1969 года сдана в эксплуатацию экспериментальная сеть, объединившая 4 узла на скорости 56 Кбит/с. Эта сеть была названа **ARPANET** (*Advanced Research Projects Agency Network*) и стимулировала большое число исследований проблем коммутации пакетов во всем мире.
 - ✓ На сетевом уровне были разработаны связные процессоры или концентраторы, способные как взаимодействовать с главными ЭВМ, так и выбирать маршруты для пакетов в сети. Были разработаны также алгоритмы маршрутизации и управления потоками.
 - ✓ Само слово пакет было придумано исследователями ARPA для того, чтобы можно было различить длинные сообщения, вводимые в сеть главными ЭВМ, и многочисленные более мелкие блоки данных, на которые эти сообщения разбиваются с целью улучшения пропускной способности сети. Это привело к тому, что связной процессор стали называть коммутатором пакетов.

Компьютерные сети $\leftrightarrow$ Телефонные сети

● Сетевые цифровые технологии развивались до (указать год) параллельно для телефонных и компьютерных сетей.

- Развитие цифровых телефонных сетей шло по линии уплотнения каналов, как за счет мультиплексирования низкоскоростных первичных каналов Т1, так и за счет использования более рациональных методов модуляции, например, использования дифференциальной ИКМ и ее модификаций, позволивших применять для передачи голосового сигнала скорости 32, 16 и 8 кбит/с.
 - ✓ Используется технология коммутации каналов посредством временного уплотнения каналов (TDM)
- Технологии компьютерных сетей ориентированных на передачу данных, развивались по линии увеличения полосы пропускания каналов передачи данных, необходимой для передачи не только текстовых, но и графических данных и данных мультимедиа
 - ✓ Используется технология пакетной коммутации

Телефонные сети - тенденции

- Развитие схем мультиплексирования привело к возникновению трёх цифровых иерархий с разными (для разных групп стран) уровнями стандартизированных скоростей передачи или каналов:
 - DS2 или T2/E2; DS3 или T3/E3; DS4 или T4/E4.
 - Эти иерархии, названные *плезioxронными* (т.е. почти синхронными) цифровыми иерархиями PDH (ПЦИ), широко использовались и продолжают использоваться как в цифровой телефонии, так и для передачи данных.
- Дальнейшее развитие технологий скоростных телекоммуникаций на основе PDH привело к появлению двух новых цифровых технологий:
 - *синхронной оптической сети SONET (COC), и синхронной цифровой иерархии SDH (CЦИ), иногда рассматриваемых как единая технология SONET/SDH, расширившая диапазон используемых скоростей до 40 Гбит/с.*
 - Эти технологии ориентированы на использование волоконно-оптических кабелей (ВОК) в качестве среды передачи

Компьютерные сети - тенденции

- ARCnet, Ethernet и Token Ring (2-16 Мбит/с) →
- FDDI, Fast Ethernet и 100VG-Any LAN (100Мбит/с) →
- 1 Гбит/с Ethernet → 10 Гбит/с Ethernet → 100 Гбит/с Ethernet

Методы мультиплексирования потоков

- Первые системы тел. связи использовали отдельные линии передачи для организации каждого канала
 - в 1918 г идеи организации нескольких тел каналов по одной линии
 - Т.е. мультиплексировать каналы
- Стандартный канал тональной частоты (канал ТЧ)
 - Является единицей измерения емкости аналоговых систем передачи
 - Обеспечивает передачу полосы частот 300...3400 Гц, соответствующей основному спектру телефонного сигнала
 - ✓ В цифровых системах канал ТЧ передается со скоростью 64 Кбит/с, называется «основной цифровой канал (ОЦК)» или В-канал в ISDN
 - Используется для унификации многоканальных систем связи
 - Является основным (или стандартным) каналом
- Мультиплексирование – это объединение нескольких входных каналов связи (например, каналов ТЧ) в один выходной канал большей емкости
 - Связисты называют мультиплексирование уплотнением каналов
 - Выходной канал часто называю агрегатным, а трафик – агрегированным (т.е.объединенным)

Методы мультиплексирования потоков

• Три метода мультиплексирования:

1. Мультиплексирование с частотным разделением каналов (FDM)
 - ✓ **FDM** - Frequency Division Multiplexing
 - ✓ Частотное мультиплексирование/уплотнение,
2. Мультиплексирование с временным разделением каналов (TDM)
 - ✓ **TDM** - Time Division Multiplexing
 - ✓ Временное мультиплексирование/уплотнение
3. Мультиплексирование по длине волны в оптическом кабеле (WDM)
 - ✓ **WDM** - Wavelength Division Multiplexing
 - ✓ Спектральное мультиплексирование

FDM идея частотного мультиплексирования

- Полоса частот выходного канала нарезается (делится) на некоторое число полос (подканалов) n , каждый шириной 4 кГц
 - 3.1 кГц (полоса ТЧ канала) + 900 Гц (защитная полоса)
 - ✓ Защитная полоса 900 Гц используется для уменьшения взаимного влияния ТЧ каналов
 - Фактическая полоса пропускания 3,1 кГц, формируется полосовыми фильтрами с частотами среза,
 - ✓ первый канал - 60,3 и 63,4 кГц,
 - ✓ второй канал - 64,3 и 67,4 кГци т.д.

Для формирования
канальных групп
используется процедура ОБП-ПН
-модуляции несущей и поднесущих по
амплитуде с подавлением одной
боковой полосы (ОБП - левой или
правой)
- и подавлением несущей (ПН)



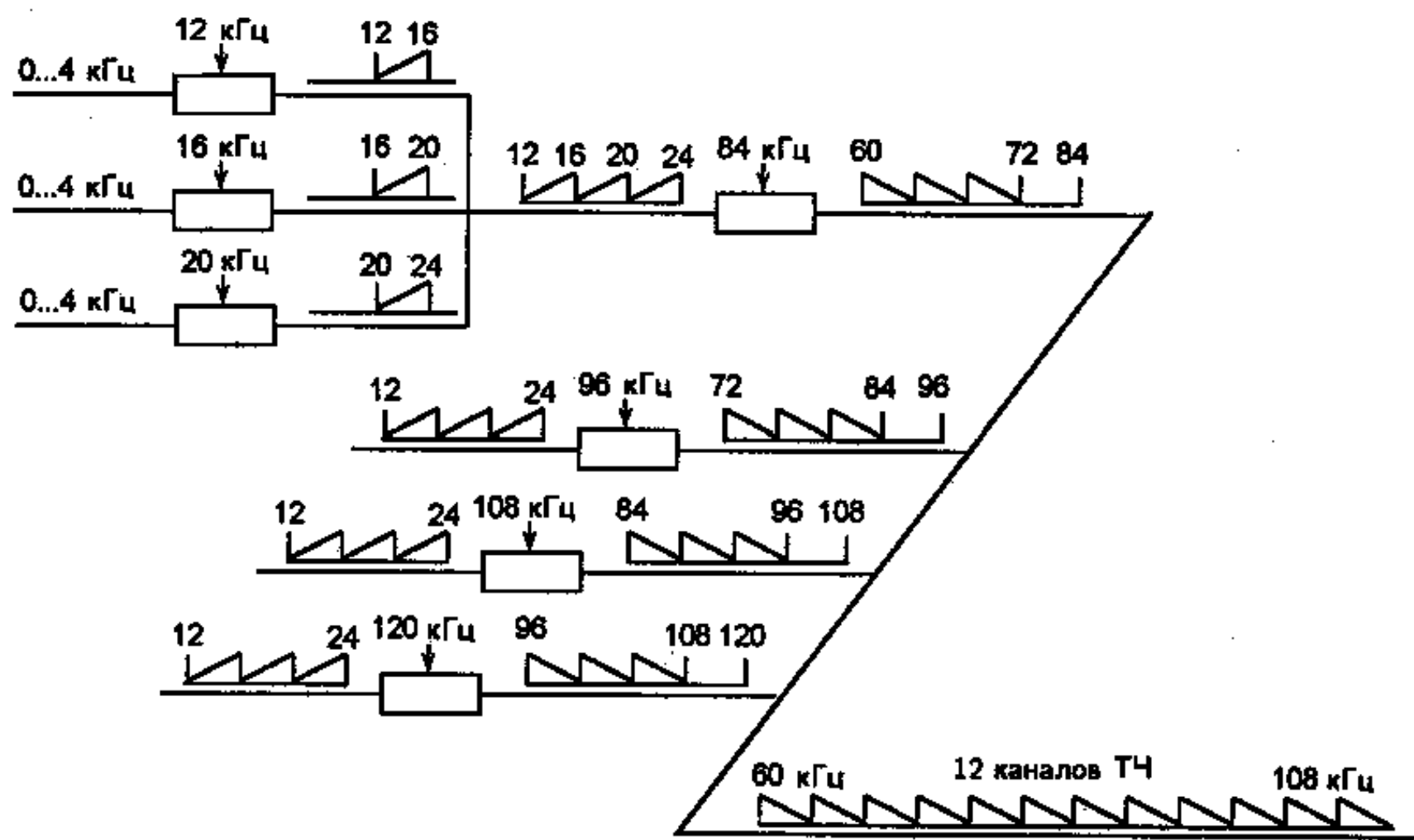
FDM стандарты группообразования

● ITU-T рекомендует следующую систему группообразования:

- основная канальная группа (называемая связистами первичной группой) состоит из 12 стандартных телефонных каналов;
- основная супергруппа (называемая вторичной группой) - 5 канальных групп (т.е. $5 \times 12 = \underline{60}$ каналов);
- мастергруппа (называемая третичной группой)
 - ✓ 5 супергрупп (т.е. 300 каналов)
 - ✓ или 10 супергрупп (т.е. 600 каналов),
 - ✓ или 16 супергрупп (т.е. 960 каналов)
- мультимастергруппы (называются четверичными группами)
 - ✓ различное число мастергрупп и супергрупп

FDM пример формирования первичной группы

12 ТЧ каналов



TDM идея временного разделения канала

● TDM идея - поочередное подключение каждого входного канала на определенный временной интервал T_i к выходному каналу связи

■ T_d – период дискретизации одного входного канала

✓ Согласно теореме В.А. Котельникова период дискретизации непрерывного, ограниченного по спектру сигнала с верхней частотой $F_v \gg F_n$ должен быть равен

✓ $F_d = 1/T_d \geq 2F_v$, т.е. **частота дискретизации**, в два раза больше верхней частоты сигнала (частота среза)

■ Поскольку мультиплексируем несколько входных каналов, в групповой канал они будут поступать со сдвигом по времени (разделяем время) с периодом TS , называемом тайм-слот (Time Slot)

✓ TS интервал времени между ближайшими импульсами группового сигнала

■ И поскольку передача в таких системах осуществляется циклами, то есть периодически в виде групп из N тайм-слотов, необходимо для целей определения начала (конца) цикла добавить n сигналов управления (или бит в цифровых системах)

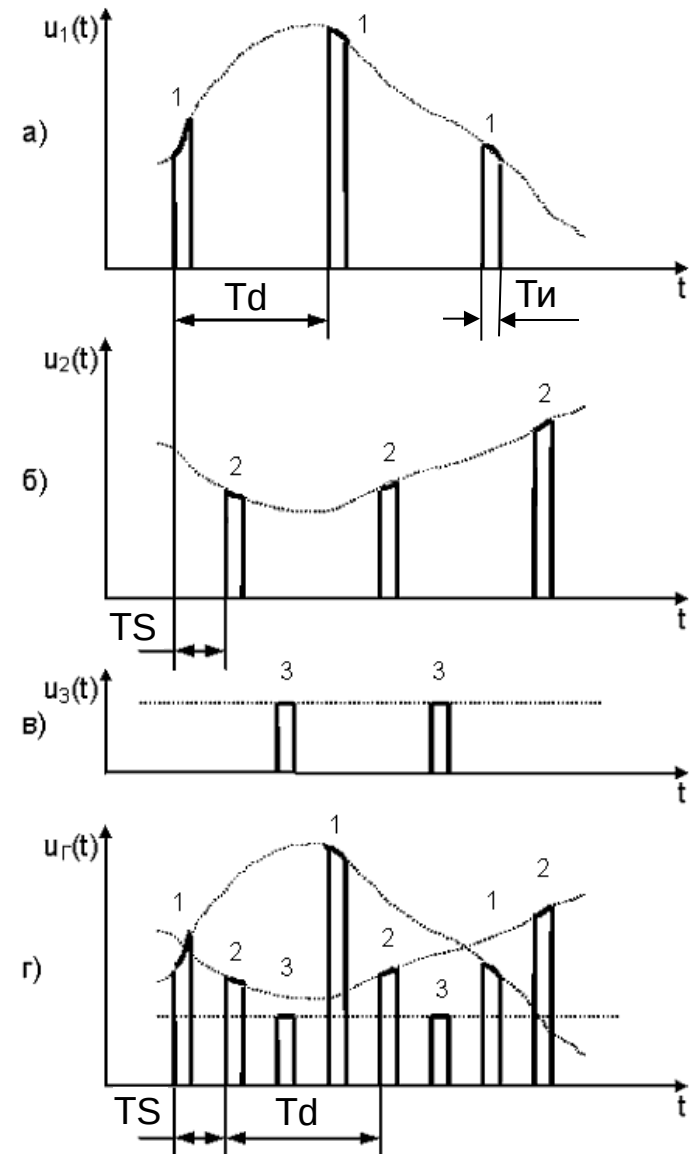
■ Тогда общее число тайм-слотов в цикле = $N + n$, где

✓ N – количество информационных сигналов,

✓ n – количество служебных импульсов для синхронизации, служебной связи, управления и вызовов

■ Заметим, что $T_i < TS$

■ Примечание. На рисунке не показаны n -сигналы управления, т.е. $n = 0$ и $TS = T_d / N$, однако в общем случае $TS = T_d / (N + n)$



TDM синхронизация *(нужна убедительная картинка)*

- ❶ Коммутаторы на приемной и передающей стороне должны работать синхронно,
 - чтобы знать место каждого тайм-слота в цикле и передавать управляющую информацию нужно знать начало цикла, т.е. должен использоваться определенный синхроимпульс или определенная последовательность бит в цифровых системах

“Выборка” - импульсный сигнал с амплитудой, равной мгновенному значению входного сигнала в момент взятия выборки

**“Интервал
выборки”**
называют **“тайм-
слот”** (цикл)

коммутаторы
передающий и
принимающий
должны работать
синхронно



Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)

TDM Частота дискретизации передатчика

● Частота дискретизации (F_d)

- F_d выбирается из условия возможности последующего восстановления аналогового сигнала без потерь (искажений) из выборок с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ)
- По теореме Котельникова-Нейквиста $F_d = 2F_{ср}$, где $F_{ср}$ (частота среза) – верхняя граница полосы частотного спектра аналогового сигнала

● Пример частоты дискретизации в телефонных сетях

- основная полоса частот речевого спектра оптимизирована по **индексу артикуляции** (принятому равным 0.7), соответствующему **уровню разборчивости** слов 85-90%, и составила 3100 Гц (диапазон 300-3400 Гц [1]).
- Частота среза $F_{ср}=3400$ Гц , примерно 4000 Гц

$$\underline{F_d} = 2 \times F_{ср} = 2 \times 4 \text{ КГц} = \underline{8 \text{ КГц}}$$

- Период дискретизации равен $1 / F_d$

$$\underline{T_d = 125 \text{ мкс}}$$

“С в я т ы е в ц и ф р о в ы х С П Д ч и с л а ”

TDM восстановление аналогового сигнала (4)

● Восстановление исходного сигнала по совокупности их отсчетов посредством идеального фильтра нижних частот (ФНЧ) с полосой $F_{\text{ср}}$.

- Импульсная реакция ФНЧ на единичный импульс имеет вид $\sin(x)/x$

- в моменты прихода всех других импульсов, отделенных кратными интервалами времени, она проходит через 0,
- Поэтому отклики на отдельные импульсы оказываются независимыми и исходный сигнал возникает как суперпозиция парциальных (частичных) откликов
- коммутаторы на передающей и приемной сторонах должны работать синхронно

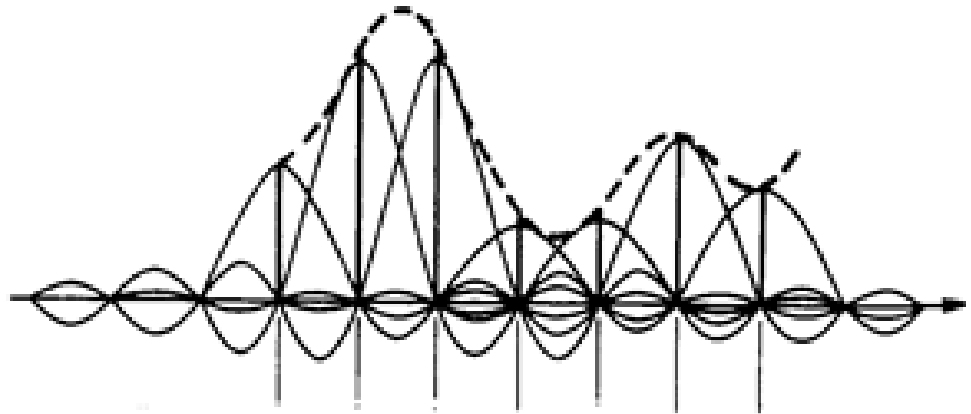


Рис. 1.4 Восстановление сигнала по совокупности отсчетов на выходе идеального ФНЧ

TDM Цифровые (1)

● В цифровых системах передачи данных

- аналоговый сигнал последовательно преобразуется сначала в информационный код, а затем, в линейный код.

● Информационное кодирование

- Мгновенному значению амплитуды аналогового входного сигнала ставится в соответствие одна из 256 (2^8) возможных кодировок.
 - ✓ оцифрованный голосовой сигнал передается в виде 8-ми разрядного кода с частотой повторения 8 кГц.

- **Шум квантования** представляет собой изменяющуюся в времени разницу между исходным и оцифрованным сигналом.

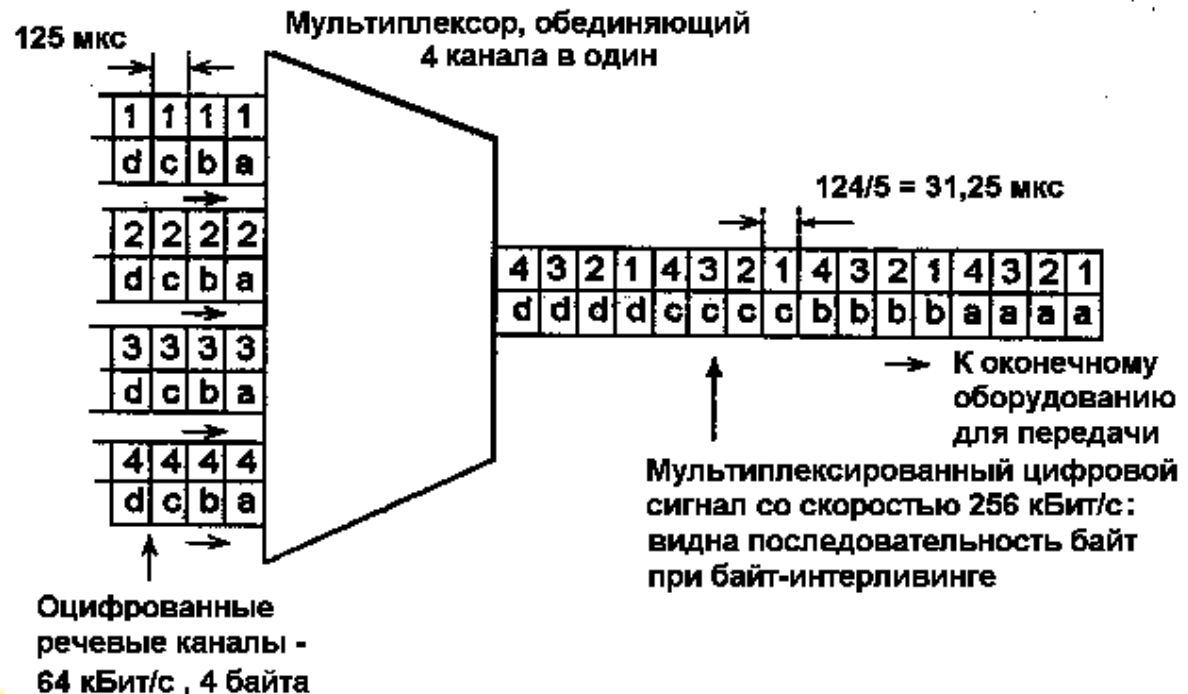
$$N_{\text{кв}}(t) = S(t) - S_{\text{кв}}(t)$$

- Ослабить влияние этого шума малые по амплитуде аналоговые сигналы можно путем преобразование сигнала в код по нелинейному закону:
 - ✓ меньшим значениям входного сигнала ставится в соответствие большее изменение выходного кода, и наоборот. Компрессор устанавливается на стороне передатчика и экспандер — на стороне приемника.

TDM - мультиплексирование двоичных потоков

- На входе мультиплексора - N входных потоков
- Мультиплексор отбирает из каналов любую логически осмысленную для данной сетевой технологии последовательность бит, составляя из них выходную последовательность
 - Этот процесс называется интерливингом (interleaving), или чередованием.

Пример: временное мультиплексирование четырех двоичных потоков данных входных каналов 64 кбит/с
На рисунке изображен байт-интерливинг



TDM – Интерливинг

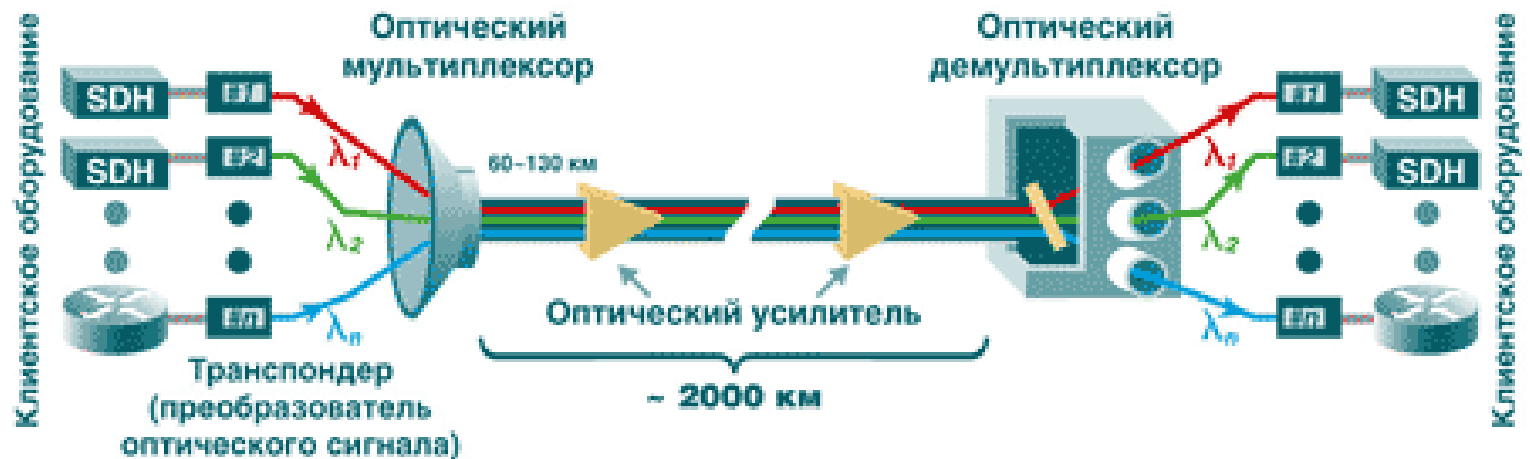
● Различают следующие виды интерливинга:

- бит-интерливинг (или чередование битов) - на выход последовательно коммутируется по одному биту из каждого канала;
- байт-интерливинг (или чередование байтов) - на выход последовательно коммутируется по одному байту из каждого канала;
- символьный интерливинг (или чередование символов) - на выход последовательно коммутируется по одному символу (один ниббл или поле длиной 7 бит (ASCII код - Американская версия), или поле длиной 8 бит - байт или октет (ASCII код - международная версия) из каждого канала;
- блок-интерливинг (или чередование блоков) - на выход последовательно коммутируется по одному блоку (который может быть длиной в несколько байт или может быть полем целократным другому стандартному формату) из каждого канала.

● Длина битового интервала на выходе мультиплексора уменьшается пропорционально коэффициенту мультиплексирования

WDM - Волновое мультиплексирование

- В оптических системах связи используется метод мультиплексирования с разделением по длине волны
- Суть метода - объединение нескольких оптических несущих λ_i (на передающей стороне) и передаче полученного сигнала $\Sigma \lambda_i$ по одному волокну с последующим выделением (демультиплексированием) отдельных несущих
- несущие генерируются отдельными источниками (лазерами), сигналы которых объединяются мультиплексором в единый многочастотный сигнал
- Каждая λ может передавать поток цифровых сигналов, сформированный по законам различных сетевых технологий. Например, одна несущая формально может передавать трафик ATM или гигабитного Ethernet, другая SDH, третья PDH и т.д.



Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) PCM - Pulse Code Modulation

ITU-T G.711 (PSM)

ИКМ / PCM

- Дискретизация
- Квантование
- Кодификация

ИКМ процесс

- Для передачи аналогового сигнала по цифровым системам передачи данных выполняется Импульсно-Кодовая Модуляция, которая основана на:

- I шаг: Дискретизация передаваемого аналогового сигнала, т.е. используется последовательность выборок взятых с частотой дискретизации F_d .
 - ✓ Это процесс амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), аналогичен аналоговым системам
 - ✓ Например, для телефонного сигнала $F_d = 8\text{КГц}$
 - ✓ Т.е. выборки следуют с периодом дискретизации 125 мкс
- II шаг Квантование амплитуд импульсных выборок
 - ✓ Процесс отображения *непрерывного* множества значений амплитуд выборок (АИМ-сигналов) на *дискретное* множество уровней квантования
- III шаг: Двоичное кодирование, или кодификации квантованных значений

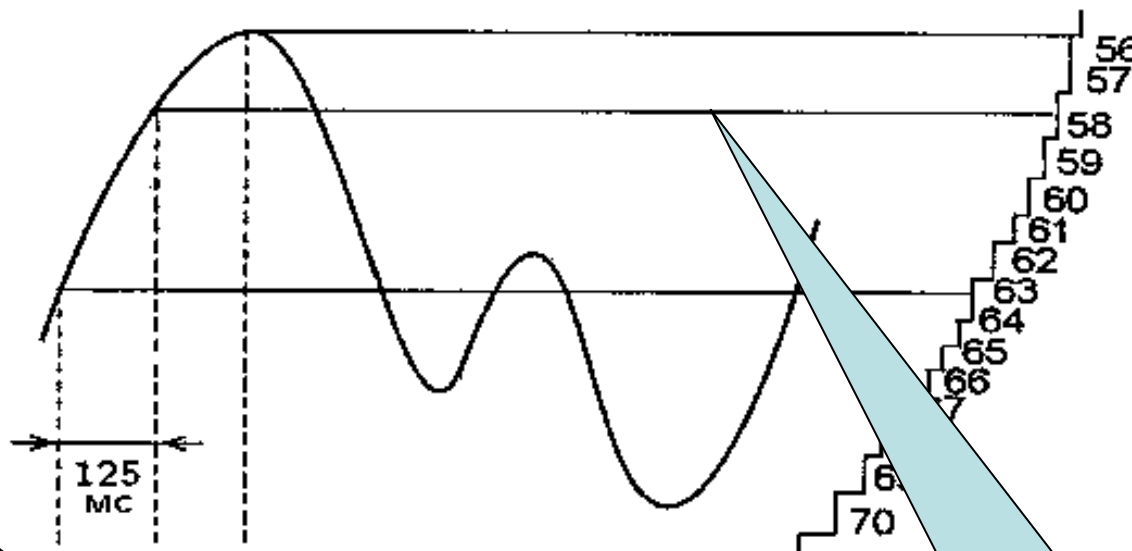
- Дискретизация, квантование и кодификация → есть процесс импульсно-кодовой модуляции (ИКМ)

- Позволяет перейти от аналогового представления речевого сигнала к цифровому

ИКМ - иллюстрация

1. «Дискретизация» -
разбивает сигнал по
временной
составляющей

Номер выборки
Уровень квантования



2. «Квантование» -
уровни квантования

Кадровый бит

3. «Двоичное кодирование» -
выполняет преобразование
уровня в цифру посредством АЦП

10111110011101010111000001111011100001100111110 Двоичный код

0 0 1 1 1 1 0 1

Биполярный кодовый
сигнал



«Линейное кодирование» -
с целью синхронизации
приемника и передатчика

ИКМ – дискретизация во времени

● Частота дискретизации (F_d)

- F_d выбирается из условия возможности последующего восстановления аналогового сигнала без потерь (искажений) из выборок с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ)
- По теореме Котельникова-Нейквиста $F_d = 2F_{ср}$, где $F_{ср}$ (частота среза) – верхняя граница полосы частотного спектра аналогового сигнала

● Пример частоты дискретизации в телефонных сетях

- основная полоса частот речевого спектра оптимизирована по **индексу артикуляции** (принятому равным 0.7), соответствующему **уровню разборчивости** слов 85-90%, и составила 3100 Гц (диапазон 300-3400 Гц [1]).
- Частота среза $F_{ср}=3400$ Гц , примерно 4000 Гц

$$\underline{F_d} = 2 \times F_{ср} = 2 \times 4 \text{ КГц} = \underline{8 \text{ КГц}}$$

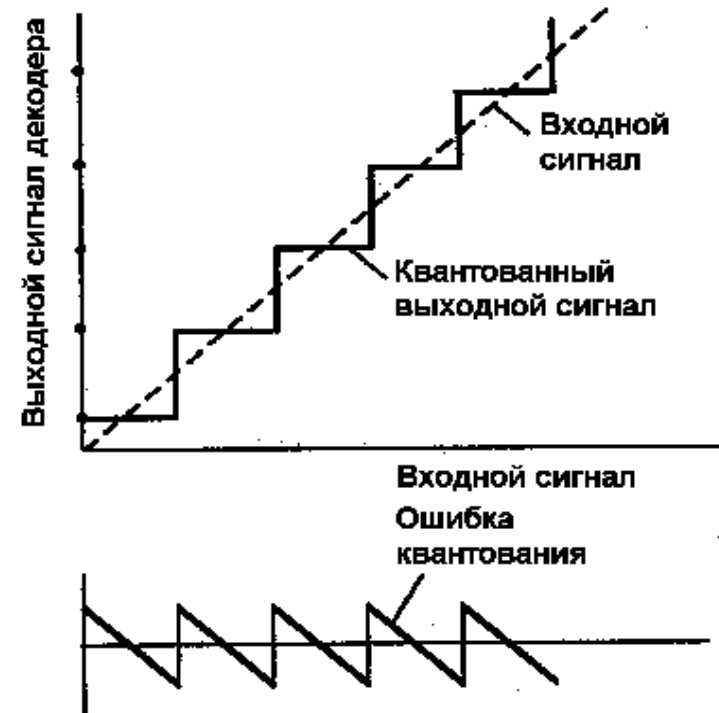
- Период дискретизации равен $1 / F_d$

$$\underline{T_d = 125 \text{ мкс}}$$

“С в я т ы е в ц и ф р о в ы х С П Д ч и с л а ”

ИКМ квантование по уровню

- АИМ - сигнал дискретный во времени, но непрерывный по уровню
- Устанавливается конечное множество “разрешенных” амплитудных значений, называемых уровнями
 - Количество уровней определяет качество передачи сигналов
- Разность между соседними уровнями называется шагом квантования Δ .
 - Если АИМ сигнал $> \Delta/2$, его значение увеличивается в большую сторону,
 - Если АИМ сигнал $< \Delta/2$, его значение уменьшается в меньшую сторону.
- Таким образом получается сигнал квантованный по уровню
- Ошибка (шум) квантования - разность между истинным значением отсчета и его квантованным значением
 - Для уменьшения ошибки квантования нужно увеличить число уровней квантования
 - в Hi-Fi системах используются 16, 20 и 24 бита на выборку
 - в цифровых системах связи - 8 бит на выборку и возникает задача передачи маленьких сигналов с минимальными искажениями



Нелинейное квантование → аналоговое сжатие / компандирование динамического диапазона

- Для речевых сигналов с большим динамическим диапазоном применяется нелинейная операция его сжатия (схема компандирования)

- динамический диапазон сигнала - отношение максимальной амплитуды к минимальной амплитуде
- на входе АЦП Компрессор (сжиматель) динамического диапазона
- на выходе ЦАП экспандер (расширитель) динамического диапазона

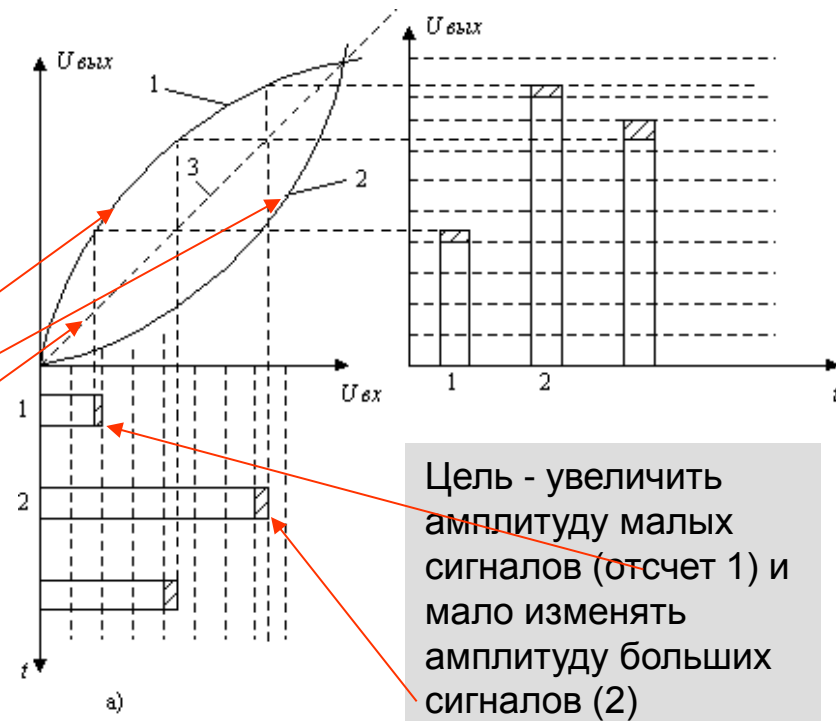
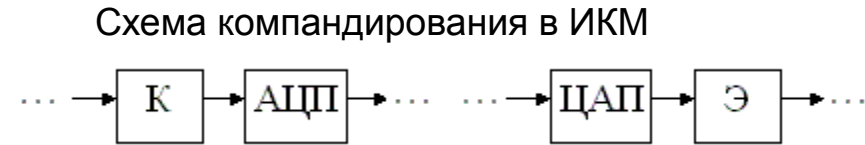
- Компрессор и Экспандер имеют взаимнообратные амплитудные характеристики

- 1 – амплитудная характеристика компрессора
- 2 – амплитудная характеристика экспандера
- 3 – результирующая амплитудная характеристика схемы компандирования линейная

- Получается неравномерное квантование для сжатия динамического диапазона + равномерное кодирование в АЦП

- Этот способ применялся в ИКМ первых выпусков (60-70-ые годы XX века)

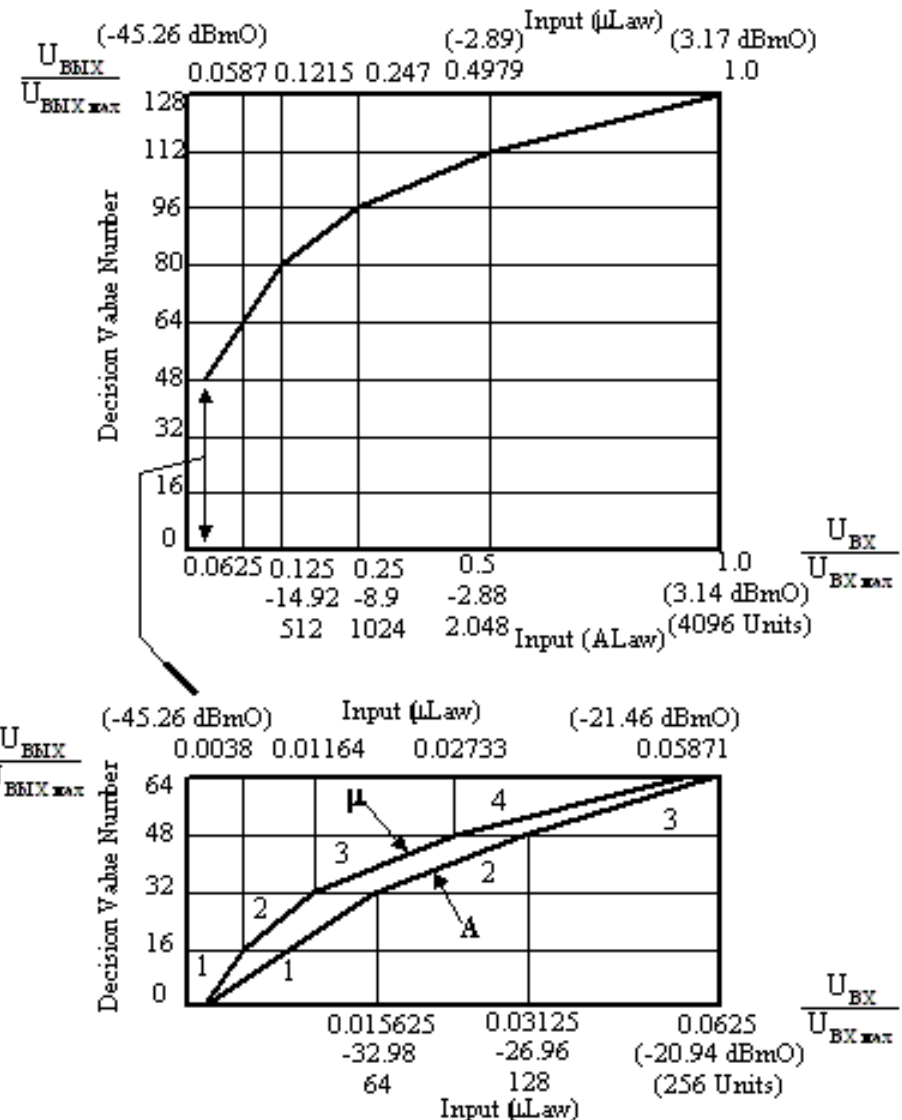
- В настоящее время используется нелинейная кодификация посредством КОДЕКА



а – амплитудные характеристики компандера;
б – сигнал на выходе компрессора.

А- и μ- законы квантования

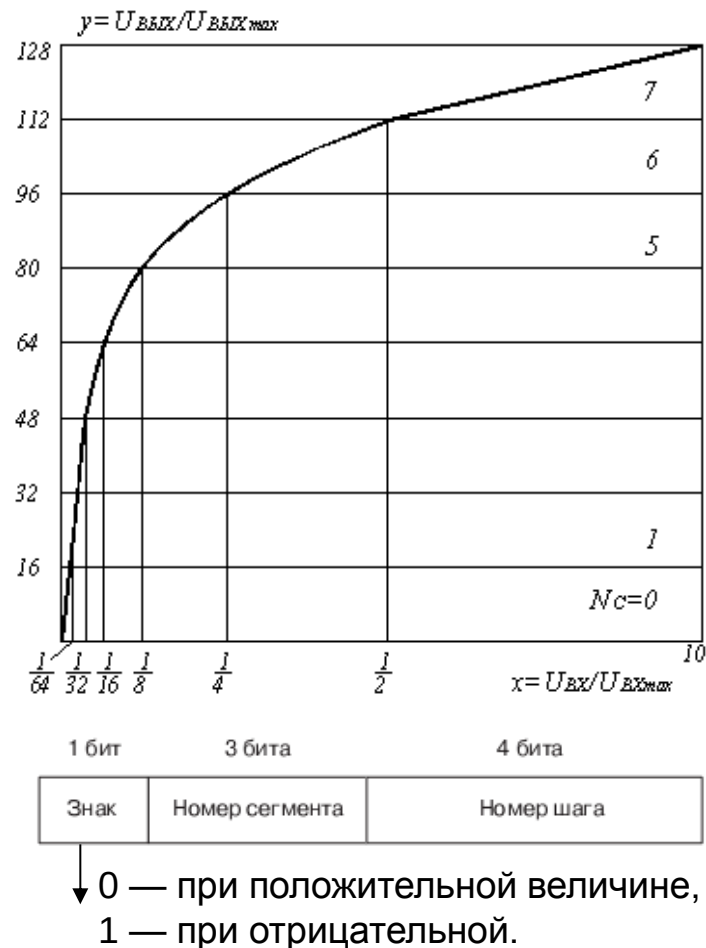
- Для нелинейных (прямого и обратного) преобразований входа / выхода идеально подходит пара $\ln(x) \leftrightarrow \exp(x)$
- Используются два закона для входного сигнала x , которые отображаются и описываются в нормированном виде $y=f(x)$, где $y=U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}_{\text{max}}}$, $x= U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}_{\text{max}}}$:
- Мю-закон (μ-law) североамериканский :
 - $y = \ln(1 + \mu \cdot x) / \ln(1 + \mu)$
✓ где $\mu = 255$
- А-закон (A-law), европейский:
 - $y = A \cdot x / (1 + \ln A)$ для $x \leq 1/A$
 - $y = (1 + \ln(A \cdot x)) / (1 + \ln A)$ для $1/A \leq x \leq 1$
✓ где $A = 87.6$
- Параметры A и μ характеризуют степень нелинейного сжатия и равны:
 - А-закон ($A=87.6$) используется в европейских системах ИКМ и дает при 8 разрядной кодификации минимальный шаг квантования 2/4096
 - μ -закон используется в североамериканских системах ИКМ (D1 с $\mu=100$ и D2 с $\mu=255$), давая минимальный шаг квантования 2/8159



Нелинейная кодификация → цифровое сжатие (командирование) динамического диапазона

● В кодеках плавная компрессия заменена сегментированной, т.е. кусочно-ломанной аппроксимацией:

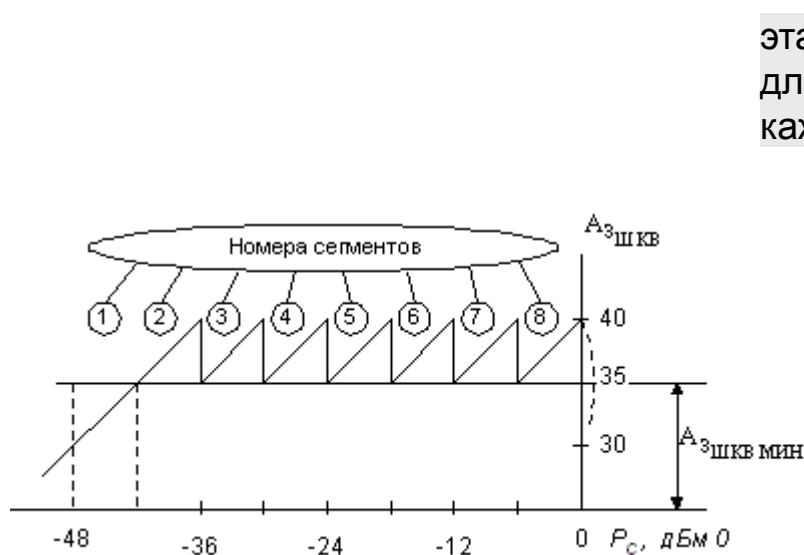
- Общее число сегментов $N_c=16 \leftarrow (\text{знаковый бит} + 3)^2$
- В пределах каждого сегмента - линейное кодирование с числом уровней $16 \leftarrow 4^2$
- Нулевые сегменты (положительный и отрицательный) рассматриваются как один сегмент, имеющий 31 шаг квантования с шагом Δ
- В каждом последующем сегменте шаг квантования увеличивается в 2 раза по сравнению с предыдущим
 - ✓ за исключением первых двух сегментов в А-законе, в которых шаг квантования одинаков и равен минимальному шагу квантования Δ
 - ✓ Поэтому фактическое число сегментов с разными шагами квантования в А-законе равно 13.
 - ✓ Такая характеристика командирования называется типа А=87,6 /13
- Общее число шагов квантования $256 \leftarrow 2^8$
- В первых двух сегментах для А-закона, значение Δ минимально и соответствует равномерной кодификации 12 разрядами с числом уровней 2048 (шагов квантования)



Нелинейная кодификация →

цифровое сжатие (компандирование) динамического диапазона

- Для реализации кодеков (АЦП+) взвешивающего типа необходимо задать величины эталонных напряжений (в количестве минимальных шагов квантования Δ)
 - нижней границы каждого сегмента
 - для кодирования внутри сегмента
- Таким образом, максимальный шаг квантования (в восьмом сегменте) в 64 раза превышает минимальный шаг квантования (параметр $A=87.6$ приблизительно равен 64)
- Обеспечивается одинаковость зависимости защищенности от шумов квантования $A_{зшкв}$ при измерении величины кодируемого сигнала от сегмента к сегменту (за исключением первых двух сегментов)



эталонные напряжений
для нижней границы
каждого сегмента

эталонные напряжений
для кодирования
внутри сегмента

№ сегмента	Код сегмента	Эталоны в Δ					Шаг квантования Δ	Корректирующий сигнал
		основной	дополнительные					
1	000	0	8	4	2	1	1	½
2	001	16	8	4	2	1	1	½
3	010	32	16	8	4	2	2	1
4	011	64	32	16	8	4	4	2
5	100	128	64	32	16	8	8	4
6	101	256	128	64	32	16	16	8
7	110	512	256	128	64	32	32	16
8	111	1024	512	256	128	64	64	32

Кодификация – кодирование квантованных значений

ВЫВОДЫ

- Численное значение каждого уровня квантования может быть представлено в виде 7 или 8 бит
- Позволяет передать 128 (2^7) или 256 (2^8) дискретных уровней амплитуды речевого сигнала
- Учитывая, что выборки должны передаваться последовательно, получаем двоичный цифровой поток речевого сигнала со скоростью
 - 56 кбит/с (8 кгц x 7 бит / выборки)
 - 64 кбит/с (8 кгц x 8 бит / выборки)
- Святое число цифровых систем скорость = 64 Кбит/с

Рекомендация ITU-T G.704

**Структура синхронных кадров, которые
используются на первом и втором
уровне скоростей передачи данных**



Структура синхронных кадров

- Информационный поток образуют кадры (frames) и мультикадры (multi frames)
 - ИКМ с *p*-канальным мультиплексированием, внутриканальной синхронизацией (осуществляемой путем вставки *синхрогруппы* из *k* бит после *m* фреймов)
- Кадр → $N \times TS$ (Time Slot)
 - Кадр состоит из N восьмибитовых (8 бит) канальных интервалов и управляющих символов
 - ✓ Число канальных интервалов N в кадре стандартизировано ITU-T
 - ✓ Обозначают канальный интервал: TS (Time Slot)
 - ✓ Нумерация канальных интервалов кадре: TS0, TS1, TS2 TSN
 - Кадры передаются с частотой 8 КГц, т.е. за 125 мкс
 - ✓ 8 КГц – это частота дискретизации тел. сигнала
 - ✓ Каждый канальный интервал обеспечивает перенос оцифрованного голоса или данных со скоростью $8 \text{ бит} \times 8 \text{ КГц} = 64 \text{ Кбит/сек}$
 - Биты кадра передаются со скоростью
 - ✓ $(N \times 8 \text{ бит} + K \text{ бит синхронизации}) \times 8 \text{ КГц}$
- Мультикадр → состоит из несколько кадров, имеет фиксированную длину
 - Мультикадры также передаются с частотой 8 КГц, т.е. за 125 мкс

Структура и скорости потоков T1 и E1

● Кадр потока T1

- состоит из 24 канальных интервалов и одного управляющего бита, что составляет $24 \cdot 8 + 1 = 193 \text{ бита} \cdot 8000 \text{ Гц} = \underline{1544 \text{ Кбит/сек.}}$

● Кадр потока E1

- состоит из 30 информационных и двух управляющих канальных интервалов, что составляет $32 \cdot 8 = 256 \text{ бит} \cdot 8000 \text{ Гц} = \underline{2048 \text{ Кбит/сек.}}$

Поток Т1 с цикловой структурой

Кадр состоит из:

24-х тайм слотов →
24*8=192 бита.

Скорость=1536 кбит/сек.

Для целей управления и синхронизации в каждый кадр добавляется бит, что дает в цикле 193 бита.

Скорость = 1544 Кбит/сек.

Суперкадр → 12 или 24 кадров

FAS - биты кадровой синхронизации,

DL - канал сигнализации,

CRC - проверочная последовательность

Номер кадра	Номер первого бита кадра	Кодирование		
		<i>FAS^a</i>	<i>DL^b</i>	<i>CRC</i>
1	0	-	<i>n</i>	-
2	193	-	-	<i>e₁</i>
3	386	-	<i>n</i>	-
4	579	0	-	-
5	772	-	<i>m</i>	-
6	965	-	-	<i>e₂</i>
7	1158	-	<i>m</i>	-
8	1351	0	-	-
9	1544	-	<i>m</i>	-
10	1737	-	-	<i>e₃</i>
11	1930	-	<i>m</i>	-
12	2123	1	-	-
13	2316	-	<i>m</i>	-
14	2509	-	-	<i>e₄</i>
15	2702	-	<i>m</i>	-
16	2895	0	-	-
17	3088	-	<i>m</i>	-
18	3231	-	-	<i>e₅</i>
19	3474	-	<i>m</i>	-
20	3667	1	-	-
21	3860	-	<i>m</i>	-
22	4053	-	-	<i>e₆</i>
23	4246	-	<i>m</i>	-
24	4439	1	-	-

«F-бит» кадра T1

- **Первый бит кадра «F-бит» используется для**
 - кадровой синхронизации
 - динамического определения производительности
 - обслуживания канала передачи данных
- **Существует два варианта организации мультикадров в потоке T1 12-ти кадровый и 24-х кадровый**
 - Поле управляющего символа используется для организации служебного информационного канала передачи данных со скоростью 8 Кбит/сек.

Мультикадр Т1

● Структура 24-х кадрового мультикадра

- Канал 4 Кбит/с используется для передачи диагностической последовательности DL (diagnostic link)
- два канала по 2 Кбит/с используются для передачи сигнала обрамления мультикадра FAS (frame alignment signal) (001011) и 6-ти разрядной контрольной суммы CRC.
- Сигнал FAS используется для обеспечения мультикадровой синхронизации приемника и передатчика. Для передачи сигнальной информации используются биты №8 всех тайм слотов каждого шестого кадра мультикадра (6,12,18,24).

● Структура 12-ти кадрового мультикадра

- Технологический канал используется для передачи двух последовательностей FAS (010101) и S-бит. Последовательность S имеет две функции: она может использоваться для разделения мультикадров или для передачи информации об аварии на удаленном абоненте

Структура кадров T2

● В состав кадра потока T2 входят

- четыре потока T1 $\{ 4 \times (24 \times 8) = 768 \text{ бита} \}$
- + 5 управляющих битов $\{ 5 \text{ бит} \}$
- + два сигнальных канала 8 Кбит/сек $\{ 2 \times 8 = 16 \text{ бит} \}$

Итого: 789 бит

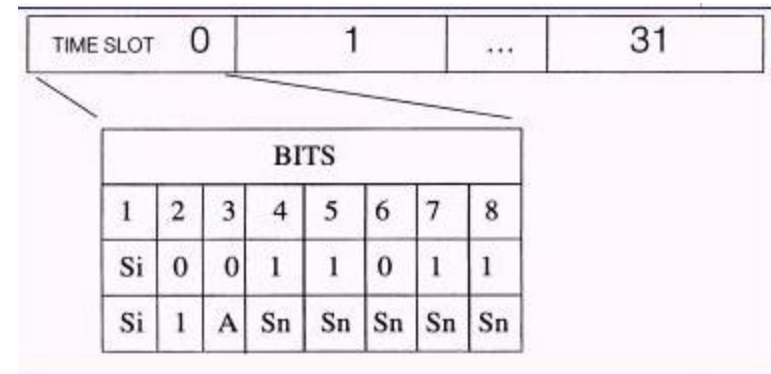
● Частота повторения кадров T2 составляет 8000 Гц.

● Скорость потока T2 = 6,144 Мбит/с

● Биты кадра T2 нумеруются от 1 до 789.

Поток E1 с цикловой структурой

- Неструктурированный поток E1 не имеет цикловой структуры
- Структурированный поток E1
 - Разделен на 32 канальных интервала (Time Slot - TS) от TS0 до TS31
 - В канальном интервале 8 бит
 - ✓ длина цикла = 256 бит (8 x 32),
 - ✓ длительность цикла = 125 мкс,
 - ✓ скорости потока E1 = 2,048 Мбит/с
 - В канальный интервал мультиплексированы BRI = 64 кбит/с
 - В TS0 передается сигнал кадровой синхронизации FAS (Frame Alignment Signal)
 - Существуют процедуры контроля ошибок по CRC, а также описание процедур мультиплексирования и демultipлексирования каналов ТЧ в поток E1.



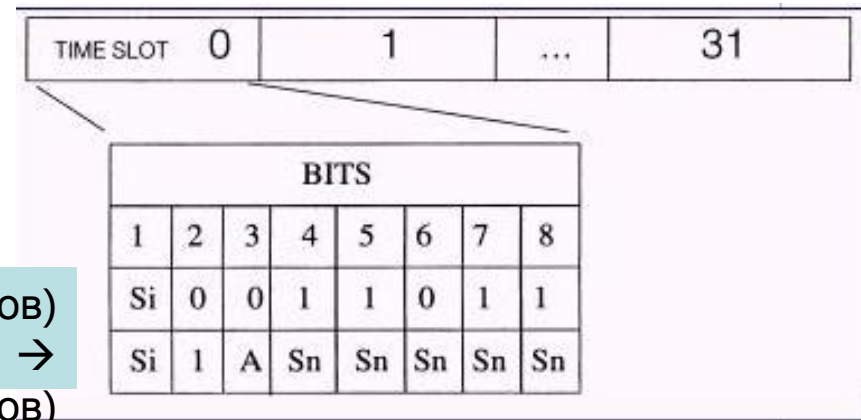
Поток E1 с цикловой структурой

Начало кадра определяется по FAS

- Различаются четные и нечетные кадры
- В TS0 нечетных кадров (циклов) FAS (первая строчка) = цикловая/кадровая синхронизации 0011011 и зарезервированный бит (Si)
- В TS0 четных циклов (кадров) передается NFAS (не содержится FAS)

Структура NFAS

- Si - зарезервированы для международного использования
- A - для сигнализации неисправностей
- Sn4-Sn8 - для сетевого управления, диагностики и дополнительных процедур контроля ошибок



FAS (в TS0 нечетных циклов)



NFAS (в TS0 четных циклов)

Варианты циклов потока E1

● Существует вариант потока E1 с цикловой структурой ИКМ-31

- $E1 = 31B + D$
- используется в ряде систем передачи данных, а также в некоторых приложениях OKC7, ISDN и B-ISDN.

● Существует вариант потока E1 с цикловой структурой ИКМ-30

- $E1 = 30B + D$
- шестнадцатый канальный интервал (TS-16) используется для сигнализации разговорного канала (сигнализации CAS)
- В этом случае поток E1 имеет дополнительно к цикловой структуре еще и сверхцикловую структуру (MFAS - Multi Frame Alignment Signal).
 - ✓ 16 циклов объединяются в сверхцикл

Структура кадров E1

● Биты TS0 используются для управления

■ В четных кадрах

- ✓ первый бит TS0 (бит C) используется для передачи контрольной суммы CRC-4 субмультикадра.
- ✓ Остальные 7 бит используются для синхронизации кадра (0011011).

■ В нечетных кадрах

- ✓ первый бит TS0 используется для синхронизации мультикадра (001011) и сигналов E нарушения контрольной суммы.
- ✓ Третий бит используется для передачи сигнала «удаленная тревога».

● Биты TS16 используются для канальной сигнализации (ABCD)

- В тайм слотах TS16 передаются биты сигнализации ABCD для каналов с 1 по 15 и с 17 по 31.

Роль TS0 в сверхцикле E1 ИКМ-30

- Каждый сверхцикл разбит на 2 подцикла (SMF).

SMF#1 - Подцикл 1

SMF#2 - Подцикл 2

c1, c2, c3, c4 - биты CRC

000011 - сигнал сверхцикловой синхронизации для CRC

E1 и E2 идентифицируют ошибку по CRC (E=1 - нет ошибки, E=0 - ошибка по CRC)

Sn = биты, зарезервированные под задачи национального использования и для передачи управляющей информации сетевого уровня

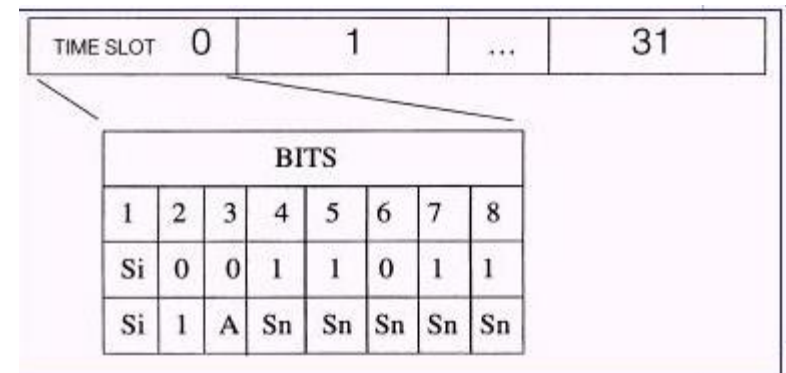
Субкадровая синхронизация

Кадровая синхронизация

Сверхцикл									
Канальный интервал 0									
Подцикл	Цикл	Биты							
		Бит1	Бит2	Бит3	Бит4	Бит5	Бит6	Бит7	Бит8
SMF #1	FAS 1	c1	0	0	1	1	0	1	1
	NFAS 2	0	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
	3	c2	0	0	1	1	0	1	1
	4	0	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
	5	c3	0	0	1	1	0	1	1
	6	0	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
	7	c4	0	0	1	1	0	1	1
	8	0	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
SMF #2	9	c1	0	0	1	1	0	1	1
	10	1	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
	11	c2	0	0	1	1	0	1	1
	12	1	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
	13	c3	0	0	1	1	0	1	1
	14	E1	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8
	15	c4	0	0	1	1	0	1	1
	16	E2	1	A	Sn4	Sn5	Sn6	Sn7	Sn8

Роль TS0 в сверхцикле E1 ИКМ-30

- Реализованы процедуры контроля ошибок передачи (CRC-4)
 - встроенная диагностики параметров ошибок в канале
 - Используются биты S_i в составе циклового заголовка FAS и NFAS сверхцикловой структуры из 16 циклов
 - Оборудование передачи E1 производит расчет суммы CRC-4 [полином $X(4)+X+1$] и включает результаты суммы в сигнал следующего сверхцикла
 - Оборудование приемника E1 принимает сигнал, производит аналогичный расчет и сравнение полученной суммы и переданной в следующем сверхцикле. Если полученная сумма не равна принятой генерируется сигнал ошибки CRC-4.
 - В линейное оборудование и системы самодиагностики цифровых каналов ИКМ встраивается функция анализа по CRC-4.



Роль TS16 в сверхцикле E1 ИКМ-30

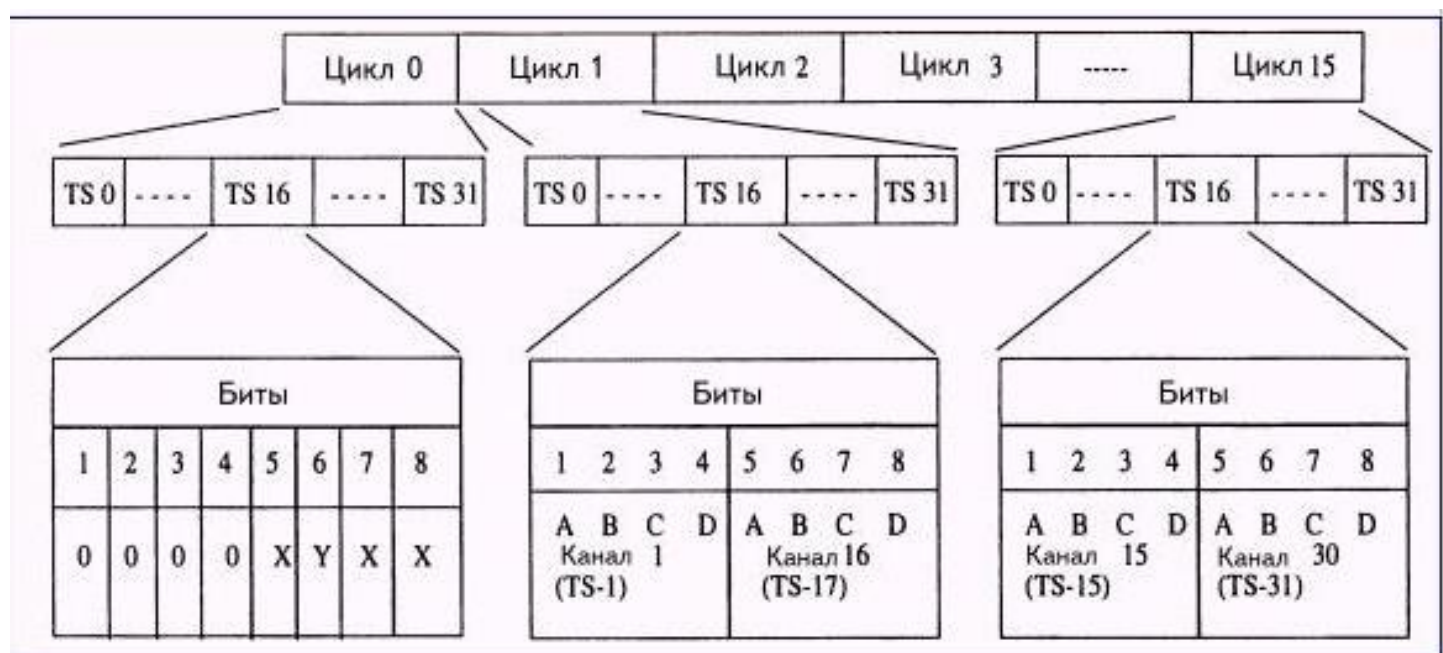
- Тайм-слот 16 (TS16) в “Цикле 0” содержит информацию MFAS о сверхцикле

- Сигнал MFAS=0000XYXX

X- запасные биты (1 обычно не используется)

Y- удаленная неисправность MFAS (равно 1 в случае, если потеряна сверхцикловая синхронизация) .

- TS16 в остальных пятнадцати циклах используются для передачи сигнальной информации (ABCD)



Процедуры управления Е1

● Сигналы о неисправностях фиксируются во встроенных средствах диагностики

- Эта информация собирается в узлах системы управления и обрабатывается

● Сообщения делятся на три категории:

1. сообщения о возникновении ошибок в системе передачи;
 2. сообщения о неисправностях, возникающих в системе передачи;
 3. сообщения, используемые для реконфигурации первичной сети и восстановления плана синхронизации
- Последняя категория сообщений сетевого уровня Е1, получивших название сообщений SSM (System Synchronization Messages - сообщения в системах синхронизации)

Процедуры управления E1

1. Сообщения о возникновении ошибок в системе передачи;

- Передаются в сообщениях E1E2.
- E-сообщения подтверждают возникновения блочной ошибки CRC и служат критерием качества цифровой системы передачи.

2. Сообщения о неисправностях в системе передачи

- Передаются в циклах NFAS, а также битами MFAS в случае, если поток E1 имеет сверхцикловую структуру.
- В составе четных циклов NFAS входят биты, зарезервированные под задачи национального использования (бит A и биты Sn4, Sn5, Sn6, Sn7, Sn8)
- Помимо битов Sn для передачи сообщений о неисправностях могут использоваться биты XXYY MFAS

Процедуры управления Е1

● Сообщения о неисправностях в системе передачи

- Бит Y является индикатором неисправности MFAS на удаленном конце
- Бит A (называется Sn3) - бит “оперативного сигнала” о неисправности
 - ✓ Существенная неисправность, называют RDI (Remote Defect Indication - Индикация дефекта на удаленном конце)
- Бит Sn4=1 – бит "не оперативного сигнала" неисправности
 - ✓ Например, параметр ошибки BER в FAS становится хуже, чем 10^{-3}
 - Получив этот сигнала система управления может перевести на резервный канал Е1
 - ✓ неисправность в цепи питания кодека
 - ✓ потерян входной сигнал или имеет место сбой цикловой синхронизации
- Биты Sn5, Sn6, Sn7, Sn8 образуют **служебный канал** 2 кбит/с, который может использоваться для передачи сигналов о неисправностях
 - ✓ Тип сообщений и алгоритм их генерации устанавливается национальными стандартами, производителями оборудования или операторами
 - ✓ Использование битов Sn дает возможность разграничить степень ответственности различных операторов

Структура кадров E2

- **Размер кадра E2 1056 бит, 132 байта, которые пронумерованы от 0 до 131.**
- **В тайм слотах 5-32, 34-65, 71-98, 100-131 передаются данные 120 телефонных каналов с 1 по 120.**
- **Для обеспечения передачи битов сигнализации и управляющих последовательностей 16 кадров E2 объединяются в мультикадр.**
 - Схема формирования последовательностей сигнализации в мультикадре E2 такая же, как и в мультикадре E1.
 - ✓ Различие заключается лишь в том, что для передачи сигнализации используется не один тайм слот, а четыре.
 - Для передачи бит сигнализации используются четыре тайм слота TS67—S70

PDH потоки для передачи данных

- Цифровые структуры PDH были разработаны для обеспечения передачи оцифрованного телефонного сигнала
- При передаче данных передача бит канальной сигнализации ABCD не требуется,
 - однако, когда в одном потоке передаются данные и оцифрованные телефонные каналы, необходимость передачи бит сигнализации может привести к уменьшению пропускной способности каналов передачи данных

Дробные (fractional) скорости передачи данных

- Рекомендации G.703 и G.704 предусматривают возможность использования дробных (fractional) скоростей
- $V = n * 64$ Кбит/сек, где
 - $n=1,2, \dots, 24$ (T1), обозначается FT1
 - $N=1,2, \dots, 32$ (E1), обозначаются FE1
- В том случае, когда поле тайм слотов дробного потока E1 перекрывает TS16, слот данных совпадающий по времени с TS16 и все последующие тайм слоты перемещаются на одну позицию вправо.

Дробные (fractional) скорости передачи данных

● Интеграция дробных потоков, мультиплексоры доступа

- Интеграция дробных потоков FT или FE производится по принципу временного мультиплексирования (time division multiplexing — TDM)
- Устройства, которые выполняют функцию объединения дробных потоков, называются мультиплексорами доступа.
- Процедура, которую выполняет мультиплексор доступа называется «Вырвать и Вставить» (Drop and Insert)
- Использование мультиплексоров доступа является на сегодняшний день одним из самых дешевых способов интегрирования голоса и данных. Главный недостаток этого метода заключается в невысокой эффективности использования пропускной способности канала.

Коммутация плезиохронных потоков

- Коммутацию осуществляют кросс-коннект мультиплексоры
- одновременно с мультиплексированием информационных тайм слотов они также осуществляют коммутацию соответствующих им сигнальных последовательностей

Типы цифровых интерфейсов T1, E1

- **Передача данных** производится по двум парам медных проводов (120 Ом) или по двум коаксиальным кабелям (75 Ом)
- **Полные интерфейсы**
 - предназначены для передачи данных с одной фиксированной скоростью (T1 или E1).
- **Дробные интерфейсы**
 - предназначены для передачи данных со скоростью, величина которой определяется и переопределяется при программной настройке интерфейса (FT1 или FE1).
- **Структурированные интерфейсы**
 - способны выполнять функцию мультиплексора доступа для входного потока и организовывать виртуальные логические интерфейсы, путем закрепления за ними групп тайм слотов входного потока (CE1 или CT1).
- **Элементарные интерфейсы**
 - предназначены для передачи данных со скоростью 64 Кбит/сек (G.703.1).

Параметры стандартных ИКМ систем

- **T1 (AT&T, США, 1962), позднее названная Bell D1 - 24-канальная система с выходным потоком $T1 = 1544$ кбит/с;**
- **D2 (Bell, США) - 24-канальная система, описана в ITU-T Rec. G.733 [31];**
- **U.K. (Великобритания) - 24-канальная система с выходным потоком 1536 кбит/с;**
- **CEPT (Европа) - 30-канальная система с выходным потоком $E1 = 2048$ кбит/с, описана в ITU-T Rec. G.732 [32].**

Параметры стандартных ИКМ систем

Таблица 1-1. Параметры основных существующих стандартных систем ИКМ

Параметры	Bell D1	Bell D2	U.K.	CEPT
Частотный диапазон, Гц	300-3400	300-3400	300-3400	300-3400
Частота дискретизации, Гц	8000	8000	8000	8000
Квантование: бит на выборку	7	8 (5x8/1x7)	7	8
Кодификация: бит-значение/знак	6/1	7/1	6/1	7/1
Число тайм-слотов на фрейм	24	24	24	32
Число бит (+1 бит) на фрейм	193=192+1	193=192+1	192+0	256
Число фреймов на мультифрейм	--	12	4	16
Число каналов на фрейм	24	24	24	30
Выходной поток, кбит/с	1544	1544	1536	2048
Емкость ОЦК, кбит/с	64	64	64	64
Поток данных на канал, кбит/с	56	64	56	64
Закон кодификации, значения параметров μ и A	μ -закон $\mu=100$	μ -закон $\mu=255$	A -закон $A=87,6$	A -закон $A=87,6$
Возможность внутриканальной сигнализации	1 бит/канал 8 кбит/с	1 бит/6 к-ов. 1,33 кбит/с	1 бит/2 к-ла. 4 кбит/с	отдел. слот 2 кбит/с
Сигнализация по общему каналу	не предусмотрена	вместо внут- риканальной, 4 кбит/с	не предусмотрена	отдельный слот, 64 кбит/с

Параметры стандартных ИКМ систем

- **Система Bell D1** (модификация T1), в северной Америке, 4-х проводная для передачи цифровых данных со скоростью 56 кбит/с по основному цифровому каналу (ОЦК), компания AT&T, 1973 г. [1].
- **Система Bell D2**: 8 бит на выборку в пятерках (1-5 и 7-11) фреймов и 7 бит в 6-ом и 12-ом фреймах, редуцируя закон кодификации при переходе с 8- на 7-битное квантование (позволяет передавать данные со скоростью 64 кбит/с по ОЦК). Выравнивание мультифреймов (состоящих из 12 фреймов) и допускает сигнализацию по общему каналу. Распространена в северной Америке, Японии и юго-восточной Азии, стандартизована CCITT [31]
- **Английская система**, как и в D1 7-битное кодирование, но выравнивание по мультифрейму из 4 фреймов, без 193-го бита (отсюда скорость 1536 кбит/с). Использует европейский закон кодификации (с 1968 г) для целей совместимости, передает данные со скоростью 56 кбит/с по ОЦК. Вытесняется системой СЕРТ

Параметры стандартных ИКМ систем

- Система СЕРТ развивается с начала 70-х годов, базируется на двоичных, а не на двоично-десятичных эквивалентах (как три предыдущие), 8-битная схема кодификации и 32 (а не 24) канала для первичного уровня мультиплексирования.
 - тайм-слот 0 для синхронизации (выравнивания кадров) и передачи системного статуса
 - тайм-слот 16 - канал сигнализации - 64 кбит/с.
 - Число кадров в мультикадре также кратно 2 и зависит от типа сигнализации.
 - ✓ при внутриканальной сигнализации используется 16 кадров на мультикадр,
 - ✓ при использовании общего канала сигнализации - 2 кадра на мультикадр
 - Схема выравнивания проста и кратна 2: 8 бит на кадр при выравнивании кадра и 8 бит на 16 кадров для выравнивания мультикадра
 - СЕРТ фактически доминирует не только в Европе, но и в мире

Методы линейного кодирования потока данных в канале

Аспекты кодирования

- ❶ Двоичная ИКМ последовательность подается в канал связи, на входе которого, используется устройство сопряжения с каналом (или интерфейсный блок) и собственно передатчик. Физическая среда передачи данных может быть электрической, оптической или радиоканалом
- ❷ Поэтому ИКМ последовательность дважды перекодируется для оптимизации ее прохождения
 1. через интерфейс (интерфейсное кодирование) +
 2. через передатчик, сопрягающийся с физической средой (линейное кодирование).
- ❸ Два других вида кодирования:
 3. помехоустойчивое кодирование для обнаружения и исправления ошибок, возникающих в процессе передачи,
 4. а также шифрование данных, передаваемых такой последовательностью,мы не рассматриваем в рамках данной лекции

Зачем нужно линейное кодирование?

- Поток бит, полученный в результате квантования и двоичного кодирования (кодификации), оптимален только с точки зрения уменьшения ошибок квантования, но непригоден для передачи по каналу связи по ряду причин, основные из которых следующие:
 - выходной цифровой поток имеет широкий спектр, что затрудняет его передачу по каналу связи с ограниченной полосой пропускания;
 - спектр сигнала имеет значительную долю низкочастотных составляющих, которые могут интерферировать с составляющими передаваемого низкочастотного сигнала;
 - спектр содержит большую постоянную составляющую, усложняющую фильтрацию напряжения сети питания

Что обеспечивает линейное кодирование:

- **Линейный код обеспечивает формирование требуемого спектра передаваемого сигнала, а также условий по обеспечению синхронизации внутренних генераторов тактовой частоты приемника и передатчика, а именно:**
 - минимальную спектральную плотность на нулевой частоте и ее ограничение на нижних частотах;
 - информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала в виде дискретной составляющей, легко выделяемой приемником на фоне непрерывной части спектра;
 - достаточно узкополосный непрерывный спектр для передачи сигнала через канал связи без искажений;
 - малую избыточность, для снижения относительной скорости передачи в канале связи;
 - минимально возможные длины блоков повторяющихся символов ("1" или "0") и диспаратетность (неравенство числа "1" и "0" в кодовых комбинациях)

Методы кодирования (1)

- Для двоичного кодирования число уровней входного сигнала $m=2$, а число уровней выходного сигнала n может быть:
- Двухуровневое кодирование ($n=2$)
 - однополярное (+1, 0)
 - двухполярное, или симметричное (+1, -1)
- Трехуровневое кодирование ($n=3$)
 - однополярное (+2, +1, 0)
 - двухполярное (+1, 0, -1)

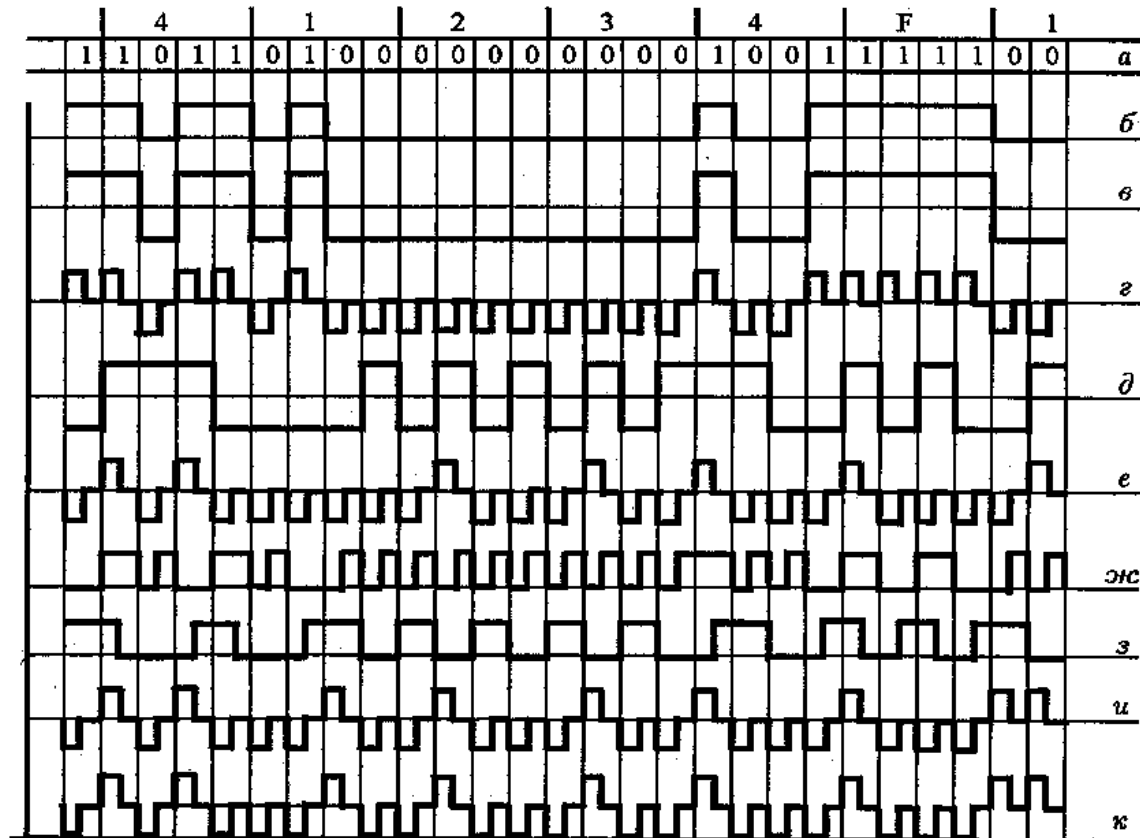
Например, оптические линии связи требуют однополярных методов кодирования, тогда как электрические линии связи могут использовать как однополярные, так и двухполярные методы кодирования

Методы кодирования (2)

- **Представление “1” и “0” в различных методах кодирования:**
 - “1”
 - ✓ положительный импульс на полную или на половинную длину двоичного интервала
 - ✓ или переходом с “+1” на “0” или “-1” (ступенькой вниз) в центре интервала
 - “0”
 - ✓ отрицательный импульс
 - ✓ или отсутствием импульса
 - ✓ или обратным переходом с “-1” или “0” на “+1” (ступенькой вверх) в центре интервала.
- Для ограничения длины блоков повторяющихся символов типа “11...N” или “00...00” используется **инверсия** [“обращение” или незапланированное (преднамеренное) изменение] **полярности** импульсов регулярной кодовой последовательности, обозначаемая ниже буквой “V”.
- Наряду с инверсией иногда используются **вставки** (дополнительные символы определенной полярности, обозначаемые ниже буквой V), позволяющие сохранить паритет кодовой комбинации

Примеры линейного кодирования

- а) исходная двоичная последовательность бит
- б) однополярный код без возвращения к нулю - NRZ
- в) двухполярный NRZ или симметричный телеграфный код
- г) двухполярный код с возвращением к нулю - RZ
- д) код с поразрядно-чередующейся инверсией - ADI (инверсия полярности на каждом втором разряде, хоть он, 0 или 1)
- е) код с чередующейся инверсией на 1 – AMI (RZ код с инверсией на каждой 1)
- ж) код с инверсией кодовых комбинаций - CMI;
- з) двухполярный двухуровневый код Миллера;
- и) - биполярный код высокой плотности порядка 3 - HDB3;
- к) - однополярный эквивалент кода HDB3 в оптической линии связи



Алгоритмы формирования кодов (1)

- **1b2b** - частный случай класса блочных кодов (mbnb), 1 бит длительностью T кодируется комбинацией из 2 бит длительностью $T/2$ (относительная скорость передачи в канале связи при этом возрастает в 2 раза). К этому классу относятся коды CMI и Миллера
- **ADI** - Alternate Digit Inversion code - двоичный код с инверсией полярности сигнала на каждом втором двоичном разряде (не важно, какой он: "1" или "0"); в результате формируется двухполярный двухуровневый код
- **AMI** - Alternate Mark Inversion code - двоичный код RZ с инверсией на каждой "1", может быть получен из кода ADI путем инверсии каждой четной "1"; в результате формируется двухполярный трехуровневый код
- **B3ZS** - Bipolar with 3 Zero Substitution code - биполярный код с подстановкой альтернативных блоков вместо блоков из трех "0", т.е. вместо блока "000" происходит подстановка блоков "00V" или "B0V" для сохранения паритета - аналог кода HDB2 (см. ниже)

Алгоритмы формирования кодов (2)

- **B6ZS - Bipolar with 6 Zero Substitution code** - биполярный код с подстановкой альтернативных блоков вместо блоков из 6-ти "0", т.е. вместо "000000" блоков "0VB0VB".
- **B8ZS - Bipolar with 8 Zero Substitution code** - биполярный код с подстановкой альтернативных блоков вместо блоков из 8-ми "0", т.е. вместо "00000000" блоков "000VB0VB".
- **CMI - Coded Mark Inversion code** - двухуровневый без возвращения к нулю двоичный код класса 1Б2Б с инверсией полярности кодовой комбинации на полный интервал на каждой "1" (т.е. каждой "1" ставится в соответствие либо комбинация "11", либо "00") и изменением полярности в середине каждого интервала "0" (т.е. каждому "0" ставится в соответствие дипульс "01").
- **HDB2 - High-Density Bipolar code of order 2** - двухполярный код высокой плотности порядка 2 - код RZ с инверсией на "1" (аналогичен AMI), в котором каждый блок "000" заменяется на блок "OOV" или "BOV", где В - вставка импульса "1" выполняемая так, чтобы число В импульсов между последовательными V импульсами было нечетным. В результате формируется трехуровневый код.

Алгоритмы формирования кодов (5)

- **HDB3 - High-Density Bipolar code of order 3** - двухполярный код высокой плотности порядка 3 - код с инверсией на "1", в котором каждый блок "0000" заменяется на блок "000V" или "V00V", где V - вставка импульса "1" выполняемая так, чтобы число V импульсов между последовательными V импульсами было нечетным. В результате формируется трехуровневый код
- **mbnb** - общее обозначение класса блочных кодов - где т - длина (в битах) блоков, на которые разбивается исходная ИКМ последовательность, а и - соответствующая им длина (в битах) блоков, составленных из кодовых символов. Среди них достаточно широко используется класс 1b2b (см. выше).
- **NRZ - Non Return to Zero code** - основополагающий двухуровневый код без возвращения к нулю, может быть как двуполярным, так и однополярным
- **RZ - Return to Zero code** - основополагающий трехуровневый код с возвращением к нулю
- **Miller code** - двуполярный двухуровневый код Миллера класса 1b2b, имеющий множество состояний {00, 01, 10, 11}, переходы между которыми описываются графом

Методы линейного кодирования

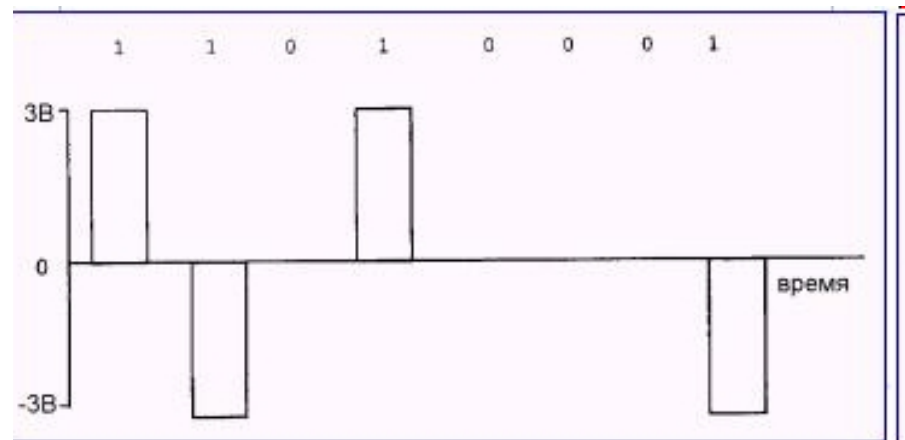
● Методы линейного кодирования

- Тип линейного кода обеспечивает формирование требуемого спектра передаваемого сигнала, а также условий по обеспечению синхронизации внутренних генераторов тактовой частоты приемника и передатчика.

Кодирование AMI

● AMI (*Alternate Mark Inversion*) инверсия альтернативного бита.

- Использует инверсию каждой следующей 1
 - ✓ Двоичный ноль передается нулевым напряжением
 - ✓ Двоичная единица - чередованием положительного и отрицательного напряжения.
- У сигнала практически отсутствует постоянная составляющая. Однако, при передаче последовательности двоичных нулей кодированный AMI сигнал не изменяется во времени. Использование алгоритма AMI не позволяет решить проблему синхронизации.

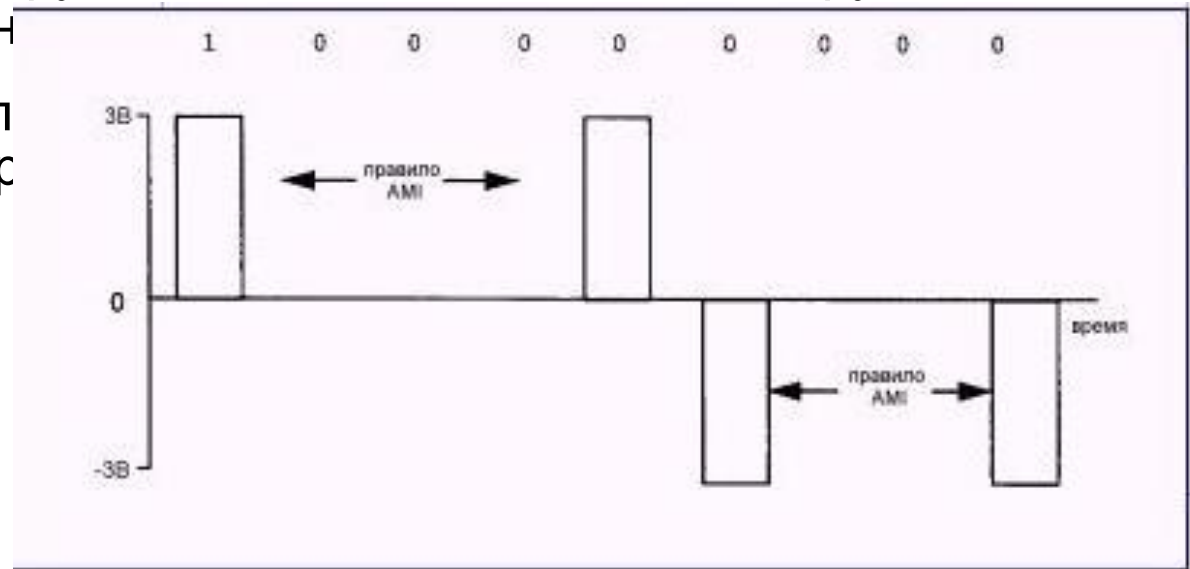


Кодирование HDB3

● HDB3 (*High-Density Bipolar code of order 3*) - двухполярный код высокой плотности порядка 3

- код с инверсией на "1", в котором каждый блок "0000" заменяется на блок "000V" или "B00V", где V - вставка импульса "1" выполняемая так, чтобы число V импульсов между последовательными V импульсами было нечетным. В результате формируется трехуровневый код.
- Комбинация из четырёх последовательных нулей во входном сигнале заменяется группой B00V, где B — компенсирующий бит, а V — бит, который н
- Вставляемые биты п положительной и отрицательной полярности

За последовательностью из четырех последовательных нулей следует двухимпульсная вставка "плюс импульс-минус импульс".

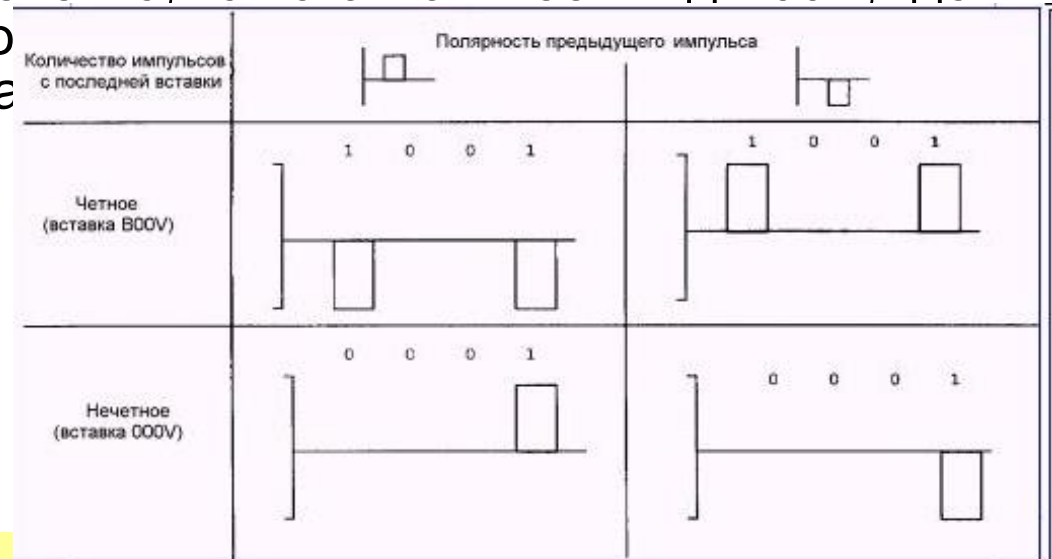


Пример HDB3

● Пример кодирования по HDB3 комбинации 1000 0000

● правила B00V вставок

- Тип вставки определяется полярностью последнего инвертированного бита и количеством битов последовательности предыдущей вставки.
- Если это количество четное, вставляется 000V; при этом полярность V такая же, как и непосредственно предшествовавшего импульса.
- Если количество битов нечетно, то вставка имеет вид B00V, где полярность B - противоположна полярности V такая же, как



Кодирование B8ZS

- B8ZS - *Bipolar with 8 Zero Substitution* code - биполярный код с подстановкой альтернативных блоков вместо блоков из 8-ми "0"
 - т.е. вместо "00000000" блоков "000VB0VB".
- Подавление 8-ми последовательных двоичных нулей — Binary 8 Zeros Suppression (????)
 - Специально сформированная последовательность положительных и отрицательных импульсов **образ** нарушает правило чередования полярности **bipolar violation (BPV)**, и следовательно, может быть распознан на приемном конце и заменен на 8 нулей
 - Существует и такая трактовка (проверить как правильно).