

Упражнение 2

ЦИФРОВО МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ

След завършване на упражнението студентът ще може да:

- ✓ Обясни необходимостта от мултиплексиране
- ✓ Разграничава техниките за мултиплексиране
- ✓ Обяснява основните характеристики на FDM и TDM
- ✓ Разграничава между синхронен и асинхронен TDM

Въведение

Наблюденията показват, че повечето от отделните устройства за предаване на данни обикновено изискват малка скорост на предаване на данни. Но комуникационните медии обикновено имат много по-висока честотна лента. В резултат на това две комуникационни станции не използват пълния капацитет на връзката за данни. Освен това, когато много възли се конкурират за достъп до мрежата, някои ефективни техники за използване на връзката за данни са много важни. Когато честотната лента на носителя е по-голяма от отделните сигнали, които трябва да се предават през канала, една среда може да бъде споделена от повече от един канал. Процесът на най-ефективно използване на наличния капацитет на канала се нарича мултиплексиране. За ефективност капацитетът на канала може да бъде споделен между редица комуникационни станции, точно както голяма водопроводна тръба може да пренася вода до няколко отделни къщи наведнъж. Най-честата употреба на мултиплексиране е при комуникация на дълги разстояния, използвайки коаксиален кабел, радиовълни и оптично влакно.

Фигура 2.7.1 изобразява функционирането на мултиплексирането като цяло. Мултиплексорът е свързан към демултиплексора чрез единична връзка за данни. Мултиплексорът комбинира (мултиплексира) данни от тези „n“ входни линии и ги предава през връзката за данни с голям капацитет, която се демултиплексира в другия край и се доставя до съответните изходни линии. **По този начин мултиплексирането може да се дефинира и като техника, която позволява едновременно предаване на множество сигнали през една връзка за данни.**

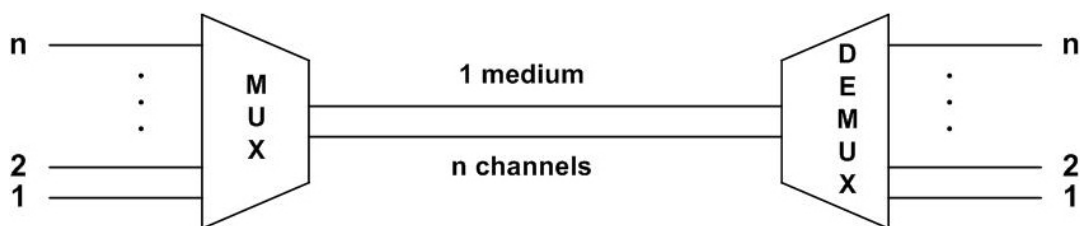


Figure 2.7.1 Базова концепция на мултиплексирането

Техниките за мултиплексиране могат да бъдат категоризирани в следните три типа:

- **Мултиплексиране по честота - Frequency-division multiplexing (FDM):** Най-популярен и се използва широко в радио и телевизионно предаване. Тук честотният спектър е разделен на няколко логически канала, давайки на всеки потребител определена честотна лента.

- **Мултиплексиране по време - *Time-division Multiplexing (TDM)***: Нарича се още синхронен TDM, който обикновено се използва за мултиплексиране на дигитализиран гласов поток. Потребителите се редуват да използват целия канал за кратък период от време.
- **Статистическо мултиплексиране по време – *Statistical TDM***: Това се нарича още асинхронен TDM, който просто подобрява ефективността на синхронния TDM.

2.7.2 Frequency-Division Multiplexing (FDM)

При мултиплексирането с честотно разделение наличната честотна лента на една физическа среда се разделя на няколко независими честотни канала. Независимите сигнали на съобщенията се превеждат в различни честотни ленти, използвайки техники на модулация, които се комбинират от линейна сумираща верига в мултиплексора, до композитен сигнал. След това полученият сигнал се предава по единичния канал, както е показано на фиг. 2.7.2. Основният подход е да се раздели наличната честотна лента на една физическа среда на няколко по-малки, независими честотни канали. Използвайки модулация, независимите сигнали за съобщения се превеждат в различни честотни ленти. Всички модулирани сигнали се комбинират в линейна сумираща верига, за да образуват композитен сигнал за предаване. Носителите, използвани за модулиране на отделните сигнали на съобщението, се наричат подносещи, показани като f_1, f_2, \dots, f_n на Fig. 2.7.3 (a).

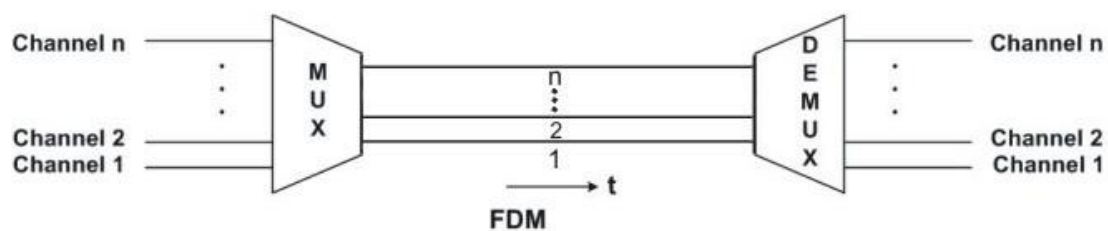


Figure 2.7.2 Основна концепция на FDM

На приемния край сигналът се прилага към група лентови филтри, които разделят отделните честотни канали. След това изходите на лентовия филтър се демодулират и разпределят към различни изходни канали, както е показано на Fig. 2.7.3(b).

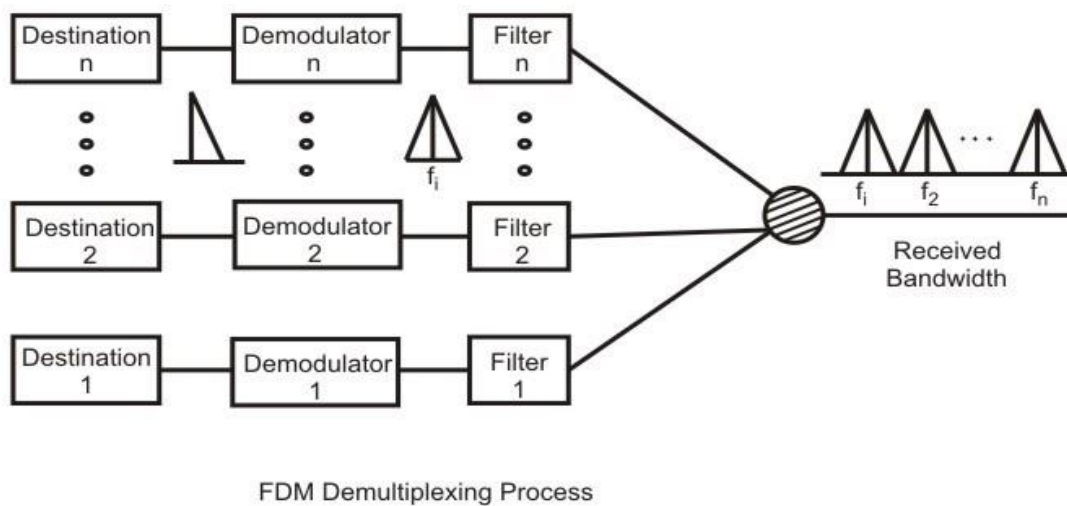
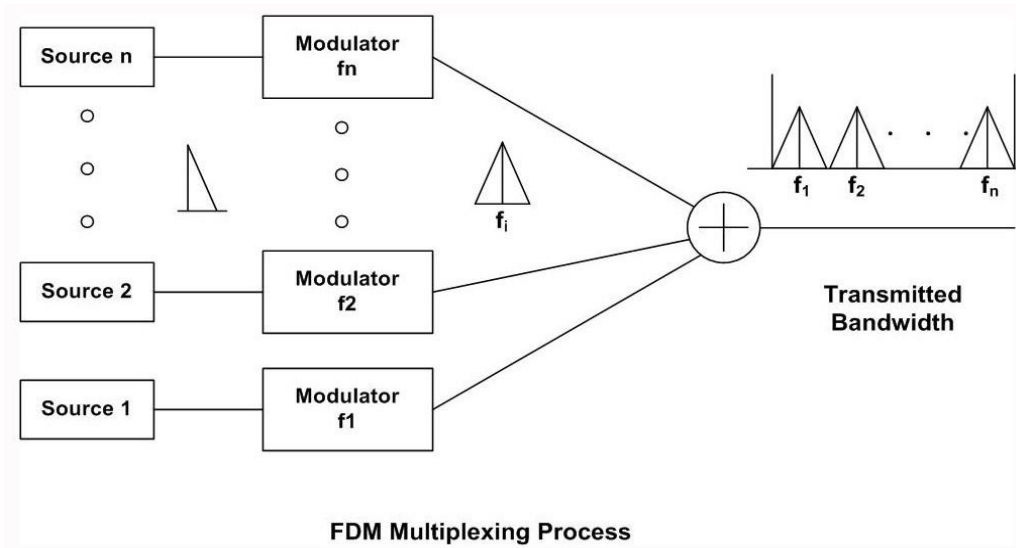


Figure 2.7.3 (a) FDM мультиплексор, (b) FDM демультиплексор

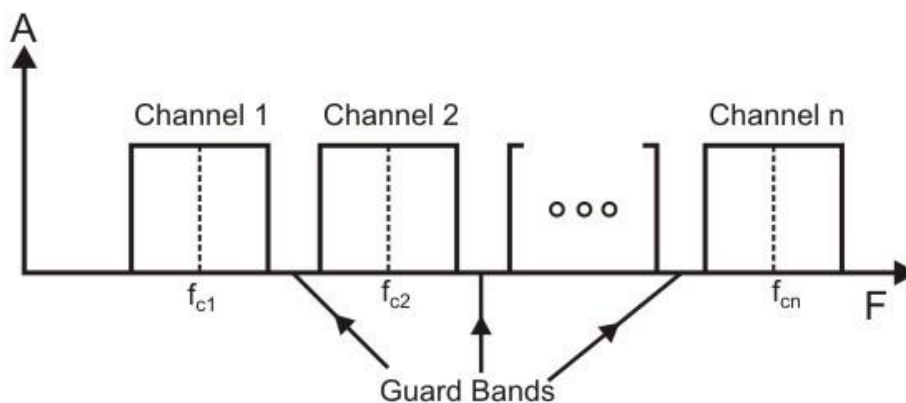


Figure 2.7.4 Използване на защитни ленти в FDM

Ако каналите са много близо един до друг, това води до междуканални кръстосани смущения. Каналите трябва да бъдат разделени с ленти с неизползвана честотна лента, за да се предотврати кръстосана комуникация между каналите. Тези неизползвани канали между всеки последователен канал са известни като защитни ленти, както е показано на Fig. 2.7.4.

FDM обикновено се използват в радиопредавания и телевизионни мрежи. Тъй като честотната лента, използвана за гласово предаване в телефонна мрежа, е 4000 Hz, за конкретен кабел с честотна лента от 48 KHz, в диапазона от 70 до 108 KHz, дванадесет отделни подканала от 4 KHz могат да се използват за предаване на дванадесет различни съобщения едновременно. Всяка радио и телевизионна станция, в определена зона на излъчване, получава определена честота на излъчване, така че независими канали могат да се изпращат едновременно в различна зона на излъчване. Например, AM радиото използва честотни ленти от 540 до 1600 KHz, докато FM радиото използва честотни ленти от 88 до 108 MHz.

2.7.3 Wavelength-Division Multiplexing (Мултиплексиране по дължината на вълната)

Мултиплексирането по дължината на вълната (WDM) е концептуално същото като FDM, с изключение на това, че мултиплексирането и демултиплексирането включват светлинни сигнали, предавани през оптични канали. Идеята е същата: ние комбинираме различни честотни сигнали. Разликата обаче е, че честотите са много високи. Той е проектиран да използва възможностите за висока скорост на данни на оптичния кабел. Много тесни ленти на светлинен сигнал от различни източници се комбинират, за да се получи по-широка лента от светлина. В приемника сигналите се разделят с помощта на демултиплексор, както е показано на Fig. 2.7.5.

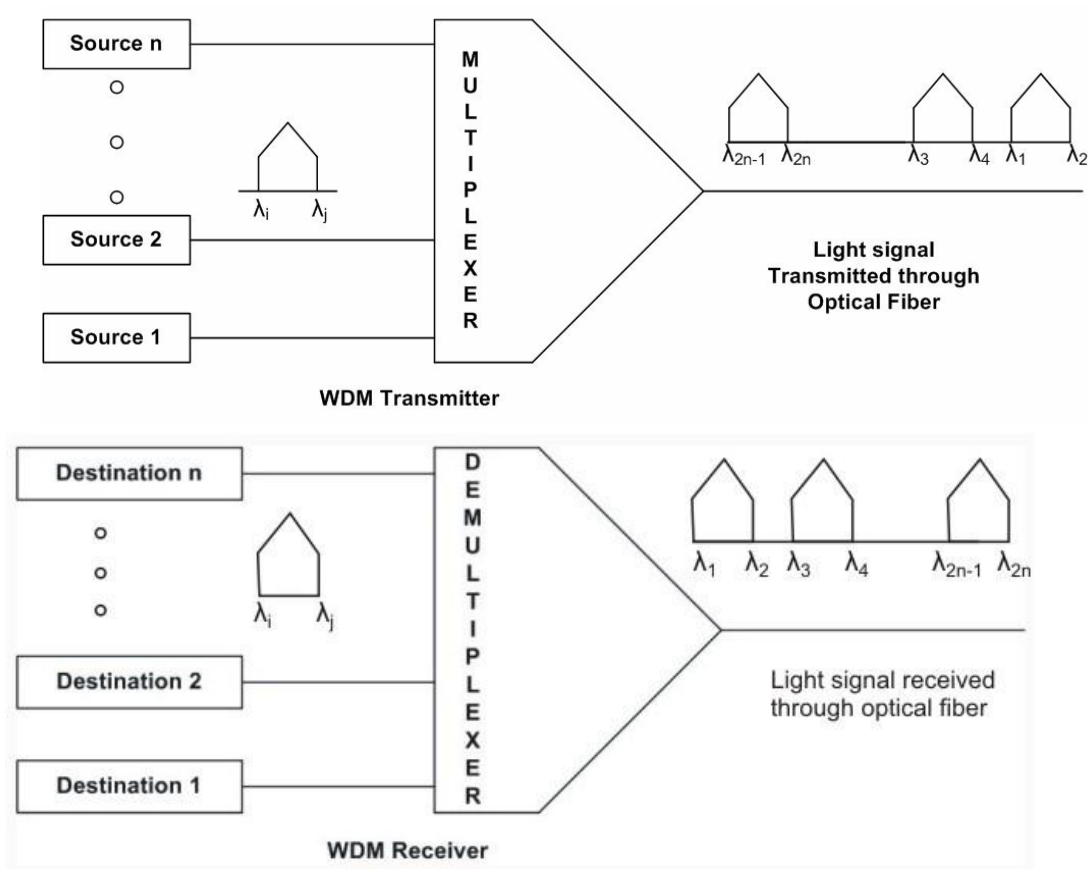


Figure 2.7.5 WDM мултиплексиране и демултиплексиране

Мултиплексирането и демултиплексирането на светлинни сигнали може да се извърши с помощта на призма, както е показано на фиг. 2.7.6. От основните познания по физика знаем, че светлинният сигнал се огъва с различно количество въз основа на ъгъла на падане и дължината на вълната на светлината, както е показано с различни цветове на фигурата. Една призма изпълнява ролята на мултиплексор, като комбинира светлини с различни честоти от различни източници. Композитният сигнал може да се предава чрез оптичен кабел на дълги разстояния, ако е необходимо. В другия край на кабела с оптични влакна композитният сигнал се прилага към друга призма за извършване на обратната операция, функцията на демултиплексор.

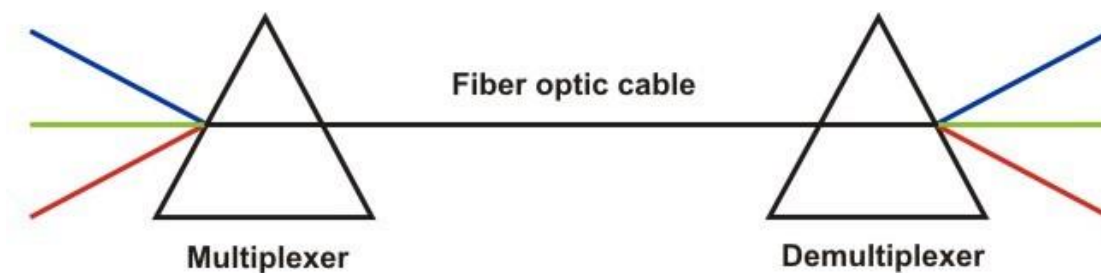


Figure 2.7.6 Мултиплексиране и демултиплексиране с помощта на призма

2.7.4 Time-Division Multiplexing (TDM) - Мултиплексиране по време

При мултиплексиране с разделяне на честота всички сигнали работят едновременно с различни честоти, но при мултиплексиране по време всички сигнали работят с една и съща честота в различно време. Това е система за предаване на базова лента, при която електронен комутатор последователно взема данни от всички източници на данни и ги комбинира, за да образува композитен сигнал с основна лента, който се движи през медиите и се демултиплексира в подходящи независими сигнали за съобщения от съответния комутатор в приемащия край. Входящите данни от всеки източник се буферират за кратко. Всеки буфер обикновено е с дължина един бит или един знак. Буферите се сканират последователно, за да образуват съставен поток от данни. Операцията по сканиране е достатъчно бърза, така че всеки буфер се изпразва, преди да могат да пристигнат повече данни. Съставната скорост на данни трябва да бъде най-малко равна на сбора от индивидуалните скорости на данни. Съставният сигнал може да се предава директно или чрез модем. Операцията на мултиплексиране е показана на фиг. 2.7.7

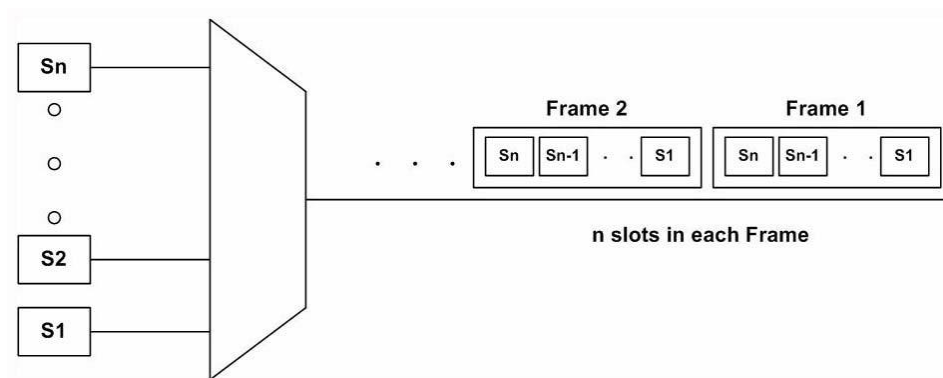
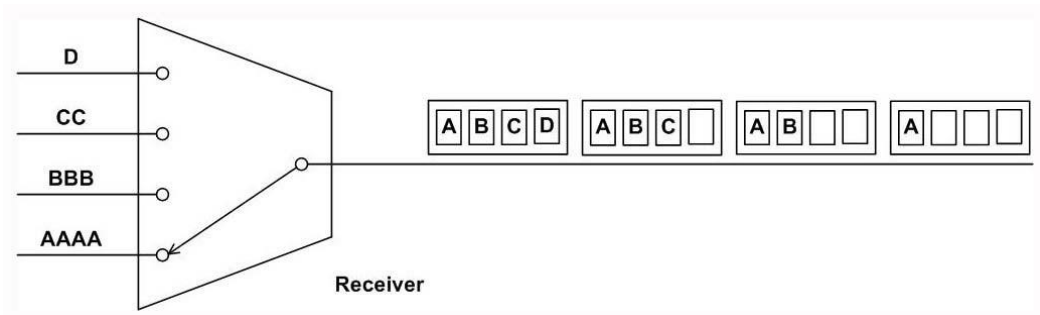
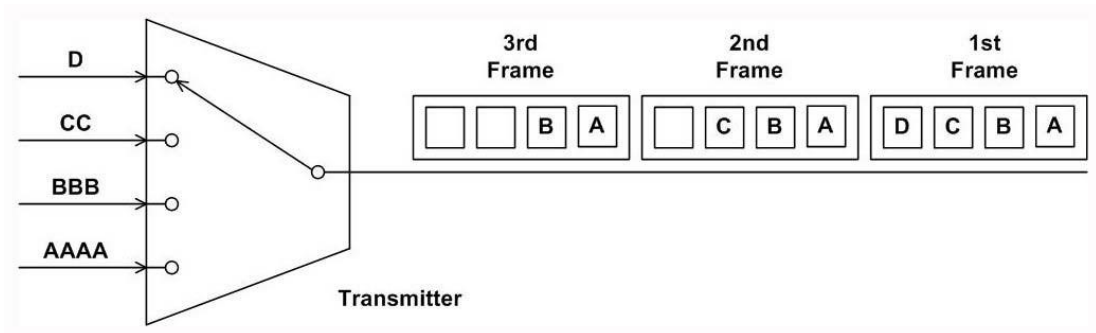


Figure 2.7.7 TDM

Както е показано на фигура 2.7.7, композитният сигнал има известно мъртво пространство между последователните пробни импулси, което е от съществено значение за предотвратяване на кръстосани междуканални разговори. Заедно с пробните импулси, един синхронизиращ импулс се изпраща във всеки цикъл. Тези импулси от данни заедно с контролната информация образуват рамка. Всеки от тези кадри съдържа цикъл от времеви интервали и във всеки кадър един или повече слотове са посветени на всеки източник на данни. Максималната честотна лента (скорост на данни) на TDM система трябва да бъде поне равна на същата скорост на данни на източниците.

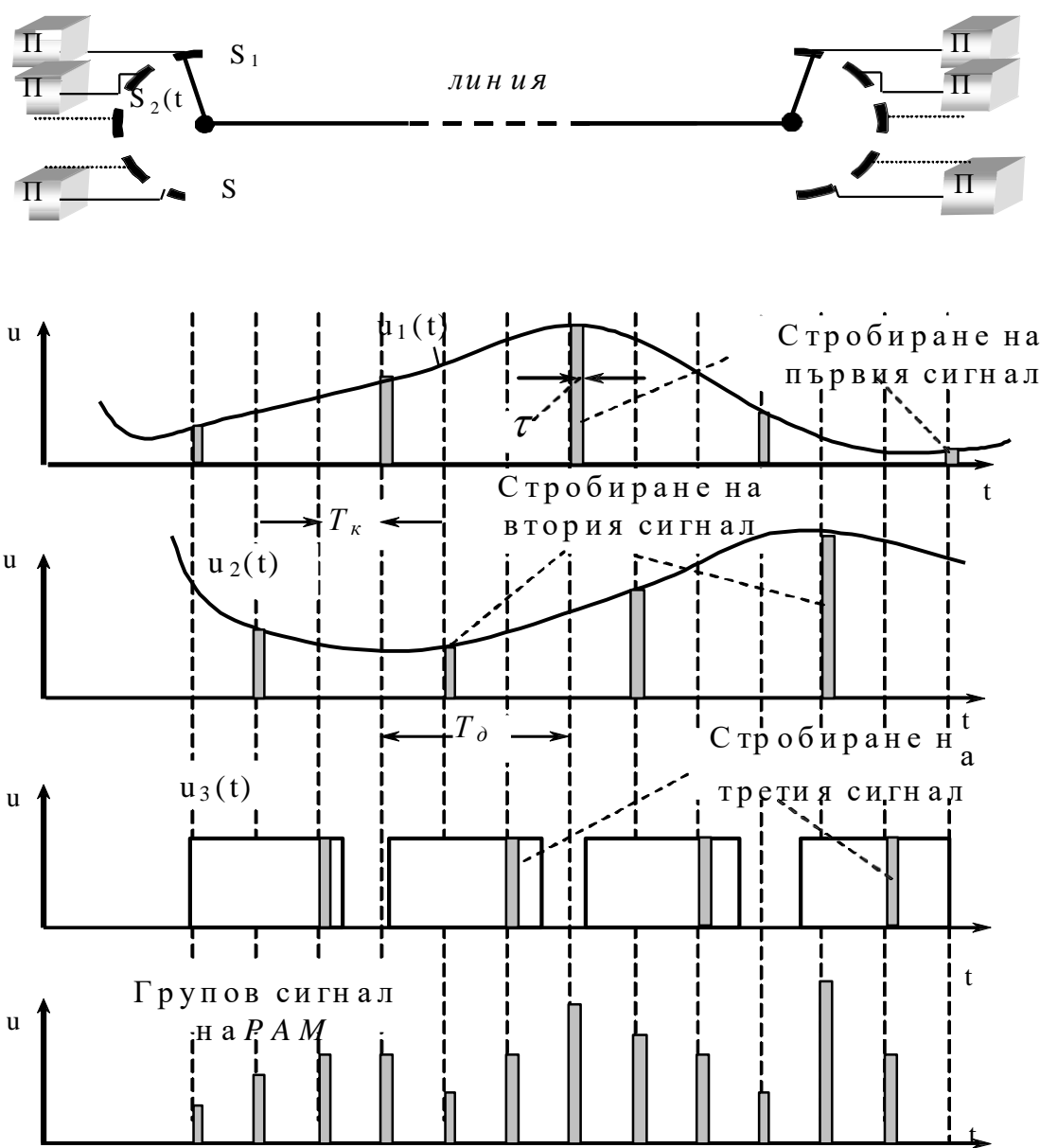
Синхронният TDM се нарича синхронен главно защото всеки времеви слот е предварително зададен на фиксиран източник. Времевите интервали се предават независимо от това дали източниците имат данни за изпращане или не. Следователно, с цел простота на изпълнение, капацитетът на канала се губи. Въпреки че се използва фиксирано присвояване на TDM, устройствата могат да обработват източници с различни скорости на данни. Това се прави чрез присвояване на по-малко слотове на цикъл на по-бавните входни устройства, отколкото на по-бързите устройства. Операциите на мултиплексиране и демултиплексиране за синхронен TDM са показани на фиг. 2.7.8.



Цифрово мултиплексиране. Квантуване, кодиране, Импулсно-кодова модулация. Линийно кодиране, скремблиране, синхронизация. Цифрова йерархия – PDH и SDH системи. Особенности на оптичното мултиплексиране

Принципи на мултиплексиране с разделяне на каналите по време

Уплътняването по време (TDM – time division multiplexing) представлява последователно, циклично, за къси интервали от време, предоставяне на преносната среда на всяка двойка кореспондиращи си абонати от множество едновременно протичащи сеанси.



Амплитудно-импулсна модулация: T_{δ} – период (интервал) на дискретизация
 F_{δ} – честота на дискретизация; T_{κ} – канален интервал

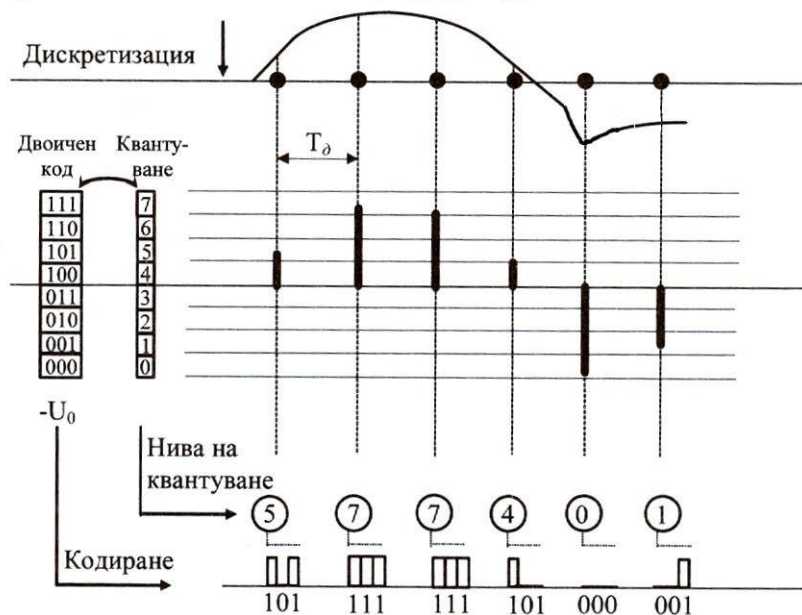
Теорема на Котелников - Найкуист:

$$T_{\partial} = \frac{1}{F_{\partial}} \leq \frac{1}{2 f_{\max}}; \quad F_{\partial} = 1/T_{\partial}; \quad \text{трябва } F_{\partial} \geq 2F_{\max}$$

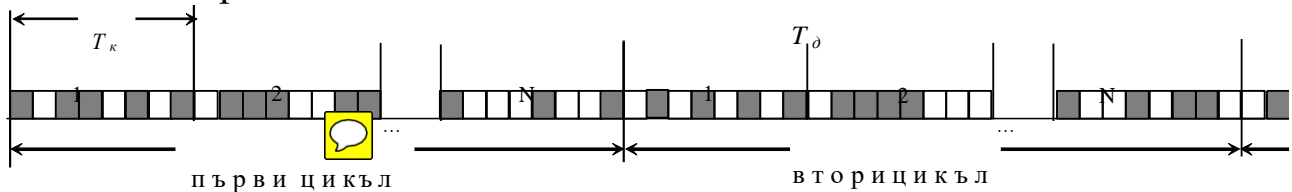
Импулсно кодова модулация (*pulse-code modulation* - PCM).

Три основни операции:

- Дискретизация по време (*sampling*)
- Квантуване (*quantizing*) (Δ - стъпка на квантуване)
- Кодирание (*encoding*).



При цифрово мултиплексиране в рамките на един интервал на дискретизация T_{∂} (наричан вече цикъл) се разполагат кодовите комбинации на всичките N уплътнявани сигнали. На всеки сигнал се полага един канален интервал:



- канален интервал: $T_k = \frac{T_{\partial}}{N}$; N -брой на каналите
 - шум от квантуване
 - тактова честота: $f_t = F_{\partial} N m$, където m е броят на разрядите в кодовата комбинация на цифровия сигнал
- $$m = \log_2 [\text{брой на квантуваните нива}]$$

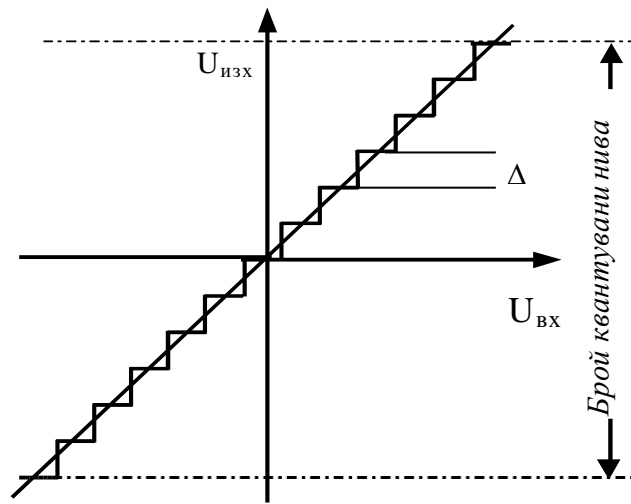
За телефонен канал:

- $F_{\max} = 3\,400 \text{ Hz}$, $F_{\partial} = 8\,000 \text{ Hz} > 2 F_{\max} = 6800 \text{ Hz}$
- период (интервал) на дискретизация $T_{\partial} = \frac{1}{8000} = 125 \text{ } \mu\text{s}$

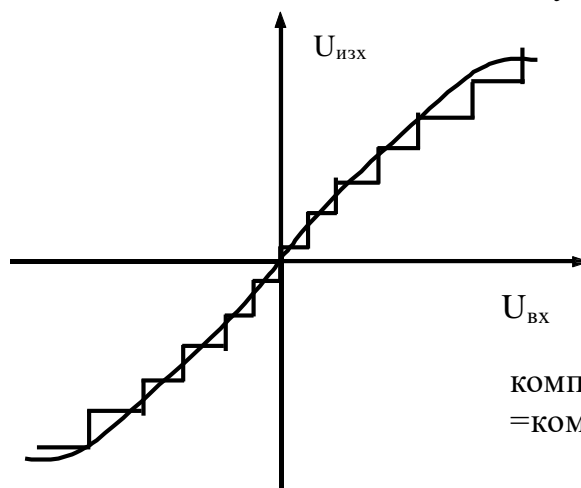
- 256 нива на квантуване, $m = \log_2 256 = 8$, т.е. 8-разрядни комбинации
- скорост на предаване на един цифров телефонен сигнал
 $B_t = 8000 \times 8 = 64 \text{ KBaud} = 64 \text{ kBit/s}$
- ефективна ширина на спектъра $F_{\text{ef}} = \frac{B_t}{2} = 32 \text{ KHz}$, т.е. сега сигналът
заема 8 пъти по-широка честотна лента от тази на аналоговия

Равномерно (линейно) и неравномерно квантуване

Линейно квантуване



Нелинейно квантуване



Закони за компресиране: А-закон (ITU-T за Европа) -закон (за Америка)

А-законът се представя с

$$y(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x) \cdot \frac{1 + \ln A|x|}{1 + \ln A} & \text{за } \frac{1}{A} < |x| < 1 \\ \frac{Ax}{1 + \ln A} & \text{за } -\frac{1}{A} < x < \frac{1}{A} \end{cases}, \text{ където } A = \text{const} = 87,6$$

2.7.5 Statistical Time-division Multiplexing (Статистическо мултиплексиране)

Един недостатък на подхода TDM, е, че много от времевите слотове в кадъра се губят. Това е така, защото ако конкретен терминал няма данни за предаване в определен момент от време, ще бъде предаден празен времеви слот. Ефективна алтернатива на този синхронен TDM е статистическият TDM, известен също като асинхронен TDM или Интелигентен TDM. Той динамично разпределя времевите слотове при поискване към отделни входни канали, като по този начин спестява капацитета на канала. Както при синхронния TDM, статистическите мултиплексори също имат много I/O линии с буфер, свързан към всяка от тях. По време на въвеждането мултиплексорът сканира входните буфери, събирайки данни, докато рамката се запълни и изпраща кадъра. В приемащия край демултиплексорът получава рамката и разпределя данните в съответните буфери. Разликата между синхронен TDM и асинхронен TDM е илюстрирана с помощта на фиг. 2.7.9. Може да се отбележи, че много слотове остават неизползвани в случай на синхронен TDM, но слотовете се използват напълно, което води до по-малко време за предаване и по-добро използване на честотната лента на средата. В случай на статистически TDM, данните във всеки слот трябва да имат адресна част, която идентифицира източника на данни. Тъй като данните пристигат от и се разпределят към I/O линиите непредсказуемо, информацията за адреса е необходима, за да се осигури правилна доставка, както е показано на Фиг. 2.7.10. Това води до повече административни разходи на слот. Относителното адресиране може да се използва за намаляване на разходите.

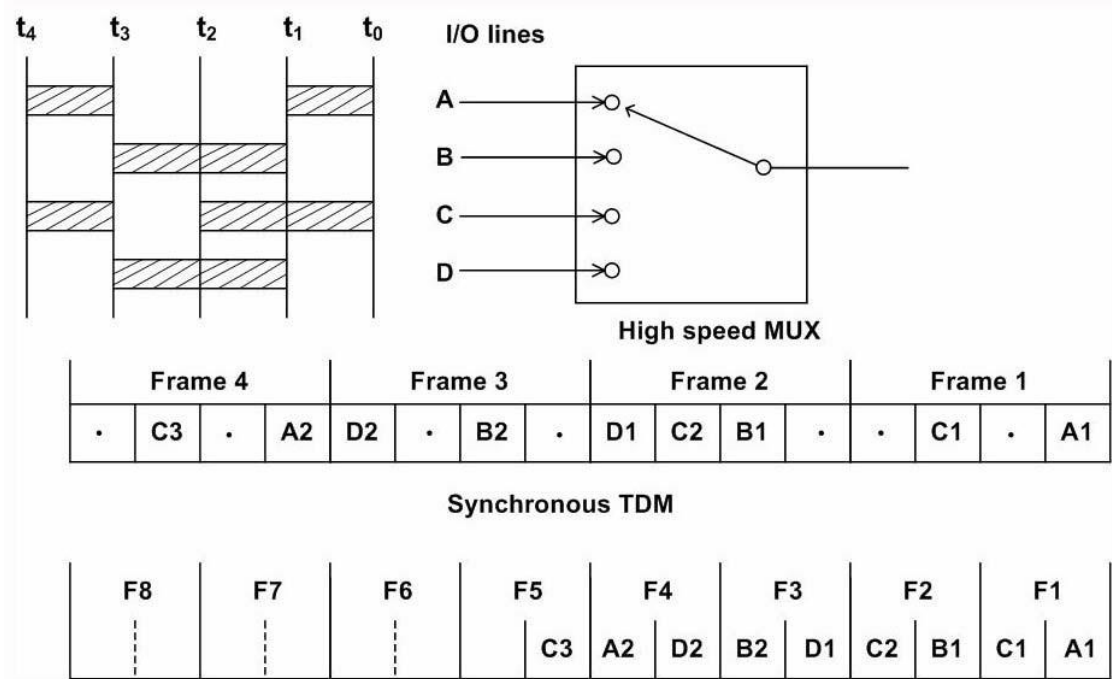


Figure 2.7.9 Синхронен и асинхронен TDM

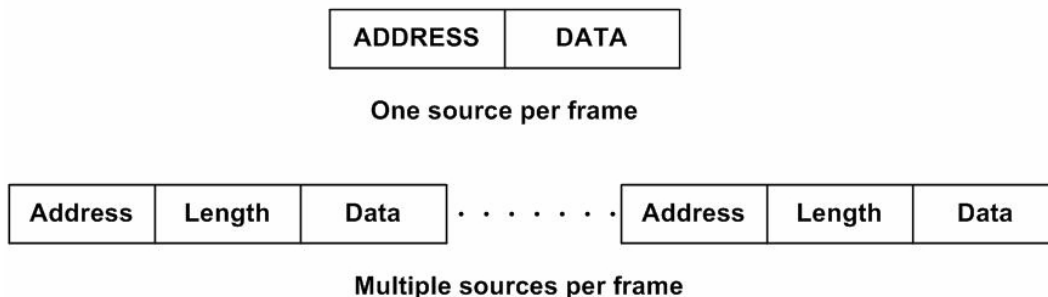


Figure 2.7.10 Address overhead in asynchronous TDM

2.7.6 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Ортогонално честотно мултиплексиране на каналите)

Мултиплексирането с честотно разделяне (FDM) е технология, която предава множество сигнали едновременно по една среда на предаване, като кабелна или безжична система. Всеки сигнал се движи в рамките на своя уникален честотен диапазон (носител), който се модулира от данните (текст, глас, видео и т.н.).

Техниката за разпределен спектър на ортогонално честотно мултиплексиране (OFDM) разпределя данните върху голям брой носители, които са отдалечени на точни честоти. Това разстояние осигурява "ортогоналността" в тази техника, която не позволява на демодулаторите да виждат честоти, различни от техните собствени. Основният подход на OFDM е илюстриран на фиг. 2.7.11.

Предимствата на OFDM са висока спектрална ефективност, устойчивост на радиочестотни смущения и по-ниско многопътно изкривяване. Това е полезно, тъй като в типичен сценарий за наземно излъчване има многопътни канали (т.е. предаваният сигнал пристига до приемника, използвайки различни пътища с различна дължина). Тъй като множество версии на сигнала си пречат една на друга (интерференция между символи (ISI)), става много трудно да се извлече оригиналната информация.

OFDM е техника за предаване, която съществува от години, но едва наскоро стана популярна поради развитието на цифрови сигнални процесори (DSP), които могат да се справят с тежките изисквания за цифрова обработка. OFDM се прилага в системите за широколентов безжичен достъп като начин за преодоляване на проблемите с безжичното предаване и за подобряване на честотната лента. OFDM се използва и в безжични локални мрежи, както е посочено от стандартите IEEE 802.11a и ETSI HiperLAN/2. Използва се и за безжично цифрово радио и телевизионно предаване, особено в Европа. OFDM понякога се нарича модулация с множество носители или дискретна многотонална модулация.

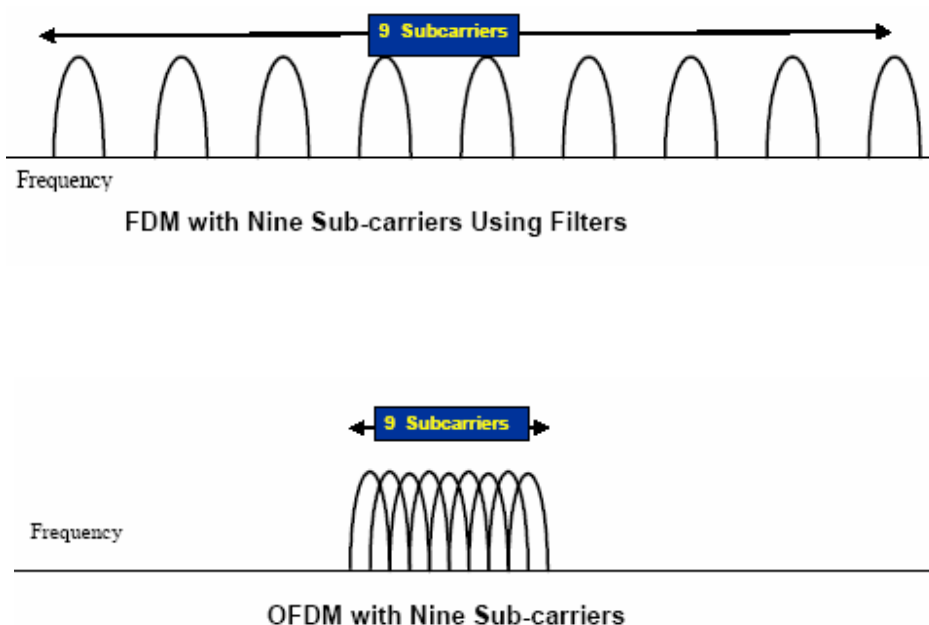
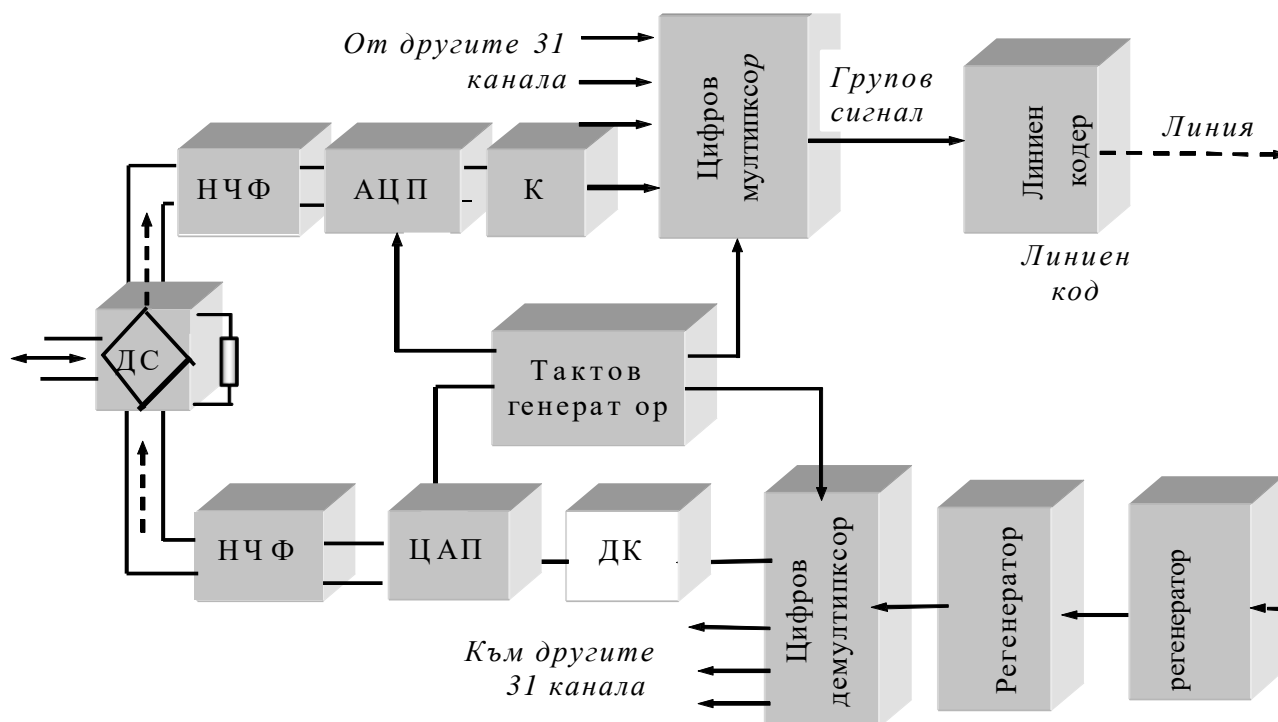


Figure 2.7.11 Разлики между FDM и OFDM по отношение на честотната лента

OFDM е подобен на FDM, но е много по-спектрално ефективен, като раздалечава подканалите много по-близо един до друг (докато те действително се припокриват). Това се прави чрез намиране на честоти, които са ортогонални, което означава, че те са перпендикулярни в математически смисъл, позволявайки на спектъра на всеки подканал да се припокрива с друг, без да пречи.

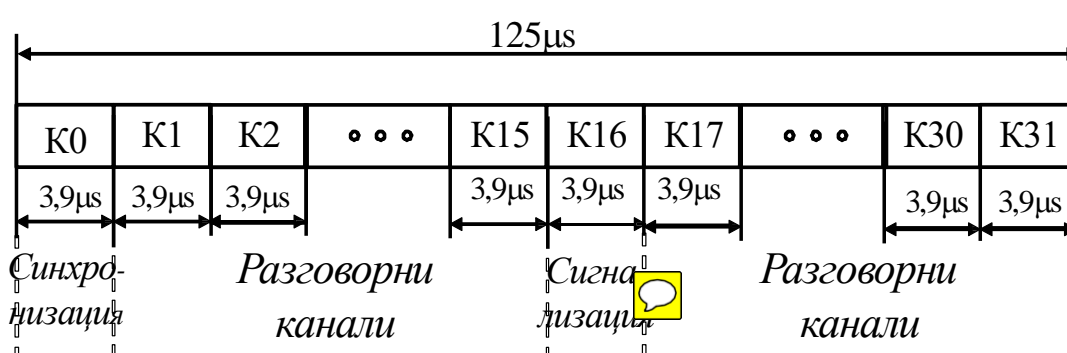
Блокова схема на УТС с ИКМ 30/32



При 32 канала:

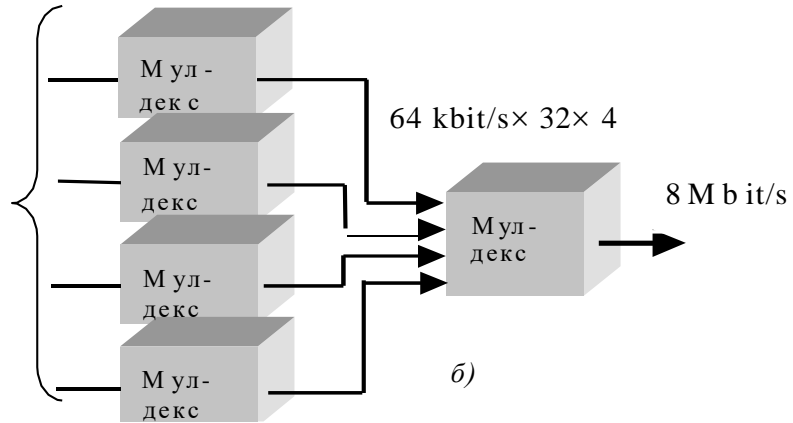
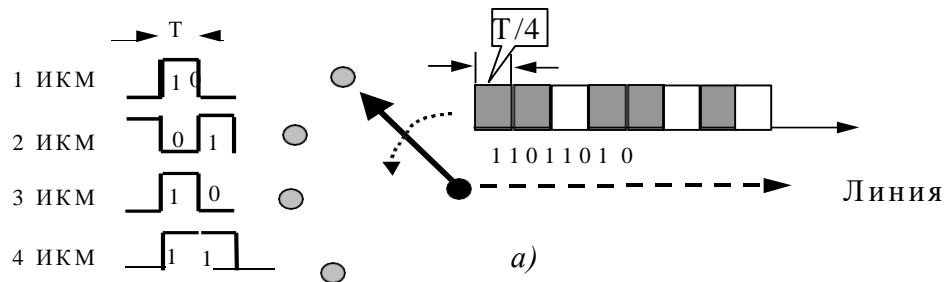
- $f_t = F_{\text{от}} m N = 8000 \times 8 \times 32 = 2,048$ [Mbaud = Mbit/s.]
- T_k – канален интервал = $\frac{125}{32} = 3,9 \mu\text{s}$

Структура на цикъла на ИКМ 30/32

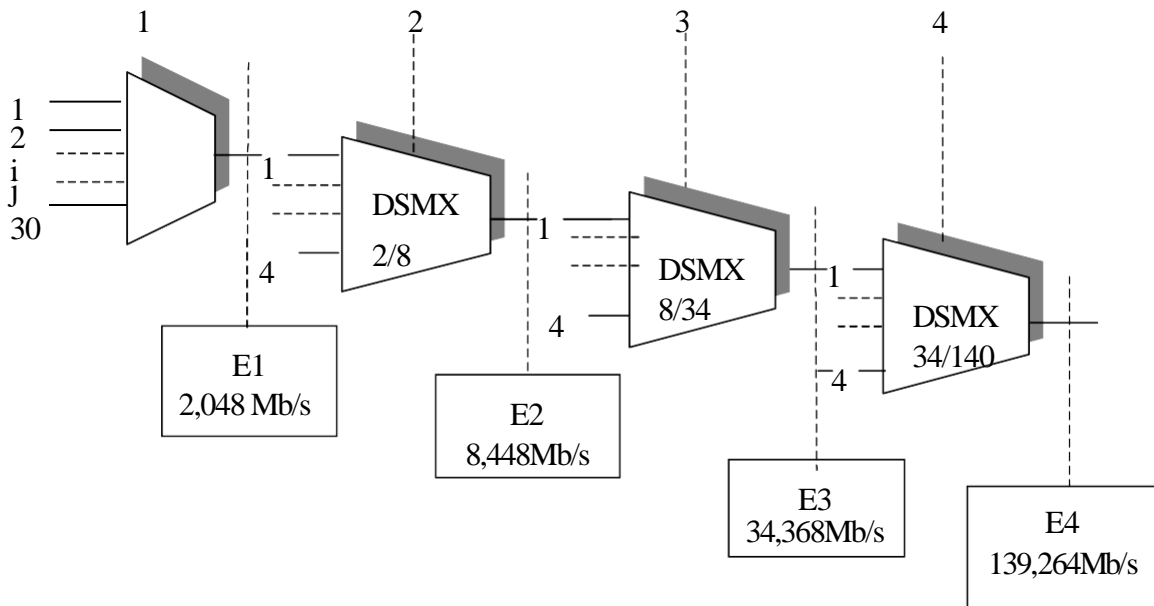


Синхронизация в цифровите мултиплексни системи

- Тактова
- Циклова (Синхросигнал 0011011)
- Свърхциклова синхронизация - сигнали за управление и взаимодействие (СУВ) - набиране на телефонните номера, заемане на съоръженията в комутационните възли, таксуване на разговорите, разпадане на връзката (Свърхцикъл: 16 цикъла по 125 s се обединяват в един цикъл от 2000 s за целите на синхронизацията)



Обединяване на 4 цифрови потока в един



Европейска мултиплексна цифрова йерархия

Означение	Скорост на предаване	Брой канали	Допустими отклонения Mbit/s
E1	2,048 Mbit/s,	30	$1 \pm 50 \cdot 10^{-6}$
E2	8,448 Mbit/s,	120	$1 \pm 30 \cdot 10^{-6}$
E3	34,368 Mbit/s	480	$1 \pm 20 \cdot 10^{-6}$
E4	139,264 Mbit/s	1920	$1 \pm 10 \cdot 10^{-6}$

- Проблеми в PDH:
 - синхронизация
 - фазиране, приплъзване, джитер (*jitter*)
 - необходимост от поетапно мултиплексиране и демултиплексиране “обратно по веригата”

2. Синхронна цифрова йерархия (Synchronous Digital Hierarchy - SDH)

- Синхронна оптическа мрежа (Synchronous Optical Network - SONET).

В SDH е възможно:

- Скокообразно от 2 на 155,52 мегабитово мултиплексиране;
- Изваждане и вмъкване на произволен 2 – мегабитов поток;
- Директно взаимодействие между първичните 2-мегабитови потоци.

Основната скорост на *SDH* е определена от ITU-T на 155,52 Mbit/s.

Стандартните нива на йерархия са:

- | | | |
|------------------|-------------------|--------------------|
| 1. 51,84 Mbit/s | 3. 622,08 Mbit/s | 5. 9,95328 Gbit/s |
| 2. 155,52 Mbit/s | 4. 2,48832 Gbit/s | 6. 39,81312 Gbit/s |

Други методи за цифрово кодиране наречта

ИКМ е стандартизиран през 1970 г., а от тогава са създадени множество нови и по-ефикасни методи за кодиране. При тях може да се получи по-добро качество (при същите скорости на предаване на информацията – 64 Kbit/s) или същото качество (при по-ниски скорости). При GSM, напр., използваната скорост за предаване на реч е 13 Kbit/s или дори 7 Kbit/s.

Методите за кодиране на реч могат да се разделят на 2 категории – *кодиращи формата* на сигнала (като ИКМ) и така наречените **вокодери** (*vocoder* от **voice coding**), използващи характеристиките на човешкия глас.

Адаптивна ИКМ (APCM). Това е вариация на ИКМ, при която се изпраща информация периодично за силата на сигнала, като допълнение към стойностите на отчетите.

Диференциална ИКМ (DPCM). Тук се предава само разликата между два последователни отчета и тъй като тя обикновено е малка, може да се използват по-малко битове. За още по-голямо намаляване на скоростта може да се прави предсказване на стойността на следващия отчет на базата на няколко предишни отчета. Тогава се предава само грешката от предсказването.

Адаптивна диференциална ИКМ (ADPCM). Тук се комбинират предните два метода.

Предаването с по-малка скорост чрез използване на ADPCM (например 16, 32 Kbit/s) е стандартизирано от ITU-T и се използва в практиката. Например за големи разстояния (подводни кабели) или в частни мрежи (каналите, наети от клиент за свързване на учрежденската му централа, могат да се намалят, например наполовина).

Кодиране на речта при GSM

В GSM се използва комбинация от вокодер и ADPCM-кодер. Принципът е следният. Речевият сигнал първо се разделя на отрязъци от по 20 ms. Всеки отрязък се изследва за откриване на синусоиди в него. Синусоидалните съставки се извличат от речевия сигнал и така амплитудата на последния се намалява силно.

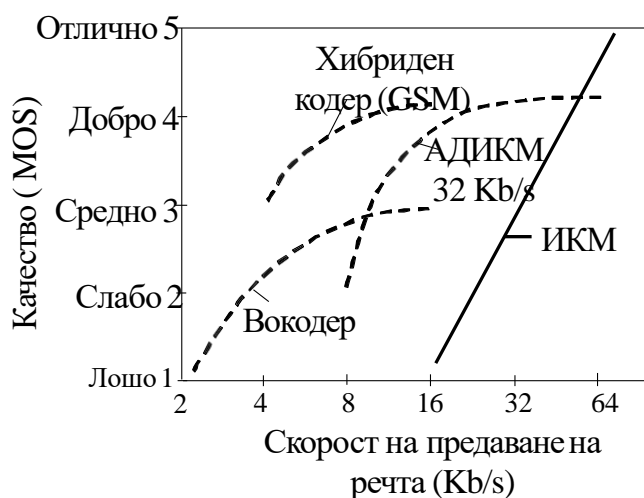
Синусоидалните компоненти (които са високоенергийни) не се предават, а се предават техните параметри. Остатъчният сигнал се предава чрез кодиране формата на сигнала с предсказване. Поради малката амплитуда се изискват по-малко количество битове.

Сравнение на методите за кодиране на речта

Най-силно намаление на скоростта на речевия цифров поток се постига с вокодери. Но качеството на предаване чрез кодиране на формата на сигнала е много по-добро. Репродуцираният (чрез вокодер) глас звучи синтетично. Така вокодерът не удовлетворява изискването в телефонията – да може да се разпознае събеседникът.

Диалоговият характер на телефонната телеуслуга поставя изисквания за допустимото закъснение на сигнала от обработката при кодирането. Усещането за влошаване на качеството се получава при сумарно закъснение в двете посоки над 180 ms. За висококачествено предаване не се допуска това закъснение да е над 150 ms, а сложните кодираня увеличават доста закъснението на сигналите.

Оценка на качеството при различни методи на кодиране се прави чрез т. нар. *средна експертна оценка (MOS - Mean Opinion Score)*, която отразява средното мнение на група хора за качеството. Методът MOS се е използвал някога, когато линиите са били лоши. При качествените цифрови телефонни канали използването му станало



Зависимост на качеството от скоростта на предаване при различните методи на кодиране

kbps (CSA-CELP) всички с MOS=4.0; G.723.1 – 6.3 kbps (ACELP) с MOS=4.0.

безпредметно. Днес, когато заради въздушния интерфейс на мобилните апарати и заради пакетната телефония (VoIP), се използват сложни обработки с чувствително намаление на скоростите, но и с известно влошаване на качеството, този метод е отново актуален.

ITU препоръки за цифрово кодиране на говор: G.711 – 64 kbps (ИКМ); G.726 – 32 kbps (АДИКМ); G.728 – 16 kbps (LD-CELP); G.729 – 8 kbps (CSA-CELP) всички с MOS=4.0; G.723.1 – 6.3 kbps (ACELP) с MOS=4.0.