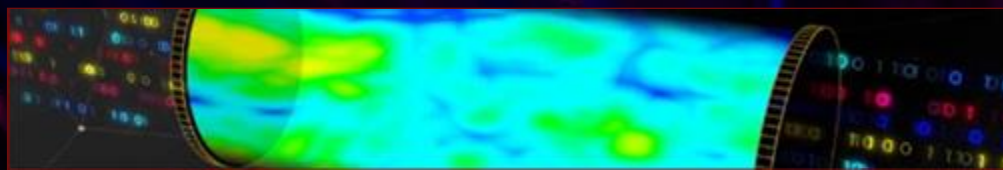


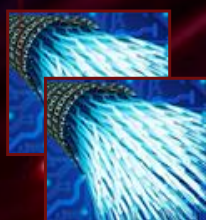
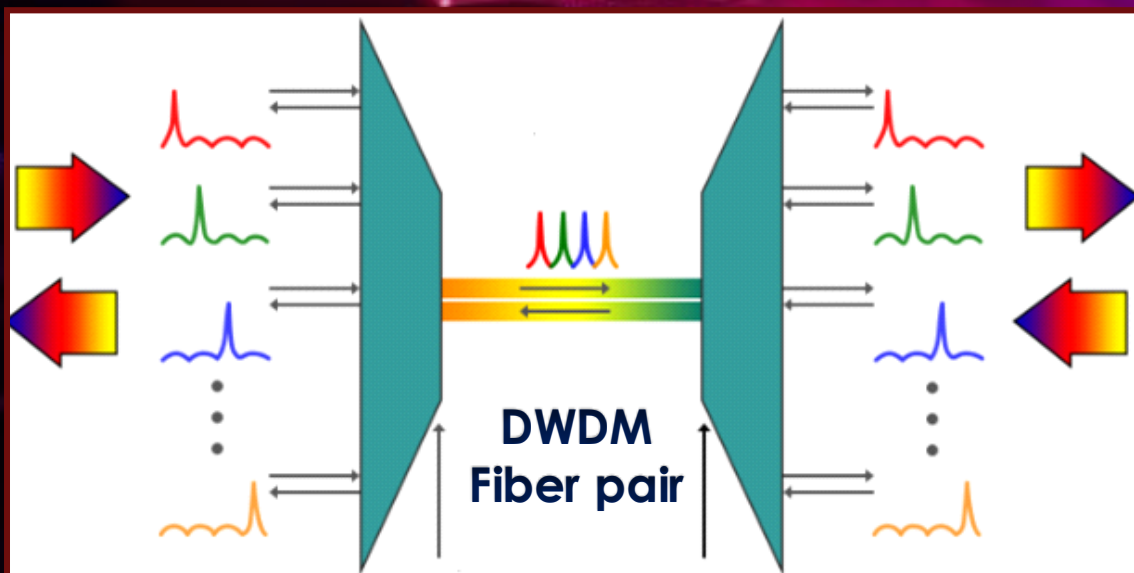
**ИВЕЛИНА
БАЛАБАНОВА**

**ГЕОРГИ
ГЕОРГИЕВ**

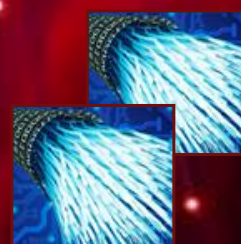


МУЛТИПЛЕКСНИ ОПТИЧНИ СИСТЕМИ И МРЕЖИ

**СПЕЦИАЛИЗИРАН УЧЕБНИК
ПО ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИИ**



**Университетско издателство
"Васил Априлов" - Габрово
2023**



ИВЕЛИНА БАЛАБАНОВА

ГЕОРГИ ГЕОРГИЕВ

**МУЛТИПЛЕКСНИ ОПТИЧНИ
СИСТЕМИ И МРЕЖИ**

**СПЕЦИАЛИЗРАН УЧЕБНИК
ПО „ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИИ“**

**Университетско издателство
„Васил Априлов“ – Габрово
2023**

© доц. д-р инж. Ивелина Стефанова Балабанова, 2023

© гл. ас. д-р инж. Георги Иванов Георгиев, 2023

СПЕЦИАЛИЗИРАН УЧЕБНИК ПО „ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИИ“

Мултиплексни оптични системи и мрежи

Рецензент: проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

За контакти:

Габрово, 5300, ул. „Хаджи Димитър“ №4

Технически университет – Габрово

Катедра „Комуникационна техника и технологии“

© Университетско издателство „Васил Априлов“ – Габрово, 2023

ISBN: 978-954-683-694-6

ПРЕДГОВОР

В съвременния технологичен свят все повече се утвърждават като закономерност нарастващите изисквания за цифровизация на частния, индустриалния и бизнес сектор относно достъпа до Интернет услуга във връзка с интеграцията на електронни услуги, онлайн управление, мониторинг и други категории услуги. Тези аспекти имат отношение към възможностите, редуциращи до минимум мрежовите ограничения, на потребители в различни по разположение градски зони и отдалеченост на извънградските географски региони. Аналогично в паралел на тези процеси се развиват иновациите в телекомуникациите и хибридните обслужващи системи, управляващи сложни инфраструктури от мрежови ресурси с пренос на информационни клъстери чрез набори от различни технологични поколения и техни производни.

На преден план в качеството на основополагащи приоритети се профилират надеждността, информационната сигурност, системната интеграция, гарантирането на производителността и капацитета на крайните и междинните комуникационни звена от страна на мрежовия доставчик и крайните системни потребители. Особено съществени се оказват факторите, определящи качеството на използваната преносна среда, като скорост, широчина на честотната лента и мрежови обхват, както и защитава спрямо потенциални възникващи въздействия смущения и явления по отношение на свойствата на средата. Всичко това налага прилагането на потвърдили във времето своите предимства политики, както и модерни и иновативни инструменти, технически подходи и практики в дейностите по планиране, сегментиране, полагане, изграждане, поддръжка и експлоатация на преносни участъци, поддържащи параметризация на преносната среда спрямо стандартизирана QoS метрика. Основна част от обособените дейности включват прилагане на жизнено важните:

- ✚ Прочути и подбрани спрямо специфичните условия на средата, технически и експлоатационни спецификации на комуникационно оборудване, прибори и компоненти, позволяващи концептуални модификации на апаратната мрежова част при запазване на нисък разход на капиталовите финансови средства;
- ✚ Технически подходи за мултиплексиране/демултиплексиране на пренасяни сигнали посредством канали на основата на оптична преносна среда като основен или спомагателен сегмент за реализация на широколентов достъп;
- ✚ Иновативни технологии в развитието на Оптичните комуникации с внедряване на следващи поколения в областта.

Дефинираните основни моменти поставят редица изисквания за подготовка на висококвалифицирани специалисти с комплексни конструктивно-технически познания и компетенции в сферата на комуникациите и информационните технологии. В тази връзка е изготвен Учебник, предоставящ необходимата специализирана теоретична основа за постигане на посочените цели. Заложените тематични направления в структурирания учебник са разпределени в следните категории:

- ✚ Възникване, основни етапи в развитието, структура, функционалност, приложение, параметрични характеристики на мултиплексирането и мултиплексните системи;

- ✚ Специфика и особености на предаваните съобщения и сигнали, параметри на комуникационните канали за връзка;
- ✚ Параметризация на преносните среди в комуникациите – въздушни кабелни, кабелни електропроводни и влакнесто-оптични съобщителни линии, спътникови радиокомуникационни системи;
- ✚ Мултиплексиране / Демултиплексиране, циклична структура, преимущества и слаби страни на Плезиохронната цифрова йерархия;
- ✚ Концепции, принципи, характеристики, изграждане, функции, структура и технически средства при Синхронната цифрова йерархия, Методи и системи за мониторинг в телекомуникациите;
- ✚ Технологии, методи и технически средства за мултиплексиране на абонатни линии;
- ✚ Принципи, характеристики, параметри при проектиране и изграждане на оптични системи на основата на Мултиплексиране с разделяне по дължина на вълната;
- ✚ Моделиране, изграждане и стандартизация на Оптични системи за информационно предаване;
- ✚ Еластични оптични мрежи (EON) - идеология, концепции, архитектурни решения, подходи и инструменти за администриране на трафика;
- ✚ Софтуерно дефинирани мрежи (SDN) и Софтуерно дефинирани еластични оптични мрежи (SD-EON).

Учебното съдържание е предназначено за въвеждане в основни и допълнителни тематични курсове по комплексни и специализирани дисциплини в обучението на студенти в образователно квалификационна степен Бакалавър и Магистър по специалност "Комуникационни технологии и киберсигурност". Сред тях са обхванати "Оптични комуникации", "Телекомуникационни мрежи и протоколи", "Комуникационни протоколи", "Компютърни комуникации", "Качество на обслужването в комуникациите".

Авторите поднасят своите най-сърдечни Благодарности към Рецензента проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов за направените препоръки при съставяне и оформление на Учебника!

ГЛАВА I

МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ И МУЛТИПЛЕКСНИ СИСТЕМИ

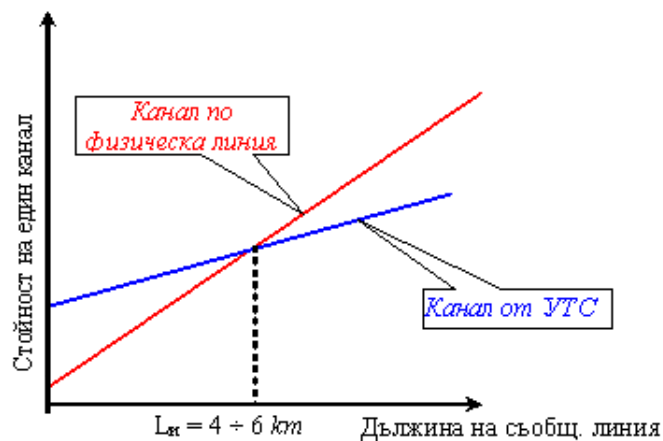
1.1. Мултиплексиране (multiplexing)

Мултиплексирането представлява процес на формиране на много съобщителни канали по една и съща преносна среда така, че да работят едновременно без взаимно влияние. На голямо разстояние приемлива цена на канал може да се получи само, ако кабелните чифтове се мултиплексират, така че по един чифт да могат да се провеждат едновременно много разговори, без да си пречат (фиг.1.1). За целта се използват т.н. многоканални уплътнителни телефонни системи (УТС), които за сметка на допълнителни комуникационни съоръжения, рязко снижават стойността на преносната система.

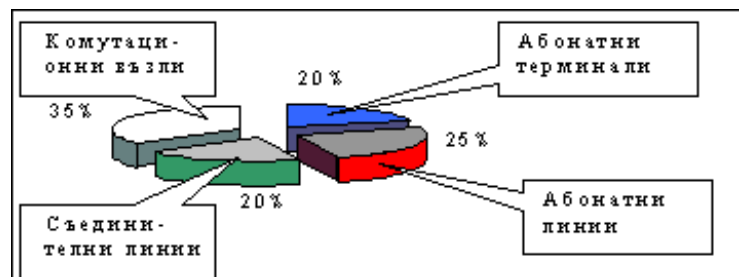


Фиг. 1.1. Мултиплексиране

Преносните съоръжения са най-скъпият компонент на телекомуникационната система, което прави необходимо мултиплексирането с цел ефективното им използване. На фиг.1.2 е показана зависимостта между стойността на един канал с тонална честота, устроен по физическа линия и един канал от многоканална УТС [1].



Фиг. 1.2. Необходимост от мултиплексиране от гледна точка на икономичност



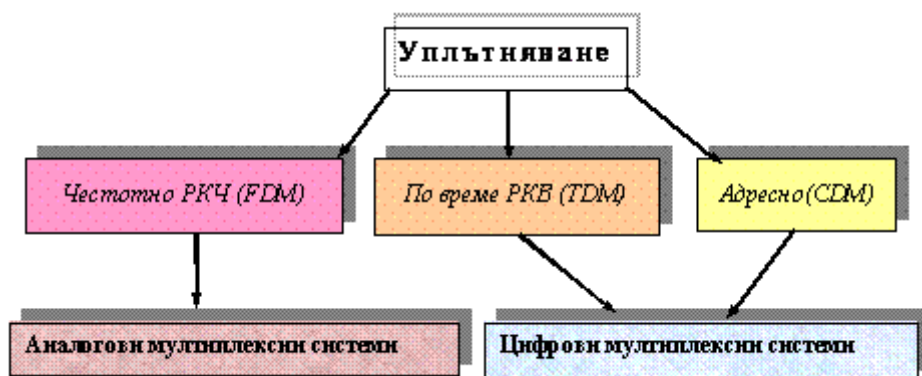
Фиг. 1.3. Стойностни дялове на компонентите в комуникационната система

При къси разстояния мултиплексирането не е необходимо, понеже кабелът има малка стойност, а УТС оскъпява комуникацията. Но след някаква дължина (например от $4 \div 6$ km), която зависи от стойността на УТС, става по-икономично да се използват мултиплексни системи, вместо физически линии за всеки канал. Когато разстоянието между абонатите е много голямо, такова решение е единствено приемливото.

Благодарение на мултиплексирането съединителните линии заемат дял само от около 20% от общата стойност на телекомуникационните системи, показано на фиг. 1.3. Ако те бяха построени на физически линии, дялът щеше да е много по-голям, а техническото решение – много скъпо и непригодно [1, 2].

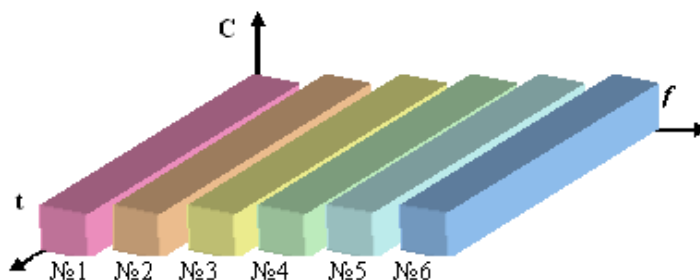
1.2. Основни видове мултиплексиране

Класификационна схема на видовете мултиплексиране е представена на фиг. 1.4. Трите вида мултиплексиране могат да се представят като оси на една тримерна координатна система (честота f , време t и код C).



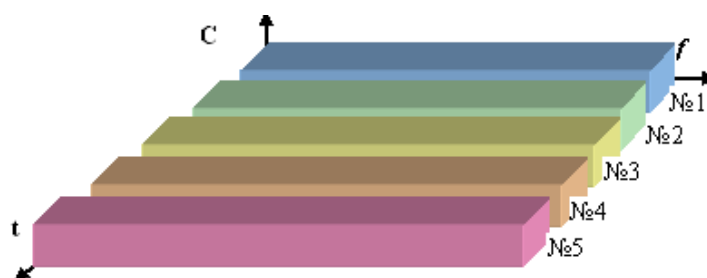
Фиг. 1.4. Видове мултиплексиране

Честотното мултиплексиране (Frequency Division Multiplexing – FDM) се осъществява чрез разделяне на каналите по честота (РКЧ). На всеки канал се отделя собствена тясна честотна лента. Спектрите на относително теснолентовите канали (телефонни, телеграфни) се разполагат във възходящ ред в широката честотна лента на преносната среда. За да заемат своето място в честотното пространство сигналите се преобразуват, оставайки аналогови по целия тракт. За да не се прекриват (да не си пречат), каналите се отделят с честотни интервали (фиг. 1.5). Подобна схема се използва от радиостанциите, работещи в един и същи регион, където всяка станция работи на своята честота.



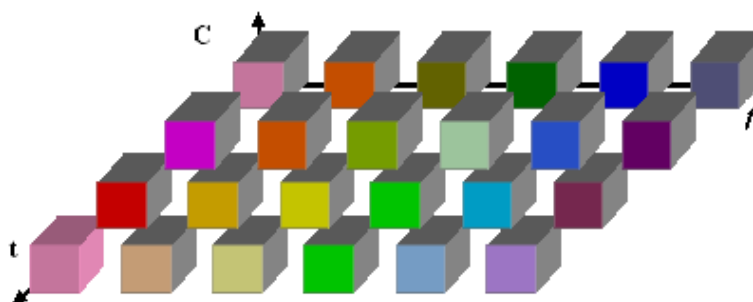
Фиг. 1.5. Мултиплексиране с разделяне на каналите по честота

Мультиплексиране по време (Time-Division Multiplex – **TDM**) става чрез последователно във времето циклично редуване в една линия на цифрови сигнали от няколко различни съобщителни канала. Характерното за този метод на фиг. 1.6 е, че на канала се предоставя преносната среда с цялата честотна лента, но само за определен промеждутък от време. Тези промеждутъци пак са разделени със защитни интервали, но сега по време. В груба аналогия двата принципа на разделяне могат да се оприличат на автомагистрала с паралелни ленти за движение. Много потребители (водители на автомобили) ползват една и съща среда (автомагистралата) без да си пречат (като не допускат аварии). Но за това е задължително всеки да се движи в своята лента на определено разстояние след предшестващия. Защитните времеви интервали са промеждутъците между последователно движещите се автомобили, а защитните честотни интервали – страничните дистанции между автомобилите в съседните ленти.



Фиг. 1.6. Принцип на разделяне на каналите по време

Двата принципа на разделяне могат да се обединят, както това става по автомагистралите с паралелно движещи се автомобили в различни ленти, дадено на фиг. 1.7. Подобно обединение е направено в клетъчните мобилни комуникации от типа GSM. В системите с РКВ се използват дискретни цифрови сигнали, поради което съответните системи са наречени цифрови уплътнителни системи.

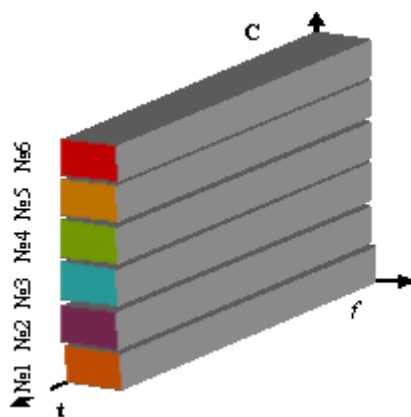


Фиг. 1.7. Обединение в една система на РКЧ и РКВ

Идеята за **кодово разделяне** (Code Division Multiplexing – **CDM**) е относително нова. При кодовото мултиплексиране всички канали използват една и съща честота в едно също време, илюстрирано на фиг. 1.8. Разделянето тук се постига чрез присвояване на всеки приемник на определен код (адрес), така че само получател, настроен на този код, да може да го приеме. За защитни интервали се използват кодови вектори, отстоящи един от друг на т.н. Хемингово разстояние.

За да се разбере принципа на кодовото разделяне на каналите е необходимо да бъде направена аналогия с обществено събитие, на което са се събрали хора от различни

националности, разбиращи различни езици. Въпреки, че всички говорят едновременно и от това се създава определена зашуменост, всеки чува другите, но разбира своя език. Естествено, за да не се получат преслушвания и смущения, трябва да има "защитни бариери". Такива са различията в езиците. Колкото по-различни са, толкова по-голяма е защитната бариера. Защитата е твърде слаба, ако те си приличат, както например македонският и българският.



Фиг. 1.8. Кодово разделяне на каналите

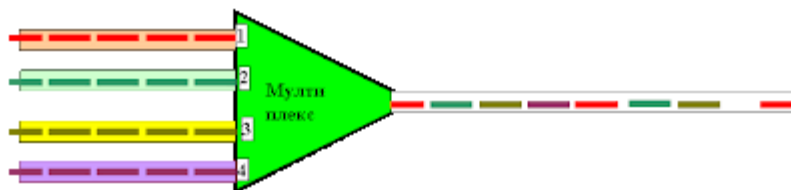
Недостатък на CDM е сложността на приемника, който трябва "да знае" кода и трябва да може да отдели своя канал от фоновия шум. Главното предимство на кодовото разделяне е добрата му защитеност от преслушване и смущения. Макар, че на отделните канали трябва да се присвояват различни кодове, това при мощните и бързодействащи микропроцесори не е особен проблем. За сметка на това кодовото пространство е огромно в сравнение с честотното. Това предимство се изявява особено в безжичните комуникации [3].

Мултиплексирането според режима на прехвърляне на информацията

Комутацията (маршрутизирането) на съобщенията през мрежата може да стане по два начина. Най-общо режимите на прехвърляне на информацията в този аспект се подразделят на *канални* и *пакетни*. Пакетният режим от своя страна, има няколко съществени разновидности. Основното тук е, че всеки пакет е относително самостоятелен и има свой адрес, който стои начело (Header) на импулсната поредица, с която се носи неговата информация. В пакетен режим, в който работят съвременните широколентови комуникационни системи, се изпращат различни видове информация - изображения, данни, звук, мултимедия. Всички те се цифровизирани и пакетирани.

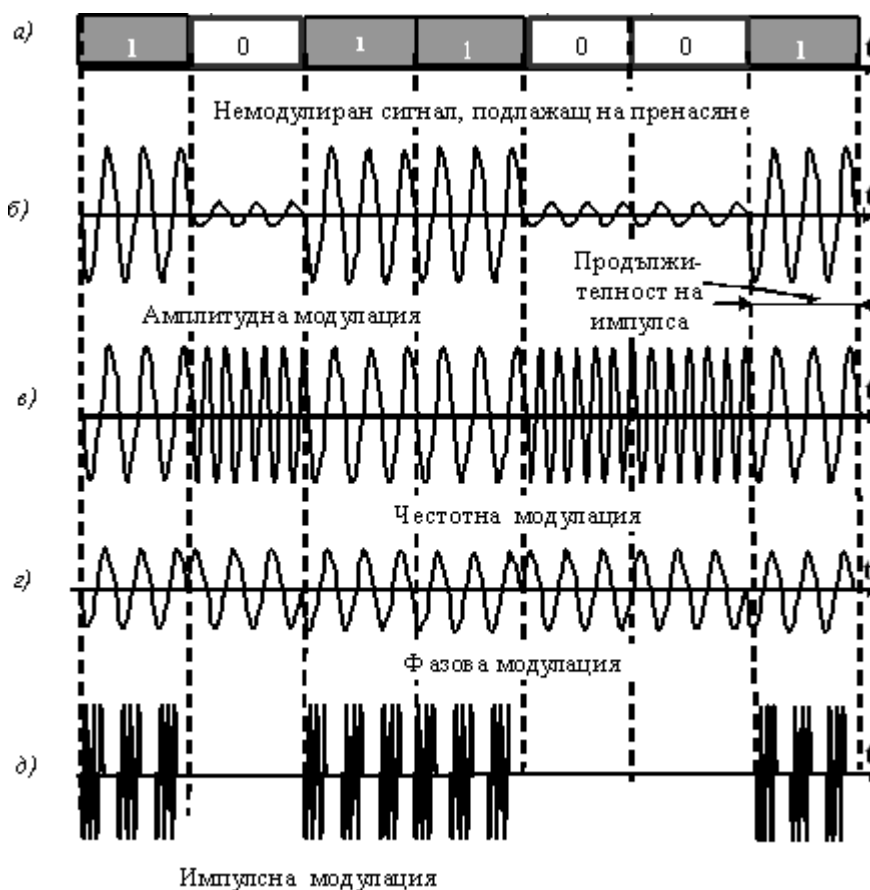
За илюстрация може да бъде разгледан пример на фиг. 1.9, при който на входа на мултиплексора постъпват 4 такива потока информация. Принципът на действие е "първ влязъл – първ излязъл". Ако пакетите на някои от каналите се застъпват във времето, първият влязъл се обработва и излиза в общия мултиплексиран канал, докато следващият пакет го изчаква на входа и след това влиза в мултиплексора за обработка. В тези потоци може да има периоди, когато няма какво да се предаде. В примера четвъртият поток е на дистанция, която позволява вторият пакет да изчака, да се обработи и въпреки това да се получи пауза. Третият пакет се появява чак след това. Видно е, че преносната система се

заема само, когато има информация за предаване. Този тип мултиплексиране е известно като **Асинхронно** или още **Статистическо**.



Фиг. 1.9. Статистическо мултиплексиране

При мултиплексирането с позиционирани канали в канален режим всяка комуникационна връзка се дефинира чрез позицията си в канала - честотната или времевата позиция. Тъй като днес е актуален вторият случай, а и защото не е трудно да бъде направен паралел, на фиг. 1.10 е показана схема с позиционирани канали, в които порциите информация са времево позиционирани. Те са синхронни, еднакво дълги и винаги пълни, дори и когато няма какво да се предаде. Тогава се предават нули [3, 4].



Фиг. 1.10. Мултиплексиране с позиционирани канали – а) Немодулиран сигнал, б) Амплитудна, в) Честотна, г) Фазова и д) Импулсна модулация

Човешката реч е изохронна услуга, тя генерира равномерен поток и е по-подходяща за мултиплексиране с позиционирани канали. В потоците от данни, какъвто е случаят и с Интернет, е точно обратното. Статистическото мултиплексиране е много по - ефективно.

1.3. Мултиплексни системи

1.3.1. Основни понятия

Мултиплексните системи решават следните основни технически задачи в съвременните телекомуникационни мрежи:

1. Увеличава броя на предаваните електрически сигнали по една съобщителна линия, с което се увеличава ефективността на преносните среди.
2. Увеличава разстоянието на пренасяне на информацията между абонатите, включени, в която и да е точка на мрежата чрез личните си терминални устройства.
3. Създават възможност за оптимизация на структурата на телекомуникационната (ТК) мрежа чрез гъвкавото и изграждане и следователно до икономично създаване на връзки между отделните потребители на ТК услуги.

Изброените технически проблеми са възникнали в зората на телекомуникациите, веднага след откриването през 1877 г. на телефонната връзка и са били мощен стимулатор за развитието на телекомуникациите през следващото столетие. Днес мултиплексните преносни системи позволяват дължината на връзката да е неограничена, броят на предаваните разговорни сигнали по една съобщителна линия да е десетки хиляди, а съобщителната мрежа дава техническа възможност към нея да се включват потребители на говор, данни и видео, практически във всяка нейна точка. За да се осъществи всичко това в съвременната ТК мрежа, мултиплексните системи реализират функцията динамична маршрутизация на пренасяните информационни високоскоростни цифрови потоци в глобалната мрежа.

Осъществяването на съвременните съобщителни услуги, предоставяни на милионите потребители се основава на два основни процеса: пренасяне (transmission) на даден вид информация и нейната комутация (switching) към потребителите ѝ чрез съответна съобщителна мрежа. Съобщителната мрежа се развива и изгражда като съоръжения, топология и структура изключително, за да удовлетвори класическата телефонна услуга (Plain Old Telephone Service – POTS). Едва след създаването на мултиплексни системи с времемеление, работещи с импулсно-кодова модулация (Pulse Code Modulation), започва масовото цифровизиране на телефонната съобщителна мрежа, в която се пренася освен телефония и други видове информация, най-вече данни.

Мултиплексирането е процес, който реализира първата задача на мултиплексните преносни системи. Чрез мултиплексирането се обединяват (групират) определен брой електрически сигнали в групов сигнал, за да се предават едновременно от едно предавателно устройство по една съобщителна линия. Самото устройство се нарича мултиплексор МХ и е част от многоканалната преносна система. Демултиплексирането е процес, обратен на МХ, реализиращ разделянето на електрическите сигнали от груповия, като ги преобразува в приемната страна в техния изходен вид. Устройството се нарича демултиплексор DMX и също е част от многоканалната преносна система [1, 2].

1.3.2. Етапи на развитие на мултиплексните системи

1918 г. се реализира първото многоканално аналогово уплътняване – предаване на два разговора по въздушна кабелна линия с електронни лампови усилватели, а след 1930 г. в Европа започва производство и изграждане на аналогови системи за уплътняване на симетрични, а после и на коаксиални кабели. Развитието на аналоговите системи завършва

към края на 70-те години, след създаването на мултиплексни преносни системи за 2700 – 3600 телефонни канали по коаксиален кабел.

Цифровизацията на мултиплексните системи започва със създаването на първата мултиплексна система за 24 телефонни канала с разделянето на каналите по време (Time Division Multiplexing – TDM) през 70-те години в САЩ. Всъщност с цифровия пренос на телефонна информация започва развитието на цифровите телекомуникации. Освен това се създават нови преносни среди – спътникови и космически връзки, както и влакнесто оптични кабели. Тези постижения в областта на мултиплексните системи и на преносните среди, както и появата на технология GlobeSpan (xDSL) за пренос на видео, глас и данни по абонатни медни линии. Развитието на тези технологии дава възможност да се осъществява достъп на широколентовите услуги до глобалната мрежа чрез съществуващата медна телефонна мрежа. Въвеждането освен това на оптични влакна в абонатната мрежа дава допълнителни възможности за изграждане на широколентова цифрова мрежа с интеграция на услугите – BISDN.

През 1995 г. Международният съюз по телекомуникации ITU поема водеща роля по международната координация на развитието на телекомуникациите, със задачата да се създаде глобална информационна инфраструктура. Първата мултиплексна система с времеделение на Nokia Electronics е въведена в експлоатация през 1982 г. в София. Първите български цифрови мултиплексни системи ИКМ 30 са монтирани експериментално през 1985 г. През 1993 г. Българската телекомуникационна компания започва изграждането на проекта DON, чийто смисъл е цифровизирането на телекомуникациите у нас. Изграждат се два преносни оптични пръстена на територията на България и два оптични ринга на територията на София на базата на SDH (Synchronous Digital Hierarchy) технология, работещи на най-ниската за тази технология скорост от 155,52 Mbit/s.

През 2000 г. се разширява транзитната оптична преносна мрежа и съединителната мрежа на столицата чрез мултиплексни системи, работещи със скорост на предаване до 2 Gbit/s (STM-16), а по-късно и разширяване на опорната мрежа чрез мултиплексори, реализирани чрез технологията с мултиплексиране чрез разделяне на сигналите по дължина на вълната WDM (Wavelength Division Multiplexing) [5].

1.4. Класификация на методите за мултиплексиране

Двата принципно различни метода за уплътняване на съобщителните преносни линии и мултиплексиране на сигнали от различни информационни източници са чрез честотно разделяне на каналите (Frequency Division Multiplexing – FDM) и чрез времево разделяне на каналите (Time Division Multiplexing – TDM). При аналоговите мултиплексни системи сигналите $a_i(t)$ се предават едновременно по съобщителната линия през цялото им времетраене (възникване). Всеки непрекъснат във времето сигнал $a_i(t)$, който е аналогов по своята същност, заема свой, строго определен интервал от честота Δf_{ki} , който представлява част от честотния диапазон на системата F . Честотните спектри на всички M предавани сигнали (телефонни разговори) са еднакви и са равни на спектъра на разговорния сигнал. Времето на заемане на даден честотен канал (времето за пренасяне) зависи само от продължителността на разговора. Отделните честотни канали са разположени през постоянен честотен интервал, като между тях е предвидена защитна честотна лента.

При многоканалните цифрови системи с разделяне на каналите по време всеки цифров сигнал $a_i(t)$ заема не честотен, а времеви интервал Δt_{ki} , който се нарича канал и не може да се заеме от друг сигнал, предаван по същото време до приключване на предаването му. Между времевите канали също може да има защитен интервал и в тези канали се предава цифровизираният непрекъснат разговорен сигнал с постоянен спектър, равен на този на разговорния сигнал (от 0,3 до 3,4 kHz). Максималният им брой N зависи от броя на времевите интервали на мултиплексната система.

При честотно-времевия (смесен) принцип на разделяне на каналите, цифрови сигнали получени след цифровизация на аналогови сигнали и мултиплексирани по време, се мултиплексират и по честота. По този начин се създават $M.N$ на брой честотно-времеви канали при спазване на условията както за TDM, така и за FDM. Този метод на мултиплексиране придоби приложение в GSM комуникациите, а също така намери развитие и при мултиплексирането по дължина на оптичната вълна.

Описаните принципи на мултиплексиране са характерни за ТК мрежи с фиксирана канална структура, при които съществува понятието физически канал, т.е. в обществените комутируеми телефонни мрежи PSTN с комутация на канали. В мрежите с пакетна комутация, информацията се пренася по логически изградени времеви канали, наричани виртуални канали. Увеличаването на пропускателната способност на преносните пътища в тези мрежи се постига чрез т.н. динамично мултиплексиране по време DTDM, при което даден източник (потребителски поток) може да заема в определен момент (отрязък от време) различни по брой времеви интервали. Типичен пример за използването на тази технология на мултиплексиране е в ATM (Asynchronous Transfer Mode) мрежите, при което една единствена изходяща линия се уплътнява с потоци от клетки от различни източници и при това в зависимост от натовареността на мрежата с цифрови потоци за обмен, от входящата скорост (на постъпването им в мрежата) и от техния приоритет. Този метод на мултиплексиране е стандартизиран от ITU-T за ATM мрежи с използване на явна и фиксирана синхронизационна циклова структура. Разновидност на тази технология на мултиплексиране е статистическото мултиплексиране.

Сравнителен анализ

Чрез FDM се прилага за аналогови сигнали, чиито амплитуди се променят непрекъснато във времето, т.е. моментните им значения заемат безкрайно много стойности. TDM се прилага за сигнали, които при известни условия се представят с техните отделни моментни стойности, взети през постоянен отрязък от време и представени в цифров вид. Тези сигнали заемат линията за връзка (съобщителната линия) през определен интервал от време.

Главните преимущества на TDM са:

1. Висока шумоустойчивост на приеманата информация поради представянето ѝ в двоичен вид, при което вероятността за грешка по бит при равновероятностни изкривявания е $p_0 = 0,5$, цифровите методи за обработка на сигнала допускат отношение сигнал/ шум на входа на приемника в някои приложения дори под 20 dB, при което защитеността на цифровия приемник е висока. При аналоговите системи това съотношение е значително по-голямо – над 40 dB. Цифровите методи на предаване са твърде ефективни при работа по оптични линии и позволяват организиране на предаване на високоскоростни потоци с рядко

разположение на междинни регенераторни устройства – дължина на тези участъци до 100 km.

2. Качеството на предаване не зависи от дължината на съобщителната линия и топологията на мрежата. Броят на регенераторите по преносния път практически е неограничен. За аналоговите системи обаче съществува норма за максимална дължина на тракта за пренасяне (еталонна верига) с дължина до 2 500 km, като за различните преносни среди се допускат различен брой препредавания (точки на транзит с преобразувания по първична, вторична, третична група). Това ограничение е наложено поради нелинейните изкривявания, които се въвеждат в полезния групов сигнал от преобразувателите и се наслагват без възможност да се компенсират след това.

3. Стабилност на параметрите на каналите. Стабилността и идентичността на параметрите на каналите като остатъчно затихване, амплитудно-честотна характеристика, фазови и нелинейни изкривявания се определят основно от устройствата за обработка на аналоговите сигнали. Тъй като в цифровите системи тези устройства са значително по-малко на брой спрямо аналоговите преносни системи, то параметрите на каналите са много по-стабилни, като освен това претоварването на цифровите системи не влияе върху параметрите на отделните канали.

4. Унификация на различните видове предавана информация: телефония, данни, видеотелефон, факс, видео конферентни връзки и др., което от своя страна води до еднообразие в методите на обработка, предаване и съхранение на информацията.

5. Интеграция на системите за пренасяне и системите за комутация, с което се създават напълно цифровизирани телекомуникационни системи. Предимството е, че те са компактни с висока надеждност, позволяват алтернативна маршрутизация и изравняване на мрежовия трафик.

6. Компютързация на телекомуникационното оборудване, която по принцип не може да се въведе в аналоговите системи.

7. Високи технико-икономически показатели чрез използване на апаратните и програмни средства на микропроцесорните системи, както и на цифровата ахемотехника и микроелектроника [5, 6].

1.5. Основни величини и измервателни единици

В телекомуникационните системи предаваните, пренасяните и приеманите електрически сигнали се измерват и оценяват чрез оценка на разпределянето на електрическата енергия в различни точки на съобщителните вериги. Използват се две основни величини за оценка на електрическите сигнали: ниво на предаване и затихване на електрическия сигнал. Възприето е за по-удобно тези величини да се оценяват и измерват в относителни логаритмични единици, защото загубите в комуникационните вериги се описват с експоненциални зависимости, а чувствителността на човешкото ухо към звуковия сигнал се подчинява на логаритмичен закон. Съществуват две системи за изчисляване на величините: чрез десетичен и чрез натурален логаритъм. По настоящем в телекомуникациите се използва само десетичната система на логаритмичните относителни единици.

Ниво на предаване се дефинира като логаритмично отношение на стойностите на мощността P_x , напрежението U_x или тока I_x в дадена разглеждана точка x от електрическата верига, към P_0 , U_0 или I_0 в нулева точка от веригата

$$\text{Ниво на предаване по мощност: } P_M = 10 \lg \frac{P_X}{P_0}, \text{ dB} \quad (1.1)$$

$$\text{Ниво на предаване по напрежение: } P_H = 20 \lg \frac{U_X}{U_0}, \text{ dB} \quad (1.2)$$

$$\text{Ниво на предаване по ток: } P_T = 20 \lg \frac{I_X}{I_0}, \text{ dB} \quad (1.3)$$

В най-общия случай нивото на предаване по мощност не е равно на нивото на предаване по напрежение или по ток, измерени в една и съща точка. Когато са известни импедансът Z_0 в точката на сравнение и импедансът Z_X в разглежданата точка, между нивата P_M , P_H и P_T съществуват следните зависимости:

$$P_M = 10 \lg \frac{P_X}{P_0} = 20 \lg \frac{U_X}{U_0} + 10 \lg \frac{Z_0}{Z_X} = P_H + 10 \lg \frac{Z_0}{Z_X}, \text{ dB} \quad (1.4)$$

$$P_M = 10 \lg \frac{P_X}{P_0} = 20 \lg \frac{I_X}{I_0} + 10 \lg \frac{Z_X}{Z_0} + P_T + 10 \lg \frac{Z_X}{Z_0}, \text{ dB} \quad (1.5)$$

При $Z_X = Z_0$ нивата са равни: $P_M = P_H = P_T$.

Нивата по мощност се сравняват без да са известни импедансите в двете точки на изследване, докато нивата по напрежение или по ток изискват при сравнение да са известни импедансите и в двете точки.

Абсолютно ниво

Когато в електрическата верига в точката за сравнение е включен еталонен източник с параметри: $P_0 = 1 \text{ mW}$, $U_0 = 0,775 \text{ V}$, $I_0 = 1,29 \text{ mA}$, $R_0 = 600 \Omega$, който е възприето да се нарича нормал генератор, а в края на веригата – товарно съпротивление $R_X = R_0 = 600 \Omega$, то изчислените спрямо него нива се наричат абсолютни и са съответно:

$$P_M = 10 \lg \frac{P_X}{1.10^{-3}}, \text{ dBm} \quad (1.6)$$

$$P_H = 20 \lg \frac{U_X}{0,775}, \text{ dBu} \quad (1.7)$$

$$P_T = 20 \lg \frac{I_X}{1,29.10^{-3}}, \text{ dBi} \quad (1.8)$$

Относително ниво е онова, при което за сравнение се приемат мощността, напрежението или токът в коя да е точка от електрическата съобщителна верига, като за удобство се означава като начална. За удобство нивата се означават с индекс r . Относителното ниво по мощност P_{mr} в точката x спрямо началната е:

$$P_{Mr} = 10 \lg \frac{P_x}{P_H}, dB \quad (1.9)$$

В точката с относително нулево ниво при величини приети за сравнение в началото на канала ($P_H = P_0$), нивото е:

$$P_{H0} = 10 \lg \frac{P_H}{P_0} = 0, dB \quad (1.10)$$

Връзката между абсолютните и относителните нива на предаване е:

$$P_{rx} = P_x - P_0,$$

където: P_x и P_0 са абсолютните нива съответно в точката x на веригата и точката 0 на веригата, приета за сравнение.

Измерително ниво на предаване в дадена точка от една съобщителна верига е големината на абсолютното ниво по напрежение, което се наблюдава в тази точка, когато началото на веригата в аналоговите системи се захранва с ток с честота 800 Hz чрез нормал генератор ($E_0 = 1,55V$).

Номинални (нормирани) нива на предаване и на приемане

В мултиплексната техника на входа и на изхода на даден канал се поддържат стойности на нивата, дефиниращи правилната работа на системата по отношение на шумове, устойчивост на канала, преходни влияния и т.н. и са зададени от производителя. Тези нива е прието да се наричат номинални.

- затихването на електрическия сигнал отразява загубата на енергия при пасивните четириполусници и представлява отношението на мощността, подадена на входа му $P_{вх}$ към мощността, получена на неговия изход $P_{изх}$. Изчислява се чрез израза:

$$a = 10 \lg \frac{P_{вх}}{P_{изх}}, dB \quad (1.11)$$

Затихването е положителна величина, ако е изпълнено условието $P_{изх} < P_{вх}$. Ако $P_{изх} > P_{вх}$, то затихването е отрицателно и следователно четириполусникът усилва ($-a = S$).

В зависимост от условията в телекомуникационната техника, при които се определят $P_{вх}$ и $P_{изх}$ се дефинират собствено и работно (внесено) затихване:

- собствено затихване (усилване) на даден четириполусник се определя при съгласувано натоварване: $Z_C = Z_{вх} = Z_{изх}$ т.е. при условие, че четириполусникът е натоварен на входа и на изхода си с импеданси, равни на характеристикния Z_C .
- работно затихване се дефинира чрез израза:

$$a_p = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}, dB \quad (1.12)$$

Където: P_1 и P_2 са собствените мощности на входа (върху вътрешния импеданс Z_1) и на изхода (върху товарния импеданс Z_2), без да е изпълнено условието за съгласувано натоварване. В реални условия на работа това се случва и дефинираното по този начин затихване се нарича внесено [1-6].

1.6. Канал. Параметри и норми за оценка

Каналът включва всички съоръжения (устройства), чрез които се осигурява пренасянето на информацията, включително и преносната среда и не включва устройствата за изграждане, освобождаване и контролиране на връзката. Понятието канал се използва, за да се определят параметрите и характеристиките на пренасяната информация при изградена връзка. Каналите биват цифрови и аналогови според вида на пренасяните сигнали. За да се оцени качеството на пренасяната информация, се използват два вида параметри:

- параметри на физическия носител на информацията, т.е. на сигнала $S(t)$, постъпващ на входа на комуникационния канал;
- параметри на комуникационния канал, чрез който сигналът се пренася.

За да се осигури качествено предаване, пренасяне и приемане на сигналите е необходимо границите и нормите на параметрите на канала да съответстват на параметрите на сигнала. Съществуват електрически, информационни и честотно-времеви параметри на сигнала и на канала.

Параметри на сигнала

- Електрически параметри

- Ниво;
- Динамичен обхват (диапазон) на сигнала D_s (измерва се в dB).

$$D_s = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}, \text{ dB} \quad (1.13)$$

- Пикфактор Q_s (измерва се в dB).
Характеризира освен границите и начина на промяна на сигнала.

$$Q_s = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{av}}, \text{ dB} \quad (1.14)$$

където P_{av} – средна стойност на мощността на сигнала.

- Затихване;
- Количество информация в съобщението (измерва се в битове – bit).

Оценява се чрез разликата между ентропията (производителността на източника на съобщението) преди $H(x)$ и след получаването на съобщението $H_1(x)$:

$$I = H(x) - H_1(x), \text{ bit} \quad (1.15)$$

- Скорост на предаване (bit/s). Определя се от количеството I цифрова информация (двоични елементи „0“ и „1“), предавано от даден източник за определен период от време T_{np} .

$$B = \frac{1}{T_{np}}, \text{ bit/s} \quad (1.16)$$

- Информационен излишък. Оценява относителната ненатовареност на символите на реалния източник на съобщенията с информация.

$$R = \left[1 - \frac{H}{H_{\max}} \right] \cdot 100\% < 1 \quad (1.17)$$

където: $H_{\max} = \lg_2 N$, bit е максималната информационна производителност (ентропия) на източник на информация при еднаква вероятност за поява на символите от 1 до N в дискретно съобщение. $H < H_{\max}$ е ентропия на информационния източник в реални условия на работа.

- Честотно-времеви параметри
- Ефективна ширина на спектъра:

$$\Delta F = F_{\max} - F_{\min}, \text{ Hz} \quad (1.18)$$

където: $F_{\max}$ и $F_{\min}$ са максималната и минималната честоти на спектъра, в който е съсредоточена 90% от енергията на предавания сигнал.

Параметри на канала

- Електрически параметри
- Максимално допустимо ниво по мощност (dB). Дефинира максималната мощност на входа на канала, при която не възниква изкривена мощност на изхода на канала, т.е. не възникват нелинейни изкривявания от претоварване на апаратурата.

$$P_{K_{\max}} = 10 \lg \frac{P_{i_{\max}}}{P_{k_{av}}}, \text{ dB} \quad (1.19)$$

$P_{k_{av}}$ е средната мощност на входа на канала.

- Динамичен обхват на канала (dB). Чрез този параметър се регламентира максимално допустимата мощност на входния сигнал в зависимост от мощността на смущенията в канала.

$$Dk = 10 \lg \frac{P_{k_{\max}}}{P_{\text{шум}}}, \text{ dB} \quad (1.20)$$

Чрез горните два параметъра се гарантира неизкривено предаване в един канал, като се спазват условията:

$$Ds < Dk \quad \text{и} \quad Ps_{\max} < Pk_{\max} \quad (Ps_{\max} < Pk_{\max})$$

- Остатъчно затихване (dB). Дефинира некомпенсираното от усилвателите по канала затихване на сигнала в преносната система, като P_n и P_k са съответно нива в началото и в края на комуникационния канал.

$$a_0 = p_H - p_K, dB \quad (1.21)$$

- Отношение сигнал/шум (dB). Дефинира качеството на пренасяната по канала информация и се определя като разлика между нивото на полезния сигнал на входа на приемника $P_{\text{пм}}$ и нивото на шума в канала $P_{\text{ш}}$:

$$SNR = P_{nm} - P_u, dB \quad (1.22)$$

- Информационни параметри

- Количество информация [bit]. Количеството пренасяна по канала информация е правопрпорционална на честотната лента на канала F_k , на времето на предаване T и на логаритъма на средната мощност P_{av} на сигнала.

$$I = Fk.T.\log P_{av}, bit \quad (1.23)$$

- Пропускателна способност (dB/s). Определя се чрез формулата на Шенон за канал с шум и представлява максималното количество информация, което може да се предаде по един канал с честотна лента Fk .

$$Ck = Fk \log_2 \left(1 + \frac{Ps}{P_{unuy}} \right), \text{bit/s} \quad (1.24)$$

- Грешка по импулс [1, 6].

ГЛАВА II

СЪОБЩЕНИЯ, СИГНАЛИ И КАНАЛИ

2.1. Съобщения в телекомуникациите

Информацията се обменя чрез съобщения. Съобщението $a(t)$ е отрязък от информационното пространство, форма на представяне на информацията.

Видове съобщения

Съобщенията $a(t)$ са дискретни и аналогови.

Дискретни са тези съобщения, които се изграждат от краен брой символи. Такива са съобщенията в телеграфията, при предаване на данни, в телемеханиката, при комуникация между компютрите и т.н. Броят на символите зависи от азбуката или бройната система, която се използва.

Аналоговите (непрекъснати) се наричат съобщенията, съставени от неограничен брой символи, т.е. използващи неограничено голяма азбука. Те се представят чрез непрекъснатата функция на времето. Типично аналогови са звуковите съобщения, в които се използват безкрайно много стойности на тонове и сила на звука, но в зададен интервал на изменение.

Параметри на съобщенията

Основни параметри на съобщението са информационните. Те са:

- количество информация, която се съдържа в съобщението;
- информационна производителност и капацитет на източника;
- информационен излишък на съобщението.

1. Количество информация

За да се разбере, как се определя количеството информация, трябва да се припомни понятието ентропия.

Ентропията $H(a)$ (Entropy) е мярка за неопределеност. Ако е известно всичко за нещото, ентропията му има стойност нула. Когато нищо не е известно, ентропията му е безкрайност. Информацията I_a , която се получава със съобщението, „погасява” неопределеността. В съобщението a_i се съдържа информация I_a , която е разликата между стойностите на ентропията преди $H_1(a_i)$ и след получаване на съобщението от получателя $H_2(a_i)$:

$$I_a = H_1(a_i) - H_2(a_i) \quad (2.1)$$

Съвкупността на всички възможни съобщения за „нещото” и тяхната вероятност за поява образува ансамбъл от съобщения. Нека ансамбълът да се състои от две възможни стойности a_1 и a_2 . Нека $a_1 = 1$ и $a_2 = 0$, („ези” и „тура”, + и -, 1 и) и пр.). Нека, освен това те да са независими и равновероятни, т.е. вероятността $P(a_1)$ да се получи съобщението a_1 да е равна на вероятността $P(a_2)$ да се получи съобщението a_2 - $P(a_1) = P(a_2) = P(a) = \frac{1}{2}$. При приемането на съобщението a е дошла информация, чието количество е:

$$I_a = -\log_2 P(a) = -\log_2 \frac{1}{2} = -(\log_2 1 - \log_2 2) = -0 + 1 = 1 \quad (2.2)$$

Това е най-малкото количество информация, наречено „binary digit” съкратено *bit*. Ако едното от съобщенията a_1 и a_2 е по-вероятно от другото, информацията щеше да е най-малко от 1 *bit*.

В общия случай при n равновероятни съобщения в ансамбъла количеството информация, която носи всяко от тях е:

$$Ia = -\log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (2.3)$$

Количеството информация $I_{\sum a}$, съдържащо се в няколко независими съобщения $Ia_1, Ia_2, \dots, Ia_n$, е равно на сумата от информацията, съдържаща се във всяко от тях:

$$I_{\sum a} = Ia_1 + Ia_2 + \dots + Ia_n = \sum_{i=1}^n Ia_i \quad (2.4)$$

В общия случай съобщенията имат различна вероятност за поява. Затова, когато се оценяват като цяло информационните свойства на източника на съобщенията $a_i (i=1, n)$ трябва да се определи ентропията между $H(a)$. Намира се като сума от количеството информация, която носят всички съобщения, но като се отчита вероятността за поява на всяко съобщение:

$$H(a) = -\sum_{i=1}^n P(a_i) \log_2 P(a_i), \text{ bit} \quad (2.5)$$

От тази по-обща формула лесно се получават (2.2) и (2.3). Тази формула е валидна за независими съобщения. Има формули за определяне на ентропията и при зависими съобщения, които тук няма да се привеждат.

Смущенията в комуникационната система променят приетото съобщение. Съобщенията със смущения съдържат по-малко количество информация. Влиянието на смущенията върху ентропията на съобщенията може да се отчете аналитично, ако се знаят неговите количествени параметри [7].

2. Информационна производителност на източника $Ht(\text{bit/s})$.

Това е скоростта на възникване на съобщенията, т.е., количеството информация, съдържаща се в съобщенията за единица време. Капацитетът на източника C_u е максималната му производителност $Ht_{\max}(\text{bit/s})$.

3. Информационен излишък

Най-голяма е ентропията ($H_{\max}$) на източника при равновероятна поява на символите в съобщенията от един ансамбъл. В общия случай обаче вероятностите не са еднакви, поради което реалната ентропия на източника е по-малка: $H < H_{\max}$. Информационният излишък R оценява относителната недонатовареност на съобщенията с информация:

$$R = \left(1 - \frac{H}{H_{\max}}\right) \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

Излишъкът, както ще се види по-нататък, служи да защитава достоверността на предаваната информация.

Цифровите данни (в двоичната бройна система – „1”-ци и нули в десетична или друга система) не се свързват в думи, цифрите са равновероятни и нямат излишък, поради което са твърде уязвими от смущения. За откриване и коригиране на грешки в приетите съобщения, излишъкът се въвежда изкуствено [7, 8].

2.2. Сигнали в телекомуникациите

Видове сигнали

Периодичност

В зависимост от повторемостта на стойностите на сигналите те биват периодични и непериодични.

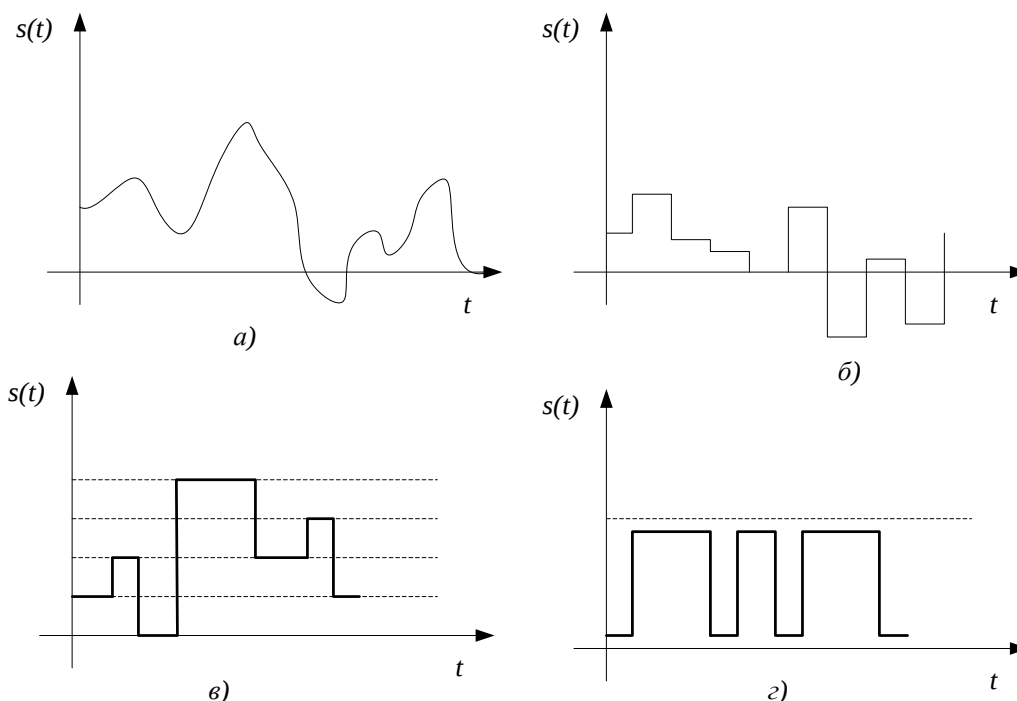
Периодичен е сигналът, чиято стойност се повтаря на равни интервали от време $s(t) = s(t + nT)$, където $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3$, за времето T , през което настъпва едно пълно изменение на параметъра на сигнала, се нарича период. Пример за периодичен сигнал е хармоничното трептене $s(t) = A \sin(\omega t + j)$. Ъгловата честота на основното трептене е $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, където честотата $f = 1/T$ на периодичния сигнал показва скоростта на неговото изменение във времето. Единица [Hz].

Непериодичен е сигналът, за който $s(t) \neq s(t + nT)$. Неговата стойност или не се повтаря през равни интервали, или повторението идва след $T \rightarrow \infty$. Непериодичен е един отделен импулс. Непериодични са постояннотоковите сигнали. Най-често и шумът е непериодичен.

Форма

По своята форма сигналите $s(t)$ могат да се групират както следва:

1. Непрекъснати в непрекъснато време. Аналоговите сигнали са типични представители на тази група. Те могат да се изменят произволно, а амплитудите им заемат произволни стойности от даден интервал на изменения (фиг. 2.1.а)).



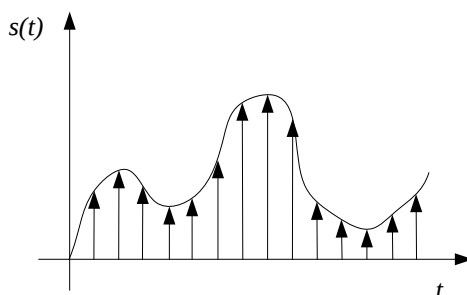
Фиг. 2.1. Видове сигнали

2. Непрекъснати по стойност, но в дискретно време. Изменят се в строго определени моменти от време (например на равни тактове), могат да заемат произволни стойности от даден интервал на изменения, но до следващия регламентиран момент от време не се предполага промяна на стойността на сигнала (фиг. 2.1.б)).

3. Дискретни сигнали в непрекъснато време. Отличават се от предишните по това, че могат да се изменят в произволни моменти от време, но заемат само разрешени (дискретни) стойности от дадено множество (фиг. 2.1.в)).

4. Дискретни сигнали в дискретно време. В определени моменти могат да заемат предварително известни стойности (фиг. 2.1г). Такива сигнали се наричат цифрови сигнали.

Дискретен сигнал е сигнал дефиниран само за определени стойности във времето- фиг. 2.2.

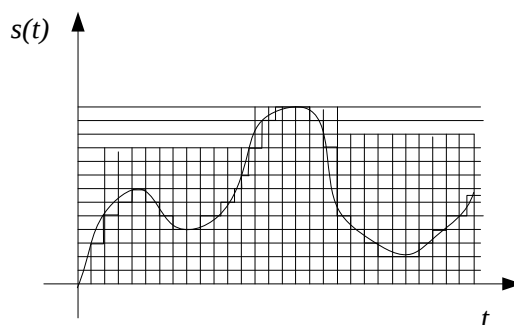


Фиг. 2.2. Дискретен сигнал

Квантуван сигнал – е вид дискретен сигнал. Нарича се квантов поради факта, че неговите дискретни стойности не могат да са произволни, а само строго определени, наречени нива. Разликата между две съседни нива се нарича „стъпка на квантуване“, а разликата между дискретната стойност и присвоеното ниво – „грешка от квантоване“ или още „квантов шум“. Стъпката на квантуване може да бъде както постоянна, така и променлива. В комуникациите, където има преобразуване на аналоговия сигнал в квантов, се използват главно два вида променлива стъпка, известни като „ μ “ (мю) и „А“ закон за квантоване. „ μ “-закона още е известен като „u“-закон (латинското малко U). И двата закона за квантуване са логаритмични по своя характер, като разликата е само във вида описваща ги функция.

Цифров сигнал е аналогов сигнал, който е дискретизиран във времето и квантуван по ниво. За определен период от време цифровият сигнал има краен брой стойности (отчети), които заемат определено ниво от скалата на квантуване, която също е краен брой стойности. От броя на тези стойности зависи с колко бита ще се кодира всяка стойност на цифровия сигнал. Колкото повече нива има в скалата на квантуване, толкова „по-вярно“ се преобразува аналоговият сигнал в цифров (по-високо качество), но и обемът на информацията е по-голям.

В повечето приложения, цифровите сигнали са представени с двоичен код, така че тяхната мерна единица е бит – изразена с „0“ или „1“, т.е. имаме две възможни стойности на сигнала. Така например, ако скалата на квантуване е съставена от 256 нива (стойности), то всяко ниво ще се кодира с 8 бита ($2^8 = 256$) [7, 8].



Фиг. 2.3. Цифров сигнал

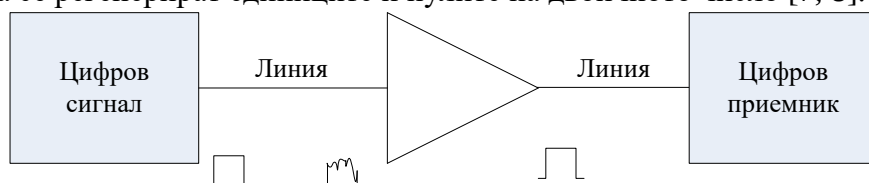
Цифровизация на комуникационните системи

При зараждането на комуникационната техника, когато в 1839 год. се появява Морзовият апарат и се създава телеграфията, сигналите са били само дискретни. През 20^{-ти} век те са основно аналогови. На границата с 21^{-ви} век стана бърз обратен преход. В началото на новото хилядолетие може да очаква пълна цифровизация на телекомуникациите. Защо? Та нали човешкият глас, основният сигнал в телекомуникациите, е аналогов.

Обяснението е следното:

1. На голямо разстояние (примерно повече от 25 – 30 км) аналоговият сигнал губи енергия и затихва толкова, че не може да се възпроизведе в приемника. За пренасянето му по-далеч трябва промеждутъчно да се усили, за да се възстанови енергията му. Но „по пътя” той вече е натрупал различни смущения. И колкото по-далеч трябва да се изпрати, толкова повече смущения натрупва, толкова пораженията върху него са по-големи. Усилвателите усилват изкривения сигнал, но не „изчистват” настъпилите изменения във формата на сигнала. Ако сигналът е цифров той също затихва, но вместо усилватели могат да се използват повторители (регенератори), които възстановяват правоъгълната му форма. И това съвсем не е трудно – достатъчно е само в регенератора да се установи, че е дошъл (независимо какъв) сигнал „1”, за да се генерира и препрати правилен и „изчистен” импулс (фиг. 2.4).

2. Вместо самата амплитуда на сигнала, може да се пренася информация за нейната стойност. И това може да стане чрез двоично число, пренесено с цифров сигнал от единици (импулси) и нули (паузи). В приемника амплитудата се възпроизвежда по получената информация за нейната стойност. Тогава затихването по канала не играе роля. Достатъчно е правилно да се регенерират единиците и нулите на двоичното число [7, 8].



Фиг. 2.4. Възстановяване на цифров сигнал

Електрически параметри на сигналите

Процесът на цифровизация започва от връзката между комутационните системи и стига до връзката между терминала и комутационната система (фиг. 2.5). От фигурата се вижда как с течение на времето цифровизацията навлиза все по-широко и по-дълбоко в телекомуникациите. Почти столетие господстват аналоговите системи. Едва през 70^{-те} години на миналия век започва усилената цифровизация, отначало на преносната среда, после

на комутационната система, на уплътнителните устройства и т.н., за да се стигне днес до изключително цифрови комуникации.

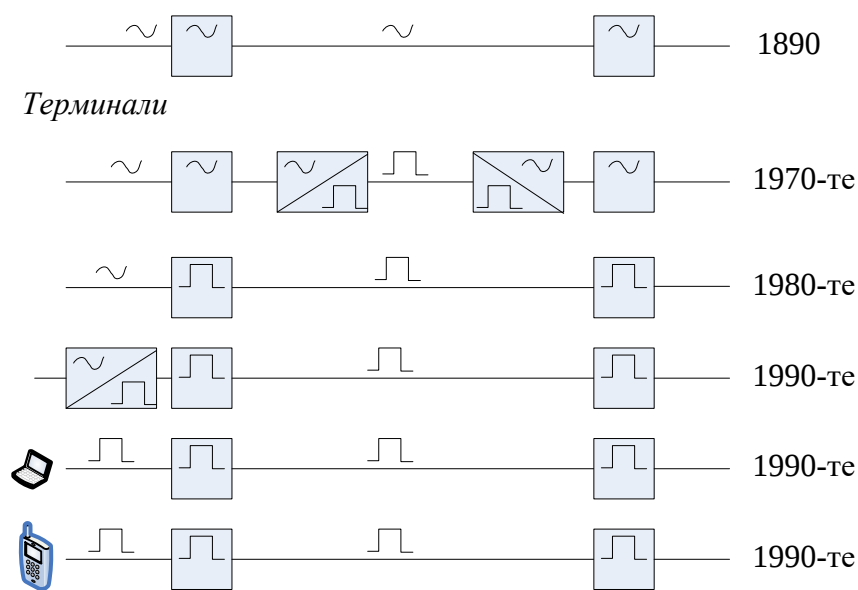
Всеки сигнал се характеризира с електрически, информационни и енергийни параметри (фиг. 2.6).

Информационните параметри на сигналите са аналогични на тези на съобщенията.

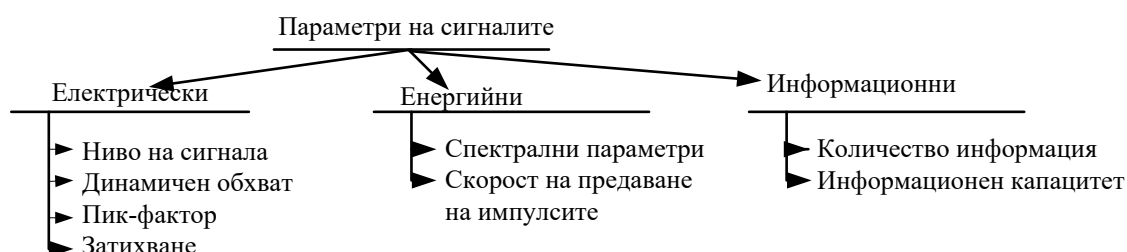
Към електрическите параметри се отнасят:

1. Ниво на сигнала

Сигналите, тяхното усилване и затихване в телекомуникациите се оценяват не във Волтове, Амperi и Ватове, с които се измерват абсолютните стойности на напреженията, токовете и мощностите им, а с относителни единици, наречени единици на предаване.



Фиг. 2.5. Процес на цифровизация на преносните среди



Фиг. 2.6. Параметри на сигналите

Исторически са известни две системи на относителни единици. В двете се използват логаритмични отношения: натурален ($\ln$) в основата, на която стои единицата непер, десетичен ($\lg$). Понастоящем се използва само десетичната, наречена Бел (Bell), в чест на създателя на телефона А. G. Bell. За практиката Бел е твърде неудобна, както Фарад при капацитета. Затова се използва 1/10 част от нея, известна като децибел (dB), т.е. ако искаме нивото да се представи в децибели, полученият при логаритмуването резултат трябва да се умножи на 10.

Децибелът е десет пъти десетичния логаритъм на отношенията на мощността на сигнала към мощността, приета за стандарт.

Когато децибелът dBm изразява отношението между две мощности, към дименсията се добавя m . Изразът:

$$10 \lg \frac{P_2}{P_1} [dBm],$$

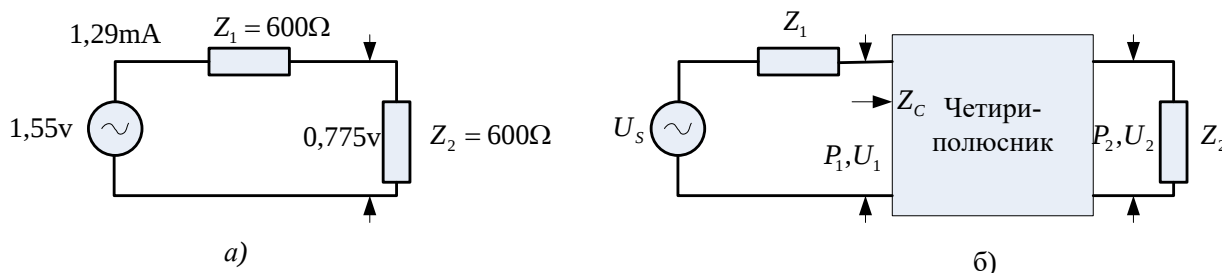
определя нивото на сигнал с мощност P_2 спрямо сигнал с мощност P_1 . Ако едната мощност е на сигнала S , а другата на шума N , то нивото S/N (сигнал/шум) се определя като към дименсията се добави p : $dBmp$.

В телекомуникациите базовите мощности, ток и напрежения спрямо, които се отнася измерваният сигнал, са стандартизирани [24]. За стандартен е приет т.н. нормален генератор (фиг. 2.7.а)) с вътрешно съпротивление $Z_1 = 600 \Omega$, ток $1,29 \cdot 10^{-3} A$ и напрежение $U = 1,55V$. Половината от напрежението ($0,775V$) остава върху товарното съпротивление $Z_2 = 600 \Omega$, а мощността върху него (стандартната мощност) е:

$$P_2 = 0,00129^2 \cdot 600 = \frac{0,775^2}{600} = 1mW = 0,001W \quad (2.6)$$

Ако мощността на сигнала е P_s , то нивото му P_w по мощност $\{dBm\}$ е

$$P_w = 10 \lg \frac{P_s}{0,001}, dBm \quad (2.7)$$



Фиг. 2.7. Схеми на свързване на нормален генератор

Когато двете мощности са равни, нивото на сигнала е $0 dBm$. Когато мощността на сигнала е два пъти по-голяма от стандартната $P_s = 2 mW$, неговото ниво е:

$$P_w = 10 \lg \frac{0,002}{0,001} = 10 \lg 2 = 10 \cdot 0,301 \approx 3dBm$$

В реалните телекомуникационни системи нивото на сигнала рядко надвишава $0 dBm$.

Най-често се съпоставят сигнали от двете страни на една система, звено, усилвател или преносна линия, които могат да се обобщят като четириполюсник (фиг. 2.7.б)). Ако четириполюсникът се натовари с импеданс, равен на характеристичното му съпротивление $Z_1 = Z_2 = Z_C$, стойностите на нивата на мощност и по напрежение (ток) съвпадат [9]. И това е обяснимо:

$$p_u [dBm] = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \lg \frac{\frac{U_1^2}{Z_C}}{\frac{U_2^2}{Z_C}} = 10 \lg \left[\frac{U_1}{U_2} \right]^2 = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = p_u [dB] \quad (2.8)$$

Следователно, за да се намери нивото, може да се вземе или отношението на мощностите, като се умножи по 10, или отношенията на напреженията, но да се умножи по 20. Когато нивото се измерва по напрежение или по ток, в знаменателя на подлогаритмичната величина стои съответната стандартна стойност, а логаритъмът се умножава по 20:

$$p_u = 20 \lg \frac{U_s}{0,775} = 20 \lg \frac{I_s}{0,00129}, dB \quad (2.9)$$

Ако импедансите Z_1 и Z_2 не са еднакви, стойностите на нивата на мощност, ток и напрежение са различни. За намиране на нивото, например по напрежение, трябва да се отчита разликата между импедансите по формулата:

$$p_u = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}, dB \quad (2.10)$$

2. Динамичен обхват (диапазон) D_S

Мощността на сигнала по време на предаването се променя непрекъснато и достига максимални P_{max} и минимални P_{min} стойности. За да се характеризират тези граници на изменение, се въвежда понятието динамичен диапазон. Динамичният диапазон (обхват) на сигнала се определя по следния начин:

$$D_S = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}} [dBm] \quad (2.11)$$

Под P_{max} обикновено се разбира стойността на моментната мощност, вероятността за превишаване, на която по време на предаването е много малка, напр. 0,01.

3. Пик-фактор на сигнала Q

Определя се с отношението на максималната към средната мощност P_{AV} на сигнала:

$$Q = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{AV}} [dBm] \quad (2.12)$$

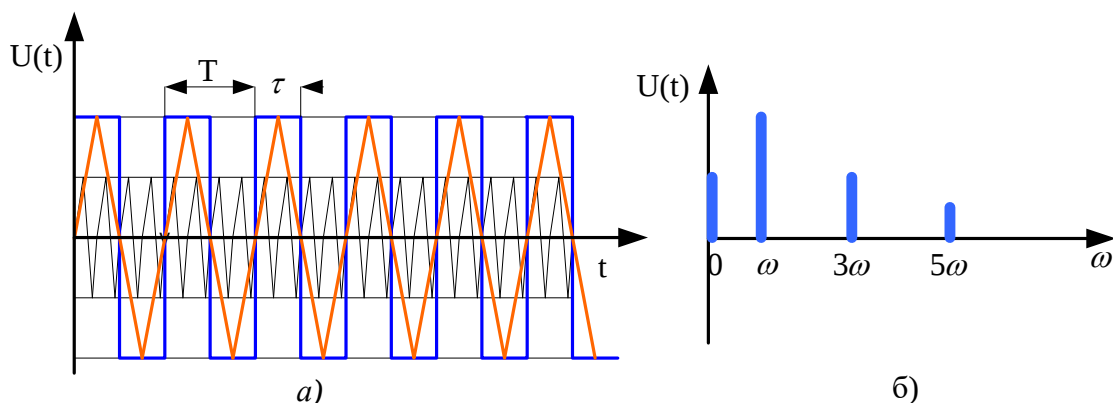
Освен границите, пик-факторът характеризира и начина на промяна на сигнала. При един и същ динамичен диапазон пик-факторът може да е различен.

Динамичният диапазон на телефонните сигнали е от порядъка на 20–35 dBm, на музикалните сигнали достига до 80 dBm, а при телевизионните е около 40 dBm. Пик-факторът на същите сигнали е приблизително равен на 14, 16, съответно 5 dBm [7-9].

Енергийни параметри на сигналите

1. Спектрални параметри

За описание на спектралните параметри е удобно да се използва периодичен сигнал. Известно е, че всеки периодичен нехармоничен сигнал може да се представи като сума от много (по принцип безкрайно много) синусоидални компоненти с различни честоти и амплитуди (фиг. 2.8.а), образуващи спектъра на сигнала (формула на Фурие). Всяка съставляваща синусоида се нарича хармоник, а съвкупността от всички хармоници се нарича спектрално разложение на сигнала.



Фиг. 2.8. Изображение на периодичен импулсен сигнал а) и б) Спектрални характеристики

Техниката за намиране на спектрите на какъв да е изходен сигнал е отдавна известна. За последователност от правоъгълни импулси с еднаква продължителност и амплитуда, спектърът се изчислява лесно с формулите на Фурие. Има специални уреди наречени спектрални анализатори, които измерват спектъра на произволен импулс и изобразяват на екрана амплитудите на хармониците или отпечатват на хартия техните стойности.

Характерна особеност на спектъра на периодичния сигнал е, че той е дискретен (прекъснат). Не съдържа всички възможни честоти, а само честотите (хармониците), кратни на основната честота: $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$. Най-голяма е амплитудата (енергията) на най-ниския хармоник. Тази компонента се нарича първа хармонична. Честотата и съвпада с честотата на сигнала. Другите компоненти са висши хармоници и имат амплитуди, намаляващи с повишаването на номера им. Може да има и постояннотокова съставка ($\omega = 0$).

Аналоговите сигнали от звуковия диапазон с непрекъснат спектър имат висши хармоници, които при честоти над 20 kHz стават пренебрежимо малки.

Ефективна ширина на спектъра F_{ef} се нарича лентата от честоти, в която се разлага основната част (например 90 %) от енергията на сигнала. Разликата между най-високата f_v и най-ниската честота f_n на сигнала, които се вменят в ефективната ширина на спектъра, се нарича честотна лента (честотен спектър) на сигнала $F_S = f_v - f_n$.

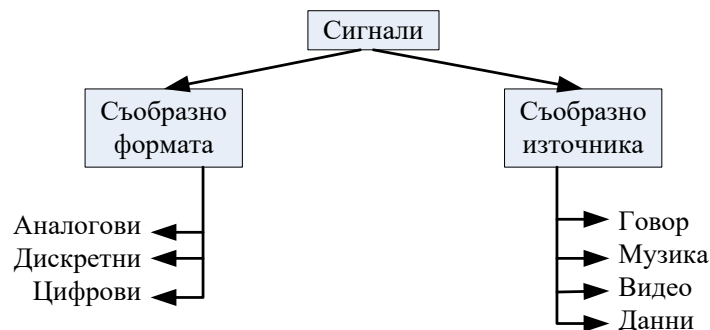
2. Скорост на предаване

При предаване на дискретни сигнали скоростта е важен параметър. Задава се като брой импулси, предавани за една секунда: $B = \frac{1}{\tau} [Baud]$, където τ е продължителността на всеки от предаваните правоъгълни импулси (фиг. 2.8.а)). При продължителност на импулса от 1 s, скоростта на предаване е 1 Baud. Този параметър се дефинира като скорост на предаване на импулсите. Измервателната единица за скорост Baud (Бод) е наречена на френския инженер Жорж Бодо с големи приноси в телеграфията [8].

Единицата Бод не държи сметка за количеството информация, която се съдържа в импулсите. Затова не бива да се смесват Baud, използван като мярка за скорост в предаването на данни, и bit/s, с който се измерва скоростта на предаваната информация. Те са равни, само ако се предават двоични импулси с равна вероятност за поява на нулите и единиците. Тогава всеки импулс би съдържал един бит информация. Ако обаче в един импулс се съдържат повече от един бит (напр.: при 4 или 8 стойности на информационния

параметър се съдържат 2, респективно 3 бита информация), тогава скоростта на предаваните импулси е по-малка от скоростта на предаване на информацията.

Разнообразието на сигналите и техните параметри е показано на фиг. 2.9. Вижда се, че важна гледна точка при описание на видовете сигнали е техният източник [10].



Фиг. 2.9. Сигнали и техните параметри

Източници и параметри на сигналите

1. Разговорни и музикални сигнали

Звукът е особено усещане, което се улавя от ухото, когато до него достигат звукови (акустични) вълни. Човешкото ухо улавя трептения на въздуха с честота от 16 Hz до 20 kHz. Звукът има две измерения: психо-физиологично (висок, гръмък, приятен, дразнещ и т.н.) и физическо (честота, интензитет, скорост). Между тях има връзка. Гръмкостта расте с интензитета, височината се повишава от честотата на основния хармоник и т.н. Тембърът зависи от т.н. обертонове, които са свързани с висшите хармоници.

Човешкото ухо има най-голяма чувствителност на честота около 1000 Hz. При тази честота долният праг има мощност около 10^{-16} W, а горният – 10^{-3} W.

Разговорният сигнал – според препоръка на ITU – T говор

ният сигнал трябва да се предава с частта от спектъра му, лежаща в границите от 0,3 kHz до 3,4 kHz. Това е приетият в цял свят честотен спектър на говорните сигнали, предавани в телефонията, за които ефективната ширина на честотната лента е $F_{ef} \approx 3,1 \text{ kHz}$.

Музикалните сигнали са подобни на разговорните. Спектърът е по-широк и за първи клас радиоприемници е 50 Hz – 10 kHz, а за втори клас – 30 Hz – 15 kHz. Висшият клас се използва само в най-качествените hi-fi технически средства.

2. Факсимилни сигнали

Факсимилната телекомуникация предава неподвижни изображения: текст, рисунки, картини, чертежи, фотографии и др. Устройството за преобразуване на факсимилното изображение превръща светлинния поток, отразен от изпращаната картина, в електрически сигнал. Ширината на спектъра зависи от много фактори, но препоръчително е тя да бъде $F_{ef} \approx 0 \div 2,5 \text{ kHz}$.

3. Видеосигнали – предават подвижни изображения. Преобразувател на съобщението в сигнал е видеокамерата. Изображението в телевизионната камера се сканира отляво-надясно и отгоре-надолу.

Телевизионните сигнали са комплексни и съдържат информация не само за яркостта на изображението, но и за цвета и синхронизацията на картината. Звуковият съпровод се предава заедно със самото изображение. На екрана на монитора то се възстановява чрез сканиране и засветяване на пикселите (точките, елементите на изображението) в същата последователност.

Съгласно възприетия у нас стандарт, телевизионното изображение се разлага на 625 реда. Ако се приеме, че разделителната способност по хоризонтала е същата и се отчете, че широчината на екрана е $4/3$ от височината, то във всеки ред трябва да има $625 \cdot 4/3$ различни точки (пиксели), т.е. в един кадър трябва да се предават $625 \cdot 625 \cdot 4/3$ импулса (елемента). Всяка секунда трябва да се предават най-малко 25 кадъра, за да няма трептене на картината. Скоростта на предаване на тези условни импулси ще бъде $B = 25 \cdot 625 \cdot 625 \cdot 4/3 = 13 \cdot 10^6$ Baud. За да се различават нулата от единиците на цифровите сигнали, достатъчно е да се предава първата хармонична на правоъгълния сигнал, т.е. в един период на сигнала има два импулса. Следователно $F_{ef} = B / 2 = 6,5 \text{ MHz}$.

4. Сигнали за пренасяне на данни

Сигналите в телеграфията и в системите за предаване на данни имат правоъгълна форма. Спектърът им има безброй хармоници. За предаване без изкривявания е необходима безкрайно широка честотна лента. Но при предаване на 1 и 0 с помощта на такива импулси се допускат изкривявания. За възстановяване на получената информация е достатъчно само да се различи наличието от отсъствието на импулс, а неговата форма няма значение. Изчисленията и практиката показват, че импулсите могат надеждно да се регистрират и при честотна лента, равна на скоростта на предаване на импулсите в Бодове. Тогава се предава само първият хармоник, вместо правоъгълни, импулсите са полусинусоидални, но се спестява ширина на честотния канал.

В телеграфната техника се работи със скорости $B = 50$ Baud и 100 Baud. На логическата единица съответства високо ниво, а на логическата нула – ниско ниво на сигнала. Данните се изпращат като последователности от нули и единици. При предаване на данни се работи със скорости $200, 600, 1200, 2400, 4800$ и 9600 Baud, а също и 48 и 64 kBaud.

Компютърните данни са двоични изображение на числа, текст, образи и т.н., представени в телекомуникационния канал като нули и единици с равна вероятност. Сигналите, с които се представят данните, имат правоъгълна форма. Последователност от 8 бита образуват 1 байт [10].

2.3. Комуникационни канали. Видове, параметри

Комуникационният канал включва всички устройства, осигуряващи пренасянето на сигналите. Ако сигналят е „нещото”, което „се движи”, то каналът е пътят, по който става движението.

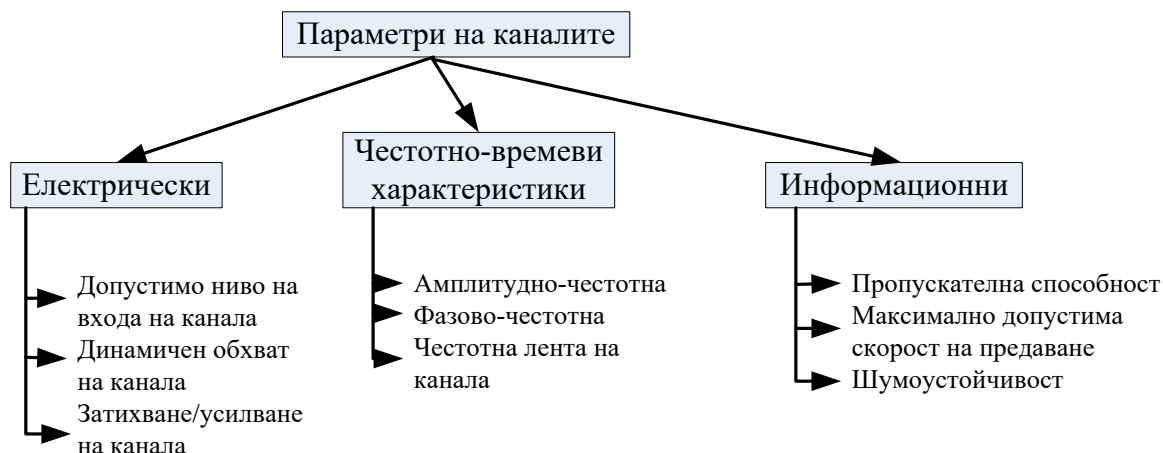
В неканално ориентираните мрежи, каквато е Интернет, каналът е логическо понятие.

В канално ориентираните мрежи, каквато е телефонната, каналът е реално, физическо понятие. Устройствата за изграждане, освобождаване и контрол на връзките не се включват в канала. Той се състои от съоръженията за пренасяне на информацията при изградена връзка.

Как се изгражда връзка?

Каналите, подобно на сигналите, са цифрови и аналогови в зависимост от вида на пренасяните сигнали. Това не означава, че по аналогови канали не могат да се пренасят цифрови сигнали. Но за да се използва ефективно, между сигнал и канал трябва да има съответствие.

На фиг. 2.10 са показани видовете и названията на съответните параметри.



Фиг. 2.10. Параметри на комуникационните канали

Електрически параметри

1. Максимално допустимо ниво на входа на канала- $P_{K.\dot{don}}$

Максималното допустимо ниво (напр.: по мощност $P_{WK.\dot{don}}$) зависи от параметрите на каналната апаратура. Тя се конструира и регулира за работа без изкривявания само при сигнали с допустимо ниво $P_{WS\max} \leq P_{WK.\dot{don}}$. Ако се подадат сигнали с по-високи нива възникват нелинейни изкривявания, което означава, че на изхода на канала ще има хармоници, които не са подадени на входа, а се пораждат в канала. Тези изкривявания са недопустими, тъй като могат да доведат до неразбираемост на говора или грешки при предаването на данните.

2. Динамичен обхват на канала

Динамичният обхват на канала D_K се задава с максимално допустима мощност P_{max} , при която все още не възникват изкривявания, и от мощността на смущенията P_N в канала. Динамичният обхват на канала се определя с израз:

$$D_K = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_N}, dB \quad (2.13)$$

Понякога това отношение се взема в абсолютни единици и се означава като отношение S/N (сигнал/шум) на канала.

Условията за неизкривено предаване са:

$$1. D_S \leq D_K; \quad 2. P_{WS\max} \leq P_{WK.\dot{don}} \quad (2.14)$$

3. Затихване и усилване

Усилването G (Gain) и затихването A (Attenuation) се дефинират пак чрез логаритмичните единици:

$$A = -G = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{изх}}} [\text{dBm}] \quad (2.15)$$

Затихването през преносната линия или друго звено на комутационния канал е относително намаление на амплитудата или мощността при преминаване на сигнали с определена честота.

Затихването се оценява при т.н. номинален сигнал, който е синусоидален с честота 800 Hz и се генерира от нормален генератор (фиг. 2.7 а). На практика се работи не с абсолютната стойност на затихване A , а с километричната му константа a , отнесена към 1 км от преносната линия.

Собственото затихване на четириполусника се определя при условие, че $Z_1 = Z_2 = Z_C$. Такова съгласувано натоварване се постига трудно. Затова са въведени и други величини като т.н. работно затихване и внесено затихване [7-10].

Честотно-времеви параметри на канала

Каналът не пропуска по един и същ начин сигналите с различни честоти:

- някои от честотите затихват повече, а други по-малко. Ако сигналът е нехармоничен и следователно се състои от много хармоници, нееднаквото затихване на хармониците може да промени неговата форма, т.е. настъпва линейно изкривяване;
- някои сигнали, в зависимост от честотата им, закъсняват през канала (дефазират се) повече от другите.

Тези свойства на каналите се оценяват от две важни характеристики:

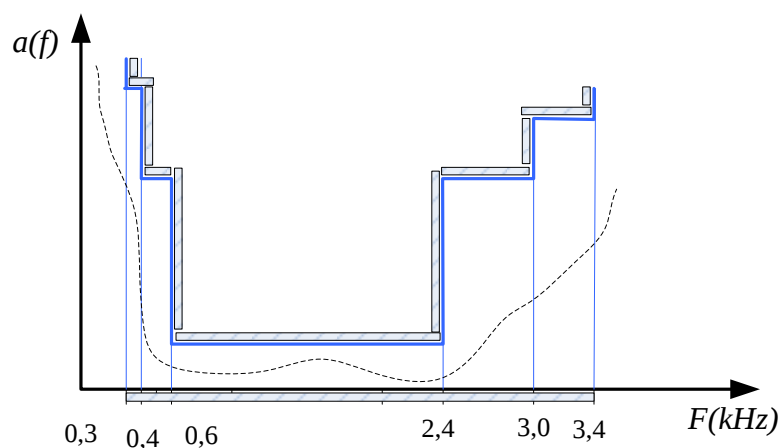
1. Амплитудно-честотната характеристика на канала, изразяваща зависимостта на затихването от честотата на сигнала $a(f)$.
2. Фазово-честотната характеристика, която показва как се изменя през канала фазата в зависимост от честотата на сигнала $\phi(f)$.

Когато се знае АЧХ, може да се определи формата на изходния сигнал, практически за какъв да е входен сигнал. На практика АЧХ се снима доста трудно, защото на входа на измервания канал трябва да се генерират еталонни синусоиди с неизменна амплитуда и плавно променяща се честота и да се измерва сигналът на изхода му.

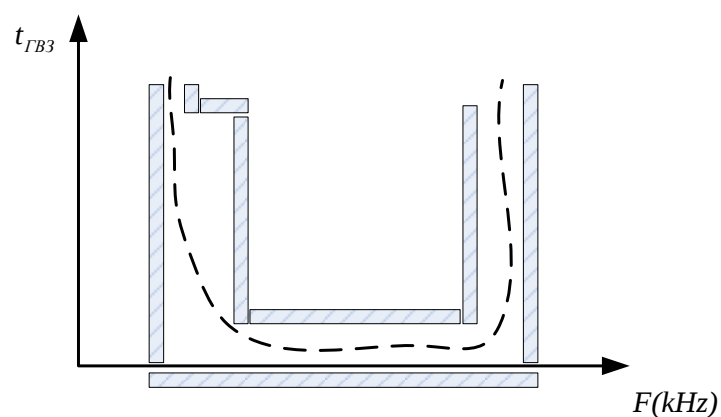
Вместо АЧХ може да се използва лента на пропускане на канала (bandwidth). Лентата на пропускане определя непрекъснатия диапазон от честоти на синусоидалния сигнал, за който сигналът се предава без значително затихване.

Затихването се дава за една точка от амплитудно-честотната характеристика. Често е достатъчно да се знае затихването на основния хармоник, за да се оцени приблизително изкривяването на сигнала.

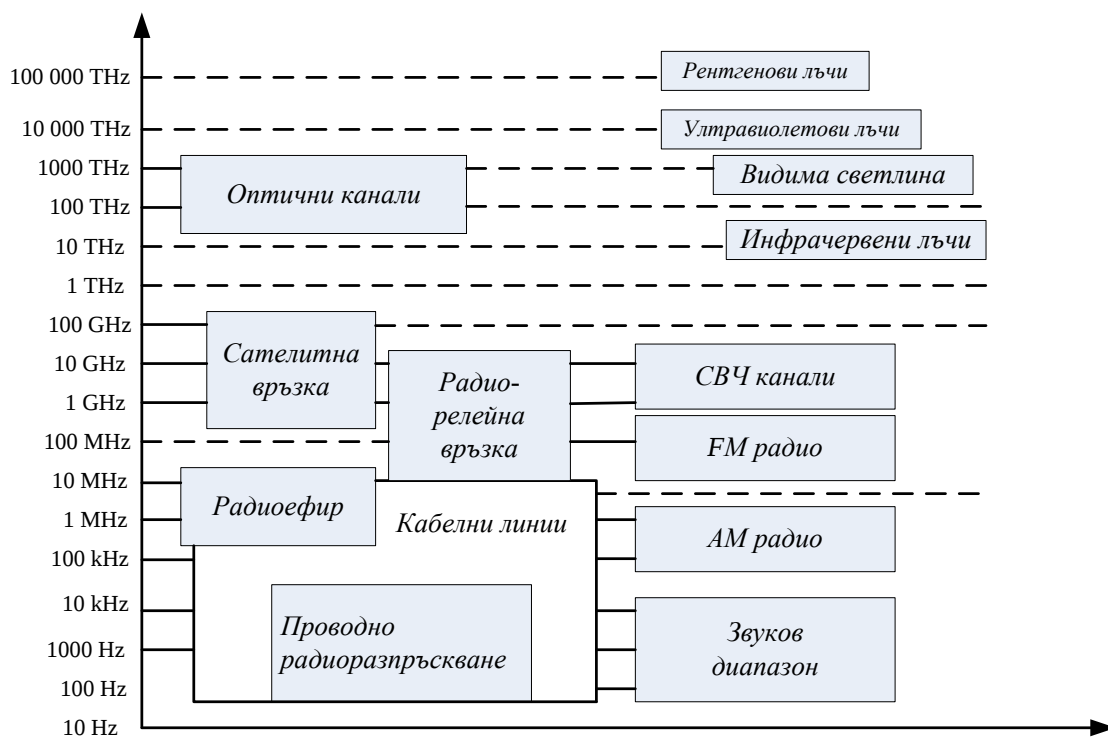
Международните организации (ITU-T) препоръчват как да се изменя затихването на стандартни канали (т.н. шаблони за затихването). На фиг. 2.11 е дадена препоръка за телефонния канал. Затихването не бива да е по-голямо от това, което показва пунктираната крива и трябва да се разполага така, че да не пресича защрихованата област.



Фиг. 2.11. Шаблон за неравномерност на затихването на телефонен канал



Фиг. 2.12. Шаблон за неравномерност на груповото време на закъснение на телефонен канал



Фиг. 2.13. Разпределение на честотните диапазони в комуникациите

Вместо с пълни шаблони, изискванията често се задават само с честотната лента на канала F_K . За телефонен канал както се вижда от фиг. 2.11, $F_K = 3100 \text{ Hz}$ ($0,3 - 3,4 \text{ kHz}$). За телеграфен канал на постоянно-токови импулси със скорост 50 Baud $F_K = 75 \text{ Hz}$ ($0 - 75 \text{ Hz}$), за радиоканал от висш клас 15 KHz ($30 - 15\,000 \text{ Hz}$), за телевизионен канал $F_K = 6 \text{ MHz}$.

При предаване на импулсни сигнали (данни, факс), неравномерността на фазово-честотната характеристика (ФЧХ) има съществено значение. Тя показва как при пренасяне през канала сигналите с различна честота, закъсняват по линията. Закъснението се измерва с групово време на разпространение $t_{гв}$ (group delay). ФЧХ трябва да е линейна функция на честотата, т.е. груповото време на канала $t_{гв}(W)$ трябва да е постоянно. На фиг. 2.12 е показан шаблон за неравномерност на $t_{гв}$ на телефонен канал.

На фиг. 2.13 са показани използваните в телекомуникациите честотни диапазони и необходимите ленти на пропускане на комуникационните канали за различни преносни среди. Координатната система е десетично логаритмична. Виждат се основните области, които се прилагат в жичните комуникации и радиокомуникации [8].

Информационни параметри

1. Пропускателна способност на канала

Максималното количество информация, което може да се предаде по даден комуникационен канал за единица време, определя неговата пропускателна способност (максималната скорост на предаване) C_K (bit/s).

Пропускателната способност зависи както от честотно-времените характеристики на канала, така и от спектралните характеристики на предаваните сигнали. Ако значимите хармоници на сигнала, определящи резултиращия сигнал на изхода, попадат в лентата на пропускане на канала, то такъв сигнал може да се приеме без съществени изкривявания.

Колкото по-висока е честотата на сигнала, толкова повече информация се предава по канала за единица време и толкова по-висока е пропускателната му способност. Но от друга страна с увеличаване на честотата на периодичния носещ сигнал се повишава и ширината на честотния му спектър. С това се появява несъответствие между лентата на пропускане на канала и честотния му спектър. Така сигналите започват да се изкривяват, а грешките при разпознаване на информацията в приемника нарастват, което ограничава скоростта на предаване.

През 1924 г. Harald Nyquist, работещ в Bell Telephone Laboratories, е открил фундаменталната зависимост между лентата на пропускане на канала F_K (в Hz) и максимално възможната пропускателна способност C_K (bit/s). Найкуист твърди, че скоростта на предаване в *Baud* не може да превишава повече от два пъти лентата на пропускане на канала:

$$C_K = 2F_K \log_2 M, \quad (2.16)$$

където M е броят на различимите от приемника стойности на информационния параметър на сигнала.

Ако сигналът има две стойности (съответни на лог. 1 и 0) $\log_2 2 = 1$ и пропускателната способност става двойно по-висока от честотната лента. Така за телефонна линия с лента от 3100 Hz скоростта не може да е повече от 6200 bit/s .

Възниква въпросът, как да се предава информация с по-голяма скорост, без да се променя скоростта на предаване на импулсите в Baud? Както бе отбелязано и ще бъде показано по-

подробно в материала за предаване на данни в телекомуникациите, това може да стане като един импулс се натовари с повече информация. Ако в импулса се съдържа повече от един бит информация, то $C_K(\text{bit/s})$ може да расте. Когато различимите стойности са 4 пропускателната способност $\log_2 4$ е два пъти, когато са 8 – три пъти и т.н. Но има едно важно препятствие, което налага ограничение. То се нарича „шум в канала“.

През 1948 г. *Claude Shannon* от Bell Telephone Laboratories, признат за основател на теорията на информацията направил нова крачка. Шенон твърди, че присъствието на шума не налага ограничение на скоростта на предаване на импулсите в *Baud*, а на количеството *bit*-ове, които могат да бъдат закодирани в един импулс, т.е. на различимите от приемника стойности на информационния параметър на сигнала. Той доказва теоремата:

$$C_K = F_K \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right), \text{bit/s} \quad (2.17)$$

където F_K е скоростта на предаване на импулсите, а P_S и P_N са съответно средните мощности на предавания сигнал и на смущенията в канала.

От формула (2.17) се вижда, че когато мощностите на сигнала и на смущенията са равни $\log_2(1+1)=1$, пропускателната способност на канала е равна на неговата честотна лента $C_K=F_K$. Когато няма смущения, пропускателната способност клони към безкрайност.

Макар за канал с фиксирана лента на пропускане да не съществува теоретична граница на пропускателната му способност, на практика такава граница има. Защото пропускателната способност може да се повиши или чрез повишаване на мощността на предавателя, или чрез намаление на шума на приемника. Но и едното и другото водят до оскъпяване на канала. Освен това отношението между тези две мощности е логаритмично и стократното му увеличение води до двукратно повишение на пропускателната способност.

За обикновена телефонна линия съотношението S/N е около 30 dB и максималното количество информация в един импулс е 5 bit. От формула (2.16) се вижда, че ако телефонната линия с максимална честота около 3 kHz допуска скорост $F_K = 6000 \text{ Baud}$, максималната скорост на предаване на информация е около 30 kbit/s.

Макар формулата на Найкуист (2.16) да не отчита наличието на смущения, тя е коректна. Силата на смущенията се отразяват върху броя на стойностите на информационния параметър M . Те не могат да са много, колкото това да е желателно, защото разликата между съседните стойности трябва да остава по-голяма от амплитудата на шума, за да може да се разпознават от приемника [7-10].

За цифров канал с честотна лента F_K и пропускателна способност C_K зависи от максималната допустима скорост на предаване $B_{\max}$ на канала и от количеството информация I_X , което носи всеки импулс:

$$C_K = B_{\max} \cdot I_X \quad (2.18)$$

Ако възможните стойности на информационния параметър на импулса са m и имат равновероятна поява в канала, пропускателната му способност е максималната, тъй като пренасяната информация е най-голяма:

$$C_{K \max} = B_{\max} \log_2 m \quad (2.19)$$

Ако например, $m = 8$ (често в модемите това е случаят), а $B_{\max} = 10\,000 \text{ Baud}$, пропускателната способност на канала е $C_{K \max} = 10000 \log_2 8 = 30 \text{ kbit/s}$.

2. Шумоустойчивост на канала

В резултат на смущенията в цифровия канал може вместо „1” да се приеме „0” или обратно. Възниква т.н. грешка на импулс. Интензивността на грешките по бит (Bit Error Rate – BER) зависи от отношението сигнал/шум (S/N), от информационните параметри на импулсите, от скоростта на предаване C_K и други фактори. Оценка на възможността на един канал да предава с определена скорост е вероятността за грешка p_0 при тази скорост:

$$p_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_0}{n}, \quad (2.20)$$

където n са подадените в канала импулси, а n_0 – сгрешените на изхода му.

Колкото по-висока е скоростта на предаване, толкова по-голяма е вероятността за грешка по импулс. За традиционните комуникационни канали BER има стойности $p_0 = 1.10^{-4} \div 1.10^{-6}$. При оптичните канали тя е много по-малка – 1.10^{-9} . За да се добие представа за броя на грешките трябва да се има предвид, че всеки символ в компютъра се приема с един байт (8 бита), а една машинописна страница е около 200 символа (байта). При $p_0 = 1.10^{-5}$ една грешка ще се появи на всеки 100 000 бита, т.е. на $100\,000 : 8 = 12\,500$ символа, значи на около 6 страници.

Вместо с p_0 може да се работи с т.н. достоверност на предаването D . Достоверността е степен на съответствие между предаването и приетото по канала и се определя чрез правилно приетите импулси:

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_{np}}{n} = 1 - p_0 \quad (2.21)$$

Ако в канала има смущения, количеството информация предадено по него, ще се намали. За да се запази зададена достоверност D , трябва да се намали и скоростта на предаване.

За телефонен канал при $F_K = 3.1$ kHz и $P_S/P_N = 100$ - $C_K \approx 20$ kbit/s.

Шумоустойчивостта на канала се определя от типа на преносната среда, както и от ефективността на използваните средства за потискане на смущенията. Най-ниска шумоустойчивост имат радиолиниите, а най-голяма – оптичните кабелни линии.

Изкривявания стават както поради смущения, така и поради ограниченията от честотната лента на пропускане на канала. Затова повишението на достоверността изисква да се разширява честотната лента и да се повишава шумозащитеността на канала.

Накрая е любопитно да се покаже пропускателната способност на различни човешки сетива, за да се сравнят с комуникационните канали.

Човешкото ухо има пропускателна способност $10^3 - 10^4$ bit/s, органите на осезанието 10^5 bit/s, а човешкото око 10^6 bit/s. Същевременно централната нервна система и главният мозък предават и обработват информация със скорост $30 - 40$ bit/s. Човешкият мозък може да обработи и запомни само малка част от приеманата информация и така се предпазва от информационно претоварване. Чрез четене и слушане човек също приема информация със скорост около 50 bit/s [7-10].

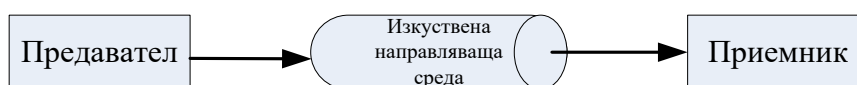
ГЛАВА III

ПРЕНОСНИ СРЕДИ И СИСТЕМИ В ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИТЕ

3.1. Общи сведения

Преносна среда е физическа среда, в която се разпространява сигнала от предавателя до приемника на информацията. Преносната среда, която свързва мрежовите елементи (комутационни системи, мултиплексни системи, терминали и др.), се нарича преносна линия (transmission line).

Проводната линия е изкуствена направляваща среда, в която сигналът се движи (води, пътува) от устройство с непрекъсната конструкция, което може да предава електромагнитна енергия в дадено направление (фиг. 3.1).



Фиг. 3.1. Структура на проводна линия за предаване

В зависимост от вида на направляващата среда, проводните линии биват:

1. Електропроводна, по която сигналът е електрически ток.
2. Световодна (оптическа), в която сигналът е светлинен лъч.

Електропроводните, които се състоят от метал или сплав с висока електропроводимост, биват въздушни линии, кабели и вълноводи. Проводникът има еднакви характеристики във всяка своя точка и поведението на сигнала в него може точно да се предскаже.

Средата може и да не „води” сигнала, а той да се предава във вид на радиовълни в открито пространство, където неговото поведение е трудно предсказуемо. Тогава преносната радиосреда е ефирът. Сигналът, както е известно, се разпространява и във вакуум, където неговото поведение е предсказуемо.

Преносните среди биват от непрекъснат и прекъснат тип.

Непрекъснати среди са тези, които включват в себе си и откритото пространство. Такива са космическите и радиорелейни системи, които освен вълноводи, коаксиални и оптични кабели, включват и радиолинии. При далечни връзки преносната среда най-често е прекъснатата, тъй като на много места тя преминава от проводна в радио среда и обратно.

При разпространението си в преносната среда сигналът затихва т.е. загубва част от енергията си. За високи честоти затихването нараства много по-бързо. Това налага загубите да се компенсират. За целта е необходимо на разстояния от няколко десетки километра да се поставят усилватели за аналоговите сигнали и регенератори за цифровите, които възстановяват нивото и формата на сигнала. Освен това се налага сигналите да се разпределят и съгласуват с преносната среда. Например, в ефира не могат да се пропуснат постояннотокови импулси. За тяхното пренасяне се използват модулации. Така преносната среда се превръща в преносна система. Типични представители на преносни системи са кабелите, радиорелейните и сателитните линии [11].

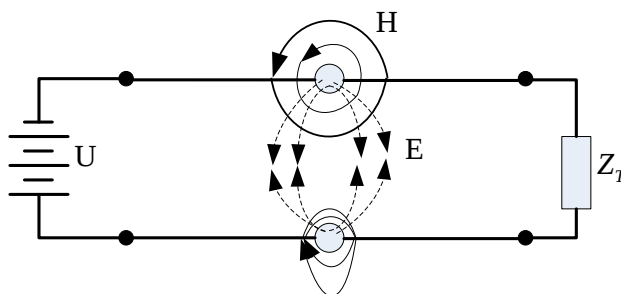
От параметрите и характеристиките на средата зависи нейната преносна способност. Те са едни за електропроводната среда, други за оптическите влакна и трети – за откритото пространство и ще бъдат разгледани последователно по - долу.

3.2. Електропроводни линии с разпределени параметри

Разпространение на електрическия сигнал по линията

Елементите на телекомуникационния канал като преобразуватели, филтри, усилватели, дискриминатори и пр. имат съсредоточени в определени места параметри (активни елементи, съпротивления, индуктивности, капацитети и др). За разлика от тях параметрите на съединителните електропроводни линии (въздушни, кабелни и вълноводи) са разпределени. Напречното сечение и материалът на проводниците, както и диелектричната проницаемост между тях, остават постоянни по протежение на цялата им дължина. Такъв вид електрически вериги се наричат хомогенни вериги (линии) или линии с разпределени параметри [12].

Ако в началото на една хомогенна линия се свърже постоянен ток източник, в двата проводника се появяват различни по полярност електрически заряди. Потенциалната разлика поражда между проводниците електрическо поле с интензитет E (фиг. 3.2).



Фиг. 3.2. Електромагнитна вълна по хомогенна линия

Зарядите и свързаните с тях електрическо поле се преместват от началото по дължината на линията към края ѝ с голяма скорост, съизмерима със скоростта на светлината. В резултат по линията протича ток който поражда около проводниците магнитно поле с интензивност H . То се премества с движението на зарядите от началото към края на линията.

Силовите линии на електрическото и магнитното поле са взаимно перпендикулярни, при което първите се разполагат в пространството между проводниците, а вторите – около всеки проводник.

Съвкупността от електрическото и магнитното поле разпространяващи се по дължина на веригата с определена скорост, се нарича електромагнитна вълна.

Ако по веригата се разпространява високочестотен сигнал, плътността на тока нараства към повърхността на проводника (повърхностен ефект), при което колкото честотата на сигнала е по-висока, толкова ефектът на изместване на тока към повърхността е по-голям. При високочестотни съобщителни линии поради това, че електромагнитният процес се развива в пространството между двата проводника, цялата енергия се съсредоточава главно в средата около проводниците. Пренасянето на сигнали с много високи честоти се извършва не от проводниците, а от окръжаващите ги среда т.е от диелектиците. Проводниците само определят посоката на движение на енергията. Благодарение на тях електромагнитната енергия не се разсейва на всички страни, а се движи по дължината на веригата.

Електромагнитната вълна при разпространението си среща във всички точки на веригата т. нар. вълново (характеристично) съпротивление Z_C (intrinsic impedance), което се изразява

чрез отношението на напрежителната вълна (съответстваща на електрическото поле) и токовата вълна (съответстваща на магнитното поле):

$$Z_c = \frac{E}{H} = \frac{U}{I}, [\Omega] \quad (3.1)$$

Разпространението на електромагнитната енергия е свързано с намалението ѝ (затихването ѝ) по амплитуда и изменението ѝ по фаза.

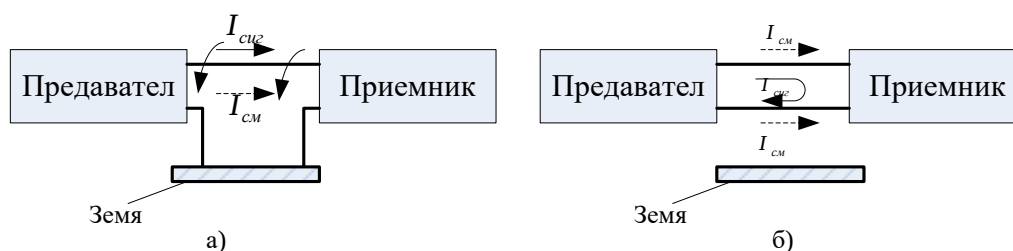
Когато източникът е променливотоков, електростатичното и електромагнитното поле се променят алтернативно (когато едното е силно, другото е слабо и обратно) с честотата на токоизточника, разпространявайки се по линията като електромагнитни вълни.

При разпространението си електромагнитната вълна среща във всички точки на линията т.н. вълново съпротивление Z_c . Вследствие на това сигналът затихва по амплитуда и се изменя по фаза. Затихването и промяната на фазата зависят от характеристиките и параметрите на линиите.

Вълновото съпротивление при променливотоков сигнал е комплексно число, чийто модул влияе върху затихването, а аргументът му – върху фазата на сигнала. Известно е като вълнов импеданс $\dot{Z}_c = \frac{\dot{E}}{\dot{H}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}, [\Omega]$ (wave impedance), където U и I са напрежението и тока по линията [12].

Еднопроводна и двупроводна връзка

Известно е, че най-простата връзка е тази, която е реализирана с един проводник. Като втори проводник се използва земята (фиг. 3.3 а).



Фиг. 3.3. Едно а) и двупроводна връзка б) с влияние на смущаващи полета

Такава среда е много икономична, но има сериозен недостатък – силна уязвимост от шумове. Единият проводник е антена за смущаващите полета (създадени например от електропровод, контактна мрежа в електрическия транспорт, атмосферно електричество, съседни проводници и др.). Целият смущаващ ток I_{cm} преминава през приемника и пречи за качественото приемане на полезния сигнал.

При използване на два близки проводника, разположени симетрично спрямо земя, например кабелни чифтове, смущаващите токове в тях имат еднаква големина и посока и взаимно се неутрализират. Това предимство води до широко приложение на двупроводната връзка.

Електрически параметри на електропроводните линии

Електрическите свойства на преносните линии се определят от параметрите на предаване. Те се подразделят на:

- първични;
- вторични.

3.2.1. Първични параметри

Първичните параметри са: активно съпротивление (resistance) R , капацитет (capacitance) C , индуктивност (induction) L и проводимост (conductance) на линията G . Те са разпределени равномерно по цялата дължина и затова се измерват съответно в Ом $[\Omega]$, Фарад $[F]$, Хенри $[H]$ и Сименс $[S]$, отнесени към един километър дължина на линията.

Активно съпротивление R $[\Omega/km]$ има няколко съставлящи:

- съпротивление по постоянен ток, което зависи от специфичното съпротивление на метала и неговото напречно сечение;
- съпротивление от повърхностния (скин) ефект, който се поражда от електромагнитните вълни и води до това, че плътността на тока в центъра на проводника е по-малка от тази на повърхността му. Ефектът е толкова по-силен, колкото са по-високи електрическата проводимост, магнитната проницаемост и честотата на тока;
- съпротивление от ефекта на близост, който се предизвиква от взаимодействието на електромагнитни полета в проводниците и се състои в това, че плътността на тока в близките участъци от проводниците нараства за сметка на плътността в отдалечените;
- съпротивление от вихрови токове, които се индуцират в съседните метални маси от протичащия в линията ток, губейки по този начин част от енергията му.

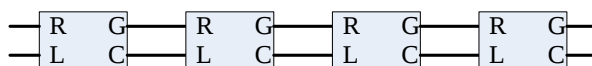
Всички съставлящи участват по сложен начин в обща формула за определяне на активното съпротивление на линията при променлив ток.

Капацитетът c (F/km) на линията е аналогичен на капацитета на кондензатор, чиито пластини в случая са проводниците, а диелектрик – изолационният материал (при кабелни линии) или въздушната маса между тях (при въздушни линии).

Проводимост G (утечка) (S/km) е обратно пропорционална на съпротивлението на изолацията между проводниците. Тя се обуславя от несъвършенството на изолацията при постоянен ток, а при променлив – от диелектричните загуби, които се изразходват за преполяризация на зарядите в диелектрика.

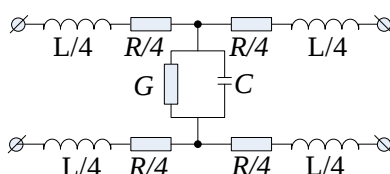
Индуктивност (H/km) характеризира способността на сигнала да създава около електрическата верига магнитно поле. Тя зависи от магнитните свойства на материала, разстоянието между проводниците на линията и техния диаметър [12].

Може да се приеме, че хомогенната линия се състои от безкрайно много свършено малки четириполусни звена, свързани последователно (фиг. 3.4). Нека тези звена имат параметри: съпротивление R , проводимост G , индуктивност – L и капацитет C .



Фиг. 3.4. Еквивалентна схема на електропроводна линия

С риск да се допусне известна неадекватност на модела може да се намери техния еквивалентен четириполусник и хомогенната линия с разсредоточени параметри и да се представи с еквивалентна заместителна схема на фиг. 3.5.

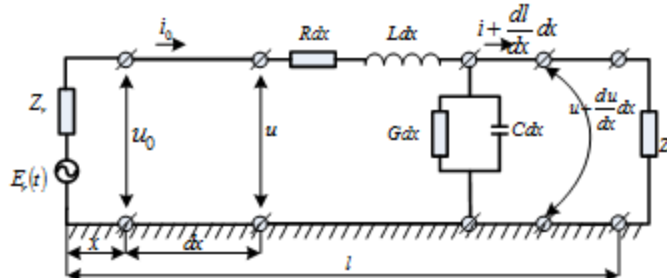


Фиг. 3.5. Еквивалентна електрическа схема на електропроводна линия

Надлъжното рамо на този симетричен T -образен четириполусник се състои от параметрите R и L , които образуват сумарния надлъжен импеданс $Z = R + j\omega L$, а напречното рамо – от параметрите G и C , образуват проводимостта $Y = G + j\omega C$.

Основни диференциални уравнения на хомогенни линии

На фиг. 3.6 е дадена хомогенна линия с дължина l . На разстояние x от началото ѝ е отделен един безкрайно малък елемент dx , показан чрез своите параметри: Rdx , Ldx , H ; Cdx , F ; и Gdx , S . В началото на линията е свързан генератор за променливо е.д.н. $E_r(t)$ и вътрешно съпротивление Z_r . Краят на линията е натоварен с импеданса Z_l . Напрежението между проводниците и тока в тях за различни точки на линията и във всеки момент са различни и се определят от независимите променливи – времето t и разстоянието x . Напрежението и токът в началото на линията са:



Фиг. 3.6. Хомогенна линия с означени първични параметри на безкрайно малка дължина

$$\begin{aligned} u(x, t) &= u(0, t) = u_0 \\ i(x, t) &= i(0, t) = i_0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

а на разстояние x :

$$\begin{aligned} u(x, t) &= u \\ i(x, t) &= i \end{aligned} \quad (3.3)$$

Съкратените означения в (3.2) и (3.3) се въвеждат за опростяване в писането на формулите.

В даден момент напрежението u токът i , действащи в началото на елемента dx , се изменят в края му на:

$$\begin{aligned} u(x + dx, t) &= u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, \\ i(x + dx, t) &= i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \end{aligned}$$

Разглеждайки елемента dx , се вижда, че падът на напрежението върху тази елементарна дължина има две съставки (върху надлъжното рамо); $Rdx i$, която преодолява съпротивлението, и $Ldx \frac{\partial i}{\partial t}$, уравниваща е.д.н. на самоиндукцията, възникваща в този участък, т.е.

$$u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) = Rdx i + Ldx \frac{\partial i}{\partial x},$$

или

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial x}$$
(3.4)

Разликата между токовете в началото и края на елементарната дължина dx се определя (през напречното рамо) от тока на проводимостта $Gdxu$ и тока на смесването $Cdx \frac{\partial u}{\partial x}$, т.е.

$$i - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) = Gdxu + Cdx \frac{\partial u}{\partial x}$$

или

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial x}$$
(3.5)

Получените частни диференциални уравнения (3.4) и (3.5) се наричат основни диференциални уравнения на хомогенната линия. Те дават възможност да се намерят напрежението и токът в линията като функции на x и t при зададени гранични условия.

Ако уравнение (3.4) се диференцира спрямо x , се получава:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R \frac{\partial i}{\partial x} + L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}$$

След заместване на израза ∂i с определението му от (3.5) и на втората частна смесена производна $\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}$, определена от същото уравнение (3.5), се получава:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (RC + LG) \frac{\partial u}{\partial t} + RG u$$
(3.6)

По аналогичен начин за тока се намира:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (RC + LG) \frac{\partial i}{\partial t} + RG i$$
(3.7)

В този си вид двете уравнения са били изведени още в 1855 г. от Уилям Томсон при изучаване на електрическите процеси в телеграфните кабели¹, затова са наречени телеграфни уравнения, но по същество те са валидни за всички еднородни преносни линии [13, 14].

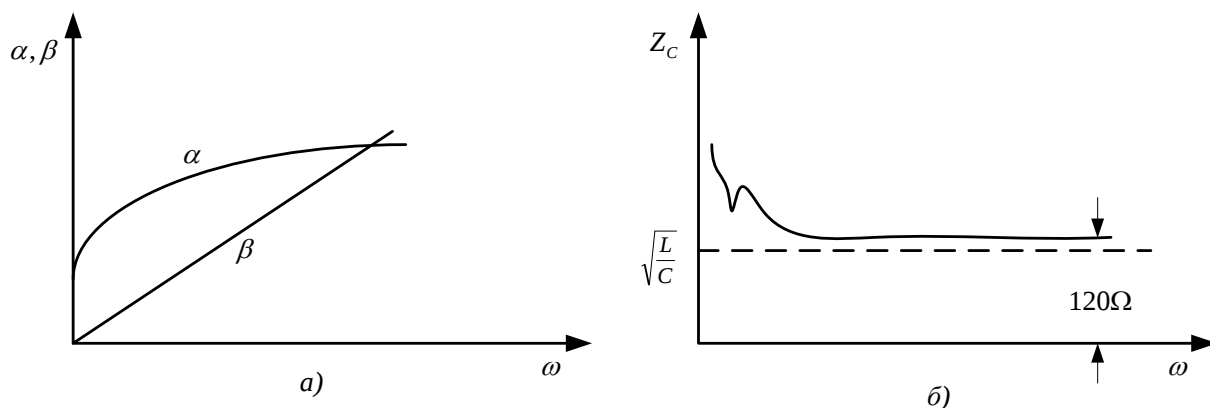
3.2.2. Вторични параметри

Вторичните параметри на една линия зависят от честотата $\omega = 2\pi f$ на сигнала и от всички първични параметри. Величината, която характеризира отслабването (затихването) на сигнала е т.н. километричен коефициент на затихване (attenuation coefficient) α . Той определя намаляването на тока, напрежението или мощността при разпространение на сигнала по линия с дължина 1 km и се измерва в dB/km. Определя се като реалната част на комплексното число $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta,$$
(3.8)

¹ Телефонни връзки още не са съществували

което представлява константата на разпространение на сигнала. Имагинерната (мнимата) част на γ се нарича километрична фазова константа β . Тя характеризира изменението на фазата на тока, (напрежението) на дължина 1 km и се измерва в градуси или радиани (1 рад. = 57^0). С увеличаване на честотата ω нарастват загубите в метала, диелектрика и вихровите токове. В резултат затихването α расте нелинейно, а фазата се увеличава почти пропорционално (фиг. 3.7).



Фиг. 3.7. Изменение на затихването а) и фазата б) на вълновото съпротивление от честотата

Вълновият импеданс $\dot{Z}_C$ се определя по формулата:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_C| \cdot e^{-j\varphi} \quad (3.9)$$

и показва способността на линията да приеме от предавателя зададената мощност на сигнала. Модулът на импеданса Z_C се намалява от $\sqrt{\frac{R}{G}}$ при постоянен ток до $\sqrt{\frac{L}{C}}$ при много високи честоти. Изменението му за симетрични кабелни линии е показано на фиг. 3.7.б).

Симетричният кабел представлява сноп от изолирани проводници подредени и усукани в определен ред, поставени по цялата им дължина в гъвкава водонепроницаема защитна обвивка. Всяка симетрична верига се състои от два еднакви в електрическо и конструктивно отношение проводника, разположени симетрично един спрямо друг и спрямо земя (металната обвивка, екрана).

Класифицират се по редица признаци:

- предназначение;
- област на приложение;
- условия на полагане и експлоатация;
- предаван честотен спектър;
- тип на изолация;
- вид на влагозащитна обвивка и
- група на усукване.

В зависимост от областта на приложение симетричните кабели се разделят на селищни и междуселищни (далекосъобщителни). По отношение на условията на полагане и експлоатация, кабелите биват подземни, проводни и въздушни [16].

По честотния спектър на предаваните сигнали те се делят на нискочестотни (н.ч.) – за тонален честотен обхват, височестотни (в.ч.) – за честоти над 12 kHz и комбинирани – съдържащи както нискочестотни, така и височестотни вериги.

В зависимост от типа на изолацията на отделните проводници се различават симетрични кабели с полиетиленова, хартиена, хартиено-корделна, стирофлексно-корделна, пореста, флуоропластова и др. изолация.

Според вида на влагозащитната обвивка на кабелния сноп, кабелите биват с метална (оловна, алуминиева), пластмасова (полиетилен, поливинил хлорид) и метало-пластмасова обвивка.

И накрая, в зависимост от групите на усукване в рамките на кабелния се различават кабели с групи двойки или четворки, оформени в повивна конструкция или от елементарни кабелни снопове.

Кабелните проводници се изработват от метал с висока електрическа проводимост, достатъчна механична якост и гъвкавост. В кабелната техника е прието изолираният проводник да се нарича кабелно жило, а само голият проводник – токопроводящо жило. Жилата на кабелите трябва да бъдат съвършено гладки, без шупли и грапавини. Най-често те се изработват от електромагнитна мед и по-рядко от алуминий. Диаметърът d на токопроводящите жила са от 0,32 до 1,4 mm, като $d = 0,32; 0,4; 0,5; 0,6;$ и $0,7$ mm са характерни за селищните кабели, а $d = 0,8; 0,9; 1,0; 1,2$ и $1,4$ mm – за междуселищни кабели. Ако за проводников материал се използва алуминий, за да имат медните и алуминиевите токопроводящи жила еднакво съпротивление трябва да се спазва съотношението $d_{Al} = 1,28d_{Cu}$, където d_{Al} е диаметърът на алуминиевия проводник, а d_{Cu} - диаметърът на медния проводник.

От съотношението се вижда, че за да имат жилата еднакво съпротивление, диаметърът на алуминиевия проводник трябва да бъде по-голям от този на медния, което следва от факта, че специфичното съпротивление ρ на алуминия е по-голямо от това на медта.

$$\rho_{Al} = 0,0280 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}; \quad \rho_{Cu} = 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

За изолиране на кабелните проводници се използват материали с голямо изолационно съпротивление $R_{из}$, малки диелектрични загуби $tg\delta$, малка диелектрична проникваемост ε , голяма гъвкавост и голяма диелектрична якост $E_{пр}$. Такива са: полиетилен, полистирол, стирофлекс, кабелна хартия, флуоропласт, поливинилхлорид, порест полиетилен и др.

Електрически параметри на селищните телефонни кабели

Електрическите качества на селищните телефонни кабели се характеризират с четири основни електрически величини: активно съпротивление, индуктивност, капацитет и проводимост на изолацията [16].

Първичните параметри на селищните телефонни кабели са в зависимост от конструкцията на кабелните вериги, материала на проводника, вида на изолацията и пр.

1. Активно съпротивление на кабелната верига – при нискочестотните кабели зависи от материала, от който са изработени проводниците и от диаметъра им. Токопроводящите свойства на проводниците се изразяват чрез специфичното им съпротивление ρ , което представлява съпротивлението на проводник с дължина 1m и напречно сечение $1mm^2$. В такъв случай съпротивлението на една кабелна верига е:

$$R_0 = 2\rho \frac{l}{q}, \Omega$$

Където:

- l е дължина на проводника;
- q представлява напречно сечение на проводника.

Съпротивлението на 1 km верига е:

$$R_0 = 2\rho \frac{l}{q} = 2.0,0175 \frac{1000}{\frac{\pi d_0^2}{4}} = \frac{44,8}{d_0^2}, \Omega / km \quad (3.10)$$

При усукване на кабелните жила в групи и на групите в снопове дължината на веригата е винаги по-голяма от дължината на кабела, поради което величината $\frac{44,8}{d_0^2}$ трябва да се

умножи с коефициента на спиралността λ , който при практически изчисления с достатъчна точност се взема 1,02 – 1,04. За медни вериги при 20°C:

$$R_0 = \frac{\lambda \cdot 44,8}{d_0^2}, \Omega / km \quad (3.11)$$

а за алуминиеви:

$$R_0 = \frac{\lambda \cdot 74}{d_0^2}, \Omega / km \quad (3.12)$$

Съпротивлението на кабелните вериги при температури, различни от 20°C, се определя по формулата:

$$R_t = R_{20^0} [1 + \alpha(t - 20)], \Omega / km \quad (3.13)$$

където: R_{20^0} е съпротивлението на проводника при $t=20^0$ C:

- α - температурния коефициент;
- t – температурата, при която се изчислява съпротивлението.

Стойностите на ρ , γ и α са дадени в Табл. 3.1.

Табл. 3.1. Стойности на параметри ρ , γ и α

Наименование на материала	Специфично съпротивление $\rho, \frac{\Omega mm}{m}$	Специфична проводимост $\gamma, \frac{s.m}{mm^2}$	Температурен Коефициент α	Специфично Тегло $g[g/cm^3]$	Относителна магнитна проницаемост μ
Мед	0,0175	54,00	0,004	8,9	1
Алуминий	0,0291	34,36	0,0043	2,65	1
Стомана	0,139	7,23	0,006	7,9	100-120

2. Индуктивност на кабелната верига

Индуктивността на двупроводна кабелна верига се изчислява по формулата:

$$L = \lambda \left(4 \ln \frac{2a - d_0}{d_0} + 1 \right) \cdot 10^{-4}, H / km \quad (3.14)$$

където:

- d_0 е диаметърът на кабелното жило;
- a – разстоянието между центровете на жилата на кабелната верига в mm;
- λ - коефициент на спиралност - $\lambda = (1,02 - 1,04)$.

3. Капацитет на кабелната верига

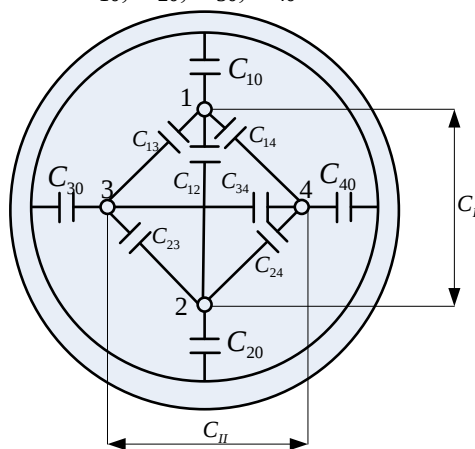
Капацитетът на кабелната верига може да се разглежда като капацитет на кондензатор, чиито плочи са образувани от повърхността на проводниците на веригата, а за диелектрик служи изолационният материал между тях – въздух, изолационна хартия и др.

В кабелната техника се различават два вида капацитети:

- а) работен капацитет – капацитетът между проводниците на разглежданата верига, и
- б) частичен капацитет – между отделните проводници на кабелните елементи.

Частичният капацитет е съставна част на работния капацитет.

На фиг. 3.8 са дадени работните и частичните капацитети на звездно усукана четворка, покрита с металическа обвивка. Капацитетите C_I и C_{II} са работните капацитети между жилата (1-2) и (3-4), а капацитетите между отделните жила $C_{13}, C_{14}, C_{23}, C_{24}, C_{12}, C_{34}$ и между жилата и металическата обвивка $C_{10}, C_{20}, C_{30}, C_{40}$ са частичните капацитети.



Фиг. 3.8. Капацитети на кабелни двойки

Броят на частичните капацитети на кабелния сноп се определя по формулата:

$$N = \frac{n}{2}(n+1) \quad (3.15)$$

където: n е броят на жилата на кабела [11-16].

От фиг. 3.8 се вижда, че една кабелна четворка, покрита с оловна обвивка има 10 частични капацитета. Четворка, намираща се в кабелен сноп от седем четворки има 406 частични капацитета, различаващи се един от друг. Оттук следва, че извеждането на формулите за работния капацитет на кабелни вериги е много трудно и сложно.

При спазването на равенството $C_{10} = C_{20} = C_{13} = C_{14} = C_{23} = C_{24}$ (фиг. 3.8) В. Н. Кушлиев е извел формулата за работния капацитет на кабелната верига:

$$C = \frac{\lambda \varepsilon_r}{36 \ln \frac{2a}{d_0}} \cdot 10^{-6}, F / km \quad (3.16)$$

където:

- a е разстоянието между центровете на проводниците на кабелната верига;
- d_0 – диаметърът на кабелния проводник без изолацията;
- λ - коефициент на спиралност;
- ε_r - диелектрична проницаемост;
- ψ - корекционният коефициент характеризиращ отдалечеността на кабелните проводници от металната обвивка.

Диелектричната константа ε_r за различните видове изолация е дадена в Табл. 3.2.

Табл. 3.2. Диапазони на диелектричната константа ε_r

Предназначение на кабела	Вид изолация	Диелектрична проницаемост
Селищни съобщения	въздушно-хартиена	1,55 – 1,66
	хартиено-маслена	1,65 – 1,75
	корделно-хартиена	1,45 – 1,55
Между селищни съобщения	корделно-хартиена	1,35 – 1,45
	корделно-стирофлексна	1,20 – 1,30

Корекционните коефициенти в зависимост от начина на усукване на кабелните проводници в групи се определят по формулите дадени в Табл. 3.3.

Означенията на отделните величини в таблицата са:

- d_p, d_3, d_{DM} – диаметър на групите, съответстващ на системата на усукване;
- d_1 – диаметър на проводника заедно с изолацията;
- a – разстояние между центровете на проводниците на кабелната верига;
- d_0 – диаметър на кабелния проводник без изолация
- D_e – диаметър на екрана [17].

Табл. 3.3. Аналитични зависимости за корелационните коефициенти

Вид усукване	Разстояние между центровете	Корекционни коефициенти
Двойка неекранирана	d_1	$\psi_p = \frac{(d_p + d_1 - d_0)^2 - a^2}{(d_p + d_1 - d_0)^2 + a^2}$
Двойка екранирани	d_1	$\psi_{pe} = \frac{D_e^2 - a^2}{D_e^2 + a^2}$
Звезда неекранирана	$d_3 - d_1$	$\psi_3 = \frac{(d_3 + d_1 - d_0)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d_0)^2 + a^2}$
Звезда екранирана	$\sqrt{2}d_1$	$\psi_{3e} = \frac{D_e^2 - a^2}{D_e^2 + a^2}$
Четворка ДМ	d_1	$\psi_{DM} = \frac{(0,65d_{DM} + d_1 - d_0)^2 - a^2}{(0,65d_{DM} + d_1 - d_0)^2 + a^2}$

Работният капацитет на фантомната кабелна верига се изчислява по формулата:

$$C_\phi = \frac{\lambda \varepsilon_r}{18 \ln \frac{2a}{d_0}} \cdot 10^{-6}, \quad F / km \quad (3.17)$$

където: ϕ е корекционен коефициент за фантомни вериги.

Стойностите на коефициентите ϕ и ψ в зависимост от усукването на първичните кабелни групи са дадени в Табл. 3.4.

Проводимост на изолацията (утечка) на кабелната верига. Проводимост на изолацията G на кабелната верига характеризира качеството на изолационната покривка на кабелните проводници. При високи честоти проводимостта на изолацията на кабелната верига е сума от проводимостта при постоянен ток G_0 и проводимостта при променлив ток G_∞ , т.е.

$$G = G_0 + G_\infty \quad (3.18)$$

Табл. 3.4. Стойности на параметрите φ и ψ

За основни вериги						За фантомни вериги	
d_1/d_0	ψ_p	ψ_{pe}	ψ_z	ψ_{ze}	ψ_{DM}	φ_z	φ_{DM}
1,6	0,608	0,647	0,588	0,711	0,615	0,876	0,735
1,8	0,627	0,640	0,611	0,710	0,628	0,885	0,785
2,0	0,644	0,633	0,619	0,709	0,660	0,890	0,820
2,2	0,655	0,627	0,630	0,708	0,670	0,899	0,745
2,4	0,665	0,624	0,647	0,707	0,692	0,906	0,850

Проводимостта на изолацията при постоянен ток е обратно пропорционална на съпротивлението на изолацията на кабелните жила:

$$G_0 = \frac{1}{R_{из}}, \quad \frac{s}{km} \quad (3.19)$$

Тъй като величината G_0 е много малка в сравнение с G_∞ , при изчисленията за практически цели утечката при постоянен ток се пренебрегва. С достатъчна точност при променлив ток се изчислява по формулата:

$$G_\infty = \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad \frac{s}{km} \quad (3.20)$$

Вторични параметри на селищни телефонни кабели

Вторичните параметри на селищните телефонни кабели се изчисляват по следните опростени формули:

Затихването на 1 km се изчислява по формулите:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega C}{2}(R - \omega L)}, \quad Np/km, \quad \text{при } \frac{\omega L}{R} \leq 0,1$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}, \quad Np/km, \quad \text{при } \frac{\omega L}{R} \leq 0,01 \quad (3.21)$$

Фазовата константа β може да се изчисли по опростените формули:

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega C}{R}(R + \omega L)}, \quad rad/km, \quad \text{при } \frac{\omega L}{R} \leq 0,1;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}, \quad rad/km \quad \text{при } \frac{\omega L}{R} \leq 0,01 \quad (3.22)$$

Вълновото съпротивление Z_C се изчислява по формулата:

$$Z_C = \frac{R}{j\omega C}, \quad \Omega \quad (3.23)$$

Ако диаметърът на проводника на кабелна линия, намираща се в експлоатация, е неизвестен, той може да се определи, като във формула (3.21) се замени с измерените стойности за RC при честота ω и полученото затихване на 1 km верига се използва равенството $b = \alpha l$, при което се получава общото затихване на кабелната верига:

$$b = \frac{0,068.l}{d_0}$$

от където:

$$d_0 = \frac{0,068.l}{B}.$$

В Табл. 3.5 са дадени основните електрически параметри на селищните телефонни кабели с хартиено-въздушна изолация.

Табл. 3.5. Електрически параметри на селищните телефонни кабели

Диаметър на каб. жило d_0 [mm]	Съпротивле ние R, Ω / km	Затихване α Np/km	Импеданс Z_C, Ω	Брой на двойките			
				До 100 двойки		Над 100 двойки	
				Работен капацитет, $\mu F / km$			
				среден	максим.	среден	максим.
0,5	95,0	0,155	1040	0,050	0,055	0,050	0,055
0,6	65,8	0,112	880	0,041	0,045	0,039	0,043
0,7	48,0	0,0965	730	0,042	0,042	0,040	0,044

Пример: Затихването на абонатната верига е 0,5 Np при дължина на кабелната верига 5 km. Да се изчислят диаметърът на кабелния проводник и електричните параметри на кабелната верига при $\varepsilon_r = 1,28$, $a = 2d_0$, $tg\delta = 0,003$; $\lambda = 1,03$; $\psi = 0,644$.

1. $d_0 = \frac{0,68.l}{b} = \frac{0,068.5}{0,5} = 0,7 mm$
2. $R = \frac{\lambda.44,8}{d_0^2} = \frac{1,03.44,8}{0,7^2} = 94 \Omega / km$
3. $L = \lambda \left(4 \ln \frac{2a - d_0}{d_0} + 1 \right) \cdot 10^{-4} = 1,03 \left(4 \ln \frac{2.2.0,7 - 0,7}{0,7} + 1 \right) \cdot 10^{-4} = 0,56 \cdot 10^{-3} H / km$
4. $C = \frac{\lambda \varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2a}{d_0} \psi} = \frac{1,03.1,28 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2.2.0,7}{0,7} 0,644} = 0,039 \cdot 10^{-6} F / km$
5. $G = \omega C tg\delta = 5000 \cdot 0,039 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003 = 0,58 \cdot 10^{-6} S / km$
6. $\alpha = \sqrt{\frac{\omega C}{2} (R - \omega L)} = \sqrt{\frac{5000 \cdot 0,039 \cdot 10^{-6}}{2} (94 - 2,8)} = 0,095 Np / km$
7. $\beta = \sqrt{\frac{\omega C}{2} (R + \omega L)} = \sqrt{\frac{5000 \cdot 0,039 \cdot 10^{-6}}{2} (94 + 2,8)} = 0,097 rad / km$
8. $|Z_c| \cong \sqrt{\frac{R}{\omega C}} \cong \frac{94}{5000 \cdot 0,039 \cdot 10^{-6}} = 690 \Omega$

Преносните линии се натоварват съгласувано т.е. стойността на товара Z_m е равна на вълновия импеданс Z_c . Само в този случай по линията не се връща отразен сигнал и прехвърлената мощност към товара е максимална.

Често към вторичните параметри отнасят и скоростта на разпространение на електромагнитната енергия по линията V . Тя се определя от отношението $V = \frac{\omega}{\beta}$. За постоянен ток скоростта на разпространение на сигнала е около 30 000 km/h, докато за високи честоти достига до скоростта на светлината [11-17].

3. Преходно затихване

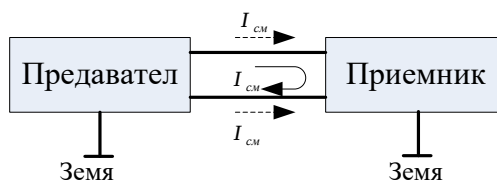
Освен затихване, в металните преносни среди има индуктивно прехвърляне на сигнал от един чифт в друг и обратно, т.е. веригите си влияят взаимно. Това явление се нарича преслушване (crosstalk). То е нежелано и поради смущенията, които внася в разговора – единият сигнал пречи на другия.

За оценка на взаимното влияние между веригите е приет показателят преходно затихване:

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ dB} \quad (3.24)$$

Където P_1 е мощността на сигнала на влияещата верига, а P_2 – мощността на сигнала, отнесени към разглежданата точка на веригата, подложена на влияние. За да няма преслушване при телефонно предаване, ITU-T препоръчва нивото на смущаващите сигнали да не е по-високо от (-65dBm).

Основният метод за борба с преслушването е кръстосването на проводниците в линията. С цел да се защитят от взаимно влияние, двойките проводници в една въздушна линия си сменят разположението на всеки следващ стълб (кръстосват се една спрямо друга). В кабелите, двойките проводници се усукват със стъпка от няколко сантиметра до няколко десетки сантиметра.



Фиг. 3.9. Симетричност на проводниците

Така проводниците във веригите стават конструктивно и електрически симетрични един спрямо друг и спрямо околната среда (фиг. 3.9). И което е по-важно, индуктираният във веригата ток и взаимни влияния рязко се намалява по подобие на принципа на работа на двупроводна линия, поради взаимната компенсация на индуктираните съставки [17].

3.3. Въздушни съобщителни линии

Въздушна линия (open wire) представлява двойка метални проводници, укрепена чрез порцеланови или стъклени изолатори към носещи дървени или железобетонни стълбове. Основните изисквания към въздушните линии се свеждат до: голяма механична якост, висока електропроводимост, добра еластичност и устойчивост против корозия. На тези изисквания най-добре отговарят медни, стоманени и биметални линии, чиито проводници са от мед и стомана.

Медните линии имат проводници с $\Phi 4 \div 5 \text{ mm}$, които осигуряват качествено пренасяне на сигнали в честотния диапазон 0 – 150 kHz.

При положение, че за един стандартен телефонен канал са необходими 3,1 kHz (от 0,3 до 3,4 kHz) това означава, че по една двупроводна медна верига могат да се организират 30 – 40 телефонни канала, т.е. могат да се водят едновременно 30 – 40 разговора. На практика медните линии се натоварват с 24 еднопосочни или 12 двупосочни канала (за едната от посоките е ангажиран обхват от 36 до 84 kHz, а за другата – от 92 до 140 kHz).

Стоманените линии са по-тънки (3 mm), а имат лента от около 15 kHz. Използват се за устройване на три телефонни канала.

На практика линиите често са биметални, като външният слой е меден, а вътрешният – стоманен. Така се получава по-голяма здравина, а електрическата проводимост почти не се влошава, тъй като от повърхностния ефект сигналният ток „се изтласква” на повърхността на проводника, където е медта с малко съпротивление [18].

Въздушните линии, поради лошата си метеорологична защитеност и незадоволителни преносни качества, имат все по-ограничено приложение, макар че те са по-евтини и се строят по-бързо. Има страни като Япония където те все още се използват твърде широко.

3.4. Кабелни електропроводни съобщителни линии

Общи сведения, видове, конструкция

Едно или няколко електропроводни изолирани жила, обвити по цялата си дължина със защитна обвивка, се нарича съобщителен кабел (communication cable).

По известните видове електропроводни линии от този клас са симетричните и коаксиални кабели. Те са по-скъпи от въздушните линии, но са по-устойчиви и стабилни.

Кабелните проводници (тоководещите жила) трябва да са гъвкави, здрави, гладки, да имат голяма електропроводимост и да се запояват лесно. На тези изисквания отговарят най-добре медта и алуминият.

Изоляцията между проводниците ги предпазва от допир помежду им и фиксира взаимното им разположение по цялата дължина на кабела. Тя трябва да има голямо специфично съпротивление, малка диелектрична проникваемост ε , нисък коефициент на диелектрични загуби $tg\delta$ и висока механична и диелектрична якост. Идеален диелектрик е въздухът, който е изолатор на въздушните линии, но той се влияе силно от метеорологичните условия. Използва се и в кабелите, които по конструкция са защитени от влиянието на метеорологичните условия.

Най-често прилаганите изолационни материали за симетрични кабели са:

- кабелна хартия и хартиен кордел (усукана телефонна хартия);
- полиетилен;
- полистирол и стирофлекс, който във вид на кордел се използва във в.ч. кабели;
- поливинилхлорид, който има висока устойчивост.

Усукването може да бъде по двойки, най-често със стъпка 300 mm, и по четворки, които имат стъпка 100 до 300 mm. Така формираният кабелен сноп от проводници се защитава от влага и механични повреди с влагозащитна обвивка от олово, алуминий или пластмаса, а когато кабелът се полага във вода или земя върху нея се поставя бронева покривка и спирално обвити стоманени ленти или стоманена тел.

Симетрични кабели

1. Видове

Симетричните кабели (symmetrical cable) са най-разпространените съобщителни кабели. Биват различни видове (фиг. 3.9).

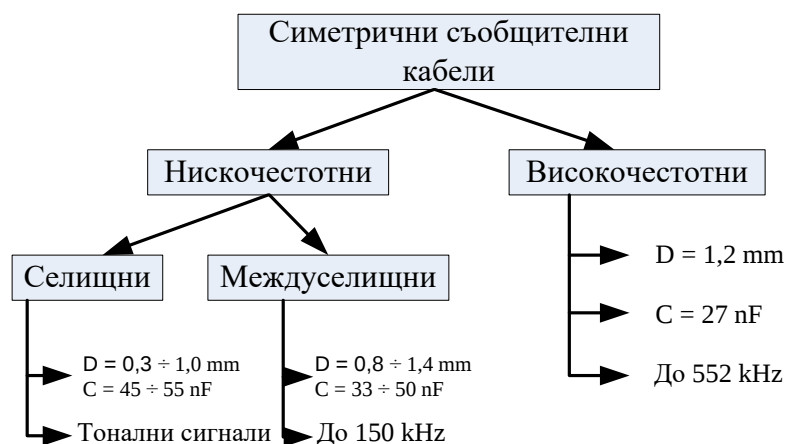
2. Конструкция

Използват се различни видове изолация (корделно-хартиена, корделно-стирофлексна и полиетиленова).

Тръбна изолация. Използва се при нискочестотни селищни кабели.

Плътна изолация. Използва се главно в селищните кабели.

Спирално-корделна изолация. Използва се при високочестотни и нискочестотни междуселищни и селищни кабели.



Фиг. 3.10. Видове симетрични кабели

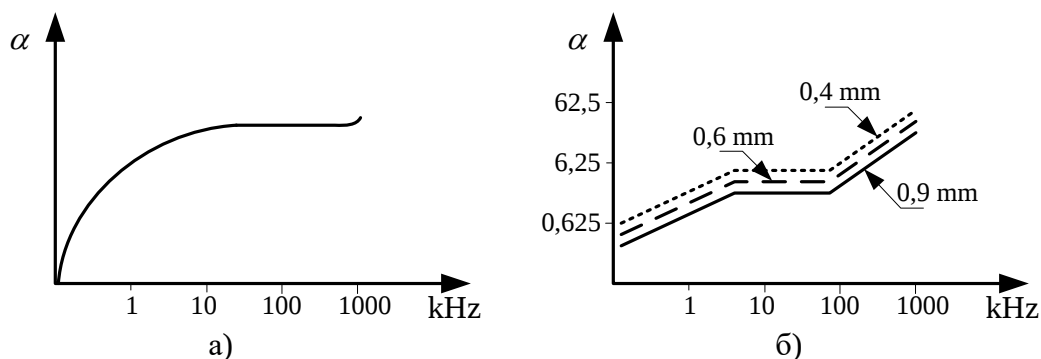
Изолираните проводници се усукват в групи, с което стават симетрични (конструктивни и електрически) един спрямо друг и спрямо околната среда. Отслабват се електромагнитните връзки и се намаляват взаимните им влияния и преслушването между тях. Усукването може да е в двойка, в групи по две двойки и в четворки. Стъпките на усукването са различни, но в границите 125 – 175 mm. На разстояние до 100 m една вита двойка проводници може да пренася данни със скорост до 10 Mbit/s, а във високоскоростните кабели – до 100 Mbit/s, което е твърде важно за LAN [18].

3. Параметри

Километричното затихване α на симетричните кабели и неговото изменение от честотата $f = \frac{\alpha}{2\pi}$ може да се изчисли по формулата:

$$\alpha(f) = k\sqrt{f} + k_1 f, \text{ dB/km} \quad (3.25)$$

където k (5 – 25) и k_1 (от порядъка на няколко единици) са коефициенти, които зависят от конструкцията на кабела и материалите, от които е изготвен. По формула (3.25) е построена графиката (фиг. 3.11.а), от която се вижда, че с честотата затихването нараства линейно.



Фиг. 3.11. Затихване на абонатните кабелни двойки

Вълновият импеданс Z_c на кабелите намалява с честотата (фиг. 3.11.б). При честоти, по-ниски от 100 kHz, то е комплексно число, а стойността му е пропорционална на $\frac{1}{\sqrt{f}}$.

При зададена честота идеалното условие за най-малко затихване се получава при условието на Хевисайд $LG = CR$. Това условие се постига трудно, тъй като първичните параметри са дадени на кабела.

Най-лесно е да се увеличи индуктивността с индукционни (т.н. пупинизиращи) бобини. Такива се разполагат по линията на разстояние до 2 – 3 km една от друга. Пупинизираната линия има няколкократно по-малко затихване и по-голямо разстояние между усилвателите, но поради усложненото и скъпостроителство в последно време не се използва.

4. Обозначение и характеристики на кабелите

Кабелите се маркират с буквено-цифрово обозначение, което отразява предназначението на кабела и конструктивните му особености. Например: ТЗБ7 х 4 х 1,2 означава 7 четворки с $\varnothing 1,2$ mm. Т - означава телефонен селищен кабел с усукани кабелни двойки с хартиено-въздушна изолация. З – означава, че кабелните двойки са усукани в звездни четворки, а Б – че е защитен с лентова броня.

Селищните нискочестотни симетрични кабели (ТП, ТБ и др.) се използват за съобщителни връзки на къси разстояния, обикновено за връзка на телефонни абонати с прилежащите им ТЦ. Най-често срещаните проводници имат диаметър 0,4; 0,5; 0,63 и 0,9mm и съдържат най-малко две и най-много 3000 усукани двойки, като многочифтовите кабели имат по-тънки кабелни жила. На фиг. 3.9 се виждат някои от техните параметри.

Масовият характер на абонатните линии (те достигат до всеки абонат) предопределя необходимостта от използване на евтини кабели с тънки медни жила. Това означава голямо затихване на сигнала и дължина на линията не по-голяма от 5 – 10 km. Последното е основополагащо при определяне местата на комутационните възли. Те трябва да се разполагат така, че да се окажат топологичен център за пространство, в което се намират абонатите.

Независимо от несъвършенството си, абонатните линии имат добри преносни качества. Това се вижда от фиг. 3.10б. За сигнали с честоти над 100 kHz даже най-тънките проводници с диаметър 0,6 mm имат затихване около 6 dB/km и могат да пренасят честотен спектър, чувствително надвишаващ изискванията на телефонния канал. При съвременните комуникации тези неизползвани в обикновената телефония свойства имат голямо значение. Те позволяват във всеки дом да влязат услугите на Интернет.

Междуселищните нискочестотни симетрични кабели (ТЗГ, ТЗБ и др.) са класическата преносна среда за междуградските телефонни съобщения. Характеризират се с по-дебелите си жила (0,8 – 1,4 mm) и имат няколко десетки симетрични двойки или четворки като по първата двойка се осъществява само предаване, а по втората – само приемане.

Високочестотните симетрични кабели (МКГ, МКБ и др.) се използват за създаване на телефонни връзки на големи разстояния в честотен спектър до 522 kHz. Добрите параметри на тези кабели се постигат благодарение на използването на сравнително малък брой симетрични двойки, корделно-стирофлексна изолация с малък капацитет и проводници с по-голям диаметър. Най-често съдържат една, четири или седем четворки [19].

Коаксиални кабели

1. Конструкция

Характерно за коаксиалните кабели (coaxial cable) е, че двата проводника не са еднакви и симетрични. Единият от тях – външният – представлява медна или алуминиева лента огъната по такъв начин, че да се получи тръбичка с $\varnothing 2,9 - 25$ mm. Вторият, вътрешният проводник е разположен в нея концентрично. Той най-често е плътен меден или биметален цилиндър с $\varnothing 0,7 - 11$ mm.

Между двата проводника има електрическа изолация от полистирол, полиетилен или друг диелектрик в разнообразни конструкции, които предвиждат голямо участие на въздуха. Всяко отклонение на разположението на вътрешния проводник спрямо външния изкривява магнитното поле, което се затваря в пространството между тях и е причина за загуби на енергия при пренасяне на сигнала.

2. Параметри

Километрично затихване на една коаксиална кабелна двойка се изчислява по формулата:

$$d(f) = k + k_1 \sqrt{f} + k_2 f, \quad (3.26)$$

където k , k_1 и k_2 са константи, чиито стойности са определени от ИТУ-Т в зависимост от типа на кабела при честота 1 MHz.

За честотната област, в която на практика се използва коаксиалният кабел, вълновият импеданс Z_c се определя по формулата:

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d}, [\Omega] \quad (3.27)$$

Както се вижда, импедансът е честотно независим, не се влияе от стойностите на диаметрите на проводниците, а само от съотношението им D/d . Неговата стойност варира от 71 до 75 Ω .

Преслушването между коаксиалните кабелни двойки е пренебрежимо малко. Преходното затихване е много високо (над 120 dB/km), поради което обикновено не се взема под внимание.

3. Видове

В зависимост от предназначението си те се подразделят на:

- магистрални (стандартни); ($\varnothing 2,6 - 9,4$ mm, f до 60 MHz. Те могат да се използват за предаване до 10800 телефонни или няколко телевизионни канала)
- малогабаритни; ($\varnothing 1,2$ до 4,4 mm. При тях могат да се предават до 12 MHz)
- подводни (капацитетът им е до 4200 телефонни канала. Такива кабели са положени по дъното на моретата и океаните и осъществяват транс-континентални връзки)

В зависимост от конструкцията на кабелния сноп те биват:

- еднородни;
- комбинирани;
- радиочестотни (имат едно- или многожилен вътрешен проводник, около който е разположена плътна полиетиленова изолация. Външният проводник е медна оплетка, върху която има пластмасово покритие. Използват се за къси разстояния – кабелни телевизионни мрежи, домашни антенни инсталации и др.).

Вълноводи

Пренасянето на телекомуникационни сигнали в широка честотна лента (напр. едновременно предаване на няколко телевизионни канала) е предизвикало потребността от специални широколентови направляващи среди за СВЧ. Известно е, че при разпространение на СВЧ вълни по метални линии поради повърхностния ефект електромагнитното поле прониква в проводниците на нищожна дълбочина. Електромагнитната енергия се разпространява и пренася основно от окръжаващата ги диелектрична среда. На тази база са направени и свръхвисокочестотните направляващи метални среди. Една от тях е вълновода (waveguide).

Вълноводите представляват метални тръби с кръгло или правоъгълно сечение, най-често от плътна кръгла стомана с $\varnothing$ 50, 60 или 70 mm и дебелина на стената 3 mm. Вътрешната им страна е покрита с тънък слой електромагнитна мед или с навити на спирала тънки медни проводници. За много къси вълноводи в радиотехниката се използва слой от злато, сребро или хром.

Според конструкцията на металната тръба те биват твърди и гъвкави.

Твърдите вълноводи се използват като фидери (преносна линия, която свързва антената с предавателя) за сравнително къси разстояния. На дължина 10 m се допуска най-много 50 mm изкривяване. Иначе от отразените вълни загубите при пренасяне на енергия силно нарастват.

Такива вълноводи пропускат сигнали с честоти от 30 до 100 GHz. По тях могат да се организират до 200 000 телефонни или няколко десетки телевизионни канала. Тъй като са скъпи, използването им е икономически оправдано при не по-малко от 30 000 телефонни канала.

По - ефективни са гъвкавите вълноводи, които се изпълняват в две конструкции: спирални и пръстеновидни. Тези вълноводи могат да се огъват по вълновото трасе без да се нарушава тяхната хомогенност (напречното им сечение и материалът на проводниците, както и диелектричната проницаемост между тях, остават постоянни по протежение на цялата им дължина) и да се предизвикват отразени вълни.

С появата на оптичните кабели значението на вълноводите съществено намаля и сега те се прилагат само за къси разстояния в рамките на една сграда (радиопредавател, радиорелейна линия, телевизионна кула и т.н.) [11-19].

3.5. Влакнесто-оптични съобщителни линии. Общи сведения.

Влакнесто-оптичните съобщителни линии (ВОСЛ) са направляваща среда не за електрически, а за светлинни сигнали, чиято честота е от оптическия диапазон ($1 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{15}$ Hz). Те се състоят от оптични влакна (световоди), които представляват изключително тънки нишки от съвършено чисто стъкло.

Физика на оптическия пренос

Светлината е видима за човешкото око, когато има дължина на вълните от 380 (виолетово) до 780 nm (червено). Във ВОСЛ се използват светлинни сигнали в близкия инфрачервен обхват с дължина на вълните $\lambda = 0,85 \div 1,55 \mu m$. Прилъчване с дължина на вълната $1 \mu m$ честотата на оптичната вълна е $300 \text{ THz}^2 = 300\,000 \text{ GHz}$.

² Терахерц: $1 \text{ THz} = 1 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$

За да се поддържат ниски загуби на светлина по протежение на оптичното влакно, дебелината му трябва да е от един и същи порядък с дължината на вълната λ . Затова се използват влакна с диаметър $8 - 50 \mu m$.

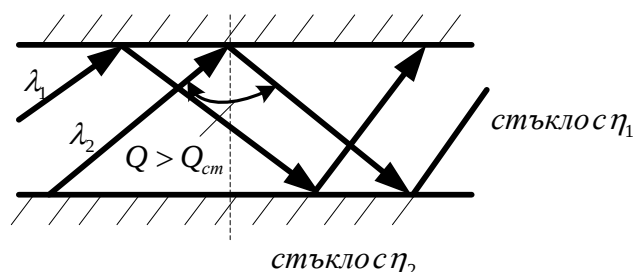
Материалите за изготвяне на оптични влакна трябва да имат голяма пропускателна способност и минимално затихване при разпространението на светлината (от порядъка на $0,1 - 3 \text{ dB/km}$), докато стъклото на прозорците има $50\,000 \text{ dB/km}$. За целта се използва силикатно стъкло, но най-добър материал за световод е ултрачистото синтетично кварцово стъкло. Стъклените нишки с такава чистота, изготвени във вакуумна среда, стават гъвкави и имат малко затихване. Поглъщането на светлината се дължи главно на примеси на водата (хидроксилни йони) и на металите (желязо, мед, хром, манган, никел, кобалт и др.). Установено е, че примес от метали само от 10 mg/ton увеличават затихването с 1 dB/km .

Характерно за световодите е еднопосочното предаване на сигналите. За да се осъществи дуплексна връзка, са необходими два отделни противоположни комуникационни канала.

Оптичните влакна (стъкловолакна-optical fiber) формират диелектричен вълновод, по който се предават оптичните сигнали [20].

Скоростите на разпространение на светлината във въздуха и в стъклото са различни. Разликата между тях зависи от дължината на вълната. Отношението на тези скорости се нарича коефициент на пречупване. За стъклото и въздуха той е $\eta \approx 1,5$.

Съвременните оптични влакна имат двуслойна структура – сърцевина и обвивка от стъкло с различен състав. Коефициентът на пречупване на сърцевината е по-голям от този на обвивката, като разликата им е над 10% . Когато ъгълът на падане надхвърля $Q_{\text{ст}}$, светлината се разпространява по дължината на сърцевината чрез последователни пълни вътрешни отражения от границата между двете среди – фиг. 3.12.



Фиг. 3.12. Разпространение на светлинни лъчи в оптично влакно

Тази граница се държи като огледало, което направлява светлинния лъч към центъра на сърцевината, като не му позволява да излезе навън от обвивката. Всяка светлинна вълна с ъгъл на падане $Q_i > Q_{\text{ст}}$ се разпространява в сърцевината, докато лъчите с по-малък ъгъл на падане се пречупват в обвивката и се губят [20].

Видове оптични влакна

По влакното могат да се разпространяват различни видове светлина: само с една вълна (мода) (едномодово влакно – monomode fiber) или едновременно вълни с различни дължини (многомодов режим – multimode fiber). Това зависи от спектъра на „пуснатия“ по стъклената нишка лъч и от съотношението между диаметъра на световода и дължината на светлинната вълна. Едномодов режим се осигурява, когато дебелината на сърцевината е близка до дължината на вълната и оптичната ѝ плътност е по-голяма от тази на обвивката на

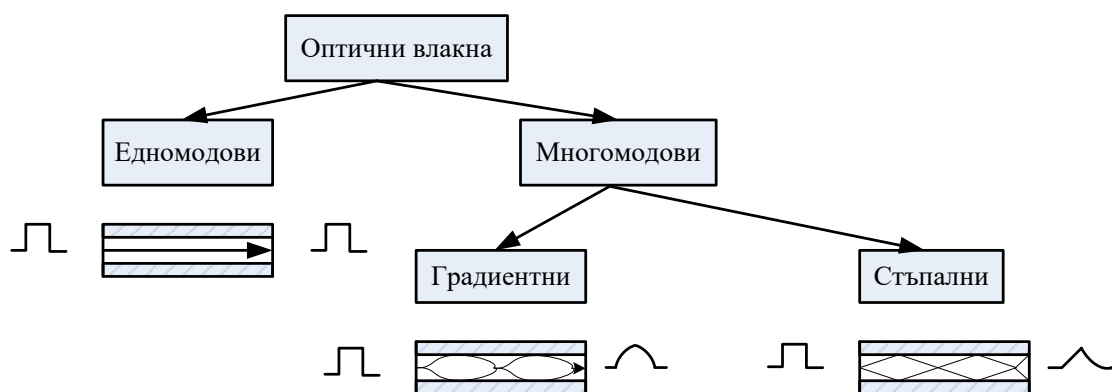
световода. Но това означава диаметърът на влакното да е $6 \div 8 \mu m$, толкова тънко, че създава технологични трудности по изготвянето и свързването на влакната. За оптични излъчватели в едномодовите световоди се използват лазерни устройства. По тази причина едномодовите ВОСЛ са по-скъпи. Този тип влакна днес са широко разпространени в обществените телефонни мрежи. Те имат най-широка честотна лента и най-малко затихване.

В многомодов режим се пускат повече вълни с различни дължини и различни ъгли на падане, по-големи от критичния. Разпространението продължава с пълни вътрешни отражения, но по различни пътища (на фиг. 3.11 плътна линия за λ_1 и λ_2). Многомодовите оптични влакна се захранват от светодиоди и се отличават с по-голяма дебелина на сърцевината ($50 \mu m$), което облекчава технологиите по изготвяне и снаждането им. По тези причини те са по-евтини, по-здрави, но с по-ограничени възможности.

Диаметърът на ядрото на многомодовото влакно е $50 \mu m$, но може да бъде и повече. Обвивката му е $125 - 150 \mu m$. Използват се за евтин пренос на къси разстояния с пропускателна възможност около 20 MHz, включително и LAN. Предимството им е възможността да се използват евтини и лесни за настройка съединители.

Многомодовите влакна биват (фиг. 3.13):

- градиентни (graded-index fiber), когато коефициентът на пречупване на сърцевината се променя плавно от центъра към периферията, така че светлината се канализира отново в сърцевината;
- стъпални, когато този коефициент е постоянен за сърцевината, но в обвивката се променя стъпално с отдалечаване от центъра.



Фиг. 3.13. Видове оптични влакна

Градиентните влакна имат по-широка лента на пропускане и по-малко затихване, но са по-скъпи поради по-сложната технология на изготвянето им [21].

Оптични кабели

1. Конструкция на оптичното влакно

Оптическото влакно представлява тънък стъклен цилиндър от SiO_2 , наречен сърцевина, обхванат от стъклен слой – обвивка. Върху стъклената обвивка са разположени последователно силиконова обвивка, буферна обвивка (кевлар), укрепващи елементи и полиуретанова външна обвивка – фиг. 3.14.а).

В зависимост от конструкцията на самия кабел, оптичното влакно може да се разположи в кабела по различен начин. Има кабели, в които влакното се поставя свободно в тръбата от флуоропласт (фиг. 3.14.б) с по-голям диаметър (2,5 mm и дебелина на стените 0,5 mm). Има и такива, в които влакното е поместено плътно в двуслойна полимерна тръба с твърда вътрешност и мека външност, например от пенопласт.

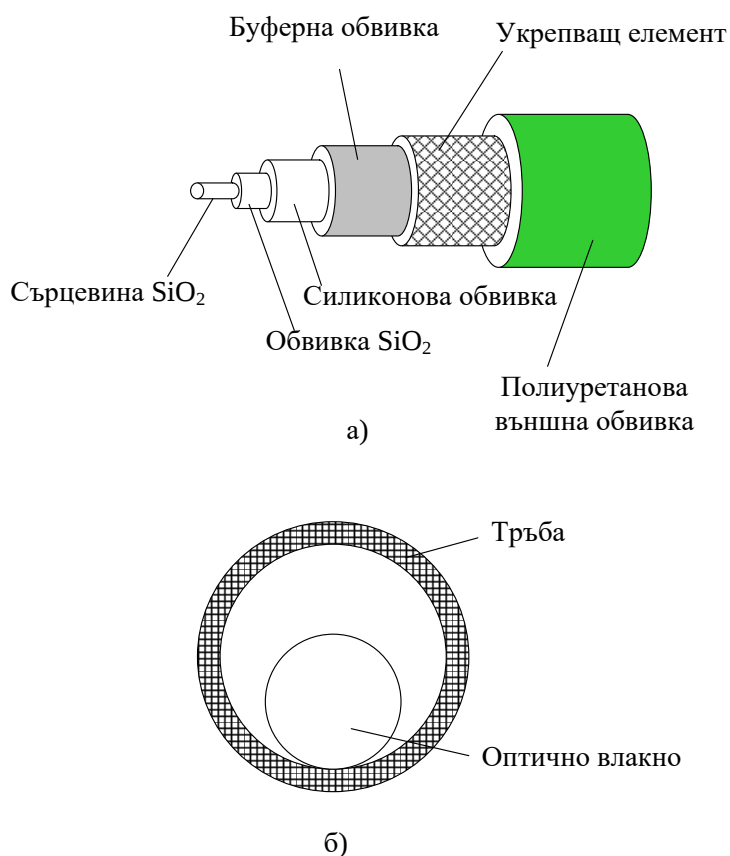
Строителната дължина на влакната е от 1250 m и 2500 m.

2. Конструкция и разновидности на оптичните кабели

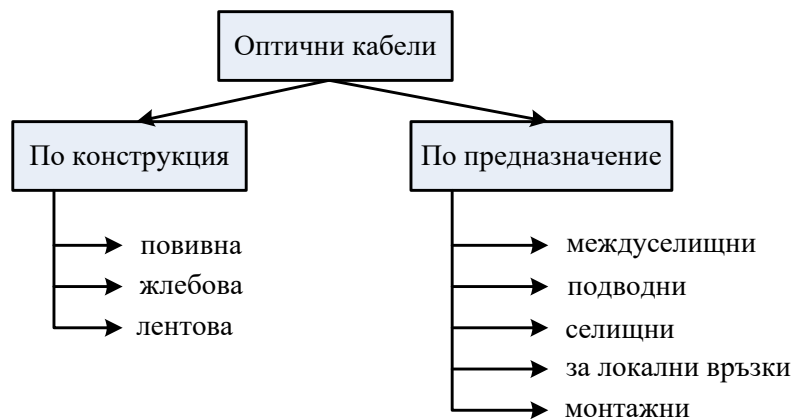
Оптичните влакна се използват не единично (многооптични влакна), а като сноп от влакна, свързани в определена система и обвити със защитни обвивки т.е. обединени в оптичен кабел (ОК), който се полага в съществуващите или нови кабелни шахти.

Изискванията към ОК се свеждат до:

- добри преносни параметри;
- висока якост на опън и натиск;
- гъвкавост, без да се нарушават оптичните свойства на влакната;
- влагонепроницаемост, химична и термоустойчивост;
- простота в монтажа и полагането на кабелите.



Фиг. 3.14. Конструкция на оптичен кабел – а) конструктивни обвивки и б) свободно поставяне в тръбата



Фиг. 3.15. Видове оптични кабели

Съществуват следните видове оптични кабели, показани на фиг. 3.15 [20, 21].

По предназначение кабелите са:

1. Междуселищни оптични кабели, които пренасят оптични сигнали на стотици и хиляди километри. Те са предназначени за междуселищни комуникации с цифрови мултиплексни системи. Използват се както едномодови, така и многомодови градиентни оптични влакна с дебелина $50\ \mu m$ и обвивка $125\ \mu m$. В един кабел са поместени 4, 8, 10 или 12 оптични влакна, по които се пропускат лъчи с дължина на вълната $1,3 - 1,6\ \mu m$. За оптоизлъчвател се използва полупроводниковият лазер, а за приемник – лавинен фотодиод или пинфотодиод. Затихването на тези кабели е $0,5 - 3\ dB/km$, а дължината на регенераторните участъци – $15 - 36\ km$.

2. Подводни оптични кабели, които са подобни на междуселищните, но поради това, че са предназначени за преодоляване на големи водни басейни, отговарят на по-строги изисквания по оптични параметри, физикохимични свойства и дълготрайност. Те са специално укрепени, за да имат по-голяма здравина.

3. Селищни оптични кабели, които се използват за съединителни линии между комутационните центрове в рамките на едно селище. Имат голям брой оптични влакна, но са за къси разстояния $2 - 15\ km$. Работят на вълни с дължина $0,85 - 1,3\ \mu m$ без регенератори. Затихването им е $0,8 - 3,5\ dB/km$.

4. Оптични кабели за местни връзки, които са предназначени за пренасянето на всички видове телекомуникационни сигнали в локални самостоятелни мрежи на учреждения, заводи, фирми, кораби, самолети и пр. Изграждат се с 2, 4 или 6 стъпални многомодови силикатни световоди с размери $50/125$ или $200/400\ \mu m$ с дължина от няколко километра и затихване $5-10\ dB/km$.

5. Монтажни оптични кабели, които са предназначени за връзка на оптоелектронни апаратури в комуникационните системи с оптически влакна с размери $50/125\ \mu m$ или $200/400\ \mu m$ и дължина на вълната $0,85\ \mu m$.

Предимства на оптичните кабели

Главните (основните) предимства са:

- изключително голям капацитет;
- малко затихване (регенераторите са на $30 - 100\ km$, а вече и по-големи);
- нечувствителност към външни електромагнитни влияния (могат да се окачват на високоволтови линии на електропроводи);

- няма къси съединения в оптичната линия;
- оптичните кабели са компактни, с малки размери и тегло, не са метални и не са от интерес за присвояване;
- имат относително ниска стойност и дълъг жизнен цикъл (над 30 години) [20, 21].

Параметри на оптичните влакна

Основни параметри са затихването и дисперсията.

1. Затихването (attenuation) $\alpha = \alpha_c + \alpha_k$ се обуславя от:

- Собствените загуби α_c на оптичната мощност в оптичните влакна се определят от чистотата на стъклото. Те се състоят от загуби от поглъщане α_{II} и загуби вследствие на разсейване α_p :

$$\alpha_c = \alpha_{II} + \alpha_p \quad (3.28)$$

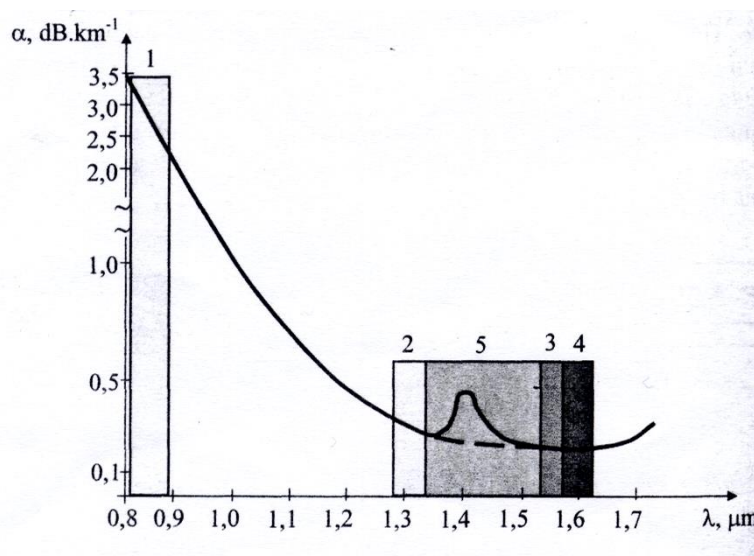
Загубите от поглъщане α_{II} са обусловени от топлинни флуктуации на коефициента на пречупване на оптичното влакно и от нееднородности в материала на световода, когато последните са по-малки от дължината на вълната.

Загубите от разсейване α_p се дължат на наличието макар и на незначителни примеси и нееднородности в материала, които абсорбират част от светлинните лъчи и ги разсейват. Загубите α_p са силно зависими от дължината на светлинната вълна и нарастват с намаляването ѝ по формулата:

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda - 4} \text{ dB/km} \quad (3.29)$$

Те се наричат още Релеевско разсейване, което определя долната граница на възможностите на ВОСЛ.

В посочения спектър на светлинните вълни с дължина между $0,8 \mu\text{m}$ и $1,6 \mu\text{m}$ има три «прозореца», разположени около $0,85$, $1,3$ и $1,55 \mu\text{m}$, в които затихването е много ниско – фиг. 3.16.



Фиг. 3.16. Собствено затихване в оптичното влакно

Виждат се трите минимума, най-рано от които е усвоен първият прозорец, тъй като първото поколение свето- и лазерни диоди излъчват в обхвата 0,815 – 0,950 μm . Най-малко обаче е затихването при третия минимум (0,5 dB/km), който се усвои най-късно и днес вече се използва.

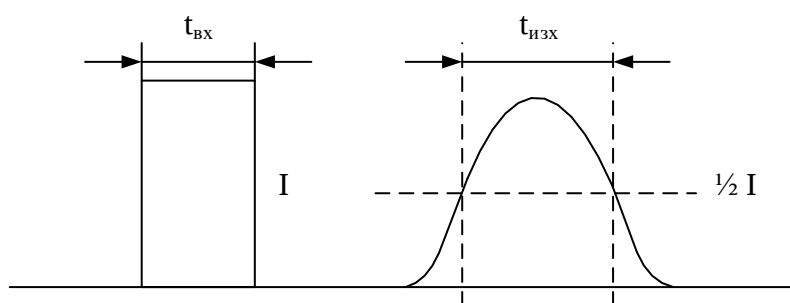
- допълнителни кабелни загуби α_k се дължат на усуквания, огъвания, деформации и др. механични въздействия при полагане и експлоатация на кабелите, както и на тяхното производство и вграждане в оптичните преносни системи [23].

2. Дисперсия

Дисперсията (dispersion) е вторият важен параметър на оптичните влакна. Тя представлява увеличение на продължителността на предаваните оптични импулси (сигнали) при преминаването им през оптичното влакно.

Удължението не е еднакво за различните вълни, поради което предадените правоъгълни импулси, състоящи се от различни хармонични честоти, се деформира (фиг. 3.16). Математически дисперсията τ може да се дефинира като квадратичната разлика между дължината на импулсите на изхода и входа във влакното:

$$\tau = \sqrt{t_{изх}^2 - t_{вх}^2} \quad (3.30)$$



Фиг. 3.16. Промяна на сигнала по оптичното влакно вследствие на дисперсията

Дисперсията се нормира най-често спрямо дължина 1 km и се измерва в ps/km (пикосекунди на километър).

Връзката между дисперсията τ и честотната лента ΔF на пропускане на влакното с дължина 1 km се определя приблизително по формулата:

$$\Delta F = \frac{0,44}{\tau} \text{ MHz / km} \quad (3.31)$$

Физическият смисъл на тази формула се обяснява с ограниченията, които налага дисперсията на предаваната честотна лента ΔF . Очевидно, ако дисперсията расте линейно, то ΔF ще намалява обратно пропорционално на τ . В тази формула не се отчита дължината на оптичното влакно.

Основните източници на дисперсията са:

- свойствата на материала на оптичното влакно;
- направляващите свойства на световодната структура;
- различните скорости на разпространение на светлинните вълни с различни дължини [24].

Затихването и дисперсията налагат през няколко десетки km по дължината на линията да се разполагат регенератори, които възстановяват нивото и формата на сигнала.

Въпреки ограниченията от затихване и дисперсия оптичните кабели имат големи спектрални възможности. На дължините на светлинните вълни, които те пропускат, съответства честота $f = 1.10^{14} \text{ Hz}$. Ако се използва само малка част от спектъра около тази честота, ефективната ширина на лентата става много голяма ($F_k = 3000 \div 6000 \text{ GHz}$). В литературата се приема, че потенциалната и ширина стига до 20 000GHz. Това означава, че по едно оптично влакно могат да се организират до 5 милиарда телефонни линии или няколко милиона телевизионни канала. Тези възможности реално не могат да се използват и затова има няколко причини.

Първата е липсата на обективна необходимост.

Втората, по - съществена, е в оптоелектричните и електрооптичните преобразуватели. В тази честотна област съществуват практически непреодолими трудности по направата на излъчватели и приемници с такова високо бързодействие. Затова реално използваните скорости са до десетки Gbit/sec [20-24].

Оптични излъчватели

Два типа излъчватели: светодиоди и лазерни излъчватели.

Светодиодите (LED) се прилагат при теснолентови системи за пренос на къси разстояния. Преходният процес при светодиодите се характеризира с време $3 \div 5 \text{ ns}$, а за някои типове достига до 1 ns . Това означава, че със светодиод може да се предава със скорост не повече от 300 Mbit/sec, което налага сериозно ограничение върху скоростта на предаване на оптичните системи.

Лазерният излъчвател е световод, обединен с оптичен резонатор, чиято резонансна честота съответства на излъчваната дължина на вълната. Когато управляващият ток надвиши определен праг, оптичният резонанс предизвиква принудителна фотонна емисия и мощността на изходния сигнал се увеличава многократно. Излъчваната светлина е кохерентна, има една и съща дължина на вълната и се разпространява под малък ъгъл.

Лазерните излъчватели като правило се използват за едномодови влакна и могат да се модулират с честоти от порядъка на гига херци [23].

Оптични приемници

За обратно преобразуване на светлината в електрически сигнали се използват полупроводникови фотодиоди, които се състоят от обратно включен PN – преход. Използват се два типа фотодиоди: PIN – фотодиоди и лавинни (APD) фотодиоди.

PIN – фотодиодите може да са силициеви, германиеви или индиево-галиеви-арсенидни.

Оптични съединители

Оптичните съединители (optical connectors) са устройства, с които се създават неразглобяеми или разглобяеми връзки между две оптични влакна.

Връзките се осъществяват между оптични влакна, еднакви по размер и коефициент на пречупване. За да няма затихване в мястото на свързване, челните им повърхности трябва точно да съвпадат и да са съосни. Съосността се получава много трудно, особено в толкова тънките едномодови влакна.

Загубите се получават и поради отстоянието между свързаните оптични влакна. При добре подготвени челни, перпендикулярни на оста, без наклон и грапавини, тези загуби имат малки стойности. Те намаляват още повече, ако отстоянието се запълни с емерсионна течност или смола с коефициент на пречупване еднакъв с този на влакната.

Неразглобяемите съединения се правят по два начина – заваряване и механично свързване на влакната.

При заваряване двата края на влакната се поставят между електроди. Чрез електрическата дъга между тях се стопяват и залепват. Заваряването става чрез специално устройство за точно срещане на челните повърхности на влакната, наблюдавано през микроскоп. На мястото на свързване не трябва да има никакви следи (удебеляване, всмукване, пукнатини). Готовото съединение се укрепва с тясна тръбичка, която се залепва.

При механично свързване се използва прозрачна епоксидна смола за залепване.

Разглобяеми съединения се използват при необходимост от разединяване и отново свързване на оптичния канал, което се налага обикновено в края на регенерационните участъци.

Изработването на разглобяеми съединения е трудно. Връзката между влакната става по два начина: чрез лещи и чрез челно свързване [23-24].

3.6. Свободното пространство като преносна среда

Радиовълни, параметри и характеристики.

Радио и телевизионните връзки са безжични връзки, които използват като преносна среда свободното пространство. Носител на информацията са електромагнитните вълни.

Както е известно наелектризираното тяло създава статично електрическо поле, а постоянният магнит – статично магнитно поле. Те съществуват самостоятелно и независимо едно от друго. Но ако започнат да се променя, те се превръщат едно в друго. Промяната на статичното поле поражда магнитно и обратно. В резултат, когато в един проводник протича променлив ток, около него се създава електромагнитно поле, в което се разпространяват електромагнитни вълни (ЕМВ). ЕМВ с дължина на вълната $\lambda > 10^{-4} \text{ m}$ ($f < 3 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$) се наричат радиовълни.

ЕМВ се излъчва от радиопредавателна антена. Радиовълните възникват вследствие на протичащия в антената високочестотен ток. Енергията на тока с висока честота се превръща в енергия на електромагнитното поле, която намалява с квадрата на разстоянието от антената.

Радиовълните се характеризират с някои понятия и величини:

1. Лъч е линията, която започва от антената и по чието протежение се разпространяват електромагнитните вълни.
2. Фронт на вълната е повърхността, перпендикулярна на лъча. Ако излъчвателят е точка, фронтът на вълната е концентрична на нея сфера. Ако излъчвателят е дълъг проводник, вълната е цилиндрична.
3. Отражението е явление, при което радиовълната падайки на границата между две среди, се връща в същата среда, от която идва.
4. Пречупването е изменение на посоката на лъча при преминаване на радиовълната от една среда в друга.

5. Дифракцията е явление, при което вълните заобикалят препятствия и попадат там, където лъчът не може да проникне. Дифракцията е най-силна, когато геометричните размери на препятствието са съизмерими с дължината на радиовълната.
6. Интерференцията е явление, при което радиовълните си взаимодействат. Това може да се отнася и за вълни от един и същи източник, които, ако изминат различни пътища до една и съща точка, попадат там в различни фази. В резултат може да се получи затихване или усилване.
7. Рефракцията е явление, сходно с пречупването. Когато вълните преминават през среди, чиито параметри плавно се променят, лъчите се изкривяват.

Скоростта на разпространение на радиовълните v зависи от средата. В общия случай тя се определя от скоростта на светлината c , от относителната диелектрична ϵ_r и относителната магнитна μ_r проницаемост:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (3.32)$$

Вижда се, че във вакуум, когато $\epsilon_r = 1$ и $\mu_r = 1$, тя е равна на скоростта на светлината $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Хармоничните (изменящи се по синусоидален закон) ЕМВ се характеризират с 3 основни параметъра:

1. Период на хармоничната вълна (T) е интервалът от време в s , в който се извършва едно пълно изменение на параметрите на вълната по синусоидален закон.
2. Честота на трептене (f) е реципрочната стойност на периода ($f = \frac{1}{T}$, Hz).
3. Дължината на вълната (λ) е разстоянието, на което се премества вълната в пространството за време от един период

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} [\text{km}] \quad (3.33)$$

Радиообхвати и радиовълни

Радиовълните се разделят на обхвати, всеки от които има специфични характеристики (Табл. 3.1).

Табл. 3.1. Честоти и вълнови обхвати при радиовръзка

Граници	Честотен обхват	Вълнови обхват	
	Наименование (значение)	Дължини	Наименование (значение)
30 – 300 kHz	Ниски честоти (НЧ, LF)	10 – 1 km	Дълги вълни (ДВ)
300 – 3 000 kHz	Средни честоти (СЧ, MF)	1 – 0,1 km	Средни вълни (СВ)
3 – 30 MHz	Високи честоти (ВЧ, HF)	100 – 1 m	Къси вълни (КВ)
30 – 300 MHz	Много високи честоти (МВЧ, VHF)	10 – 1 m	Метрови вълни (МВ)
300 – 3 000 MHz	Ултрависоки (УВЧ, UHF)	1 – 0,1 m	Дециметрови вълни (ДЦВ)
3 – 30 GHz	Свръхвисоки честоти (СВЧ, SHF)	10 – 1 cm	Сантиметрови вълни (СМВ)

Един от важните субекти при разпространението на радиовълните е земята. За много ниските, съответстващи на дългите и свръхдългите вълни, тя се отнася като почти идеален проводник. Тези радиовълни се отразяват от нея и загубите на енергията им е незначителна [11-18].

Късите вълни проникват в земята и се „поглъщат“ от нея.

Друг много важен субект е атмосферата. Тя има 3 слоя от значение за разпространение на радиовълните.

Най-близката до земята област – тропосферата – има дебелина 10 – 12 km. Тя е добър диелектрик. Примесите, които се съдържат във въздуха и неговата плътност намаляват с отдалечаване на земята, променят се μ_r и ε_r и лъчите се изкривяват поради тропосферната рефракция.

Стратосферата е следващият слой. Той има отдалеченост 50 – 60 km от земята. Тя няма съществено значение за разпространението на радиовълните.

Йоносферата е последният – трети слой (60 – 400 km). Денем под действие на слънчевите и космическите лъчи, неутралните атоми се разпадат на електрони и йони, а нощем се извършва обратния процес – рекомбинация. Йонизираният газ е силно проводим и отразява вълните.

Повърхностна вълна – разпространява се успоредно на земната повърхност и се нарича приземна. Тя осигурява надеждна радиовръзка, но бързо затихва.

Пространствена – вълна, която се излъчва към космоса. Тя може да попадне под малък ъгъл в йоносферата, да се отрази и върне отново в атмосферата. Пространствените вълни се приемат по-добре нощем. При по-голям ъгъл пространствената вълна се пречупва и изгубва в космическото пространство [11-18].

Разпространение на радиовълните от различни обхвати

1. Дълги и свръх дълги вълни

За този обхват е типична дифракцията, защото дължината на вълната е голяма. С това се обяснява тяхната особеност добре да обгръщат земята. Радиовръзката е възможна на големи разстояния (2 000 – 3 000 km) и е много устойчива. Условието на разпространение са еднакви денем и нощем. Разпространяват се чрез пространствени вълни. За тях е характерно многократното отражение от йоносферата и от земята, която за тях се държи като проводник. Много ниските честоти се използват за предаване на сигнали към проводници, тъй като само такива честоти могат да се разпространяват под водата.

2. Средни вълни – използват се предимно за радиопредавания. Те са основен честотен диапазон на системите за радиоразпръскване. Разпространяват се чрез повърхностна и пространствена вълна на разстояния 500 – 1 500 km. Денем повърхностната компонента е по-силна, а нощем към нея се добавя и пространствената. Когато двата вида вълни си взаимодействат, може да възникне интерференция и да се получи заглъхване. То е известно като фадинг.

3. Къси вълни

Повърхностната вълна на тези честоти затихва много бързо (след няколко десетки km) поради силното поглъщане от земята, особено в пресечени местности. Дифракцията не играе съществена роля.

4. Ултра къси вълни

Разпространението на сигналите от този диапазон се ограничава от изискването за пряка видимост между предавателя и приемника, което идва от праволинейното разпространение на вълните. Дифракцията не им е свойствена, поради което те не могат да обгръщат кривината на земята. Далечината на разпространението се изчислява по формулата:

$$l = 3,6(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3.34)$$

където h_1 и h_2 са височината на разположение на предавателните и приемните антени. Когато h_1 и h_2 са 25 м, разстоянието на пряка видимост е 36 km. За по-големи разстояния трябва или антените да се повдигат по-нависоко, или сигналите да се препредават с междинни ретранслатори [11-24].

Сравнение на преносните среди

В табл. 3.2 е дадено сравнение по избрани критерии между различните видове проводни среди.

Табл. 3.2. Критерии за сравнение на видовете проводни среди

Среда	Пропускателна способност	Шумозащитеност	Простота на полагане	Популярност
Симетричен кабел	Ниска	Лоша	Просто	Много популярно
Коаксиален кабел	Висока	Добра	Сложно	Популярен
Оптично влакно	Неограничена	Превъзходна	Просто	Много популярно
Безпроводна връзка	Растяща	Лоша	Липсва	Растяща

3.7. Радиорелейни линии

Основни понятия

Радиорелейната система (Radio Relay System) е система за радиовръзка, в която, за да достигнат до предназначението си сигналите се приемат и препредават от една или повече междинни станции. Тя е преносна система за групови сигнали, сигнали за радиоразпръскването и телевизията на големи разстояния посредством радиовълни.

Радиорелейната линия използва прекъсната преносна среда организирана с препредаване (ретранслация) на СВЧ сигнали. В обхвата на дециметровия, сантиметровия и милиметровия диапазон. За целта се използват междинни ретранслаторни станции (МС). От крайната станция (КС) сигналът се преобразува в радиовълни и с помощта на остро насочена антена се излъчва към междинната станция. Носещата честота в първата дистанция е f_1 . В МС сигналът се усилва и приема, сменя се носещата му честота на f_2 и се предава с по-високо ниво до следващата МС. Там отново се възстановява честота f_1 и т.н. алтернативно.

Двете честоти по радиолинията се отличават на няколко десетки MHz (в дециметровия) или няколкостотин MHz (в сантиметровия диапазон).

Смяната на честотата по радиолинията се налага по следните причини:

1. Сигналът е затихнал и слаб и няма сила да продължи.
2. Насочеността на антените към следващата МС не е идеална, поради което се създават условия за връщане на част от излъчената енергия към приемника. Ако са на една и съща честота това може да доведе до приемане на паразитен сигнал, самовъзбуждане и неработоспособност.

Видове радиорелейни линии

1. В зависимост от посоките на предаване връзката в РРЛ може да е еднопосочна (симплексна) и двупосочна (дуплексна).

Симплексните системи се използват обикновено за предаване на телевизионни сигнали, за радиоразпръскване, радиолокация и др. За еднопосочно предаване на сигналите по радиолинията се използват единични ретранслатори.

Телефонната и телеграфната комуникация по правило е дуплексна. За създаване на дуплексна система в най-простия случай трябва да се обединят две симплексни системи, работещи в противоположни направления.

2. В зависимост от начина на ретранслация биват:

- РРЛ с пряка видимост и
- тропосферни РРЛ.

В РРЛ с пряка видимост двете комутиращи станции „се виждат“, т.е. антените им се разполагат на височина от няколко десетки метра над терена така, че между тях да има директна видимост, независимо от сферичната форма на Земята и неравностите на релефа. Разстоянието между станциите обикновено е от 40 до 80 km.

Тропосферните РРЛ използват електромагнитни вълни, разсеяни и отразени от нееднородностите на тропосферата. Връзката между съседните станции се осъществява не пряко, а благодарение на отраженията, при които тропосферата изпълнява ролята на пасивен ретранслатор.

В резултат взаимното разположение на съседните радиорелейни станции може да бъде за пределите на пряката видимост (200 – 400 km), което е икономически много изгодно.

Радиорелейна система – РРС представлява верига от приемо-предаващи станции, разположени така, че между тях да се гарантира устойчива радиовръзка. Повечето от съвременните РРС са многостволни, като сигналите от различните стволлове имат различни носещи честоти. Антените и техните мачти, както и захранващите източници са общи за всички стволлове. Така пропускателната способност на РРС се увеличава, без да се оскъпява значително.

3. В зависимост от пропускателната им способност РРС се подразделят на многоканални (над 300 канала), системи със средна мощност (60 – 300 канала) и малоканални (до 60 канала). В зависимост от далечината на покритите разстояния биват магистрални (до 12 000 km), за средни разстояния (до 1 400 km) и местни.
4. В зависимост от принципа на мултиплексиране РРЛ са аналогови и цифрови [11-24].

3.8. Спътникови радиокомуникационни системи

Принцип на действие

Както вече беше казано, дециметровите и сантиметровите вълни имат големи възможности за предаване на широколентови комуникационни сигнали. Но тяхното пренасяне е ограничено по разстояние поради праволинейното разпространение на тези вълни. Първата крачка за увеличаване на далечината на връзката са радиорелейните линии с пряка видимост, а по късно и тропосферните линии. Обаче глобализацията на комуникациите в планетарни измерения стана възможна едва, когато ретранслаторите се „качиха“ на изкуствени спътници на земята. Така се създават линии за връзка от няколко десетки хиляди километра.

Принципът на спътниковите радио комуникационни системи се състои в предаването на сигналите от земните станции към ретранслатор, разположен на изкуствен спътник на земята, където се извършва и основната функция по ретранслацията на сигнала.

Изчислено е, че при далечина на връзката около 1 000 km стойността на спътниковите и наземните комуникации е приблизително равна. При далечина над 3 000 km, спътниковата връзка е вече два пъти по-евтина.

Орбити на комуникационните спътници

Разположеният на изкуствения спътник ретранслатор трябва да има непрекъсната радиовръзка с наземните станции по време на сеанса на радиовръзката. Търсят се решения, при които спътникът остава неподвижен спрямо земните станции. На всички изисквания най-добре отговаря кръговата геостационарна орбита, чиято плоскост съвпада с плоскостта на екватора.

Спътник изведен на екваториална орбита с височина 36 788 km ще обикаля земята с нейната ъглова скорост на въртене и за земния наблюдател ще изглежда неподвижен. Тази орбита е известна като геостационарна.

Многостанционният достъп (Multiple Access) е метод, чрез който определен брой земни станции могат да използват комуникационния капацитет на радиопредавателя в един комуникационен спътник, за да се свързват помежду си [11-24].

ГЛАВА IV

ПЛЕЗИОХРОННА ЦИФРОВА ЙЕРАРХИЯ – PDH

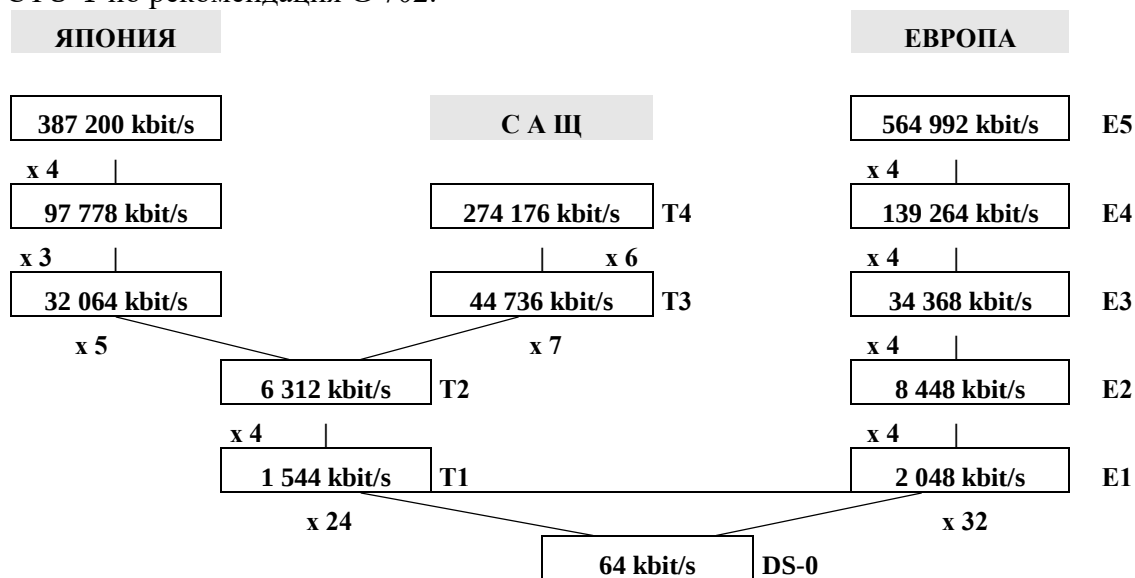
4.1. Общи характеристики на PDH

Ефикасното използване на различните преносни среди в цифровите мултиплексни системи, както и изграждането и поддържането им, е наложило скоростта на предаване да нараства по строго установен и стандартизиран начин, съобразен с оптималния информационен капацитет на съответните телекомуникационни линии. Получаването на потоци с по-високи скорости спрямо изходните, се постига чрез обединяване на сигнали от различни източници с различна структура и с еднаква номинална скорост, т.е. плезиохронни (почти синхронни).

По аналогия с аналоговите системи с честотно разделяне на каналите, в цифровите преносни системи също е създадена йерархична структура на мултиплексиращите устройства, като за основа се приема цифров канал със скорост 64 kbit/s. Тази скорост съответства на аналоговия нискочестотен канал в честотната лента от 0,3 до 3,4 kHz, преобразуван в цифров чрез стандартна ИКМ с честота на дискретизация $f_d = 8\text{kHz}$. Тази йерархична структура трябва да:

- предава различни видове аналогови и цифрови сигнали, представляващи трафик от различни потребители на ТК мрежа като се използват оптимално преносните линии в мрежата;
- обединява, разделя, предава и транзитира различни по скорост цифрови потоци;
- използва стандартизирани скорости и процедури за обединяване (мултиплексиране) на различни по скорост цифрови потоци [25].

Мултиплексорите от PDH са създадени за пренасяне на цифрови сигнали по метални кабели – симетрични и коаксиални и за радиорелейни линии в началото на 80-те години. Както се вижда от фиг. 4.1, съществуват три различни подхода за увеличаване на информационната скорост за трите континента – Европа, Америка и Азия, стандартизирани от STU-T по рекомендация G 702.



Фиг. 4.1. Подходи за увеличаване на скоростта

Скоростите в първото йерархично ниво на различните PDH системи в света се базират на стандартната скорост DS-0 за 64 kbit/s, като за Европа коефициентът на мултиплексиране е 32, а за Азия и Америка е 24. Стандартът, използван в Европа и Русия, е развил скорости, които се базират на първичния цифров поток от 2,048 Mbit/s, и се повишава с коефициента на обединение (мултиплексиране) $n = 4$ на потоци от по-ниските към по-високите йерархични нива [26].

Според схемата на мултиплексиране от фиг. 4.1, на всяко ниво в PDH се пренасят според скоростите, следният брой основни цифрови DS-0 или аналогови (от 0,3 до 3,4 kHz) канали, показани в Табл. 4.1.

Табл. 4.1. Скорости на пренасяне в PDH според каналите

Скорост, Mbit/s	2,048	8,448	34,368	139,264	564,992
Брой канали	30	120	480	1 920	7 680

Този брой на каналите се отразява в наименованието на съответната цифрова преносна система, например: ИКМ (PCM) 30, ИКМ 120 и т.н. Скоростта 564 Mbit/s не е намерила приложение в мрежата на България, не е регламентирана от STU-T, но в някои страни се използва (SIEMENS произвежда подобни мултиплексори).

4.2. Мултиплексиране на цифрови плезиохронни сигнали

Плезиохронните сигнали са тези, които имат една и съща номинална стойност, но са с различни толеранси на скоростта и фазовото съотношение между тях се променя с времето. Това са цифрови сигнали, които се генерират чрез различни тактови генератори, т.е. постъпват от различни източници на входа на мултиплексиращото устройство. Тези мултиплексатори се използват в преносните системи от по-високите йерархични нива за пренасяне на по-голямо количество информация.

Съществуват принципно три начина за мултиплексиране на сигналите от различни източници:

- чрез положителен стафинг – добавяне на изравняващи битове в сигнала в предвидените за целта времеинтервали;
- чрез отрицателен стафинг – отнемане на информационни битове, които се предават в допълнителни времеинтервали в цикъла на груповия сигнал;
- чрез двустранен стафинг – съвместява предишните два начина.

Приложение в PDH мултиплексори намира положителният стафинг, поради по-лесната реализация спрямо отрицателния. Освен това при правилно оразмеряване и поддържане на толерансите на тактовите честоти, при положителния стафинг може да се изключи загуба на информация в процеса на мултиплексирането, което е от значение за системите, работещи в реално време, каквито са мултиплексорите. Двустранният стафинг се прилага в синхронните мултиплексори [25-26].

4.2.1. Метод на положителния стафинг

Тъй като плезиохронните потоци са с различна стабилност на тактовата честота $\Delta f/f_T$, т.е. с относителна нестабилност спрямо номиналната скорост, то преди да се мултиплексират (обединят) е необходимо да се изравнят по скорост и по фаза.

Да се изравни скоростта на един цифров поток, постъпващ на входа на мултиплексора, е необходимо да се избере една изравняваща скорост, по-голяма от номиналната с допустимите толеранси, така че:

- $F_{bx} + \Delta F_{bx}$ е честота на входния поток със съответния толеранс и съвпада с честотата на запис в паметта на мултиплексора;
- $F_{изр} + \Delta F_{изр}$ е изравнената честота на входния поток със съответния толеранс и съвпада с честотата на четене на този поток от паметта, т.е. това е съответната тактова честота на самия мултиплексор, с която ще се обработват подлежащите на мултиплексиране всички входящи потоци.

Следователно честотата за четене се приема да бъде по-голяма от входната честота с нейния максимално допустим толеранс, за да може всеки поток да бъде въведен (записан), а след това прочетен (изведен) без да се загуби информация. Всеки поток, подлежащ на мултиплексиране, се довежда до тази най-висока скорост – скоростта на изравняване. Изравнените по този начин потоци след това се обединяват в общ поток.

В този процес на изравняване в определен момент се налага да се добавят битове в изравнения (прочетения) поток, когато фазовата разлика между входния изравнения поток стане равна на един бит. Този бит се нарича стафинг (пълнеж) и именно чрез тези битове се изравняват потоците, по-точно се компенсира изоставянето на фазата на входящия спрямо изравнения поток. Паметта, в която се записва със скорост, различна от тази на четене се нарича гъвкава памет.

Всяко искане за стафинг (добавка на неинформационен бит) се управлява от детектор, следящ фазите на двете тактови честоти (на приетия поток и на мултиплексиращата такава честота) в предавателя. Тъй като тези битове не са информационни, те трябва да се отстранят в приемната страна. За тази цел е необходимо:

- да се разположат на строго определени места в цифровия поток;
- чрез битове за индикация да се уведоми приемната страна за наличие на стафинг – битове в потока (цикъла), т.е. за наличие на изравняване [26].

Принципът на изравняване с положителния стафинг, като е показано изравняването на един входен поток с изходната изравняваща тактова честота. Входният цифров сигнал се записва с честота F_{bx} , която е извлечена чрез СТС от приетия входен поток във входната памет. Изравняващата тактова честота $F_{изр}$ се генерира от задаващия генератор на мултиплексора, с която се извършва четене от буферна памет. Очевидно: $F_{изр} > F_{bx}$

След изравняването, този поток се обединява с останалите (още три) също изравнени потоци. Решението за изравняване се взема чрез фазов детектор (компаратор), който сравнява фазовата разлика между двете тактови поредици (за четене и запис) и когато входният поток изостане от изравняващия с повече от 1 бит, се подава управляващ сигнал към схемата за управление на стафинга /УС/, която извършва следното:

1. Спира за времето на един такт въвеждане на информационен бит към схемата ИЛИ като спира съответния тактов импулс за четене от буферната памет.
2. Въвежда един празен „стафинг” бит в потока през схемата ИЛИ.

Според възприетите за Европа скорости на мултиплексиране в PDH допустимото изменение (толеранс) на честотите на задаващите им генератори е дадено в табл. 4.2.

Табл. 4.2. Допустимо изменение на честотите в PDH

Скорост, Mbit/s	2,048	8,448	34,368	139,264
$E = \Delta f/f$	$\pm 50.10^{-6}$	$\pm 30.10^{-6}$	$\pm 20.10^{-6}$	$\pm 10.10^{-6}$

Например, за два цифрови сигнала със скорост 2,048 Mbit/s, които се формират от генератори с номинална честота 2048kHz, при допустима относителна нестабилност на всеки един от генераторите $\epsilon = \pm 50.10^{-6}$ ще се получи:

Приема се, че в даден краен момент от време единият генератор (местният на мултиплексора) задава честота (2048000+102)Hz, а другият – (предавателят – на входния поток, подлежащ на мултиплексиране) генерира (2048000-102)Hz. Тази разлика в тактовите честоти на двата генератора (на входящия и изходящия поток) се изразява с натрупване на фазова разлика във времето между генерираните от тях потоци. Компенсира се с добавянето на празни – стафинг битове, ако входящият поток трябва да се изравни по фаза с този на местния генератор, преди да се извърши мултиплексирането на по-висока скорост [27].

4.3. Структура на циклите

Структурата на цикъла на PDH сигналите се определя от начина на изравняване на цифровите потоци чрез положителен стафинг и от коефициента на мултиплексиране. Постъпващите в мултиплексора цифрови потоци от по-ниските нива (от по-нисък порядък) имат различни отклонения на номиналните тактови честоти, които по определение са по-малки от номиналната честота на обединение във високоскоростния поток от по-високо ниво.

Това налага въвеждане в стриктно определени места на цикъла на цифровия сигнал на допълнителни стафинг-битове за изравняване. Фазов компаратор за всеки поток следи фазовата разлика на входния спрямо местния тактов сигнал и при необходимост се подава команда за изравняване. Тази команда се записва също на строго определени места (времеинтервали) на цикъла, т.нар. битове за управление на стафинга. Тези битове служат да укажат на управлението в мултиплексора дали има или няма стафинг битове, и съответно да бъдат изведени от цифровия поток преди разделянето на съответните потоци.

Битовете за управление на стафинга представляват групи с еднаква дължина, но с различно съдържание. Възприето е във всеки цикъл при въвеждане на стафинг бит (необходимост от изравняване) да се предава команда за изравняване (по един бит „единица” за всеки поток по отделно в края на всеки блок от цикъла). При липса на необходимост от изравняване за един цикъл, се предава друга команда за съответния поток (по един бит „нула” за всеки поток). Тези команди се четат непрекъснато в приемана страна и чрез тях се изравняват приеманите потоци. Мултиплексирането на цифровите потоци е бит по бит и се редуват от 4-те потоци последователно в груповия поток [27].

Структурата на цикъла за различните скорости на мултиплексиране по Европейския стандарт: 8 Mbit/s; 34 Mbit/s; 140 Mbit/s. Цифровата поредица в един цикъл се състои от 4 блока за потоци със скорости 8 Mbit/s и 34 Mbit/s и от 6 блока за скорост на потока 140

Mbit/s. В началото на първия поток се предава синхронизираща последователност FAS. Общият брой битове в цикъла за различните йерархични нива е различен. В цикъла освен информационните трибюторни (потребителски) битове /TB/ tributary Bit се въвеждат и битове за управление на стафинга, както и стафинг битове JS (по един бит за всеки поток) на строго определени места в последния поток на всеки цикъл. В циклите липсват времеви интервали за кодови думи, структурата е побитова, което произлиза от последователното наслагване на бит по бит от четирите потока (канали). Входните потоци се пренасят прозрачно чрез новообразувания цикъл в цифровия сигнал.

Разглеждането на структурата на циклите за различните йерархични нива (скорости) обяснява защо в плезиохронните мултиплексори номиналните стойности на скоростите за съответните нива са завишени и не нарастват по закона: Където с индекса $m = 1, 2, 3, 4, 5$ се означава скоростта на съответното йерархично ниво, а $n = 4$ е коефициентът на мултиплексиране. Причините за завишаване на преносния капацитет с около 2% от номиналната скорост на предаване са:

1. Скоростта във всяко следващо ниво m се завишават с $(1 + \varepsilon)$ спрямо скоростта на по-ниското ниво $(m - 1)$ заради изпълнението на условието (4.2).
2. В циклите на всяко следващо ниво се добавя завишена по обем служебна информация спрямо по-ниското ниво: общият брой битове за управление на стафинга JS на всяка следваща по-висока скорост m се увеличава спрямо по-ниската $(m - 1)$, синхронизираща информация (дължината на синхронова) се завишава - от 7 битов в поток на скорост 2,048 Mbit/s на 10 битов при скорост 8,448 Mbit/s и 12 битов при скорост на потока 140 Mbit/s, броят на сервизните битове в цикъла с увеличаване на скоростта на потока също се увеличават. В цикъла за цифровия поток до 140 Mbit/s се предвиждат и служебни битове, резервирани за обслужване на международни връзки [28].

Основните параметри на плезиохронните мултиплексори E2, E3, E4 (второ, трето и четвърто йерархични нива) са приведени в сравнителна таблица – Табл. 4.3.

Табл. 4.3. Параметри на плезиохронните мултиплексори

Параметър	E2	E3	E4
Номинална скорост, kbit/s	8448 $\pm$ 30ppm	34368 $\pm$ 20ppm	139264 $\pm$ 15ppm
Време на един бит, μ s	118,4	29	7,18
Брой входни потоци, n	4	4	4
Скорост на входа, , kbit/s	2048	8,448	34368
Вид на стафинга	положителен	положителен	положителен
Синхросигнал	1111010000	1111010000	1111010000
Сервизни битове	2	2	2
Управление на стафинга за всеки входен поток	3 (a, b, c)	3 (a, b, c)	3 (a, b, c, d, e)
Стафинг битове	4	4	4
Сигнал за изравняване	000/111	000/111	00000/1111
Дължина на цикъла, bit	848	1536	2928
Информационни битове в цикъл	200+208x3=824	372+380x4=1512	472+484x5=2892
Коефициент на изравняване	0,424	0,436	0,419

4.4. Принцип на работа на плезиохронен мултиплексор/демултиплексор

Отнася се за мултиплексор MX 2/8, който обединява четири 2Mbit/2 – цифрови потоци на скорост 8 Mbit/s. Мултиплексването на четирите потока E1 в един по-високоскоростен поток E2 се извършва бит по бит, които се редуват последователно (D₁, D₂, D₃, D₄) от четирите потока, чрез преобразуване от паралелен в последователен код. Цикълът е оформен в четири блока, като общият брой битове е 848, в който се включват и всички служебни битове.

По-подробно е избран само единият цикъл, т.е. цифровото изравняване за първия входен поток на скорост 2,048 Mbit/s, т.к. циклите имат еднакъв принцип на изравняване. От входния цифров поток чрез СТС се отделя входната тактова честота, чрез която става записване (Fзап) в „еластична памет”. Това е n-битов регистър. Чрез задаващ (местен) генератор (не е показан на схемата) се изработва тактова поредица, чрез която се чете от паметта с честота Fчет = F вх (1 + ε).

Фазовият компаратор в зависимост от фазовата разлика между двете честоти изработва сигнал, чрез който се прекъсва четенето от еластичната памет. Чрез генератора за управляващи импулси се въвеждат битове за „управление на стафинга” и „стафинг” бит за цифровия поток на строго определените им места в цикъла. Блокът за циклично наслагване на битове управлява (синхронизира) отделните канали (за отделните входни потоци), както и генерира синхрокода по цикъл в изходния (изравнен) поток. Именно този блок мултиплексира (обединява) четирите входни потока и се явява общо групово устройство на мултиплексор за 8,448 Mbit/s.

Плезиохронният демултиплексор DMX 8/2 има обратната задача – от високоскоростния входен цифров поток, след като отдели честотата $f_r = 8448 \text{ kHz}$ да демултиплексира четирите изходни потоци на скорост 2,048 Mbit/s. Работата на демултиплексора се синхронизира от генератор на управление. Сигнали под управлението на приемника на цикловия синхрокод. Цикличното побитово разделяне на четирите потока също се управлява чрез детектирането на цикловия синхронизиращ сигнал [27-28].

Десинхронизаторът, който е индивидуално устройство за всеки отделен канал, отделя от приетия поток неинформационните – служебните битове, добавени в предавателя по време на изравняването. Освен това се отделят и сервизните битове (два на брой за разглеждания мултиплексор), чрез които се следи за наличието на алармени състояния в съответния слой на плезиохронната мрежа. „Еластичната памет” се управлява от съответните честоти: за запис (отделена от местния задаващ кварцово стабилизиран генератор и допълнително донастроена с приетия сигнал чрез система за автоматична фазова донастройка – PLL).|

4.5. Недостатъци на PDH-йерархията

Основните недостатъци, които се явяват пречка за по-нататъшното развитие на PDH са:

1. Използването на изравняващи битове на всяко ниво в плезиохронната йерархия прави невъзможно точното идентифициране на единия сигнал в цикъла на даден високоскоростен цифров поток. Например, в дадена т.В, за да се получи достъп до канал със скорост 2 Mbit/s в групов сигнал от 140 Mbit/s на цифров лионен такт, е необходимо цялостното му демултиплексване. Тази операция предполага разделянето на основния поток поетапно на съставлящите го сигнали от 34 Mbit/s на 6 Mbit/s до 2 Mbit/s, като междувременно се извличат и стафинг битовете [29].

От получените 64 канала със скорост 2 Mbit/s се извежда желания канал към потребителя в станция В. След това всички сигнали се мултиплексират отново в цифров поток до скорост 140 Mbit/s. Тази процедура изисква наличие на пълния комплект от мултиплексиращи/демултиплексиращи устройства във всяка точка от тракта, което значително:

- осъществява процеса на отделяне и въвеждане на каналите;
- намалява гъвкавостта на преносната мрежа;
- намалява бързодействието на телекомуникационните услуги.

2. Друг много съществен проблем в PDH мрежата е структурата на цикъла на високоскоростните потоци. За всяко отделно йерархично ниво структурата на циклите е различна, като в тях не са предвидени възможностите за предаване на информация за контрол, управление и поддръжка на преносната мрежа. Това води до:

- значително нарастване на възможността за възникване на грешки в преносната информация, поради липса на механизъм за защита на информацията от грешки;
- не се гарантира сигурността и качеството на връзките, т.к. в структурата на цикъла липсват служебни канали (за целите на експлоатацията са на разположение само два сервизни бита А и N);
- липса на гъвкавост на преносната мрежа, т.к. маршрутизацията на потоците (пренасочването на каналите) става чрез хардуерни превключвания, както и неправилно маршрутизиране на индивидуалните канали поради често излизане от синхронизъм.

Подобни ограничения не са от съществено значение, когато става дума за конвенционални телефонни услуги. Днес, обаче, процентното им съотношение намалява чувствително в сравнение с новите услуги, предоставящи възможности за пренасяне на големи количества различна по характер цифрова информация – данни, изискващи изключителна гъвкавост на маршрутизацията в мрежата. От друга страна в PDH-технологията липсват стандартизирани оптични интерфейси, което прави невъзможно осъществяване на връзки на „оптично” ниво между системите и съоръженията, произвеждани от различни производители, както и ограничава предаването на по-високи скорости [28, 29].

ГЛАВА V

СИНХРОННА ЦИФРОВА ЙЕРАРХИЯ

5.1. Произход и концепции

Главните предпоставки за довеждането на синхронните принципи на пренасяне на цифрови сигнали са следните:

1. Развитието на електронните и информационни технологии.
2. Перспективи за въвеждане на широколентови мрежи с интеграция на услугите.
3. Нова концепция за управление и експлоатация на цифровата преносна мрежа.
4. Методите за мултиплексиране в синхронната цифрова йерархия SDH решават редица проблеми, които възникват в PDH мултиплексорите.

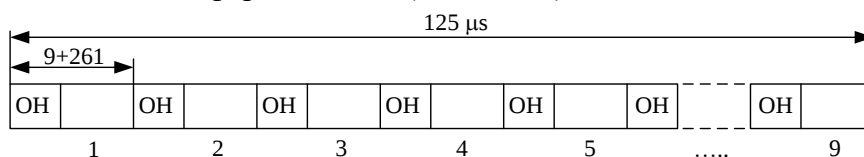
Основните цели, които се постигат чрез синхронното мултиплексиране се свеждат до следното:

1. Да се специфицира нов йерархичен ред от по-високи скорости за предаване на цифрова информация, който се базира на скоростите от PDH йерархията за Европа и за Америка, и който да позволява безпроблемно и гъвкаво пренасяне на канали с различни скорости, в която и да е точка от глобалната мрежа без допълнителни преобразувания на цифровите потоци.
2. Да се постигне чрез нови стандартни интерфейси съгласуване на новите телекомуникационни съоръжения на всички нива в преносната мрежа.
3. Да се разработи такава структура на рамките (циклите, „frame”) за предаване на информацията в мултиплексната йерархия, която да позволи управление и гъвкава маршрутизация на предаваните цифрови потоци в съобщителната преносна мрежа.
4. Да се осигури лесно въвеждане и отделяне на всички стандартизирани потоци във възлите на преносната мрежа.
5. Ефективно управление на достъпа до мрежата чрез нова концепция за управление на мрежовите елементи, с което да поевтинят услугите.
6. Високо качество на връзката, която да не зависи от разстоянията и от национални или континентални ограничения в преноса [2, 25, 29].

5.2. Основни характеристики на SDH

1. Рамка (цикъл) от 125 μ s

Цифровият поток при пренасянето на рамки (цикли), подобно в PDH мултиплексирането. Рамката от първи порядък (първо йерархично ниво) в SDH се нарича синхронен транспортен модул STM-1. Структурата ѝ е побайтова и е представена в едномерен вид на фиг. 5.1. Състои се от 9 еднакви сегмента, всеки от по 270 байта. В началото на всеки сегмент се предава заглавна информация ОН (Over Head) от 9 бита. Останалите 261 бита



Фиг. 5.1. Рамка от първо йерархично ниво по структурни сегменти

са предназначени за пренасяне на информация. Общо в цикъла се предават $270 \times 9 = 2430$ байта. Сегментите се предават по линията последователно побитово.

2. Скорост на предаване на STM-1

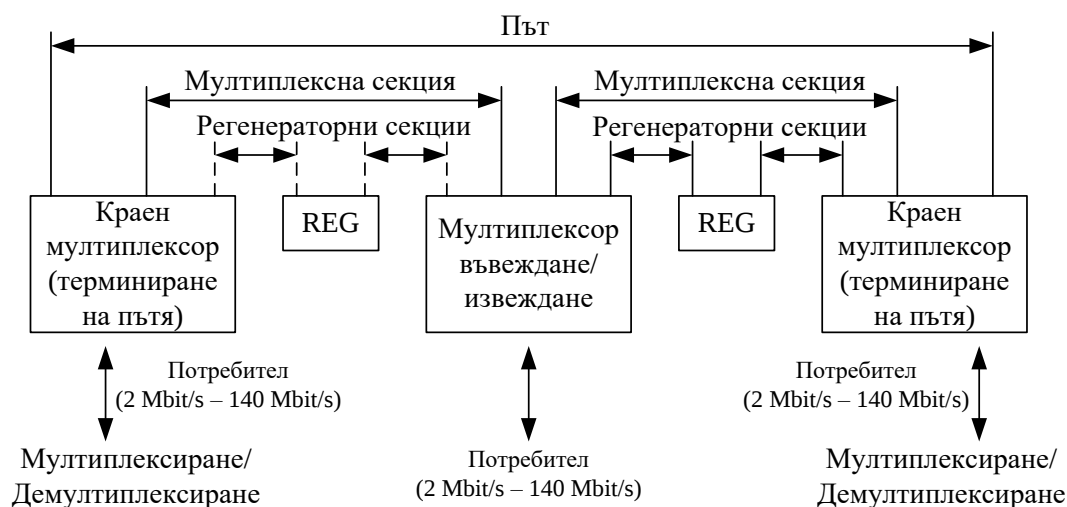
Скоростта се определя по следния начин:

Обемът информация, предаван за времето на един цикъл $T_c = 125 \mu s$ е скоростта на предаване в рамката SHM-1 се определя чрез заместване в (1.17), а именно:

$$2430.8.8000=155,520\text{Mbps}$$

3. Слоеста структура на рамката

Синхронното цифрово предаване се основава на свойството, че структурата на рамката е организирана според концепцията за слоеста структура на преносната мрежа. Най-общо един цифров поток се пренася през: път (от потребител до потребител), мултиплексорни секции, регенераторни секции и оптична преносна среда, както е показано на фиг. 5.2.



Фиг. 5.2. Пренос на цифров поток

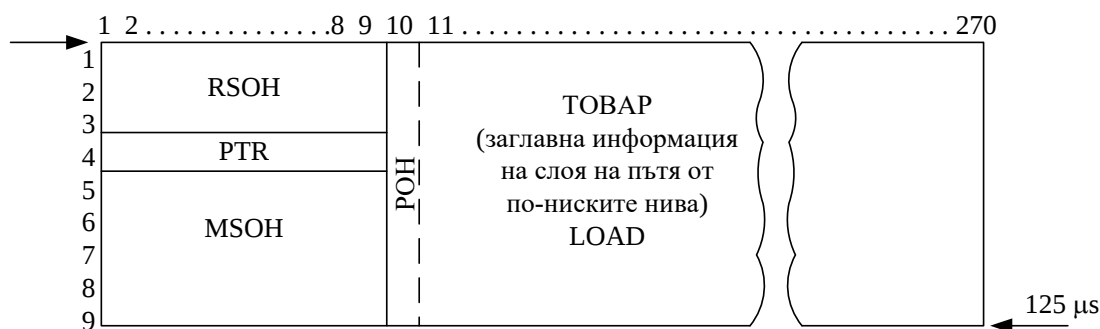
Всяка секция от преносния тракт може да се разглежда като формираща един слой на преносната мрежа и оттук процесът на цифрово предаване може да се дефинира за всеки слой: слой на пътя, слой на мултиплексната секция, слой на регенераторната секция и слой на оптическия пренос (слой на физическата преносна среда). Слойът на мултиплексната секция, заедно със слоя на регенераторната секция се нарича слой на секцията [30].

Концепцията за сместа на структурата на пренасяне на цифрови потоци дава едно много съществено предимство. При предаването на информационния поток от по-ниски нива, на границата с по-високото ниво се въвежда допълнителна указваща информация (заглавна страница), с което се гарантира преносът на информация в съответния слой. По този начин ясно се разграничават функциите на всеки слой от преноса. Това създава модулност на апаратурата от една страна, а от друга – лесно се обработва информацията, т.е. извършва се „разпределение на работата“, при което всяка една страна на преобразуване или обработка на сигнала може да се извърши независимо от останалите и не се налага разпакетиране на информацията на всеки слой, а се оперира само с онази част от заглавната страница ОН, която принадлежи на слоя. Аналогичен подход има при мрежата за предаване на данни с комутация на пакета. Слоестата структура дава гъвкавост на обработката на информацията на различните нива, а също така и бързина [30].

4. Рамкова структура на пренасяния синхронен сигнал

Структурата на рамките в синхронната цифрова йерархия образуват концепцията за слоевата структура на преносната мрежа и се наричат синхронни транспортни модули STM N (№ 1, 4, 16 и т.н. за различните йерархични слоеве), чрез които се осъществява пренасянето на цифровите потоци в синхронната мрежа.

В двумерен вид рамката STM-1 е представена на фиг. 5.3. Рамката се състои от редове и колони, които образуват мрежа от квадрати. Тъй като рамката се повтаря с период $T_c = 1/8000$ [s], то всеки квадрат представлява един байт, който пренася информация със скорост $B = 8 \text{ bit}/(1/8000)\text{s} = 64 \text{ kbit/s}$.



Фиг. 5.3. Рамка STM-1 в двумерен вид

Тази характеристика на цикъла позволява директен достъп на потоци на скорост 64 kbit/s от страна на по-високоскоростните нива, което не може да се открие в PDH. Освен това означава, че всички операции в SDH са байтово ориентирани.

Рамката се състои от 270 колони и 9 реда. Тя е разделена на 5 области, три от които представляват заглавни страници, съдържащи информация за управление и контрол на процесите в различните слоеве на цифровия тракт:

- RSOH (Regenerator Section Over Head) – заглавна страница на регенераторната секция от $3 \times 9 = 27$ байта. Осигурява преноса на информацията в регенераторната секция;
- MSON (Multiplex Section Over Head) – заглавна страница на мултиплексната секция от $5 \times 9 = 45$ байта. Осигурява преноса на информацията в мултиплексната секция.
- POH (Path Over Head) – 9 байтова указваща информация за слоя на пътя от по-високия ред в йерархичната структура на цифровата мрежа;
- Четвъртата област се нарича PTR (Pointer) – указател и съдържа 9 байтова информация, отнасяща се до синхронизацията на информационните потоци, пренасяни чрез транспортни модули;
- Петата област LOAD – товарът съдържа 260×9 байта потребителска информация подлежаща на пренасяне и постъпваща от по-ниските йерархични нива на цифровата мрежа (от PDH мрежата). Заглавните информации на пътищата от по-нисък порядък са разположени винаги в пространството на товара. POH (10-та колона от STM-1) също е включен товар [2, 25, 29, 31].

5. Мултиплексиране чрез наслагване на байтове

За разлика от плезиохронната йерархия, при която *мултиплексирането е по битове* тук подреждането на цифровите потребителски потоци в синхронния транспортен модул е на основата на *мултиплексиране по байтове*.

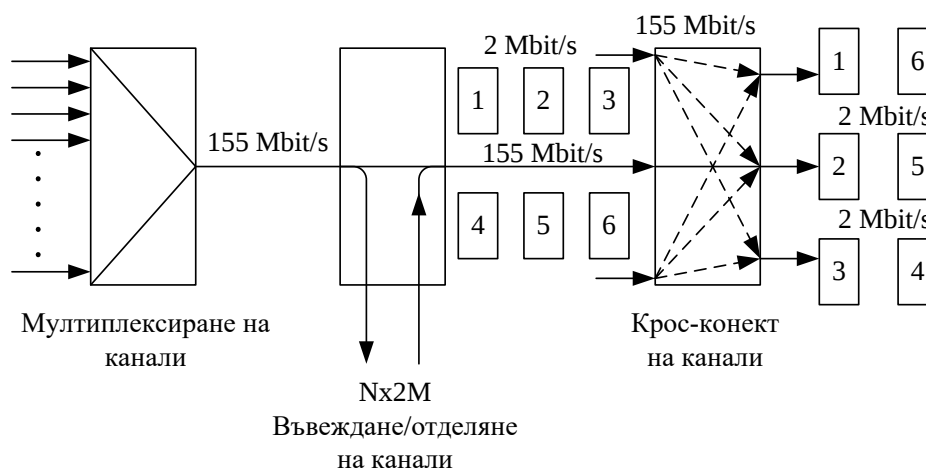
6. Унификация на цифровата йерархия

Синхронната мултиплексна структура включва както Американската, така и Европейската плезиохронна аьерархия.

От всеки един цифров поток от Северноамериканската (T1, T2, T3) или от Европейската (E1, E2, E3, E4) плезиохронна йерархия може да се образува общ синхронен транспортен модул чрез съответна синхронна процедура до скорост 155 Mbit/s, която скорост съответства на първото ниво в SDH.

7. Синхронност на основните модули

Всички модули – рамки и съдържанието им са синхронизирани, вследствие на което в мрежата лесно се осъществява отделяне, въвеждане или комутация на цели основни модули (фиг. 5.4). Синхронизацията на въведените в рамките цифрови потоци се извършва чрез непосредственото въвеждане на пойнтери (указатели) в процеса на мултиплексирането.



Фиг. 5.4. Синхронизация на цифровите потоци

Синхронизацията чрез използване на пойнтери съответства на процедурата на двустранното изравняване на потоците от гледна точка на плезиосинхронното мултиплексиране. В мултиплексорите с крос-конект функции част от потоците чрез преобразуване на адресите (тайм-слотовете им) могат да се пренасочат (комутират) към друг порт на изхода на мултиплексора.

8. Смесване на цифрови потоци с различни скорости

Смесването на цифрови потоци с различни скорости от PDH и подреждането на байтовете в рамка е гъвкаво. Синхронните мултиплексори могат да приемат трафични потоци от всеки един от стандартните плезиохронни интерфейси, наречени трибюторни (Tributary) портове. На практика се извършва директно мултиплексиране, с различни коефициенти на обединение на потоци, с което се елиминира междинна обработка на цифровите потоци, както е в PDH.

9. Синхронни интерфейси

Интерфейсите на високоскоростната страна в SDH мултиплексорите са оптични, като двупосочните портове се наричат агрегатни (Aggregate). Цифровите потоци, постъпващи и пристигащи към/от SDH мрежата са синхронизирани. Стандартът за синхронна йерархия включва синхронно кодиране (скрембиране). Цялата информация, необходима за пренасяне по оптични съобщителни линии, е включена в рамката в процеса на формирането ѝ.

Вътре в интерфейсната скорост са включени канали за поддръжка, контрол и управление, съдържащи се в ОН.

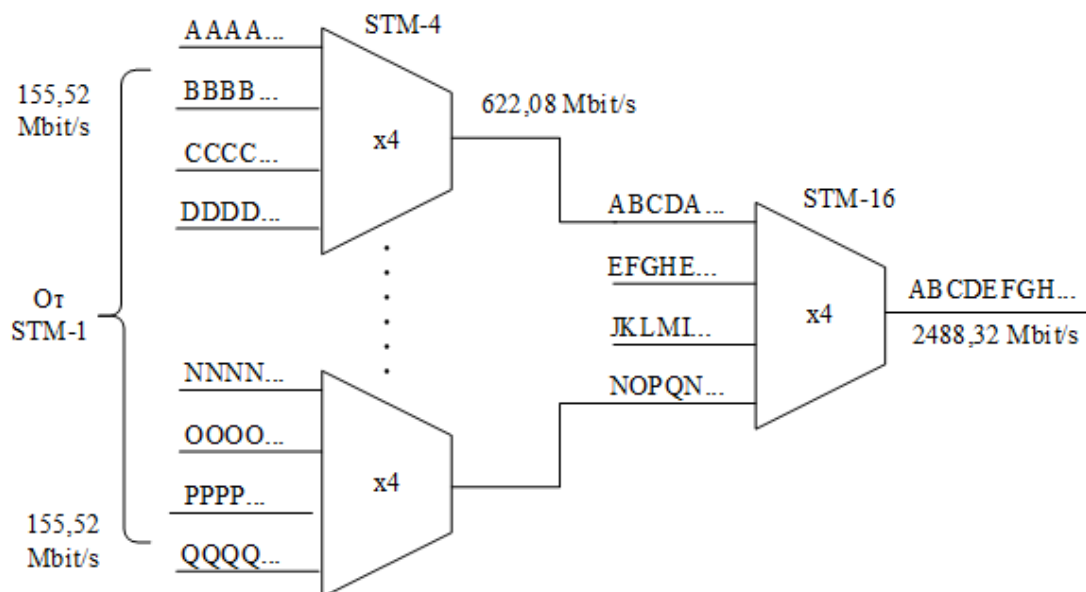
10. Синхронни потоци от по-висок ред

Мультиплексването на потоци от по-висок ред е процес на последователно включване на байтове от четири на брой по-нискоскоростни потока от ред m с цел образуване на поток от по-висок ред ($m + 1$) и следователно всяка рамка се образува от предходната чрез коефициент на нарастване по 4, като се означават съответно с STM-4, STM-16, STM-64 и т.н.).

По-високите скорости на предаване следователно нарастват с коефициент на мультиплексване $n = 4$ спрямо скоростта от по-малък ред ($(m - 1)$), при което:

- ✓ Скоростта на рамката STM-4 е: $155,52 \text{ Mbit/s} \times 4 = 622,08 \text{ Mbit/s}$ и формира поток от второ йерархично ниво;
- ✓ Скоростта на рамката STM-16 е: $622,08 \text{ Mbit/s} \times 4 = 2488,32 \text{ Mbit/s}$ и формира поток от трето йерархично ниво;
- ✓ Скоростта на рамката STM-64 е: $2488,32 \text{ Mbit/s} \times 4 = 9953,28 \text{ Mbit/s}$ и формира поток от четвърто йерархично ниво [25, 29, 30-32].

На фиг. 5.5 е онагледен процесът на последователното обединяване на потоците от най-ниската скорост (рамка ТМ-1) до следващите в йерархията по-високоскоростни потоци.



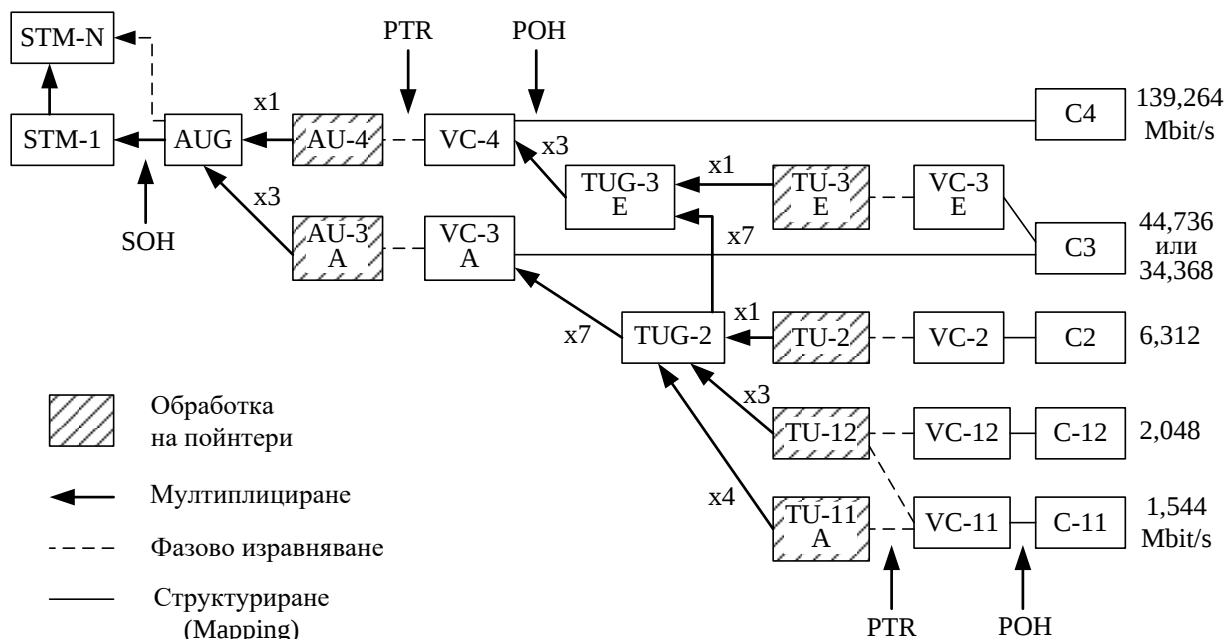
Фиг. 5.5. Последователно обединяване на потоци от различни скорости

5.3. Принципи на синхронното мультиплексване

5.3.1. Елементи на синхронния транспортен модул

Елементите на синхронния транспортен модул са показани на схемата от фиг. 5.6 по която се извършва синхронното мультиплексване в SDH.

Схемата е препоръчана от ITU-Tи отразява различните възможности за въвеждане на трибюторни сигнали от европейската или американската PDH-йерархия (фиг. 5.1) в синхронния транспортен модул STM-N (1).



Фиг. 5.6. Структурни елементи на синхронния транспортен модул

- Контейнер (Kontainer). C-mx (с $m = 1 \div 4$ се означава йерархичният ред – скоростта на трибуторния поток; а с $x = 1, 2$ се означава американския или европейския стандарт).

Това е елемент (контейнерът) на синхронния транспортен модул дефиниран като основна единица за пренасяне на цифровите потоци, постъпващи от плезиохронната мрежа. Всъщност контейнерът е рамка с определен капацитет, съдържаща определен брой байтове от цифровия поток за определена скорост, постъпващ в даден момент в STM-1 от PDH-мрежата. Възприетите размери на контейнерите за различните скорости от PDH са дадени в Табл. 5.1.

Когато скоростта на предаване на контейнерите е по-висока от скоростта на предаване на съответните потоци, то въвеждането им в контейнера е съпроводено с побитово или побайтово едностранно или двустранно изравняване [31, 32].

Табл. 5.1. Размери на контейнерите за различни скорости от PDH

Означение на контейнера	Скорост на триб. поток, Mbit/s	Скорост на предаване на контейнера, Mbit/s	Размер на контейнера, Byte
C-11	1,544	1,600	25
C-12	2,048	2,176	34
C-2	6,312	6,784	106
C-3	34,368 или 44,736	48,584	456
C-4	139,264	149,760	2340

- Виртуален контейнер (Virtual Container). VC-m ($m = 1 \div 4$)

Състои се от единичен контейнер, към който са прибавени допълнителни битове или байтове, образуващи заглавната информация на пътя. Съдържащата се информация в POH служи за правилното пренасяне (транспортиране) на съответния контейнер в слоевете на предавателния тракт. Трактът на VC представлява съвкупността от устройства от точката

на включването на РОН до точката на приемането му. Виртуалните контейнери с по-голям размер – VC-3 и VC-4 са предназначени за трибюторни потоци от по-висок порядък, докато контейнерите VC-1 и VC-2 се изграждат от цифрови потоци с по-ниски скорости (вж. фиг. 5.6).

- Товарна единица (Tributary Unit). TU-m ($m = 1-3$)

Състои се от виртуален контейнер, към който се прибавя пойнтер (указател). Виртуалният контейнер няма точно определена позиция в рамката, за разлика от TU, който е точно фиксиран. Чрез двоичната стойност на пойнтера се указва началото на VC в товарната единица, така че виртуалният контейнер може да „плува“ в TU. Тези пойнтери са еднобайтови и се генерират при изравняването на нискоскоростните потоци.

- Група от товарни единици (Tributary Unit Group). TUG-m ($m = 2-3$)

Формира се чрез обединяване в група на единични цифрови потоци TUG-m. Например: $TUG-21 = 4 \times TU-11$ или $3 \times TU-12$. Виртуалните контейнери от ниските нива преди предаването се обединяват в контейнер от висок ред. Това става чрез последователно групиране (мултиплексиране) на потоците, за да се достигне до въвеждането на товара в синхронния транспортен модул.

- Административна единица (Administration Unit). AU-m ($m = 3,4$)

Състои се от виртуален контейнер VC 3-4 и пойнтер. Пойнтерът на AU отразява отместването на виртуалния контейнер по отношение на синхронния транспортен модул STM-1, в резултат на което виртуалният контейнер може да „плува“ вътре в DU.

- Групов административна единица (Administration Unit Group) – AUG

Състои се от един блок AU-4 или три броя AU-3 и се образува от информационното поле на съответните виртуални контейнери и пойнтера на синхронния транспортен модул.

- Синхронен транспортен модул от първо ниво (Synchronous Transport Module). STM-1

Това е основният структурен елемент, използван за синхронното цифрово пренасяне. Изгражда се от груповата административна единица AUG, представляваща информационния товар (payload) и допълнителни байтове за заглавна информация на секцията (SOH – Section OverHead), както за мултиплексната, така и за регенераторната секция. Заглавната информация има управляваща (контролираща) функция, гарантираща пренасянето на товара през различните слоеве на преносния тракт.

- Синхронен транспортен модул от по-високо ниво STM-N

Формира се чрез обединяването на $N \times STM-1$ ($N = 4, 16, 64$ и т.н. [2, 25, 29, 30-32])

5.3.2. Изграждане на STM-1

Изграждането на рамката STM-1 е съгласно схемата от фиг. 5.6.

Преобразуването на трибюторните потоци се извършва чрез операциите:

- Структуриране (Mapping) чрез което потребителските потоци от VC се адаптират чрез присвояването на заглавната страница за пътя, осигуряваща правилен маршрут на контейнера в преносния тракт и чрез добавяне на изравняващи битове при въвеждането им в контейнерите;
- Изравняване (Aligning) – чрез този процес в товарната единица TU към виртуалния контейнер се присъединява пойнтер, указващ позицията на VC спрямо началото на рамката и осигуряващ привилното демултиплексиране на съответните контейнери в приемната страна (откриване на първия байт от съответния VC);

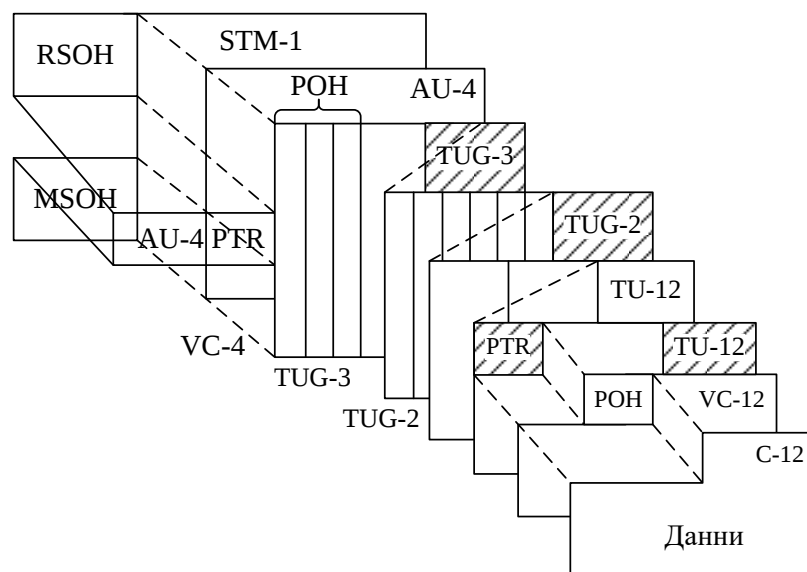
- Мультиплексиране (Multiplexing) – преминаване със съответен коефициент на мултиплексиране (обединяване) в следващ структурен елемент (ниво) на транспортния модул чрез побайтово обединяване на N на брой елементи от предходното ниво или когато високоскоростни сигнали се адаптират в мултиплексната секция. Тъй като скоростите от плезиохронните цифрови йерархии за американския и европейския стандарт са различни, то чрез различни стойности на коефициентите на мултиплексиране се изграждат съответните структурни единици (означени съответно с А и Е на фиг. 5.6) за достигане на скоростта 155,520 Mbit/s на STM-1;
- Обработка на пойнтери – Извършва се когато отклоненията в рамката са предизвикани от разликата в тактовите честоти между VC и съответния TU или AU. Обработката на пойнтери включва индикация за началото (и информация за промяна) на VC в капацитета на TU или AU, както и свързаната с това информация за двустранен стафинг. В някои точки на мултиплексната йерархия се налага капацитетът на TU или AU да се запълни с „фиксиран стафинг битове”, за да се оформи (запълни) рамката.

В таблица 5.2 са приведени основните характеристики на елементите на STM-1, като е показано нарастването на размера на различните структурни единици и съответната им скорост в този процес [2, 32].

Табл. 5.2. Основни характеристики на елементите в STM-1

Контейнер	C-11	C-2	C-3	C-4
Размер, Bite	25	106	756	2340
Скорост, bit/s	1600	6784	48384	149760
Виртуален контейнер	VC-11	VC-2	VC-3	
Размер, Bite	26	107	765	
Скорост, bit/s	1664	6848	48960	
Товарен блок	TU-11	TU-2		
Размер, Bite	27	108		
Скорост, bit/s	1728	6912		
Групов товарен блок				
Размер, Bite				
Скорост, bit/s				
Административна единица			AU-3	
Размер, Bite			786	
Скорост, bit/s			50304	
Групова административна единица				
Размер, Bite				
Скорост, bit/s				

Изграждането на STM-1 от цифровите потоци на скорост 2 Mbit/s, която скорост е базова за PDH, представлява интерес, т.к. капацитетът на VC на STM-1 се запълва най-ефективно от трибюторни 2 Mbit/s потоци спрямо другите скорости от PDH. В българската преносна мрежа този мултиплексор е най-често използваният. На фиг. 5.7 е онагледен процесът на последователната им обработка с цел мултиплексирането им в един поток на скорост 155 Mbit/s.



Фиг. 5.7. Последователна обработка на цифрови потоци с цел мултиплексирание при изграждане на STM-1

- Структуриране – побайтово подреждане на битовете в контейнер C-12, чиято скорост е по-висока от входящия поток E1;
- Добавяне на POH от един байт към C-12 и формиране на VC-12;
- Изравняване на скоростта на четене на C-12 с тази на входния поток и генериране на поинтера PTR, който се придава към VC-12, като се образува единичен поток TU-12 – този поинтер е един байт;
- Мултиплексирание на 3 x TU-2 от по-висок ред – 6 Mbit/s, PTR-12, казва мястото на VC-12 в TUG-2;
- Мултиплексирание на 7 x TUG-2 с цел получаване на нов групов сигнал TUG-3 от по-висок ред – 45 Mbit/s;
- Мултиплексирание на 3 x TUG-3 с цел получаване VC-4 – 140 Mbit/s;
- Изравняване на скоростта на VC-4 с тази на STM-1п (ако е необходимо) и генериране на нов поинтер, с който се фиксира местоположението на VC-4 в модула, т.е. аритметичната стойност на PTR AU-4 определя положението на VC-4 чрез създаването на административна единица – AU-4. Поинтерът PTR AU-4 е 9 битов;
- Прибавяне към структурата на AU-4 заглавна страница SOH за секцията, която се състои от две части – за мултиплексора и регенераторната секция, след което е формирана структурата на STM-1.

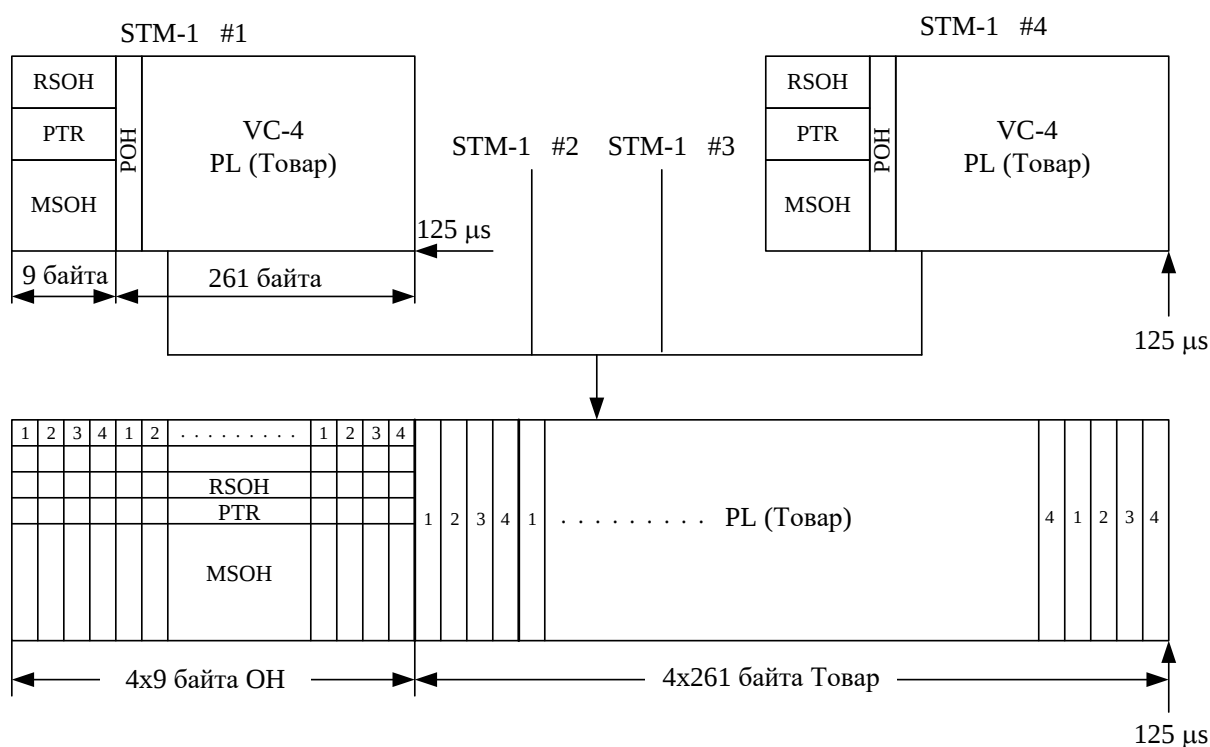
Общият коефициент на мултиплексирание за 2 Mbit/s – потоците е $3 \times 7 \times 3 = 63$, за да се постигне скоростта на STM-1. Стойностите на структурните елементи, отнасящи се за разгледания пример са потъмнени в Табл. 5.2.

Всеки сигнал, постъпващ на съответен трибюторен вход на мултиплексора и въведен в синхронната рамка STM-1 има съответна област в товара и заема определен брой колони, които съответстват на товарната единица TU (Tributary Unit). Тъй като цифровите потоци са непрекъснати и последователността на предаване е по редове, отделните сигнали са относително равномерно разпределени в цикъла на рамката [2, 25, 29].

5.3.3. Изграждане на потоци от по-висок ред, STM-N

Изграждането на транспортни модули от по-висок ред става като се обединят 4, 16 или 64 цифрови потока STM-1. При мултиплексването се спазват следните правила:

1. При образуване на нов модул се формира нова заглавна страница на секцията SOH, която нараства N пъти (N=4, 16 и т.н.) спрямо изходната.
2. Нарастване на товара N-пъти, като се наслагват байтове последователно от потоци с различни номера.
3. Преизчисляване на поинтерите преди включването на съответния товар към нова единица с цел запазване на положението във времето на старата единица.
4. Думата за циклова синхронизация в SOH нараства съответно N x 6 байта за всеки следващ транспортен модул.
5. Запазване на времето $T_c = 125 \mu s$ за предаване на новосформираната рамка STM-N, което се постига чрез съответното увеличаване на скоростта на предаване.



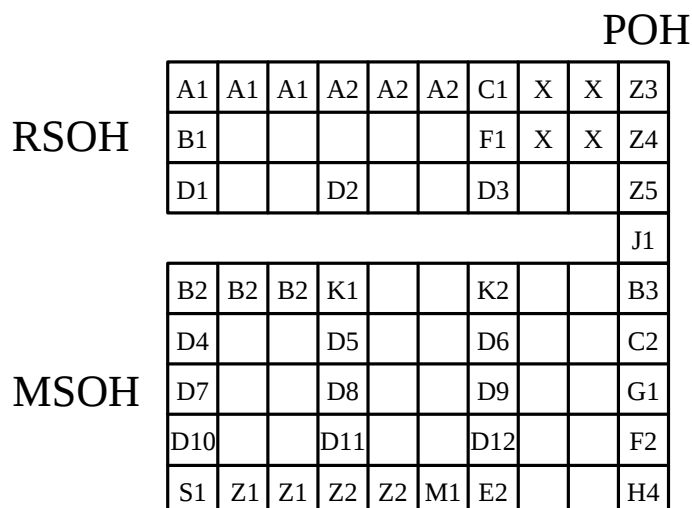
Фиг. 5.8. Мултиплексиране на STM-1 с номера #1 до #4 до получаване на STM-4

6. На фиг. 5.8 схематично е показан начинът на мултиплексиране на четири на брой STM-1 с номера от #1 до #4 и получаване на един модул STM-4 [33].

5.4. Структура и функции на управляващите полета OH в STM-1

5.4.1. Заглавна страница на секцията SOH

Заглавната страница на секцията има ясно разграничени полета (фиг. 5.9) за регенераторната секция RSOH и за мултиплексната секция MSOH, като всеки един байт има определена роля. Предназначението на отделните блокове е:



Фиг. 5.9. Регенераторна RSOH и мултиплексна MSOH секция

Байтовете A1 и A2 са предназначени за циклова синхронизация и съдържат комбинации със следната структура: A1 байт - 11110110 и A2 байт – 00101000.

Следователно синхронът FAW (Frame Aliquament Word) е 16 битов и в предаваната цифрова поредица еднозначно определя началото на рамката. Всъщност кодовете A1 и A2 се повтарят по 3 пъти и са част от функциите по адаптиране на слоя на регенераторната секция към тази на оптичната секция – т.е. реализират функцията по синхронизация на цикъл. Към тези функции следват използването на RZ тип кодиране на цифровия сигнал, както и на използването в оптичния пренос синхронно скремблиране /дескремблиране на сигнала. Трябва да се отбележи, че върху целия STM-N сигнал се прилага скремблиране, с изключение на първия ред от RSOH (където се намират A1 и A2 байтове), т.к. чрез FAW се синхронизира и самия скремблер.

Байтът C1 се използва за идентификатор на STM-модулите, насложени в STM-N. Ако са мултиплексирани 4 сигнала STM-1 в един. SRM-4, то $STM-1 \neq 1$ ще има адрес в C1 съответно 00000001, а $STM1 \neq 4$ – 00000100 в байт C1.

Байтът B1 и B2 служат за контрол на битови грешки в потока по отделно за двете секции. Контролът за регенераторната секция се извършва, като при STM-4 или STM-16 само водещият STM-1 ($c \neq 1$) носи валиден B1 байт. Байтът се формира чрез побайтово сумиране на mod 2 на определен брой байтове от рамката в предавателната страна. Кодът се нарича VIP-8 (Bit Interlived Parity) и в случая се проверява целият скремблиран модул STM-1. В приемната страна се сравнява този приет байт B1 с генериран по същия механизъм нов байт B1. Ако няма грешки по бит в регенераторния слой, двата байта (предавателният и формиращият в приемника) трябва да са еднакви [25, 29].

Байтовете B2 защитават информацията от битови грешки в мултиплексната секция. В резултат от изпълнението на процедурата, подобна на тази в регенераторната секция се формира 24-битова дума, която се предава в три поредни байта B2 в един STM-1 (кодът е VIP-24). Изчислението се прави за целия модул, без първите три реда от ОН (за да не се влияе от грешки в регенераторната секция) и байтовете се предават в следващия цикъл.

Байтът E1 в регенераторната секция е разговорен цикъл между експлоатационния персонал. Нарича се инженерен байт и е достъпен за ИКМ-съоръженията на скорост 64 Mbit/s.

Байтът F1 (User Channel) се използва от операторите по поддръжка за дистанционен контрол и управлението на различни алармени състояния по тракта.

Байтовете D1 до D12 се използват за комуникация между мрежовите елементи в SDH мрежата (за дистанционен контрол и наблюдение) и се наричат DCC (Data Communication Channel). Каналите за данни D1, D2 и D3 осигуряват капацитет $3 \times 64 \text{ kbit/s} = 192 \text{ kbit/s}$ за обмен на управляващата информация между регенераторите. Байтовете D4 до D12 с капацитет $9 \times 64 = 576 \text{ kbit/s}$ са канали за данни, осигуряващи мултиплексорната секция за комуникация по поддържане и управление. Следователно, каналите с мощен неинформационен капацитет, който се предоставя чрез SOH за експлоатация на цифрова мрежа, благодарение на което се гарантира качество на преноса.

Байтовете K1 и K2, намиращи се във водещия STM-1 ($\neq 1$) от един общ STM-N поток се използват за синхронизация и управление на процеса на т.нар. „автоматична защитна комутация“ (Automatic Protection Switching) – APS на линията 1 : n. При загуба на сигнала в далечния край – FERF или поява на друга аларма – AIS, чрез K2 се пренасят дистанционно тези съобщения. K1 осигурява процедура по защита на пренасяната информация при повреда в мултиплексор или оптичен кабел, като се превключват резервни съоръжения (агрегатни блокове и оптични линии) на мястото на основните в мрежата. Това е процес, който не намира приложение в PDH-мрежите.

Байтът S1 носи информация за типа на източника на синхронизация за пристигания STM-N. Определен е само за модул STM-1 или за STM-1 с $\neq 1$ в състава на STM-N.

Байтът M1 съдържа броя сгрешени блокове, открити с помощта на BIP-24 (B3) в далечния край. Възможните значения за STM-1 са от 0 до 24, за STM-4 е от 0 до 48. В нормални условия на работа не трябва да се генерират стойности превишаващи указаните.

Байтове Z1, Z2 са резервирани за бъдещи международни нужди [2, 25, 29, 33].

5.4.2. Заглавна страница на пътя РОН

За да се гарантира надеждният пренос на товара от източници с различни скорости, към съответния контейнер се добавя заглавна страница на пътя РОН след структурирането на потока. В зависимост от това, от какъв ред е потокът, то управляващата информация е с различен обем.

* За нискоскоростни потоци (VC-1 и VC-2) размерът на РОН е един байт. Той се съдържа в товара на рамката STM-1 и придружава съответния контейнер до неговото деструктуриране в точката на приемане. Има структурата и функциите показани на фиг. 5.10.

BIP2		FEVE	N	Етикет: L1, L2, L3			FERF
1	2	3	4	5	6	7	8

Фиг. 5.10. Структура и функции на РОН

*Байтовете в РОН, които се добавят към VC от по-висок ред (VC-3 или VC-4 са 9 на брой и са показани на фиг. 5.9, като представляват десетата колона в рамката STM-1. Те също придружават съответно VC до точката на приемането и имат следното предназначение:

Байтът J1 е канал за следене (трасиране) на пътя. Използва се за предаване на идентификатор в точката на достъпа, чрез който един приемен терминал да може да следи връзка-та си към точно определен предавател. По този канал непрекъснато се повтаря една кодова

комбинация от 64 байта с фиксирана дължина, така че да се контролира маршрутът на товара в дадено VC.

Байтът В3 служи за контрол на цифровата грешка на информацията в слоя на пътя чрез проверка по четност на битовете ВР-8, като се изчисляват всички байтове от предходната VC до скремблирането им.

Байтът С2 указва типа на полезния товар в състава на VC-3 / Vc-4. Двоичната стойност 00000000 означава неспецифициран товар – използва се за предотвратяване на лъжлива синхронизация за авария (до 11 разрешени състояния за указване на вида на товара). Стойността на идентификатора се задава в шестнайсетичен код на изчисляване, напр., чрез 12 се указва, че VC-4 е натоварен с контейнер C4, т.е. предава се поток на скорост 140 Mbit/s; чрез 13 се указва, че товарът представлява АТМ клетки.

Байтът G1 е обратен канал. Използва се от приемника, за да изпрати към VC3 / VC-4, в предавателя информация за състоянието на пътя и качеството на предаване и е показан на фиг. 5.11.

FEBE				FERF	not used			FEBE – Far End Blok Error
1	2	3	4	5	6	7	8	FERF – Far End Receive Failur

Фиг. 5.11. Структура на G1 с информация за състоянието и качеството на предаване

Първите четири бита (FEBE – Far End Blok Error) дават броя на блоковите грешки в далечния край (колкото грешки са открити чрез байт В3 в приемника). Бит 5 (FERF – Far End Receive Failur) отразява състоянието на далечния край (при индикация за алармен сигнал, пропадане на сигнал или грешка при следенето на състоянието на пътя, неговата стойност е единица).

Байт F2 се използва от потребителя на пътя и е предназначен за комуникация на скорост 64 kbit/s между отделните съоръжения.

Байтът H4 е индикатор за свръхцикъла. Функционира като индикатор на мястото на специфицирани товари, където товарът се разпределя в няколко цикъла (STM-1). Използва се задължително при фиксиран режим на пренасяне на цифрови потоци. При свободен режим не се използва. Има функция на синхронизатор при пренасяне на АТМ клетки чрез STM-1.

Байт Z3 и Z4 са канали резервирани съответно за потребителя на пътя и за мрежовия оператор.

Байтът Z5 е резервиран за бъдещи нужди [2, 25, 29, 33].

5.5. Синхронизация чрез пойнтери

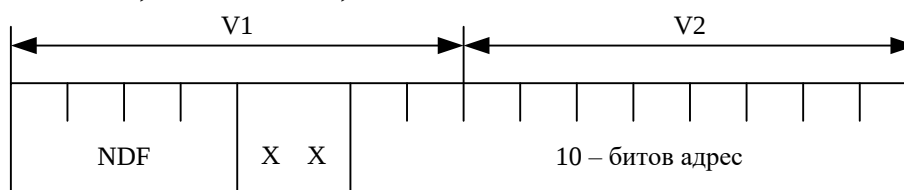
При синхронното мултиплексиране процесът на синхронизация се осъществява с точност до един байт в рамките на един свръхцикъл. Синхронизацията се извършва чрез използването на пойнтери, като в процеса на изравняване на входните потоци те променят съдържанието си. Изравняването на скорости се налага при формиране на товарна единица TU mх или административна единица AU m (фиг. 5.7), т.к. в тези етапи на структуриране на рамката тактовата честота за запис на потока се отличава от тактовата честота за четене на съответната структурна единица TU или AU. Честота на запис при нискоскоростните

потоци се извлича по подходящ начин от самия входен поток, а честотата на четене се задава от master генератора на синхронния мултиплексор. Пойтнерите в SDH мрежата следователно са два типа – за TU и за AU, но процедурата по обработката е принципно еднаква [2].

5.5.1. Пойнтер

Снабдяването на товара в SDH с пойнтери позволява отместване във времето на виртуалните контейнери VC-N спрямо STM-N рамката, като пойнтнерите от по-нисък ред (за TU) позволяват отместване на VC-1 / VC-2 спрямо тези от по-висок ред VC-3 / VC-4. Съпоставяйки местоположението на една рамка спрямо следващата рамка, чрез пойнтнера на товара за AU се указва изместването на виртуалния контейнер VC-3 / VC-4 в товара спрямо STM-N рамката. С други думи чрез пойнтнерите се дава възможност товарът да „плува“ вътре в капацитета на STM-1. За да е възможно във всяка STM-N рамка да се индикира от къде стартира контейнерът със съответния товар, то в пойнтнера се записва една двоична стойност (адрес), която указва именно фазовото отместване на този товар спрямо началото на съответната структурна единица.

* За товар, въведен в VC-1 /VC-2, пойнтнерът се състои от два байта V1 и V2 със структура от фиг. 5.12, при което двата бита XX определят какъв е типът на товара: двоична стойност 10 е за TU-12; 11 – за TU-11; 00 – за TU -2.



Фиг. 5.12. Структура на пойнтнера, въведен в VC-1 / VC-2

Чрез NDF – New Data Flag се указва за настъпила промяна в стойността на 10-битовия адрес. Двоичната стойност на адреса указва от къде трябва да се чете (извлича) съответния товар в приемната страна.

* За товар, въведен в VC-4, пойнтнерът е разположен на четвъртия ред на SOH и е прието да се означава като PTR-4. Разположението на байтовете H1, H2 и H3 могат да се видят на фиг. 5.13.

3 x AU-3	H1	H1	H1	H2	H2	H2	H3	H3	H3
3 x AU-4	H1	Y	Y	1	1	H2	H3	H3	H3

Фиг. 5.13. Разположение на байтове H1, H2 и H3

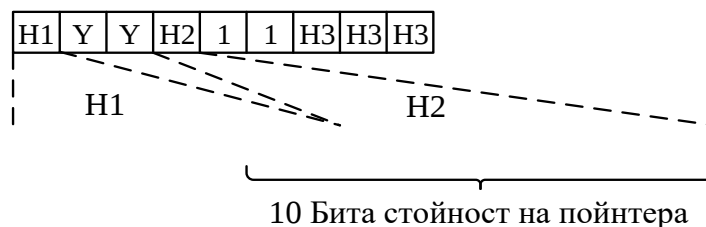
На фигурата освен това е показан и пойнтнерът, добавян към (3xAU-3) и означаван като PTR-3 (виж фиг. 5.6) [2, 25, 29].

Стойността на пойнтнера PTR-4 показва изместването в байтове на първия байт (J1) От Vc-4 (спрямо самия пойнтнер – неговия трети байт H3). Тъй като байтовете от ОН не се адресират, а началното указване е с трибайтов инкремент (нарастване), то възможният

обхват на изместването е: $(2430-81)/3 = 783$ валидни стойности на поинтера. Това са стойностите в обхвата от 0 до 782. Напр.: ако PTR-4 има стойност 0, то VC-4 започва точно след H3 байта на PTR-4; ако PTR има стойност 287, то тогава VC-4 започва на известно отместване спрямо байта K2 на следващия ред на рамката.

5.5.2. Метод на двустранния стафинг

Предназначението и означението на байтовете от поинтера PTR AU-4 е показано на фиг. 5.14.



Фиг. 5.14. Предназначение и означение на байтовете от поинтера PTR AU-4

Байт H1 и байт H2 установяват местоположението на VC-4 в рамката и съдържат адреса на поинтера. Байтовете NNNN от H1 се използват за флаг за промяна на адреса като NNNN = 0110 е нормалната стойност на флага (адресът не се променя), докато NNNN = 1001 е указател, че адресът е променен. Четирите бита трябва три пъти да са в едно и също състояние, за да се счита, че флагът е променен, т.е. има нова стойност на фазовото отместване. Битовите SS не са специфицирани.

Байтовете Y – 1001SS11 имат специална структура и управляват процеса на двупосочен стафинг, като SS-указват типа на дадения поинтер. В Табл. 5.3 са дадени използваните поинтери в SDH и възможното отместване на съответните товари спрямо началото на рамката (обхватът на поинтера).

Табл. 5.3. Използвани поинтери в SDH

Тип на поинтера	S	S	Разрешени адреси
AU – 4/3	1	0	0 - 782
TU – 3	0	1	0 – 764
TU – 2	0	0	0 – 427
TU – 12	0	1	0 – 139
TU – 11	1	1	0 - 103

Байтовете I от поинтера имат съдържание 1111111;

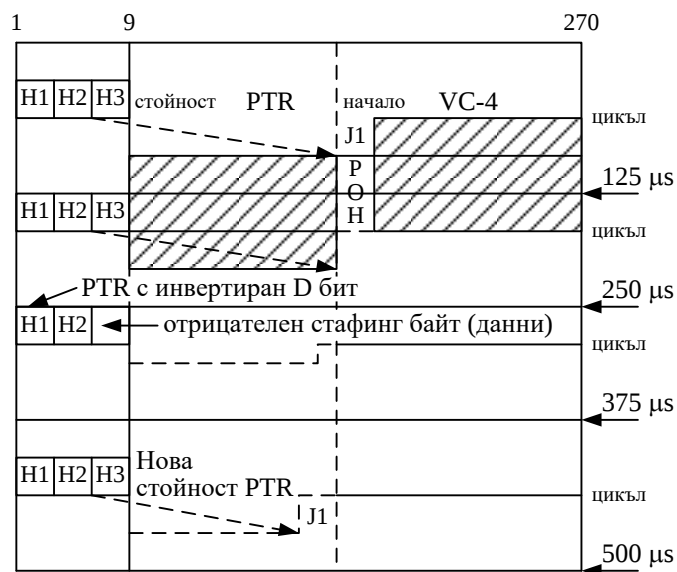
Байтовете H3 дават възможност за допълнително изравняване.

Самият адрес на VC-4 (стойност на поинтера) се задава чрез 10 бита ID ..., които следват след битове SS на байта H1 и непрекъснато се променят. Битовите от адреса I – Increment Bit служат да укажат за положително изравняване, а D – Decrement Bit – за отрицателно изравняване [31-33].

Поинтерът позволява VC-4 да бъде точно идентифициран в рамката STM-1 и стойността му отразява отместването между тях. При нулева стойност на 10-те бита, първият байт от товара заема първия адрес на рамката, а той е веднага след байт J1 (който трасира пътя на товара) – фиг. 5.15. Ако се появи фазова разлика между тактовите честоти на VC-4 (товара)

и на рамката, то след време се налага да се променя и адресът, който да отразява тази разлика, защото най-общо двата потока (товарът от плезеохронната система и STM-1) трябва да са синхронизирани.

Битовите I (инкремент) и D (декремент) служат за отразяване на двустранния стафинг, и съответно се инвентират, когато адресът на VC-4 се увеличава или намалява. В същото време чрез байтовете H3 се пренася информационен товар в поинтера в случай на отрицателно изравняване. При положително изравняване, товарът се измества в следващ цикъл (рамка) и H3 байтовете се използват за стафинг байтове.



Фиг. 5.15. Идентификация на VC-4 в рамката STM-1

Процесът на изравняване при отрицателен стафинг е онагледен схематично на фиг. 5.15. Скоростта на предаване на VC е по-висока от тази на STM-1 (TU/AU) и общият товар, който се пренася се увеличава.

Когато натрупаното отместване стане с големината на един байт, D-байтовете на адреса се инвертират и H3-байта пренася байт данни в поинтера, а адресът се намалява с 1. В получената модифицирана рамка стойността на поинтера се е намалила с 1, за да се отчете пренесеният байт данни (всъщност целият поток данни от товара е отместен към по-малките адреси). Процесът на изравняване протича за времето на четири импулса – 500 μs, като в края на процеса J1 е отместен с един адрес към по-ниските стойности.

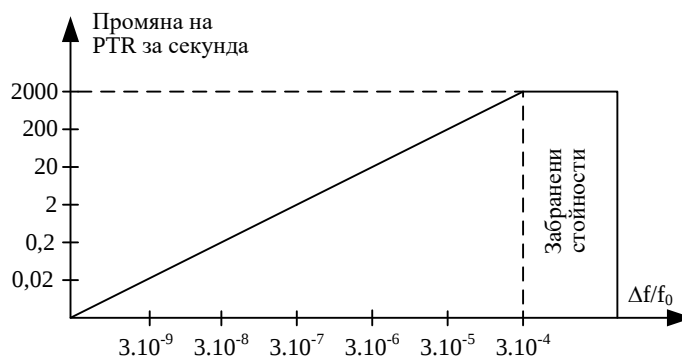
При положителен стафинг става отместване на байтовете данни към по-високи адреси и при отместване с един байт се инвертират всички I-байтове, с което и адресът се увеличава по стойност с единица. Един неинформационен (стафинг) байт H3 се премества в товара.

Стойността на поинтера варира в зависимост от разликата в скоростите на четене и на запис на приемания сигнал. Чрез текущата стойност на поинтера може да се определи еднозначно местоположението на полезния товар в рамката и се преизчислява на всеки четири цикъла [30-33].

При промяна на стойността на поинтера е възможно да се получи т.нар. състояние на препълване на поинтера, т.е. при максимална стойност на поинтера да се получи команда за положително изравняване или при минимална стойност за отрицателно изравняване.

При тези команди реално се получава загуба на циклов синхронизъм в PDH мултиплексора, тъй като се губи повече от един байт информация.

SDH – мултиплексорите се управляват от задаващи кварцови генератори с честото f_0 . Пойнтерът при необходимост изравнява фазовите вариации, които се появяват в реалната мрежа, както и когато трафикът пресича международните граници. Самото действие на PTR е функция на фазовото отместване, което е резултат от честотна нестабилност в мрежата $\Delta f/f_0$.

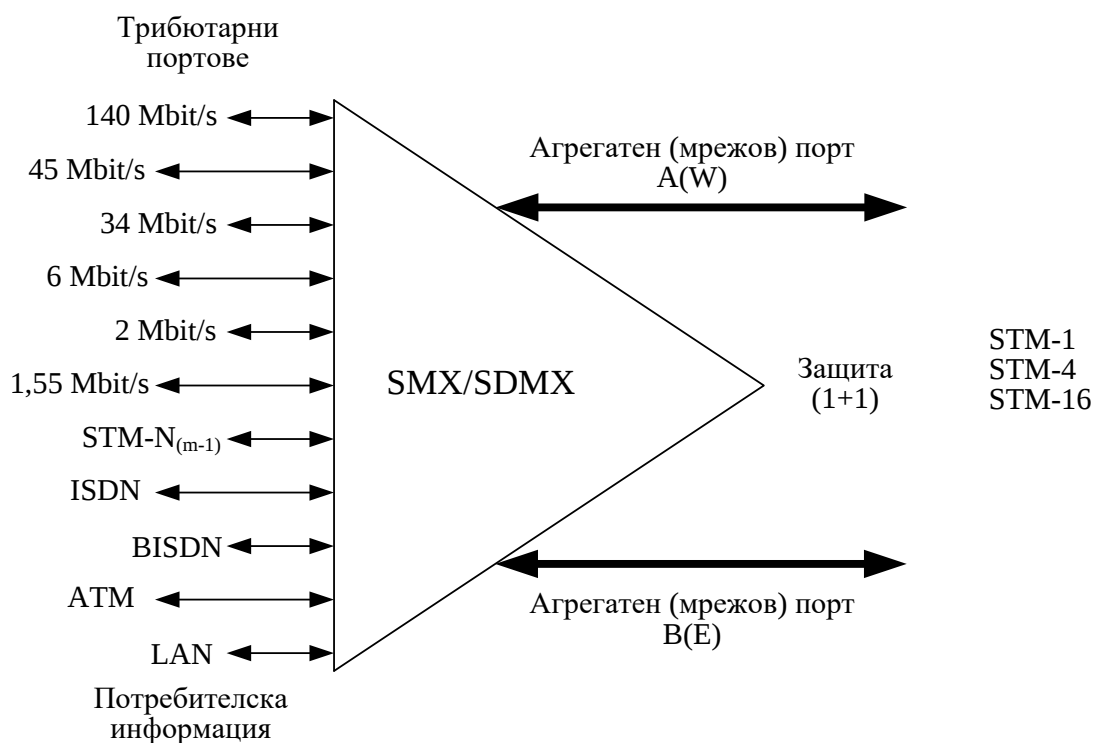


Фиг. 5.16. Промяна на стойността на пойнера спрямо $\Delta f/f_0$ на преносната SDH мрежа

На фиг. 5.16 е отразена зависимостта на промяната на стойността на пойнера за секунда от относителната вариация на честота $\Delta f/f_0$ на преносната SDH мрежа. Регламентирана е задължителна относителна нестабилност на честотата на мрежовите елементи. За поддържане на стойности до $3 \cdot 10^{-4}$ се налага мултиплексорите да се синхронизират чрез синхронизиращи сигнали, предавани в мрежата от изключително прецизни високостабилни еталонни генератори [30-33].

5.6. Синхронни мултиплексори

Синхронните мултиплексори в SDH мрежата изпълняват освен мултиплексиращи функции на всяко ниво, но и функции, позволяващи гъвкаво изграждане на преносната мрежа: оперативно превключване на потоци в синхронната мрежа, въвеждане или отделяне на потоци в дадени точки на мрежата, линейно оборудване и някои други. Всеки конкретен мултиплексор използва част от изброените функции. Синхронните мултиплексори притежават двупосочни електрически интерфейси за въвеждане (извеждане) на потребителската информация. Тези интерфейси, както бе отбелязано се наричат портове трибюторни и са стандартизирани на международно ниво. На фиг. 5.17 е представена обобщена блокова схема на синхронен мултиплексор/демултиплексор SMX/SDMX. Мултиплексорите на високоскоростната страна притежават агрегатни интерфейси (двупосочни портове А и В, означавани още с W – west и с E – east) за стандартните скорости на синхронните транспортни модули STM-N в синхронната цифрова йерархия за връзка с оптичната преносна мрежа [2, 25. 29].



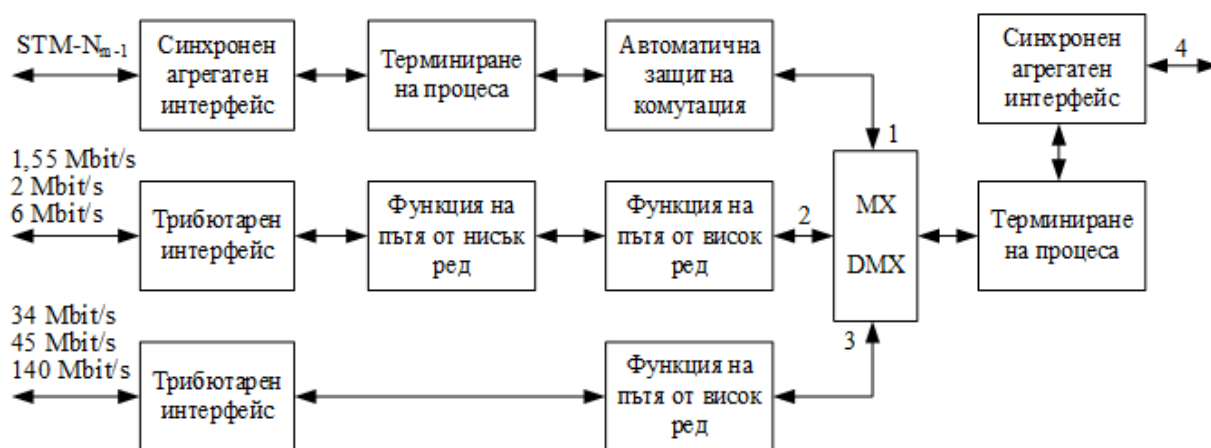
Фиг. 5.17. Обобщена блокова схема на синхронен мултиплексор/демултиплексор SMX/SDMX

Синхронните мултиплексори могат да приемат освен различни по вид цифрови потоци от плезиохронната и синхронната (порт STM-N) мрежа, но и потоци от цифровата съобщителна мрежа с интеграция на услугите ISDN, от широколентовата BISDN, а също и ATM – сигнали (режим на асинхронно пренасяне). В мултиплексорите се извършва адаптиране на асинхронните (по отношение на рамката STM-1) сигнали чрез добавяне на пойнтери, а също маршрутизиране и управление на пренасяните цифрови потоци. Синхронният оптичен агрегатен интерфейс се дублира с цел защита от евентуални прекъсвания (повреди) в преносния тракт. Надеждността на синхронното цифрово пренасяне се осигурява чрез „1+1”, при която се използва един основен и един резервен оптичен кабел.

5.6.1. Функции

Опростена функционална схема на един синхронен мултиплексор за работа с всички възможни скорости съгласно фиг. 5.6 и за всички възможни приложения е показана на фиг. 5.18.

Входните потоци от плезиохронната йерархия, както и означените със STM – Nm-1 са цифрови потоци, постъпващи от по-ниските нива на цифровата преносна мрежа.



Фиг. 5.18. Опростена функционална схема на синхронен мултиплексор

Трите хоризонтални вериги от блокове на мултиплексната структура отразяват мултиплексирането и демултиплексирането на потоците от трибюторните портове, а именно:

- по – нискоскоростни $STM-N_{m-1}$ потоци, които постъпват със SDH мултиплексори (верига от блокове 1);
- нискоскоростни потоци, които постъпват от PDH мултиплексори (верига 2);
- високоскоростни потоци, които също постъпват от PDH мултиплексори (верига 3).

Веригата от блокове 4 отразява процеса на въвеждане на ОН, с което завършва изграждането на синхронния транспортен модул от по – висок ред – STM-1 за потоци от PDH мултиплексори и съответно $STM-N_m$ за потоци от SDH мултиплексори. Отделните блокове изпълняват следните функции:

- трибюторният интерфейс реализира физическия интерфейс на мултиплексора с преносния кабел. Този интерфейс е електрически и се определя от скоростите на различните входни потоци.
- Чрез функциите на пътя от нисък ред се добавят еднобайтовите РОН и РРТ по време на структурирането на потоците от първо и второ йерархично ниво от PDH (виж фиг.5.6);
- Чрез функциите на пътя от висок ред се генерират и обработват 9-байтовите пойнтове в резултат на изравняване на скоростите на съответните структурни единици за потоците от трето и четвърто йерархично ниво. Освен това може да се променя мястото на VC_n в STM-1, за да се реализират кросконект мултиплексори;
- Мултиплексирането/демултиплексирането е процес на обединяване на потоци, протичащ на няколко етапа за различните скорости и видове мултиплексори;
- Чрез функцията „терминиране на процеса” се добавят управляващите полета за преноса на товара през мултиплексната секция – MSON и през регенераторната секция – RSON на преносния тракт, както и 9-байтовия РОН;

- Синхронният агрегатен интерфейс реализира физически интерфейса на мултиплексора с оптичния кабел за съответната синхронна скорост;
- Автоматичната защитна комутация осигурява резервиране на мултиплексната секция посредством отклонение на сигнала до друг резервен път за пренос (обработка на байтовете K1 и K2 от MSON) [2, 34].

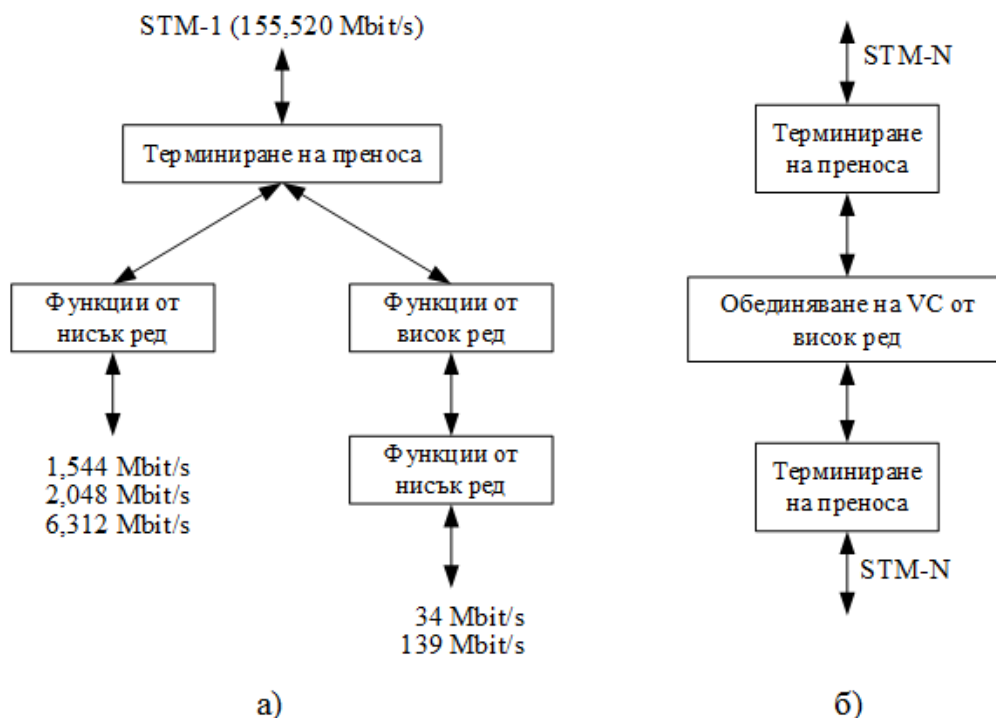
Чрез изброените до тук функции по клонове 2, 3 и 4 се реализира изграждането на AUG в зависимост от това, чрез какви плезиохронни скорости на сигнала се формира рамката STM-1. Мултиплексването на потоци от синхронната йерархия се извършва по клон 1 и клон 4 на показаната схема. На функционалната схема от фиг. 5.18 не са отразени следните съществени функционални блокове за синхронното мултиплексване:

- синхронно устройство на управление, което чрез сигнали S за наблюдение, контрол и алармени състояния, взаимодейства с всички останали блокове на мултиплексора. Този функционален блок взаимодейства и с останалите мултиплексори в преносната мрежа. Чрез байтовете D1 до D3 за регенераторната секция и от D4 до D12 за мултиплексната секция става пренасяне на сервизни съобщения между мрежовите елементи на преносната мрежа;
- синхронизиращо устройство, осигуряващо синхронизация по такт T на мултиплексора чрез собствен източник (вътрешен еталонен генератор на тактова честота) или постъпваща от външен източник за синхронизация. Местният такт, използван за синхронизация на мултиплексора се осигурява от сигнал от следните възможни източници:
 - * сигнал, отделен от всеки въвеждан STM-N поток по агрегатните портове (A или B) на мултиплексора;
 - * от входен сигнал, постъпил на всеки трибюторен порт на мултиплексора от SDH или PDH мрежата;
 - * външен 2,048 MHz сигнал.

Всички източници на тактова честота в мрежата се синхронизират от централен, високостабилен цезиев тактов генератор. Чрез байта S1 от MSON се предават съобщения за статуса на синхронизацията SSM в мрежата. Възможни са S различни нива на качеството (стабилност) на синхронизиращия сигнал. Чрез съобщенията SSM синхронните мултиплексори в мрежата се превключват на приоритетна основа към един от трите вида източник при загуба на синхронизация [2, 34].

5.6.2. Видове синхронни мултиплексори

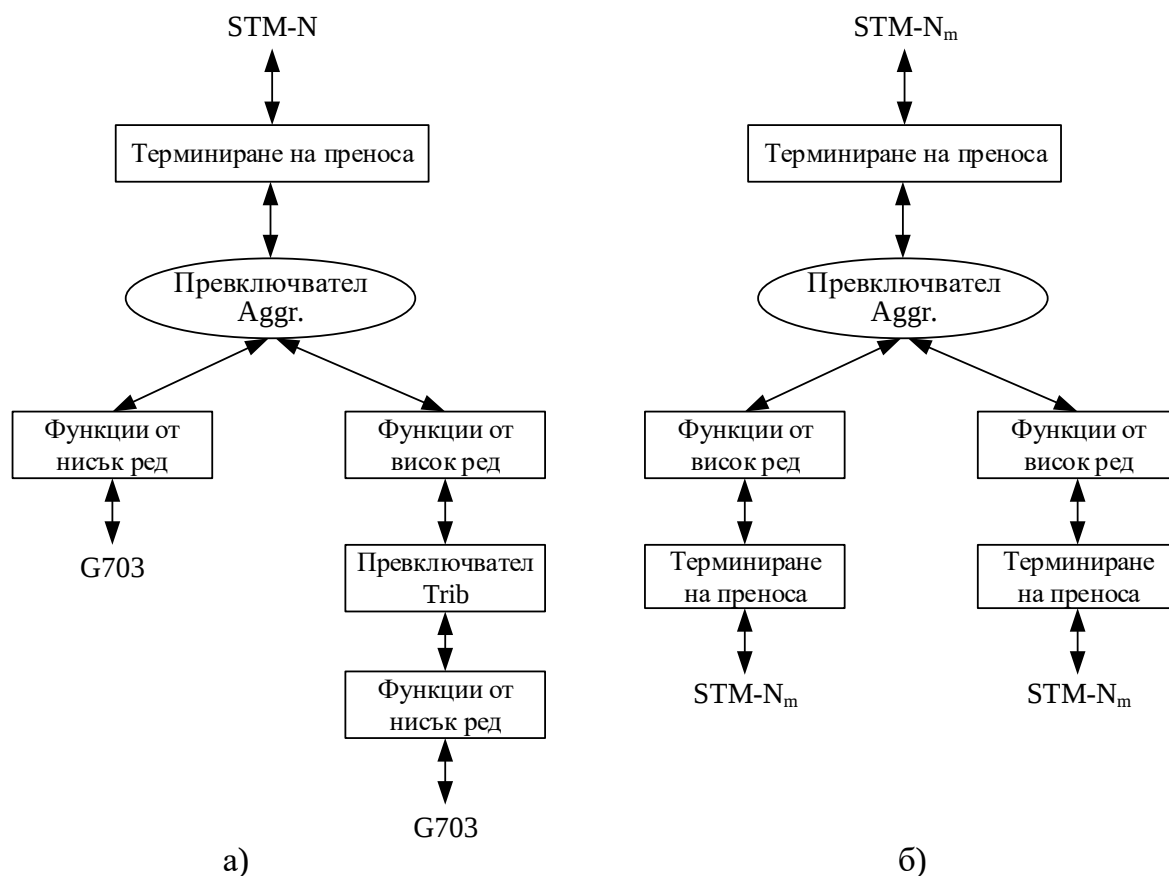
Гъвкавата мултиплексна структура позволява да се реализират различни по функции и предназначение устройства. В зависимост от това какви функции реализират синхронните мултиплексори, съществува класификацията, представена по-долу.



Фиг. 5.19. Терминален (краен) синхронен мултиплексор SMK а) и Регенератор Reg б)

Има трибюторни портове, на които постъпват потоци с ниска скорост от плезиохронни мултиплексори и агрегатен порт със скорост на рамката STM-1. Такива мултиплексори се монтират в точки на преносната мрежа, в които се генерира трафик и имат функцията на групообразуващо устройство. Те изпълняват ролята на крайна станция, даваща възможност чрез STM-1 груповия цифров сигнал да постъпи в оптичната преносна мрежа.

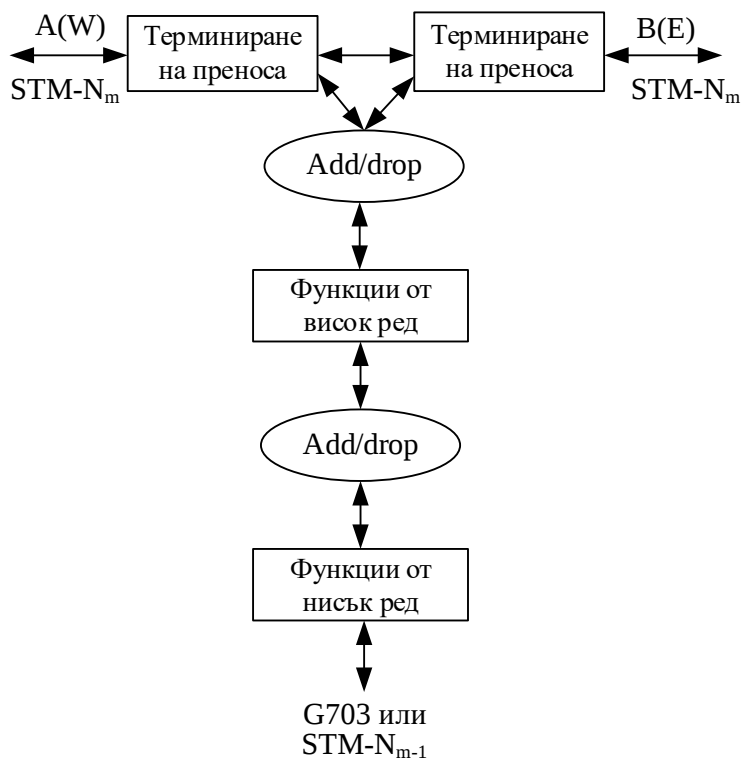
- * Терминален (краен) синхронен мултиплексор SMK, показан на фиг. 5.19.а).
- * Регенератор Reg, показан на фиг. 5.19.б), позволява в дадена точка на преносната мрежа контейнер VC $\frac{3}{4}$ да се предаде (транзитно да премине през мрежата). В международните препоръки е дефиниран като регенератор.
- * Крос-конект мултиплексор CCMX, показан на фиг. 5.20, който притежава възможност да променя направлението на потребителските потоци (да ги включва) по отношение, както на трибюторните портове, така и по отношение на агрегатните портове, (фиг. 5.20.а)). На фиг. 5.20.б) е показана структура с крос-конект функция само по отношение на агрегатните портове, която се прилага в мултиплексорите със скорост над 155,520 Mbit/s [34, 35].



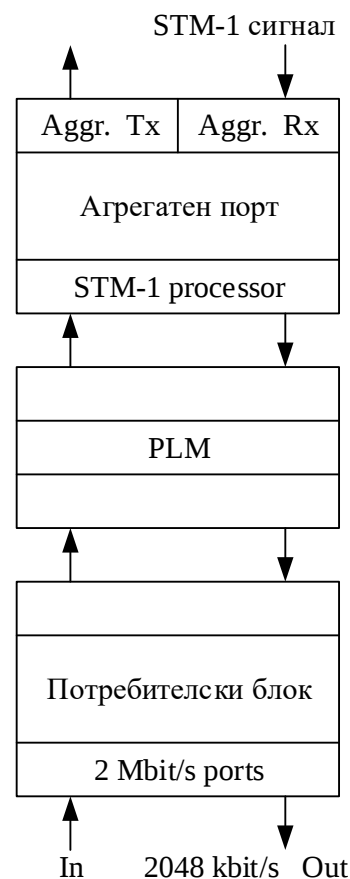
Фиг. 5.20. Крос-конект мултиплексор CCMX –
а) Трибютарни и б) агрегатни портове

Мултиплексор с подобни функции няма аналог в PDH и не се използва за повишаване на скоростта на потока на агрегатните си портове, а за пренасочване на потоци. На фиг.5.20а трибюторните портове са означени чрез стандарта G703 на ITU-T, който дефинира скоростите и електрическите параметри на PDH мултиплексорите.

- * Мултиплексорът за въвеждане/отделяне (add/drop) ADMX е показан на фиг. 5.21. Има два двупосочни агрегатни порта A(W) и B(E), на които могат да постъпват част от потоците, постъпващи на трибюторните входи (да се въвеждат/отделят). Част от нискоскоростните потоци директно преминават от единия към другия агрегатен порт (преминават транзитно през мрежовия елемент). Показаната функционална схема позволява както потоци от плезиохронната, така и от синхронната мрежа да се въвеждат/извеждат към/от оптичната мрежа чрез агрегатните портове [34, 35].



Фиг. 5.21. Мултиплексорът за въвеждане/отделяне (add/drop) ADMX

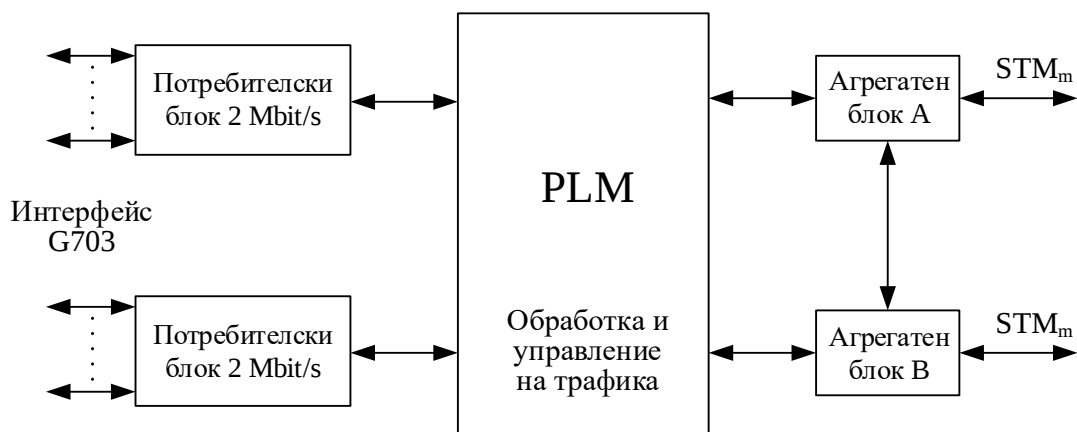


Фиг. 5.22. Синхронен мултиплексор

В зависимост от вида на нискоскоростните потоци, които постъпват в синхронните мултиплексори, последните се класифицират като:

- Мултиплексори с трибюторни сигнали, постъпващи само от PDH мултиплексори, (които са специфицирани чрез препоръка G 703) - фиг. 5.19.а), фиг. 5.20.а) и фиг. 5.21.
- Мултиплексори с трибюторни сигнали STM-N, постъпващи от SDH мултиплексори (препоръка G 707) – фиг. 5.20.б) и фиг. 5.21. На фиг. 5.22 е показана блоковата схема на синхронен мултиплексор, конфигуриран като краен (показана е връзката между трибюторния (потребителския) и агрегатен порт. Потребителския блок на 2 Mbit/s реализира функциите по адаптиране на пътя от по-ниско ниво. Портовете на агрегатния блок са двупосочни, а самият той реализира функциите по адаптиране на пътя от по-високо ниво, както и функциите по терминиране на процеса.

Чрез блока PLM – управление на товара е означен процесът на формиране на виртуалния контейнер VC-4 на STM-1 чрез процеса мултиплексиране – обединяване на потоците от по-нисък ред [2, 25, 29].



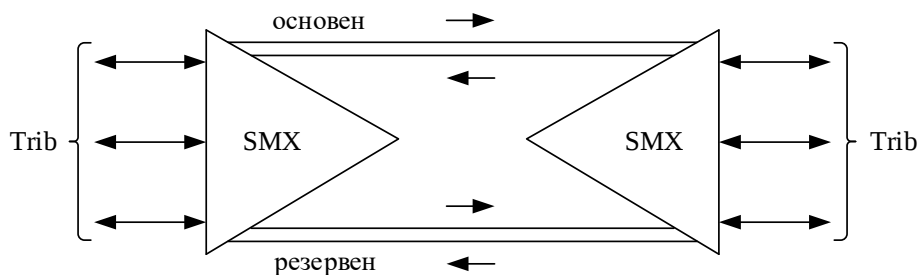
Фиг. 5.23. Мултиплексор за въвеждане /извеждане, обработващ потребителски потоци на скорост 2 Mbit/s

На фиг. 5.23 е показана най-обща блокова схема на мултиплексор за въвеждане /извеждане, обработващ потребителски потоци на скорост 2 Mbit/s. Агрегатните блокове са два: за порт А и за порт В и са двупосочни. Освен това между агрегатните блокове А и В връзката е двупосочна с цел осигуряване на информацията при повреда на преносния път – агрегатен порт или кабел. Информацията се използва за автоматична защитна комутация на преносния тракт [2, 25, 29].

5.6.3. Системни конфигурации

В зависимост от това, какви мултиплексори се използват, възможни са различни конфигурации на мрежата. Най-често използвания мултиплексор е за въвеждане/отделяне на канали, тъй като предлага различни мрежови топологии. Основните конфигурации са:

1. Конфигурация точка-точка – фиг. 5.24

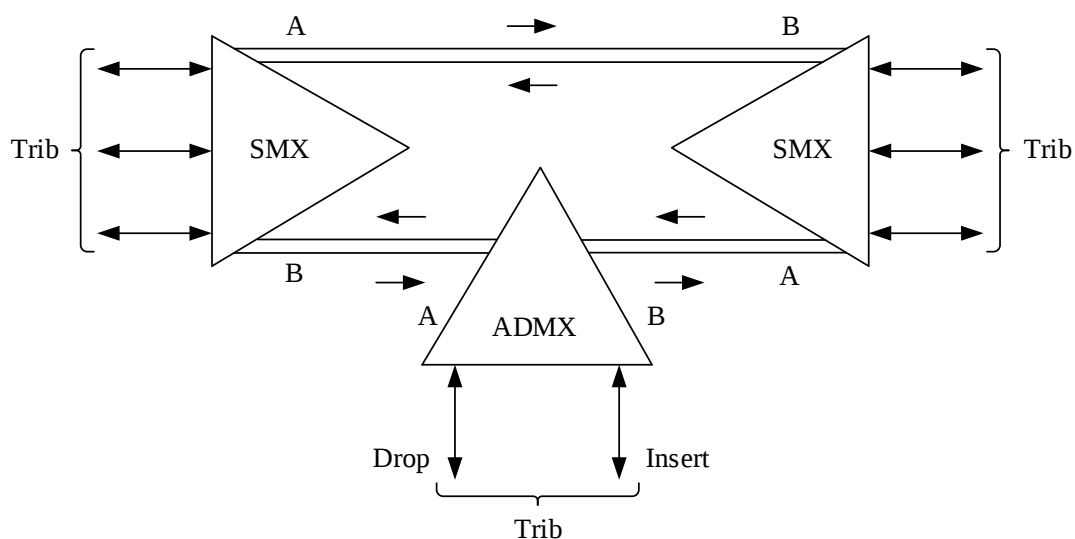


Фиг. 5.24. Конфигурация точка-точка

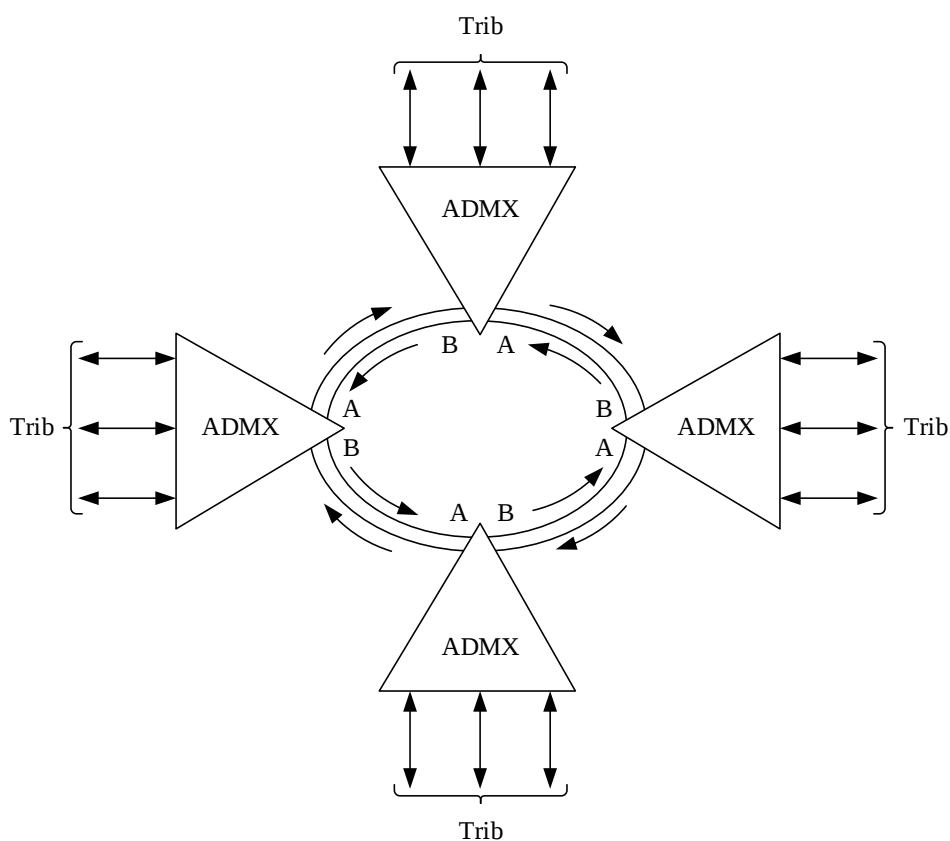
Синхронният мултиплексор е конфигуриран като краен SMX и работи като терминал в крайна станция. Най-често има два агрегатни порта – основен и резервен, работещи в присъщата за оптичните кабели защита 1+1. В тази конфигурация двата мултиплексора работят насрещно [34].

2. Конфигурация „верижна с въвеждане/отделяне на канали”

Мултиплексорите в двата края са крайни, използват по два агрегатни порта А и В с цел резервиране на преноса. Тази конфигурация позволява защита на пренасяната по оптичния път информация. В междинния възел се отделят/въвеждат трибюторни канали чрез ADMK – фиг. 5.25.



Фиг. 5.25. Отделяне/въвеждане на трибюторни канали чрез ADMX в междинния възел



Фиг. 5.26. Обръщане на посоката на предаване при прекъсване на оптичното влакно

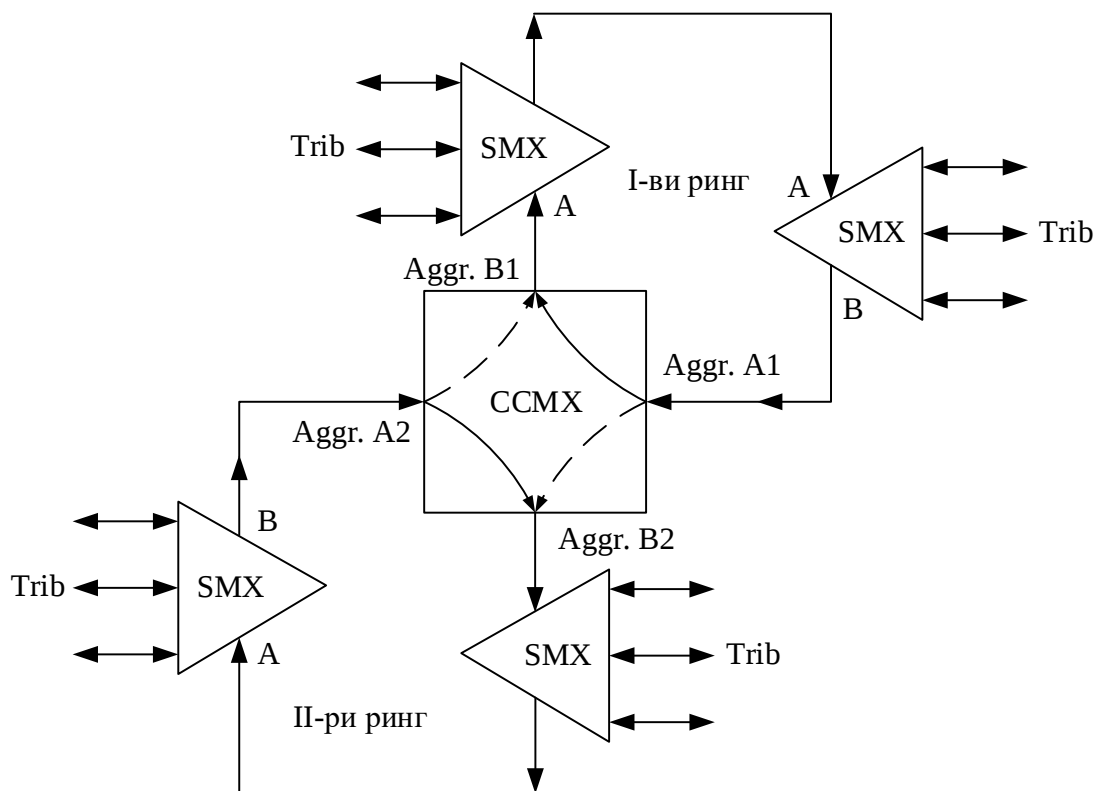
3. Конфигурация ринг с въвеждане/отделяне

Тази конфигурация е най-гъвкава и най-често се прилага мултиплексорите ADMX от типа въвеждане/отделяне са свързани в кръг чрез агрегатните си портове А и В. Всеки от тях е свързан към две оптични влакна. Този начин на включване дава възможност от всеки агрегатен порт да има по два пътя за пренос в ринга – основен в едната посока на обмен по едното влакно и резервен – в обратна посока по другото влакно. В случай, че се прекъсне основното оптично влакно в даден участък на ринга, посоката на предаване се обръща, като

се изключва от тракта дефектираният участък и се предава по резервното влакно – фиг. 5.26. Тази конфигурация е изключително надеждна [2, 25, 29, 34, 35].

4. Конфигурация „връзка между два ринга на мрежата”

Чрез един крос-конект мултиплексор CCMX един поток от I-ви ринг, постъпващ на неговия агрегатен порт Aggr.A1 се разделя, като част от него се пренасочва през Aggr.B2 към II-ри ринг, а останалата част от потока остава в същия ринг на мрежата. На другия между агрегатен порт Aggr.A2 постъпва поток от II-рия ринг и по този начин част от потока остава в него чрез агрегатния му порт Aggr.B2, а другата му част се пренасочва чрез Aggr.B1 в първи ринг, като се обединява с основната част от потока на ринга. Пренасочените потоци в CCMK мултиплексора са показани с пунктир на фиг. 5.27.



Фиг. 5.27. Пренасочени потоци в CCMK мултиплексора

По този начин, чрез един общ мрежов елемент – крос-конект мултиплексора се транзитират определен брой канали на ниво виртуален контейнер. Крос-конект функцията може да се реализира, използвайки размерност AU-4 на превключващата матрица, а също така и на ниво потоци от по-нисък ред например TU-12 [35].

5.7. Методи за управление и наблюдение на мрежата

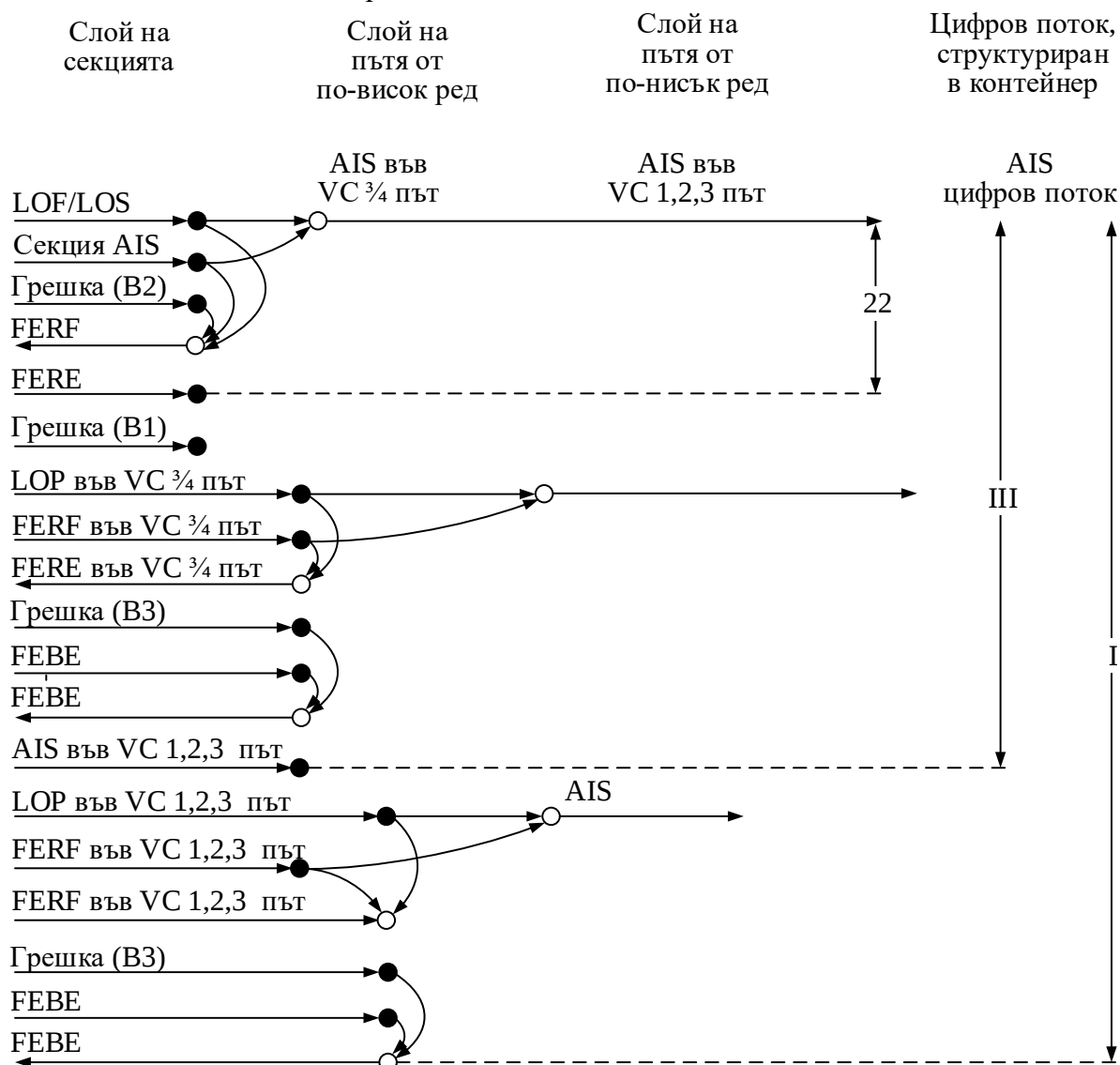
Каналите за управление, контрол и експлоатация на синхронната мрежа са изградени според концепцията за слоестата структура на мрежата. В заглавната страница на пътя РОН, както за по-ниските слоеве (скорости), така и за по-високите слоеве на пътя (байта G1 – обретен канал) се придвижват битове, респективно байтове, които пренасят информация за различни алармени състояния:

- Загуба на сигнал – LOL;
- Липса на приемане в далечния край – FERE;

- Наличие на грешка по четност – B3;
- Грешка по четност в далечния край – FERF;
- Загуба на цикъл – LOF;
- Загуба на поинтер – LOP.

Стратегията при организирането на алармената сигнализация в мрежата е илюстрирана на фиг. 5.28 и се дефинира по следния начин:

1. На всяко ниво в процеса на структуриране на рамката се откриват и регистрират изброените алармени състояния.
2. При откриване на алармено състояние се генерира сигнал за индикация на аларма AIS (съдържаща поток само от „1”), който се изпраща към следващото ниво.
3. В обратна посока се изпраща обединено алармено съобщение за уведомяване на далечния край (този който е причинил аларменото състояние) за възникналото алармено състояние – FERF и FERE.



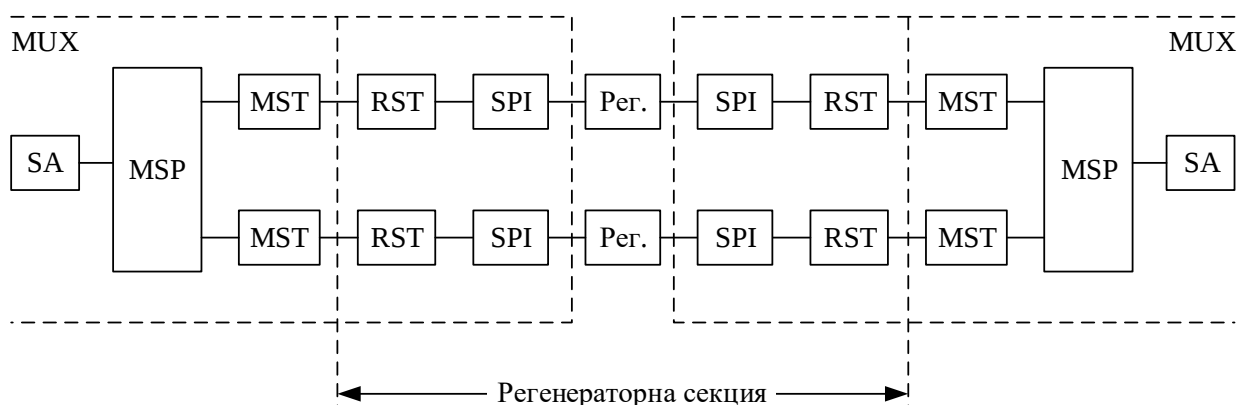
Фиг. 5.28. Стратегия при организиране на алармена сигнализация

По този аналогичен от PDH мрежата начин се уведомява (алармира) обслужващият персонал в двете посоки на обмен автоматично, като се използват наличните за тази цел канали. Независимо от това, в SOH съществуват допълнителни канали за поддръжане и управление на мрежата от оператор. Това са инженерните байтове E1 и E2, потребителският канал F1 и каналите за данни D1 до D12. За целите на управлението се използва мрежа за управление на телекомуникациите – TMN (Telecommunication Management Network), чрез която всъщност се постигат високите експлоатационни възможности за SDH мрежата [2, 25, 29, 34, 35]..

Различните видове синхронни мултиплексори изграждат отделни конфигурации в мрежата, а следователно те изграждат и различни нива. Според слоя, в който те работят, могат да откриват, обработват и генерират сигнали, както следва:

- Синхронен краен мултиплексор с трибюторен интерфейс от SDH мрежата, притежава възможността да оперира само с каналите в SOH;
- Синхронен мултиплексор за отделяне и въвеждане притежава възможността да оперира с канали в SOH и POH от по-висок ред – т.е. байтовете за алармени състояния;
- Синхронен краен мултиплексор с трибюторен интерфейс от PDH мрежата, притежава възможността да оперира с каналите в SOH, POH от по-висок ред и с POH от по-нисък ред, т.е. и с битовете за алармени състояния от нискоскоростни потоци.

Една характерна функция, която притежават мултиплексорите е да откриват повреди в линейния тракт, който е част от мрежата. При откриване на такава повреда се генерира т.нар. защитна комутация - функция, предназначена да защити информационния поток в повредения участък от мрежата. Принципът на защитна комутация е част от мрежовите функции по управление и експлоатация на мрежата, прилаган към частта от линейния тракт, заключен между две RST (преминавайки през физическия интерфейс SPI на MUX, регенераторите по линията и самия кабел) – фиг. 5.29 [36].



Фиг. 5.29. Принцип на защитна комутация

Функциите SPI и RST (Regenerator Section Termination), макар и извършвани от MUK, са предназначени да гарантират правилната работа на регенераторната секция (оперират с RSOH – генерирането и разполагането и).

Защитната комутация се прилага за всички съоръжения и функции между двойка MSP (защита на мултиплексната секция) в краищата на линейния тракт при отказ. Тя може да се извършва във формат 1+1, или (1:n), може да бъде едноръчна или двуръчна, обратима или необратима. На фиг. 5.29 е показана защитна комутация 1+1, която се реализира от блока MSP. Защитната комутация е обратима, защото защитената линия се връща в изходното си състояние автоматично след като се отстрани възникналата повреда по линията [2, 36].

Автоматичната защитна комутация като средство за увеличаване на надеждността на синхронната мрежа се постига чрез рингова архитектура на последната, при която чрез управляващите байтове K1 и K2 от SOH се променя пътят на цифровия поток по обходен маршрут (обръща се посоката на предаване) в случай, че е повреден участък от мрежата.

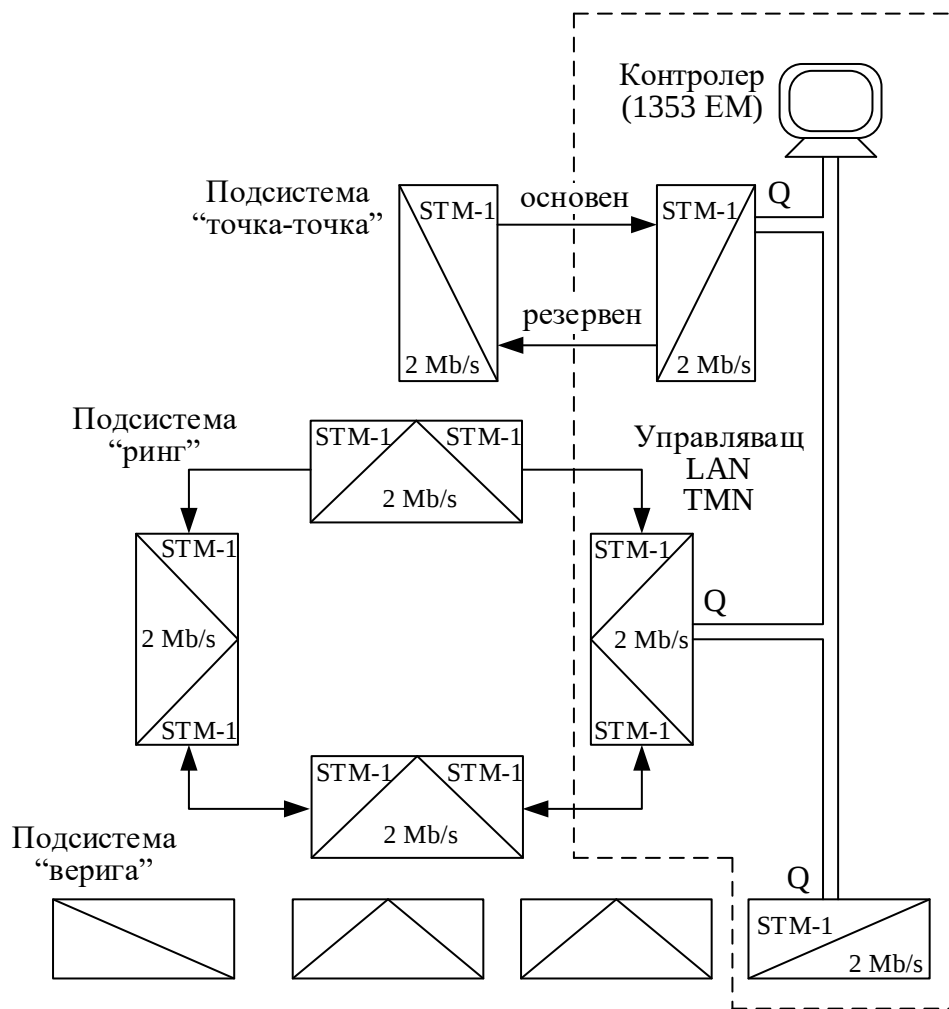
5.7.1. Системи за контрол и наблюдение на телекомуникациите – TMN

Цифровата мрежа се изгражда от различни типове конфигурации, респективно видове мултиплексори, както е показано на фиг. 5.30 от всяка конфигурация по един мултиплексор разполага с интерфейс Q, чрез който подсистемата (съответната конфигурация) получава достъп до централизирано управление на телекомуникациите – TMN. Тази система е изградена от работна станция и управляващ сървър, които са означени на схемата като контролер, и мрежови елементи, които са съответните мултиплексори от TR мрежа.

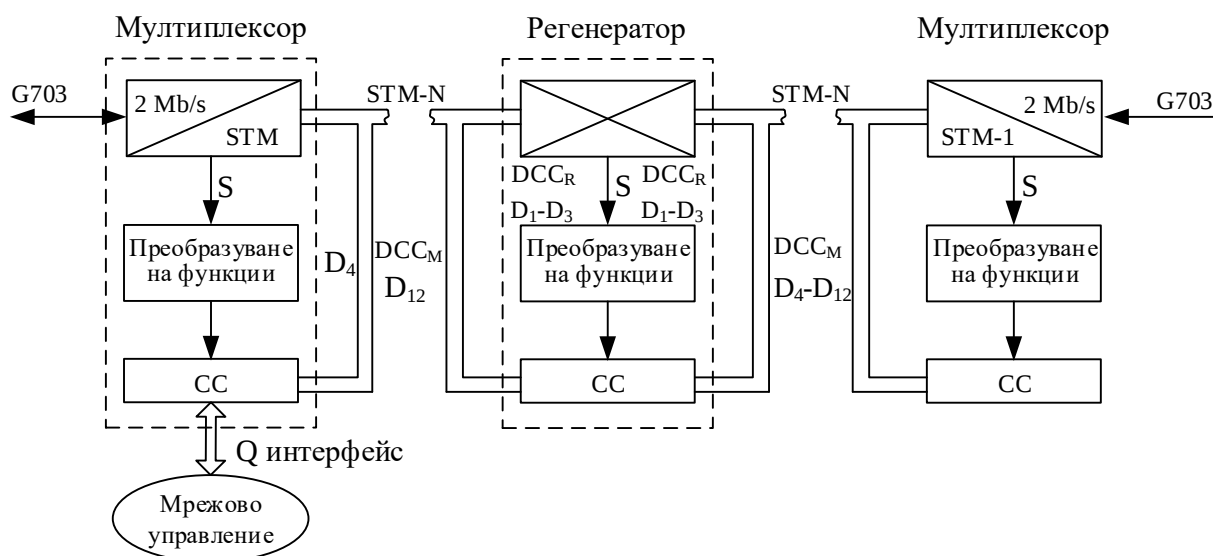
На фиг. 5.30 е представен един опростен модел на управляваща телекомуникационна локална мрежа (LAN), чрез която се обменя информация за централизирано наблюдение, контрол и управление на цифровата синхронна мрежа (оградена с пунктир). Най-важните функции на TMN са:

- Поддържане на мрежовата конфигурация;
- Експлоатационен контрол на състоянието на всички компоненти на SDH мрежата.

Управляващите съобщения (команди от оператор) и статуса на появилите се аларми в мултиплексните системи се пренасят по Q-интерфейса чрез каналите за данни D1-D12 от SOH на STM – m. Q интерфейсът формира следователно връзката между ОН – управляващата информация на мрежовите елементи от цялата ТК мрежа и контролерът (централната станция). По този начин се изгражда система за дистанционно управление на тази мрежа (TMN) [2, 25, 29].



Фиг. 5.30. Опростен модел на управляваща телекомуникационна локална мрежа



Фиг. 5.31. Механизъм на обмен на информация между мрежовите елементи на TMN и мрежовото управление

На фиг. 5.31 е показан механизмът на обмен на информация между мрежовите елементи на TMN и мрежовото управление. То се извършва чрез управляващите канали за данни – DCC, използвани за управляващи мрежови функции, формирани от функционалния блок управление на комуникациите CC.

Алармите и управляващите сигнали от мултиплексорите и регенераторите са достъпни в точките за контрол S. Чрез преобразуване на функциите, тези сигнали се трансформират в обектово-ориентирани съобщения. Посредством блока за управление CC тези съобщения се предават чрез каналите DCC за обмен на данни и се предават в ТК мрежа като байтове D1-D12 от SDH. В интерфейлната точка Q информацията се обменя посредством мрежа за управление.

В България е изградена мрежа за управление на цифровата преносна йерархия, чрез която се контролират всички съоръжения, включени на територията на цялата страна. Централната работна станция се намира в София, в Националния център за управление на ТК мрежа [32-36].

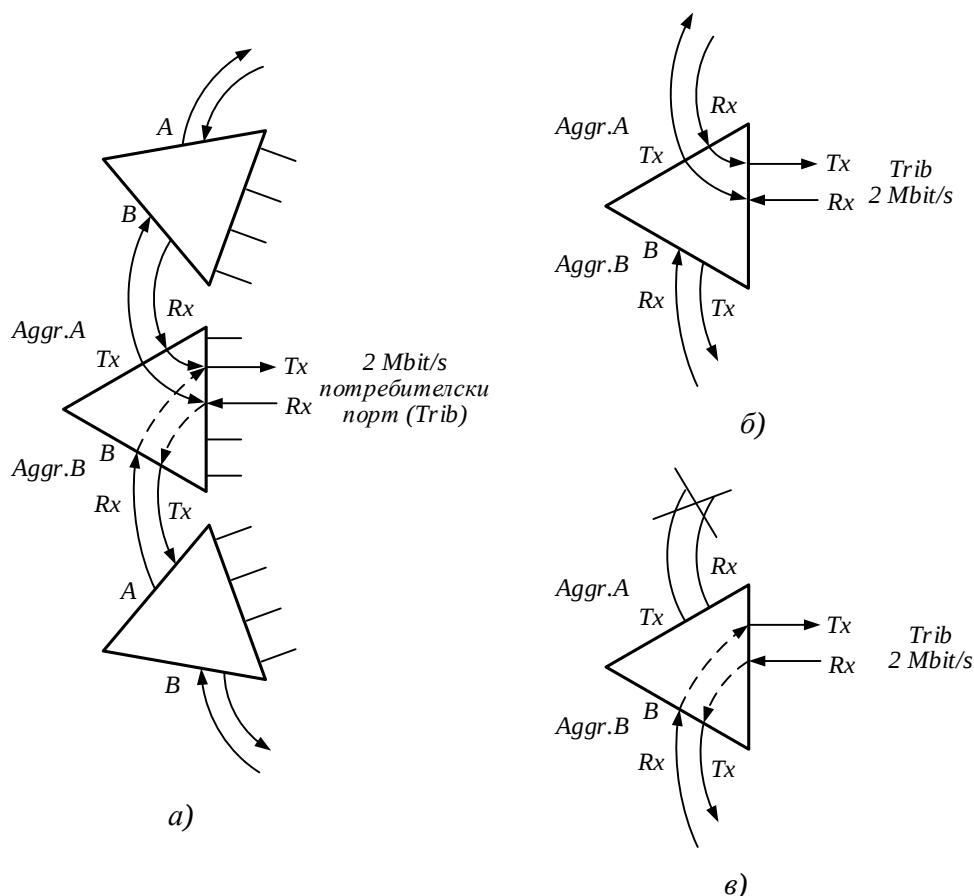
5.8. Синхронни мултиплексори за въвеждане/извеждане

За изграждане на синхронната цифрова мрежа се използват мултиплексорите за въвеждане/извеждане (ADMX-Add/Drop Multiplexer) на цифрови потоци, чрез които се осъществява връзката с потребителите. Чрез тях се извършва пренос на цифрова информация със скорост, съответстваща на конкретната STM – N на съответното магистрално трасе, съответно за STM-1 на 155 Mbit/s, за STM-4 на 622 Mbit/s и т.н. Мултиплексорите могат да обслужват трафик (да въвеждат, извеждат и пренасят цифрови потоци) както на обществената комутируема мрежа (PSTN – Public Switch Telephone Network), така и на мрежи на частни оператори, корпоративни мрежи за предаване на данни и др.). Най-често те са конфигурирани в ринг. Както се изтъкна, най-използваният ADMK е първичният за SDH мрежата на скорост 155, 520 Mbit/s.

Агрегатните портове на мултиплексора са двупосочни и съгласно схемата на фиг. 5.32.а) се характеризират със следното действие:

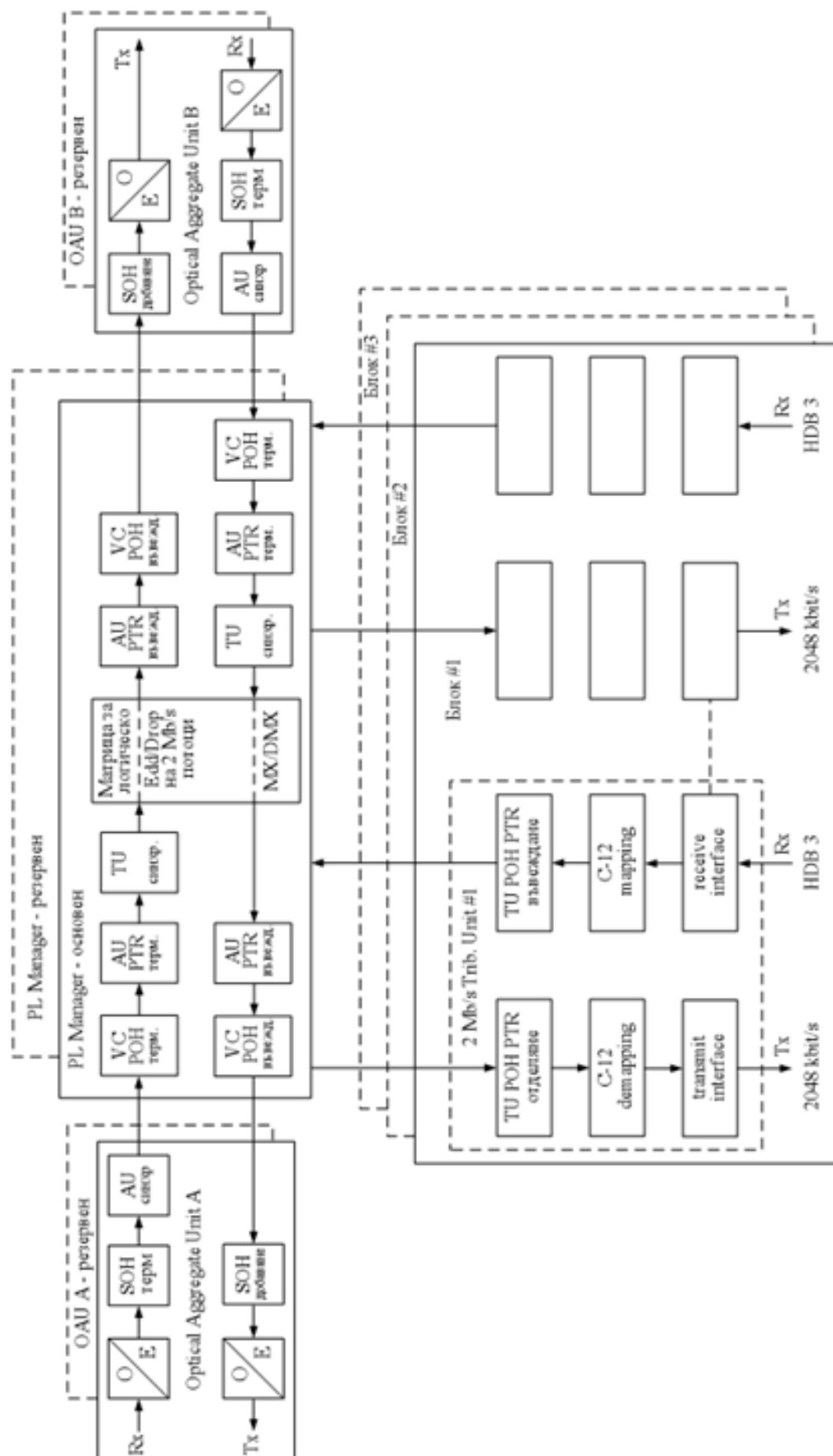
1. Трафикът е двупосочен за всеки агрегатен порт поотделно – Tx (transmit) – предавателна посока и Rx(receive) – приемна посока. Когато сигналят на ниво 2 Mbit/s (също двупосочен – Tx и Rx) постъпи от физическия 2 Mbit/s порт, той се „въвежда”(съответно „извежда”) в /от STM рамката, като съответно Tx част се насочва към Rx посоката на избрания агрегатен порт (примерно A), а неговата Rx част се насочва към Tx посоката на същия (A).
2. ADM мултиплексорите дават възможност за защита на трафика при конфигуралния ринг, като потребителският 2 Mbit/s поток може да бъде конфигуриран и в двете агрегатни посоки (A и B). Едната (в показания случай A) е избрана за основна и трафикът по разглежданата 2 Mbit/s група по принцип минава през този агрегатен порт (A). При прекъсване на оптичното влакно от страната на агрегатен порт A, се задейства резервната (spare) посока (в случая към агрегатен порт B), показана с пунктир на фиг. 5.32. б).

В резултат трафикът по разглежданата 2Mbit/s група е защитен (той се превключва от основната (А) към резервната (В) агрегатна платка – фиг. 5.32.в), като това става посредством механизма на автоматичната защитна комутация, заложен хардуерно и софтуерно (чрез байтовете K1 и K2 от MSON) в мултиплексора.



Фиг. 5.32. Агрегатни портове на мултиплексора а), задействане на резервната посока при прекъсване на влакното от агрегатен порт А и превключване на трафика от основната (А) към резервната (В) агрегатна платка в)

На фиг. 5.33 е показана блоковата схема на Add/Drop мултиплексор с рамка STM-1. Схемата пояснява начина, по който се направлява трафика между отделните портове (входове), както и модулната конструкция на устройството, която е заложена при създаването на SDH мултиплексорите [35, 37].



Фиг. 5.33. Блоква схема на *Add/Drop* мултиплексор с рамка STM-1

Основните блокове са:

- Оптичен агрегатен (мрежов) блок OAU. За връзка с мрежата е изпълнен в два броя – съответно за порт А и за порт В с еднакви функции. Интерфейсът е оптичен със скорост на потока 155 Mbit/s и е двупосочен. Посредством него се реализира връзката с оптичните влакна. Основните функции на този блок са: терминиране на високоскоростния поток – прибавяне, респективно отделяне от/към потока на SOH; синхронизиране – изравняване на тактовата честота на запис с тази на четене; линейното оптично кодиране с предшестващото скрембиране на цифровата информация, съгласно изискванията на препоръка G707.
- Трибюторен (потребителски) блок 2 Mbit/s. За реализиране на пълен физически достъп до STM-1 рамката са необходими определен брой трибюторни блокове, които да осигурят 63 на брой портове на скорост 2 Mbit/s. В един трибюторен блок 2 Mbit/s могат да бъдат разположени различен брой двупосочни интерфейсни входове/изходи за скорост на потока 2 Mbit/s, според конкретното фирмено изпълнение на ADM-а. В случая върху един блок са реализирани 21 броя потребителски единици TU, а блоковете са общо 3 на брой ($21 \times 3 = 63$). Функциите на всеки трибюторен блок са нисък ред – до създаването на TUG-2, както и интерфейсно преобразуване (линейно кодиране/декодиране съгласно G703) и обработка (изравняване и маршрутизация) на входящия/изходящия потребителски потоци.
- Блок за управление на полезната информация (товара) PL-Manager.

Функциите на този блок се свеждат главно до: мултиплексиране и демултиплексиране на постъпилите от трибюторните блокове потоци за достигане на скоростта на VC-4 и въвеждане (за предаване) или обработване (за приемане) на PTR-4 и 9-байтовия POH. По същество това са функции от висок ред (виж раздел 5.6.1). Освен това този блок съдържа матрица, чрез която определен брой канали, постъпващи в определен тайм – слотове се въвеждат/отделят логически към/от трибюторните блокове, а останалите канали се транзитират от агрегатен брой А към агрегатен блок В или обратно, съответно за едната или другата посока на обмен.

В един ADM има два управляващи товара блока PL-Manager основен и резервен. Мултиплексирането и демултиплексирането се извършва в основния блок, а ако той се повреди, резервният незабавно и автоматично поема неговите функции [35-37].

Принципът на работа на ADM се характеризира със следните пътища на трафика, показани на схемата със съответните пунктирни линии:

1. Мултиплексиране – от потребителски вход Rx към агрегатен изход Tx.
2. Демултиплексиране – от агрегатен вход Rx към потребителски изход Tx.
3. Препредаване (транзитиране) – от агрегатен вход Rx(A) към агрегатен изход Tx(B).

Освен всичко това, мултиплексорът съдържа още три важни модула, които не са изобразени на схемата:

- * Системен контролер, чийто важни функции са:

- Връзка между вградените блокове и координация на работата им с цел контрол на състоянието им и генериране на локална аварийна сигнализация или нарушаване на правилната им работа;
 - Зареждане на софтуера в паметта на всеки от изброените вградени блокове (при начално запускане или изключване на захранването на мултиплексора);
 - Управление на превключването на резервен блок при повреда;
 - Поддържане на интерфейсите на управление Q-дистанционно към TNM и F-към локален терминал за конфигуриране и преконфигуриране на мултиплексора;
 - Обработване на някои байтове от ОН, като например байтовете D(шината DCC).
- * Задаващ генератор, който също е дублиран и има следните функции:
- Задава необходимите тактови честоти за работа на всички останали блокове с необходимата относителна нестабилност на честотата;
 - Възможност да работи в режими на свободна генерация, на принудителна (от външен източник) синхронизация и в режим на удържане (след загуба на външния синхронизиращ сигнал).
- * Захранващ блок, в това число и блок за резервно захранване [35-37].

ГЛАВА VI

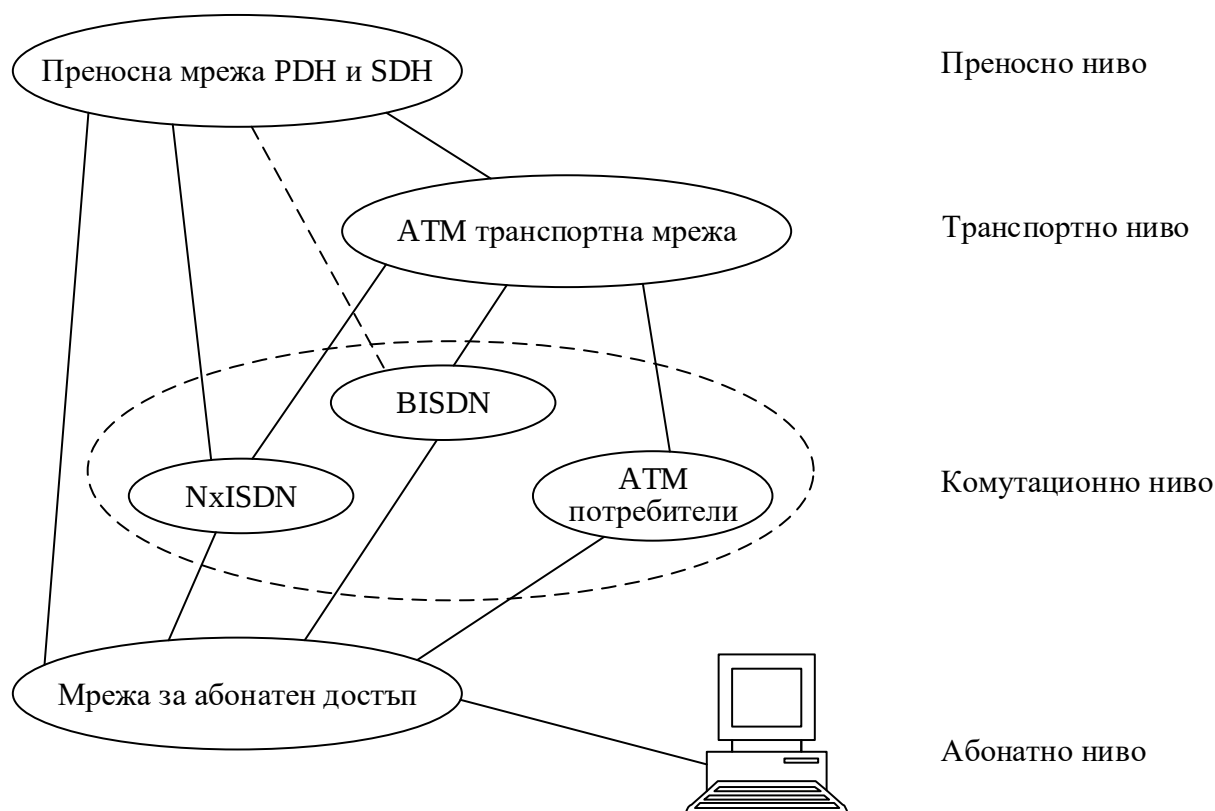
МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ В АБОНАТНАТА МРЕЖА

6.1. Технологии за абонатен достъп

Абонатната мрежа свързва абонатните терминали с комутационните възли – селищните централи. Тя е най-скъпо струващата част на ТК мрежа. Делът на инвестициите ѝ е около 50% спрямо общия обем инвестиции в комуникациите. В настоящия момент абонатната мрежа се базира на вече положените телефонни кабели със симетрични двойки, при това със запълнена кабелна канализация. От друга страна кабелната преносна мрежа е с най-дълъг експлоатационен живот спрямо всички други съоръжения в мрежата.

Модерната цифрова мрежа за достъп до абоната предполага терминално устройство, което извлича информацията на високи скорости, предава различни видове данни, осъществява интерактивни разговорни и видео връзки, високоскоростен трансфер на документи (файлове), муйлтимедийна поща и т.н. Изброените услуги изискват преносен капацитет в диапазона от 2Mb/s до 140 Mbit/s, което значително надхвърля скоростта на основния цифров поток 64 Kbit/s, използван в теснолентовите цифрови телефонни услуги.

Структурата на съвременната телекомуникационна цифрова мрежа е показана на фиг. 6.1 и отразява връзките между потребителя на изброените услуги и съответните нива в телекомуникационната мрежа, които обаче преминават през изградената до сега инфраструктура на обществената абонатна мрежа (наричана мрежа за абонатен достъп), независимо, че вече се изграждат и други абонатни линии – оптични, коаксиални и др. [38]



Фиг. 6.1. Съвременна телекомуникационна цифрова мрежа

В теснолентовия ISDN абонатните терминали (телефон, РС и др.) се включват към мрежата чрез т.нар. В-канална структура на интерфейсите. Един В-канал има скорост на предаване 64

Kbit/s. По отношение на скоростта на предаване са стандартизирани два интерфейса за достъп:

- базов достъп – $2B+D$, където D каналът е на скорост 16 Kbit/s и служи за изграждане на връзката (сигнален канал) между ISDN мрежата и абоната;
- първичен достъп, който използва канална структура $30B+D$, където $B=D=64$ Kbit/s. Този интерфейс по същество стандартизира първичния 2Mbit/s поток като стандартен за цифровите мрежи с интеграция на услугите.

Технологиите за абонатен достъп са развити на базата на посочените стандарти. Използвайки стандарта за базов достъп 64 Kbit/s са разработени така наречените абонатни уплътнителни системи, чрез които по една абонатна линия се предават N на брой канали със скорост 64 Kbit/s. Първоначално произвежданите и въведени в експлоатация абонатни уплътнителни устройства използват принципите на стандартната ИКМ. Те са предназначени основно за предаване на телефония и се използват за цифровизирана връзка по абонатна линия до 6,6 км.

Използвайки стандарта за първичен достъп на скорост 2 Mb/s са създадени така наречените модеми за ширококоловен достъп, предлагащи все по-усъвършенствани и по-високоскоростни принципи на работа абонатни, а по-късно и по-соединителни линии. Показаните на фиг.6.1 с пунктир връзки реализират цифровите ширококоловни услуги, чрез които абонатите на телекомуникационната мрежа получават достъп до абонатната мрежа към ATM и SDH опорните мрежи. В отговор на потребностите от новите високоскоростни услуги се появиха и нови технологии за реализацията им, които отчитат икономичното интегриране на модерните цифрови системи със съществуващата инфраструктура, базирана на медната абонатна мрежа. Наричат се с общото наименование xDSL.

Тези технологии, използвани в обществената абонатна мрежа или във високоскоростните корпоративни мрежи свързват всички потребители с опорната обществена мрежа за традиционни комутационни услуги. Освен това поддържат и скорости за предаване на пакетна комутация (Frame Relay), комутируеми мултимегабитни услуги за данни SMDS (Switched Multimegabit Data Service), ATM, данни между локални мрежи LAN-LAN и др.

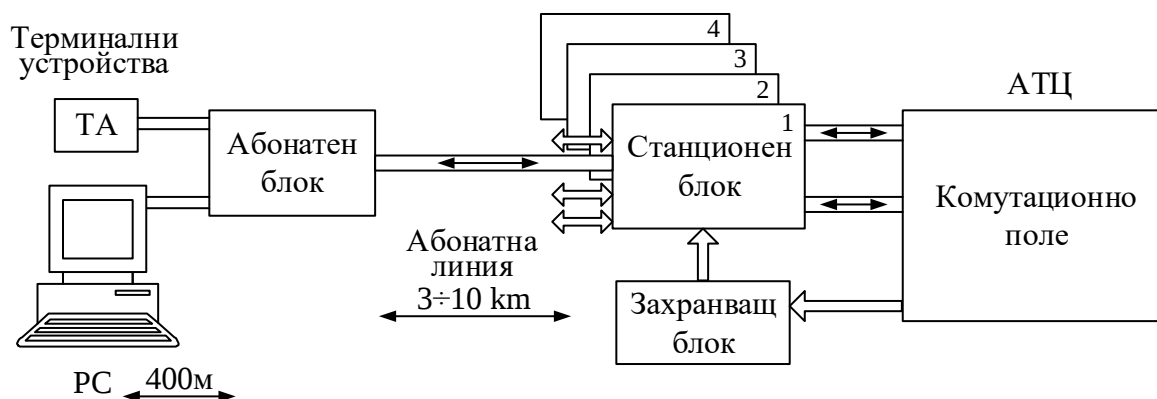
Затихването, внасяно от телефонните кабели и преходните влияния между цифровите рязко нарастват за честоти над 0,2 – 0,3 Mbit/s. Следователно сигналите, посредством които се предават цифровите потоци по абонатната мрежа трябва да имат висока ефективност на използване на честотната лента. Както беше изяснено в подраздел 6.4., това се постига чрез използване на многонивовите кодове, които позволяват многократно намаляване на тактовата честота на пренасяния по абонатната линия сигнал. По този начин се стеснява честотната лента на сигнала и съответно може да се увеличи разстоянието на предаване.

В много от случаите освен използването на стандартната ИКМ се предлагат и модуляции от вида: диференциална DPCM и адаптивно- диференциална ADPCM импулсно– кодови модуляции, както и делта модулацията. Главната цел на тези модуляции е при цифровизирането на сигнала, скоростта да се намали спрямо стандартната скорост 64 Kbit/s. Чрез посочените модуляции скоростта на цифровия сигнал може да достигне до 32, 16 или до 8 Kbit/s. В препоръка G.712 на ITU-T са изложени методите (кодиращи и декодиращи устройства) за реализиране на ADPCM. Освен това са стандартизирани и схеми на транскодери, чрез които се преобразува един модулиран със стандартната ИКМ сигнал на скорост 64 Kbit/s на по-ниска скорост и обратно [38, 39].

6.2. Мултиплексирани устройства за абонатни линии

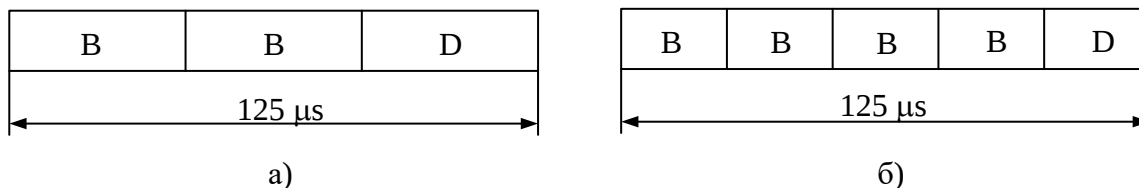
Въз основа на интерфейса за базов достъп са разработени устройства за уплътняване на абонатните линии с цифрови канали, които се наричат PCM-N ($N = 2,3,4,8,12$). Наричат се още абонатни уплътнители. Идеята на тези устройства е чрез два функционални блока (абонатен и станционен) да се изгради цифрова връзка от терминалното устройство на

абоната до централата, без да се използва регенератор. На схемата от фиг. 6.2 е показана връзка между абонатен блок за две терминални устройства (PCM-2) и АТЦ, като в централата се монтират устройства (станционен блок, обикновено за до 4 или за до 8 абонатни линии), чрез които се разделят (демултиплексират) каналите за двата терминала, в случая телефонния апарат и РС.



Фиг. 6.2. Връзка между абонатен блок за две терминални устройства (PCM-2) и АТЦ

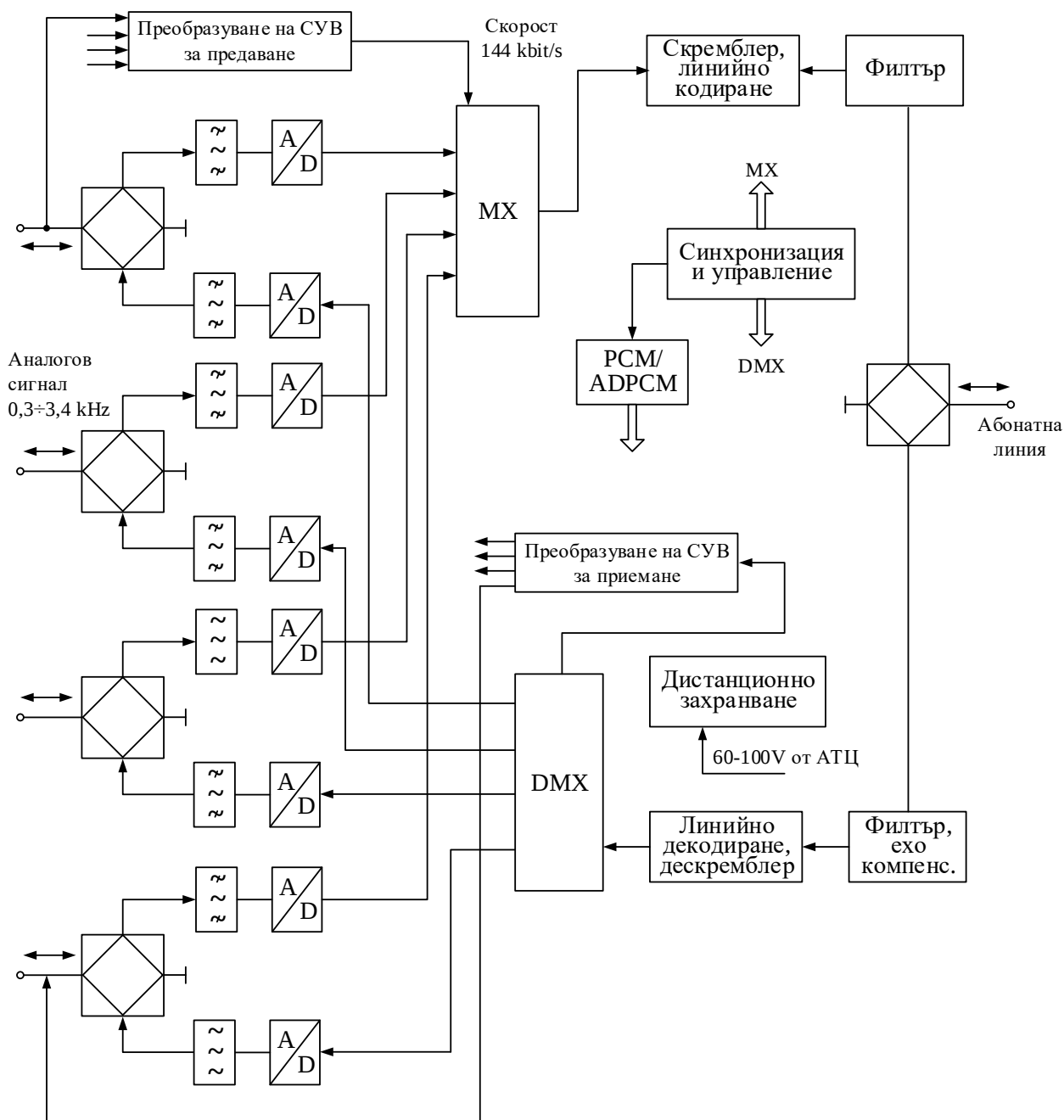
На схемата със стрелки е изобразена двупосочната връзка за двата канала на скорост 64 Kbit/s между станционния блок и комутационното поле само за една абонатна линия. Структурата на цифровия информационен сигнал, пренасян по абонатната линия е показан на фиг. 6.3.а) и е на скорост $(2 \times 64 + 16)$ Kbit/s = 144 Kbit/s.



Фиг. 6.3. Структура на цифровия сигнал а) пренасян по абонатна линия и б) за четири канален мултиплексор за абонатна линия PCM-4

На фиг. 6.3.б) е представена структурата на цифровия сигнал $(4B + D = [4 \times 32 + 16])$ Kbit/s = 144 Kbit/s) за четириканален мултиплексор за абонатна линия PCM-4. Използвайки адаптивна диференциална ИКМ, скоростта на цифровия сигнал се намалява до 32 Kbit/s (или до 16 Kbit/s за PCM-8), като по този начин се намалява скоростта на всеки информационен канал за сметка на броя на каналите в цифровия групов сигнал [39, 40].

На структурната схема от фиг. 6.4 е пояснено функционирането на един станционен блок, изграден с аналогов вход/изход към комутационното поле. Трябва да се подчертае, че действието на абонатния блок има аналогично действие и схемата му е огледално изображение на този от фигурата спрямо абонатната линия. Освен това мултиплексиращите устройства за абонатните линии са многофункционални устройства, изградени на модулен принцип, позволяващи комплектация и съответно функциониране според конкретното приложение, т.е. да уплътняват с различен брой канали дадена абонатна линия, както и различен брой абонатни линии в дадено направление на мрежата. Това означава, че преди пускането им в експлоатация те се конфигурират след съответната комплектация и монтиране.



Фиг. 6.4. *Функционирането на един станционен блок, изграден с аналогов вход/изход към комутационното поле*

Главното им предназначение е да се повиши телефонната плътност на абонатната мрежа без допълнителни разходи за монтажа на абонатни линии [40, 41].

6.3. xDSL технологии

Една от първите технологии xDSL, обезпечаваща първичен достъп към цифровата мрежа с интеграция на услугите HDSL (високоскоростна цифрова абонатна линия). HDSL – технологията в европейския си вариант позволява реализация на дуплексно предаване на потоци по два чифта от градската телефонна мрежа на скорост 2048 Mbit/s. Разстояние на предаване без регенерация на цифровия сигнал при $d=0,8$ mm на проводника може да

достигне до 10 км, като се използват и повече от един чифт проводници за предаване в едната посока.

Технологията SDSL предлага симетрични услуги по един чифт (Single Pair DSL): симетрично предаване на данни на няколко скорости (от 160 Kbit/s до 2048 Mbit/s), като поддържа и телефонна услуга по същия чифт. Прилага се за фракционно предаване на T1/E1, комутируем достъп, достъп до LAN, обучение от разстояние, достъп до Internet, ISDN BRI. Чрез прилагане на CAP кодирането и специално разработен чип със свръхголяма степен на интеграция, SDSL предава данни симетрично (в двете посоки) без регенерация на разстояние до 2,4 км за скорост 2048 Mbit/s с POTS и до 2,7 км без POTS, както и до 6,9 км с POTS за скорост 160 Kbit/s при диаметър на проводника 0,5 мм.

Технологията ADSL е разработена като асиметрична цифрова абонатна линия главно за организиране на достъп до Internet мрежи. Работейки с интернет, потребителят обикновено приема значително по-голям обем информация, отколкото предава сам към мрежата, поради което пропускателната способност на абонатната линия се разделя между двете направления асиметрично. Технологията ADSL (Asymmetrical DSL) е проектирана да допуска в посока на предаване от мрежата към абоната до 6 Mbit/s и до 0,64 Mbit/s от абоната към мрежата. Принципът на ADSL се основава на предаване на високоскоростен цифров поток над спектъра на нискочестотния телефонен канал, при това този поток е разпределен върху голям брой подканални с разделянето им по честота. Разстоянието на пренасяните данни в двете посоки е до 3,5 км по проводници с диаметър 0,5 мм.

Стойността на фактическата скорост на предаване на ADSL може да се адаптира към конкретни параметри на абонатната линия. Тази технология се нарича RADSL (Rate Adaptive DSL). Скоростта на предаване се избира чрез използване на синхронизиращ сигнал, извлечен от линията (от абонатното устройство) по време на връзката или от сигнал, предаван от станцията (мрежовото устройство). По този начин скоростта автоматично се променя според дължината на линията и според моментното състояние на медната двойка. При използване на усукана двойка и автоматично адаптиране към параметрите на линията, скоростта може да достигне от 1 Mbit/s до 8 Mbit/s при 5,5 км разстояние на предаване.

VDSL (Very Hite Bit-rate DSL), която осигурява скорост на предаване на данните в посока към абоната до 6,5 Mbit/s, а в посока от абоната към мрежата скоростта е до 52 Mbit/s за асиметричния вариант. Разработен е и вариант, при който в посоката към абоната скоростта е до 26 Mbit/s и е регламентиран като симетричен VDSL. Технологията VDSL е предназначена за доставяне до абоната на цифрови потоци по кабели с метални жила при частично изградена мрежа с оптични кабели. Технологията може да се разглежда като икономична алтернатива на влакнесто-оптичната връзка до крайния потребител, при това по една усукана медна двойка. Максималното разстояние на предаване по усукана двойка е до 1300 м, което означава, че оптичният кабел трябва да е доведен до крайните потребители на тази услуга (близо до сградата или квартала). Използва се за предаване на мултимедия и видео до поискване. Постигането на тези разстояния е възможно благодарение на CAP – линейното кодиране [40, 41].

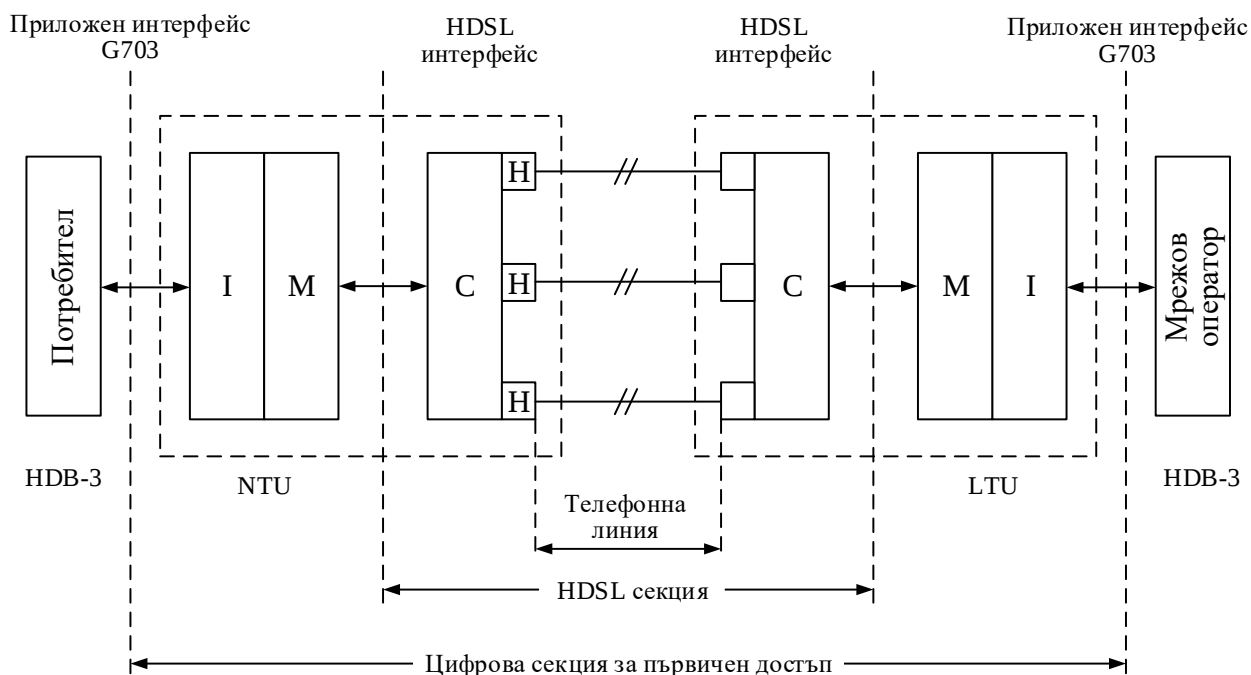
6.3.1. HDSL модеми

Тези модеми са предназначени да пренасят цифрови потоци на 2 Mbit/s по симетрични чифтове. HDSL модемите са най-ранно разработената технология за ширококолов достъп в цифровата мрежа. Те могат да работят по 1,2 или 3 кабелни чифтове, в зависимост от това какво е максималното разстояние на предаване.

Устройствата (модемите) в двата края на линията се наричат:

- линейно крайно устройство LTU, което се монтира при мрежовия телекомуникационен оператор и главно (Master) устройство;
- мрежово крайно устройство NTU, което се монтира при потребителя и се нарича подчинено (Slave) устройство.

На фиг. 6.5 е дадена функционалната блокова схема на цифрова секция за реализация на първичен достъп между потребителя, изискващ скорост на обмен 2048 Mbit/s към абонатната мрежа, и оборудването на мрежовия оператор. Схемата реализира предаване по три абонатни чифта. Интерфейсът в двата края на цифровата секция за първичен достъп се нарича потребителски и е регламентиран чрез препоръка G703 на ITU-T [41].



Фиг. 6.5. Блокова схема на цифрова секция за реализация на първичен достъп между потребителя и оборудването на мрежовия оператор

Цифровият сигнал е кодиран (най-често чрез линейния код HDB-3) според препоръката за тази скорост. Блоковете на NTU и LTU са идентични по функции, като според означенията имат следното предназначение:

- I – реализира интерфейса с потребителя или с мрежовото оборудване на скорост 2048 Mbit/s;
- M – реализира разделянето на цифровия 2048 Mbit/s поток на 2 или 3 потоци (според предназначението си) и структурирането им в по-нискоскоростни потоци;
- C – реализира управляващи функции по форматиране на HDSL рамката (прибавяне на заглавни страници, синхронизираща информация, изравняване);
- H – приемо-предавател, който е предназначен за обмен на HDSL сигнала по медния кабелен чифт. Броят на приемо-предавателите е 3. Те могат да работят в конфигурация от 1 до 3 в зависимост от това по колко чифта се предава (т.е. какво е разстоянието между модемите).

Съществуват два възможни режима на предаване на модемите:

1. Неструктуриран, в който данните от 2048 Mbit/s потока се предават прозрачно през HDSL секцията, общото канално сигнализиране се предава във ВИ16, но се следи за цифрова грешка и за загуба на цикловия синхронизъм в първичния поток;
2. Структуриран, който позволява да се фиксират всички времеви интервали на първичния поток от HDSL устройствата. В този режим се следи ВИ0 (синхронизиращият код) и синхронизацията по цикъл е възстановима при загуба. Освен това се контролира потока за възникване на грешки чрез CRC-4.

Този режим на работа дава съществено преимущество по отношение на организиране на предаването по два или по три чифта едновременно.

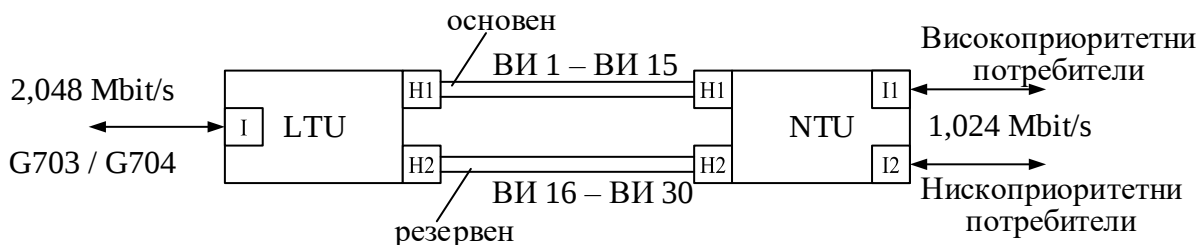
При предаване по три чифта едновременно потокът се разделя на три отделни потока, чиято скорост се намалява почти 3 пъти, а разстоянието на предаване с използване на CAP-линейно кодиране достига до 10 км. В този режим по всеки чифт се организира отделна рамка с нова синхронизираща дума.

Времевите интервали (каналите) от първичния поток, съдържащи потребителска информация се отделят като:

- ВИ 1,4,7,10.....29 формират първия поток за първия чифт (изход H1);
- ВИ 2,5,8,11.....30 формират втория поток за втория чифт (изход H2);
- ВИ 3,6,9,12.....31 формират третия поток за третия чифт (изход H3);

Времевите интервали ВИ0 (за синхронизация) и ВИ16 (за сигнализация) се въвеждат съответно като нулев (ВИ0) и като ВИ7 в новосформираните цикли на трите нови потоци, които съдържат по 10 потребителски канали (потоци) на скорост 64 Kbit/s. При този режим на работа всички времеви интервали, респективно потребителски канали са равно достъпни и с еднакъв приоритет на достъп към телекомуникационната мрежа

- Структурираният режим позволява организиране на предаване и по два чифта. При подобна организация на връзката между потребителите и мрежовото оборудване – фиг. 6.6., потребителските канали се разделят (конфигурират) на високоприоритетни (постъпващи във времеви интервали от ВИ1 до ВИ15 на първичния поток) и на нископриоритетни потребителски канали (постъпващи във времевите интервали от ВИ16 до ВИ30 на първичния поток). Във високоприоритетния и в нископриоритетния поток се въвеждат освен това и каналите от ВИ0 и ВИ16 на първичния поток. За всеки поток с номинална скорост 1024 Kbit/s се структурира нов собствен цикъл с друга синхронизираща комбинация. При прекъсване на предаването по високоприоритетния чифт, незабавно неговият поток се прехвърля по втория, използван като резервен, а нископриоритетният е възможно да се забави или изобщо да не се предаде, ако прекъсването е по-голямо от определено време [38, 39, 41].



Фиг. 6.6. Разделяне на потребителските канали на високоприоритетни и нископриоритетни

Тази процедура е аналогична на ASP процедурата от SDH мултиплексорите и позволява да се увеличи сигурността на пренасянето на цифровата информация в абонатната мрежа за определена категория абонати.

Рамката на HDSL устройствата съдържа освен потребителска информация (данни) и следната информация, която управлява процеса на обмен в HDSL секцията:

- Синхронизираща последователност;
- Заглавна информация;
- Контролна сума за защита от грешки;
- Сигнал за индикация на аларма AIS;
- Битове за изравняване;
- Битове за промяна на номиналната носеща честота;

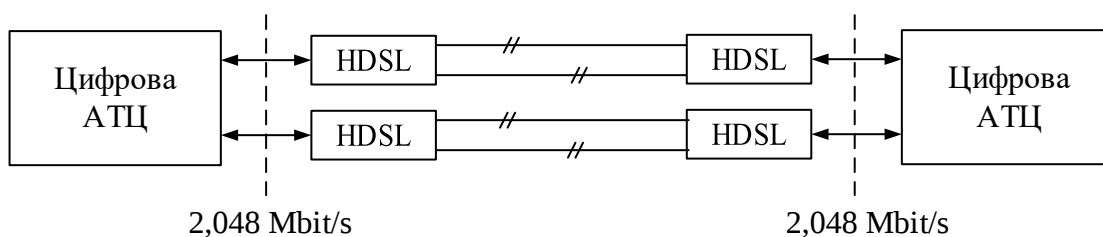
- Допълнителни служебни битове за поддържане.

Въвеждането на допълнителна служебна информация в цифровите потоци изисква завишаване на битовата скорост по абонатната линия (при някои фирмени реализации достига до 2,3 Mbit/s при предаване по един чифт) [38-41].

6.3.2. HDSL приложения

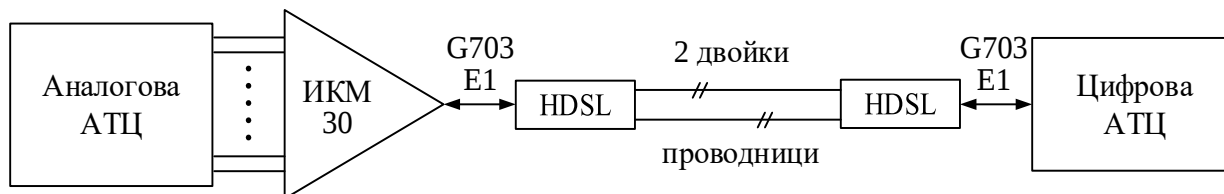
Типичните HDSL приложения са:

- * Изграждане на междустанционна връзка между две цифрови АТЦ (фиг. 6.7) чрез две двойки модеми. За връзка между двата модема се използват по две двойки съединителни линии, по всеки две, от които се предава по един първичен поток E1 (2048 Mbit/s).



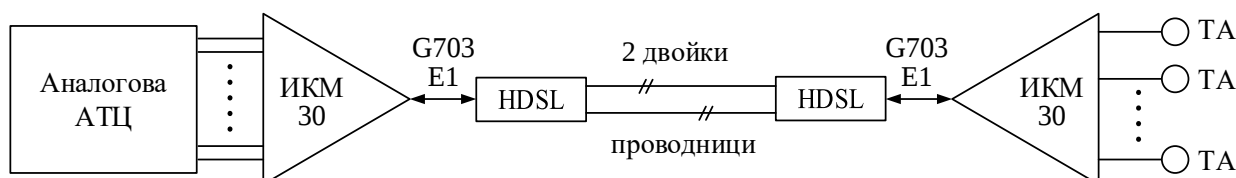
Фиг. 6.7. Междустанционна връзка между две цифрови АТЦ чрез две двойки модеми

- * Изграждане на междустанционна връзка между аналогова и цифрова АТЦ (фиг. 6.8), чрез двойка HDSL модеми по две двойки проводници. Цифровият поток на скорост 2048 Mbit/s се формира от 30-канален цифров мултиплексор ИКМ30, който работи съвместно с аналоговата АТЦ [42].



Фиг. 6.8. Междустанционна връзка между аналогова и цифрова АТЦ чрез двойка HDSL модеми по две двойки проводници

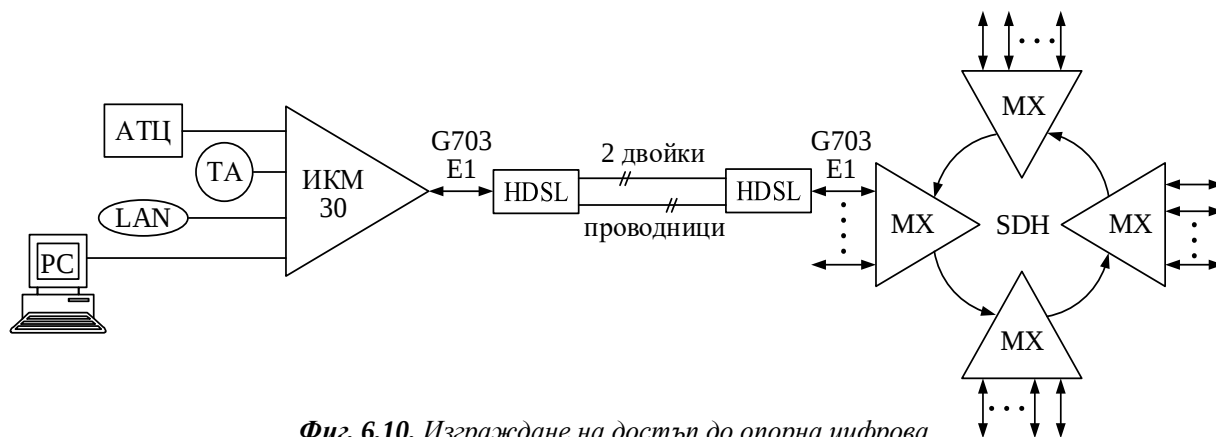
- * Включване на изнесени абонатни постове към аналоговата АТЦ през уплътнена абонатна линия (фиг. 6.9). Телефонните абонати са отдалечени от селищната АТЦ. Чрез два HDSL модема те получават достъп до АТЦ, като се използват абонатни или съединителни линии, уплътнени с 30 на брой телефонни абонати посредством 30-канална цифрова система [42].



Фиг. 6.9. Включване на изнесени абонатни постове към аналоговата АТЦ през уплътнена абонатна линия

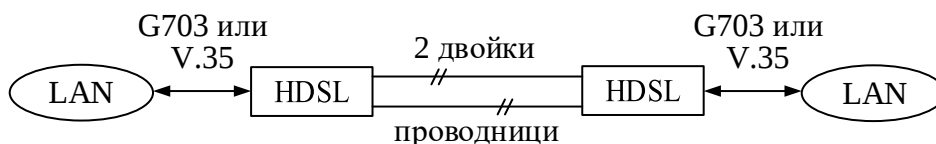
- * Изграждане на достъп до опорна цифрова преносна мрежа SDH/PDH (фиг. 6.10). Чрез първичен мултиплексор се изгражда достъп на различен тип

отдалечени потребители към мултиплексор от плезеохронна или синхронна йерархия (на фигурата е показан ADMX, включен в рингова SDH конфигурация). За целта е необходим комплект от два HDSL модема, включени в двата края на две симетрични двойки [43, 44].



Фиг. 6.10. Изграждане на достъп до опорна цифрова преносна мрежа SDH/PDH

- * Връзка между две локални мрежи (фиг. 6.11). При изграждане на корпоративни изчислителни мрежи.



Фиг. 6.11. Връзка между две локални мрежи

В заключение може да се каже, че най-съществените предимства на HDSL технологията са:

- Елиминира се нуждата от регенератор при пренасяне на разстояния, значително надвишаващи дължината на стандартната абонатна линия от 3,6 км. Защото при пренасяне на E1 (първични) цифрови потоци традиционно се използват регенератори на всеки 900 до 1800 м. при сечение на проводника 0,5 мм. Това означава, че в рамките на абонатната мрежа са необходими минимум два регенераторни пункта (или общо 4 регенератора за двете посоки за обмен), което значително оскъпява изграждането на цифрова преносна система чрез конвенционални симетрични кабели;
- Друго не по-малко от гледна точка на поддържането на преносната система предимството на HDSL технологията е премахването на диференциалните системи (разгледани в т.3.5), които изискват настройки (балансиране) в процеса на монтирането им и на експлоатацията на цифровата мултиплексна система. Самата диференциална система внася освен това собствено затихване на пренасяния сигнал:
 - * Регенераторите по принцип изискват специално захранващо напрежение, което се осигурява дистанционно от крайните станции и е свързано с допълнителни разходи на електрическа енергия;
 - * Самото монтиране и изграждане на регенераторните пунктове е трудоемко и струва повече от стойността на самите регенератори.

HDSL модемите поддържат освен интерфейса според препоръките G703 и G704 на ITU-T за предаване на първични цифрови потоци, то и интерфейси V36, V35, K21, 10BaseT за предаване на данни със скорости $n \times 64$ Kbit/s ($n = 1, 2, 3 \dots 32$), което дава възможност за разширяване на приложението им в цифровите мрежи, както и бързото реконфигуриране (преместването) на цифровата линия в зависимост от нуждите на потребителите [43, 44].

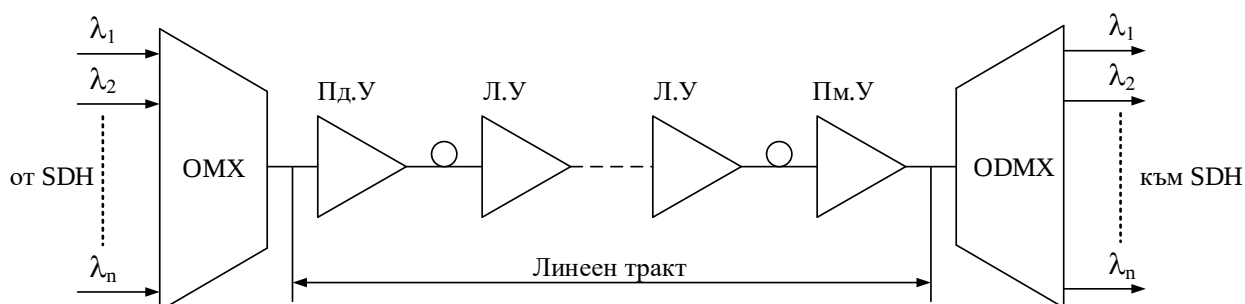
ГЛАВА VII

МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ С РАЗДЕЛЯНЕ ПО ДЪЛЖИНА НА ОПТИЧНАТА ВЪЛНА

7.1. Характеристики и развитие на оптичното мултиплексване

Изискванията за увеличаване на пропускателната способност на преносните оптични линии водят до увеличаване на скоростта на предаване в телекомуникационните мрежи. Обаче скоростта се ограничава от хроматическата и поляризационната дисперсия в оптичното влакно. Опитът показва, че реализирането на цифрови системи със скорост на предаване 10 Gbit/s (STM-64) е съпроводено с трудности, които съществено се увеличават при скорост на предаване 40 Gbit/s (STM-256). Затова възниква идеята сигналите от няколко цифрови мултиплексни системи да се предават по едно влакно на различни дължини на вълната.

- * Технологията, при която сигналите, пренасящи информация на различни оптични дължини на вълната се комбинират в оптичен мултиплексор и се предават по едно оптично влакно с цел увеличаване на преносния капацитет се нарича WDM (Wave length Division Multiplex) – мултиплексване чрез разделяне по дължина на оптичната вълна.



Фиг. 7.1. Опростена схема на оптично мултиплексване при предаване в една посока

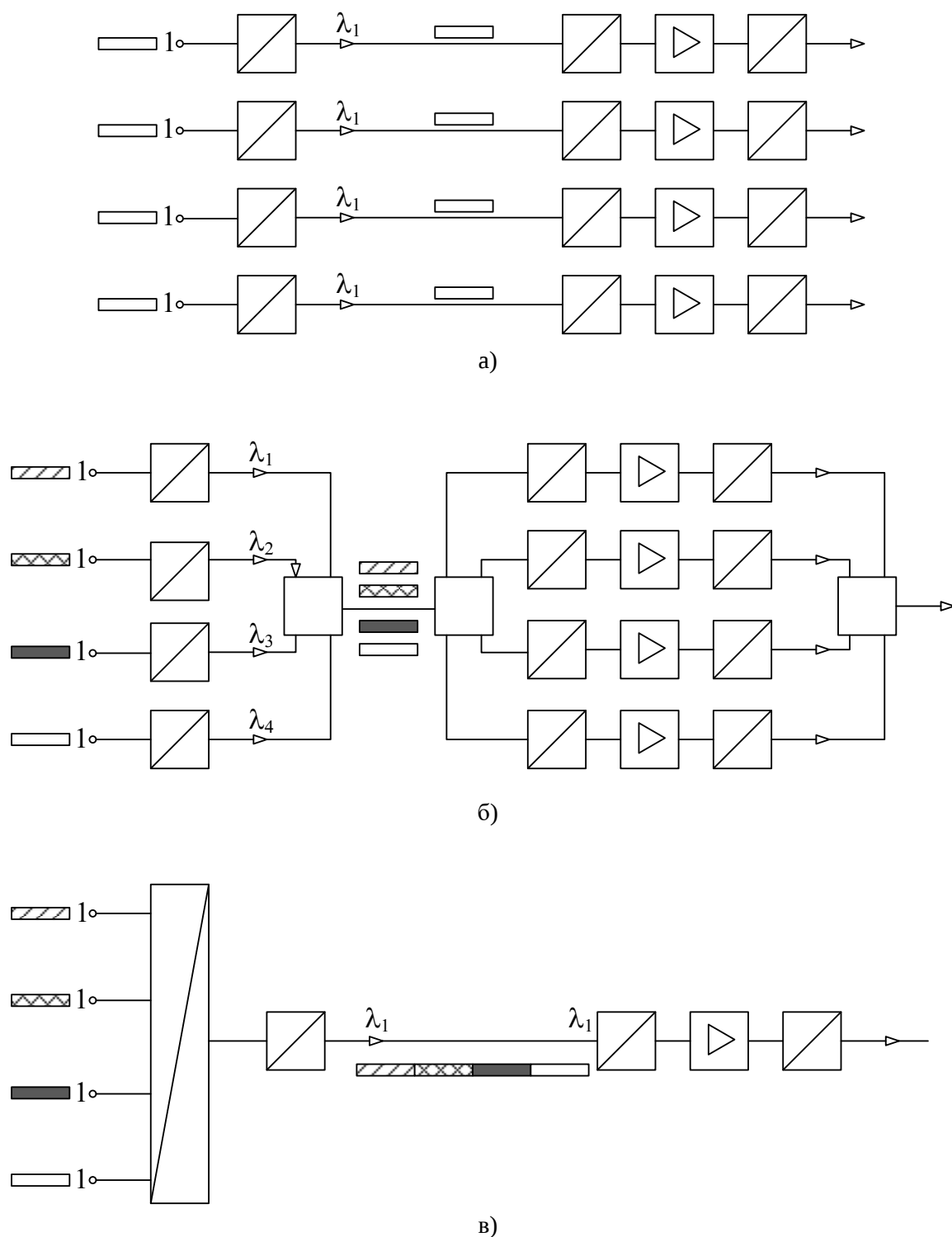
На фиг. 7.1 е представена едната посока на предаване на опростена схема с оптично мултиплексване. Оптичните сигнали от N на брой системи с различна дължина на вълните $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ постъпват на пасивен оптичен мултиплексор OMX. Обединеният оптичен поток, в който постъпват всички сигнали с указаните дължини на вълните, постъпват на Предавателен усилвател (Пд.У – усилвател на мощност), след което различните носещи се пренасят по едно оптично влакно. На приемната страна след оптически усилвател Пм.У сигнала постъпва на оптичен мултиплексор ODMX, който разделя оптичните сигнали с дължини на вълните $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ към съответните мултиплексни системи. За покриване на по-големи разстояния се използват оптични усилватели (О.У), които усливат едновременно цялата група носещи честоти с различна дължина на вълните като по този начин се намалява броят на необходимите регенератори по дължината на преносния оптичен кабел. Чрез WDM по-добре се използва огромната потенциална пропускателна способност на оптичното влакно [45].

Входните сигнали могат да имат различни цифрови скорости и формати, което прави преносната система, базирана на WDM прозрачна в сравнение с известните вече TDM системи, каквато е SDH или ATM.

- * В първоначално създадените устройства броят канали, предавани по едно оптично влакно не превишава четири. Каналите са разположени по един в два прозореца на прозрачност (първи – 850 nm и втори – 1310 nm) и два в трети оптичен прозорец – 1550 nm. В по-късно създадените системи се използва само

третият оптичен прозорец, защото оптичното затихване там е най-малко. Вторият оптичен прозорец се използва понастоящем за нискоскоростни евтини системи – за 2 и за 34 Mbit/s, защото затихването е значително по-голямо от това в третия прозорец. Благодарение на усъвършенстване на производството на лазерни източници на светлина, оптични филтри и мултиплексори и най-вече оптични усилватели в обхвата 1550 nm, става възможно да се организират няколко десетки канала в този обхват. Това уплътняване е наречено DWDM плътно (Dense) мултиплексиране по дължина на вълната и представлява усъвършенстване на технологията WDM.

- * Съществуват следните варианти на пренасяне на цифрови сигнали чрез оптични влакна – фиг. 7.2.
- Пренасяне на цифрови сигнали чрез една дължина на вълната λ_1 , като всяка система работи по различно оптично влакно. За целта се използват 4 на брой преносни системи, оптичен кабел и отделни регенераторни устройства, в които се извършва преобразуване на сигнала от оптичен в електрически и обратно. На този принцип е построена преносната оптична SDH мрежа;
- Пренасяне на цифрови потоци, използвайки мултиплексиране по дължина на вълната чрез четири различни дължини $\lambda_1 \div \lambda_4$ на вълната по едно оптично влакно (фиг. 7.2.б). В крайните точки на оптичния тракт се налага сигналите да се мултиплексират и демултиплексират. В точките на регенерация също се налага демултиплексиране (регенериране на всеки отделен канал) за всяка дължина на вълната с последващо мултиплексиране. Този принцип се използва при WDM технологията;
- Пренасяне на цифрови сигнали, използвайки честотно-времево мултиплексиране по една дължина на вълната λ_1 , чрез което се използва само един регенератор и едно оптично влакно. Този принцип се прилага при DWDM технологията.
- * При реализация на оптични системи се налага да се използва мрежа (гама) от високостабилни дължини на оптичната вълна. Дължините на вълните и стабилността им са стандартни по две причини:
- Стандартизираните стойности на дължините на вълните в оптичните мултиплексори осигурява съвместимост на различни системи уплътняване по дължина на вълната;



Фиг. 7.2. Пренасяне на цифрови сигнали по оптично влакно при а) една, б) четири различни и в) една дължина на вълната чрез честотно времево мултиплексиране

- Тъй като разстоянието между съседните канали не е голямо, то при нестабилност на вълните взаимните влияния между каналите са неизбежни [45-47].

7.2. Принципи на изграждане на мултиплексиращи устройства

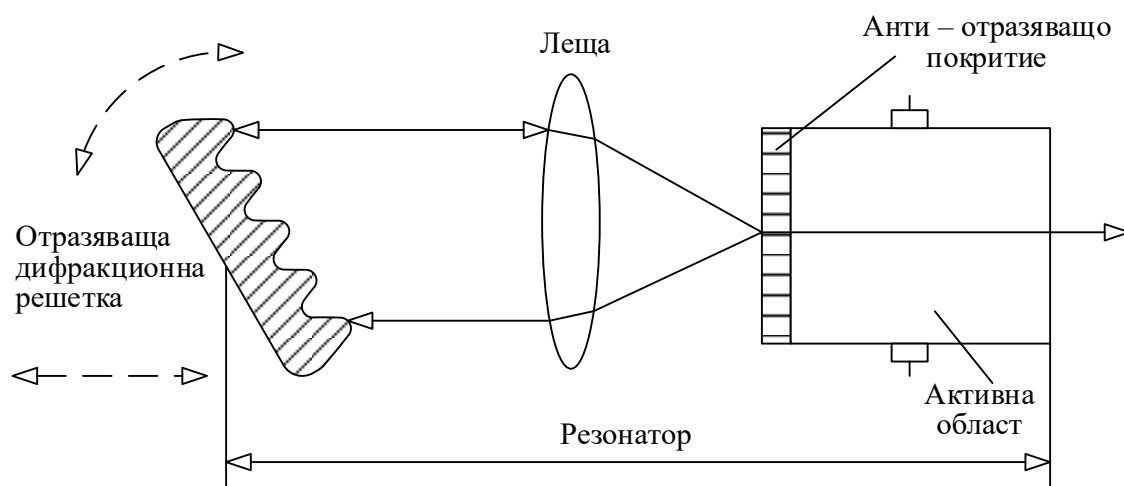
Съществуват два начина на построяване на оптични мултиплексори, осигуряващи необходимата гама от стабилни дължини на вълните.

Първият начин се заключава в това, че в състава на крайната станция с оптично мултиплексиране се включват N комплекта устройства за оптично мултиплексиране (според броя на обединяваните сигнали). Предаващите оптически модули използват високочестотни лазери, всеки от които е настроен на собствената си зададена дължина на вълната (наричат се „цветни“ оптични интерфейси). Системите, които използват този начин се наричат интегрирани системи.

При втория начин на входа на крайното устройство постъпват оптически сигнали от стандартни комплекти на мултиплексни системи от различен тип с дължина на вълните λ_m („сиви“ оптични интерфейси). Последните се преобразуват в оптични сигнали чрез вълни със зададена дължина в устройствата, наречени транспондери. В този случай системите се наричат „напълно открити“. Транспондерите представляват устройства, които преобразуват оптическите сигнали от обикновени цифрови системи (напр. SDH и имащи сиви интерфейси) в електрически и след това отново в оптически, но вече с дължина на вълните, съответстващи на „цветния“ интерфейс [46].

И в двата случая на оптично мултиплексиране е необходимо наличието на много точни лазери. Тяхната конструкция е прецизна и цените им са доста високи.

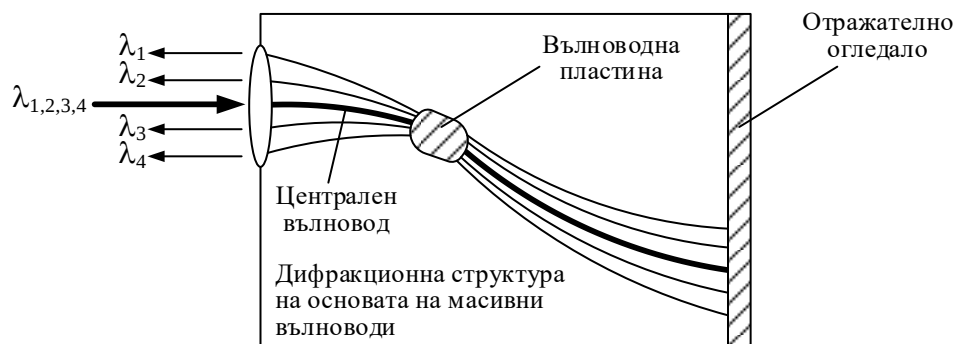
На фиг. 7.3 е показана една такава конструкция – лазер с един външен резонатор.



Фиг. 7.3. Конструкция „Лазер с един външен резонатор“

Лявото сечение на активната област е покрито с антиотразяващ слой, който практически елиминира Френеловото отражение. По този начин резонаторът на лазера се явява областта, заключена между дясното изходно сечение на активната област, което е полупрозрачно огледало и дифракционна решетка. Дифракционната решетка е второто огледало, чието едновременно завъртане и преместване спрямо активната област, изменя настройката на резонатора (респективно дължината на светлинната вълна). Използването на дифракционната решетка в качеството на огледало позволява да се подтиснат неосновните моди на излъчване, които в този случай се оказват ориентирани под някакъв ъгъл спрямо оптическата ос на системата. Лещата служи за усиление на обратната връзка (ОВ) между активната област и огледалото-решетка.

При скорости над 2,5 Gbit/s се използват лазери с външни модулатори, които осигуряват по-висока стабилност на дължината на оптичната вълна. В качеството на мултиплексори в системите с DWDM се използват пасивни мултиплексори, реализирани чрез комплект от вълноводи [46].



Фиг. 7.4. Мултиплексор с огледално отразяващ елемент в режим на демултиплексиране

Тези устройства се отнасят към класа линейни ненаправлявани устройства и затова могат да се използват както за мултиплексори, така и за демултиплексори на оптически сигнали. На фиг. 7.4 е дадена конструкцията на един такъв мултиплексор с огледално отразяващ елемент, работещ в режим на демултиплексиране. Входящият сигнал, подлежащ на демултиплексиране е сума от сигнали с различни дължини на вълната (от λ_1 до λ_4). Преминавайки през централния вълновод сигналът попада във вълноводната пластина, съдържаща 4 на брой вълноводи, представляващи дифракционна структура (подредена вълноводна решетка). Сигналът във всеки вълновод е все още мултиплексиран. След отразяването му от огледалната повърхност, светлинните потоци се събират отново във вълноводната пластина. В резултат на това се получава пространствена картина на разнесени интерференционни максимуми, които съответстват на различните (в случая четири) канали. Геометрията на вълноводната пластина и разстоянието между пластината и огледалото се избира така, че интерференционните максимуми да съвпадат с входните полюси (стойностите на вълните λ_i на входния поток). Мултиплексирането протича в обратна посока.

Част от устройствата, комплектоващи вълновите мултиплексори са вълновите конвертори, променящи дължината на вълната на оптичната носеща. Те позволяват да се осъществи т.нар. пасивна маршрутизация на цифровите потоци (промяна на направлението на цифровия поток към един или друг изход на оптичния мултиплексор). Осъществяват се чрез фотоелектрически кристали, в които се създават условия за протичане на нелинейно взаимодействие между два оптични сигнала (с различни дължини на вълните). В резултат на взаимодействието при разпространението им се генерира нелинеен продукт от втори порядък (трети сигнал с нова дължина на вълната).

Елемент на мултиплексното оборудване е и оптичният усилвател, който най-често е вграден в самия мултиплексор (тъй като мултиплексорите имат много голямо затихване в тракта си при преминаването на сигналите). Използват се два принципа на усиление: чрез полупроводников оптически усилвател или чрез усиление по технологията въвеждане на примеси в оптичното влакно [6]. За разлюляване (възбуждане) на усилвателите при липса на входен оптичен сигнал се използват допълнителни лазери, генериращи дължина на вълната 980 и 1480 nm. Те се използват за предаване на сигнал (111....1) в оптичния канал, когато мултиплексора не е в активно състояние [40-47].

7.3. Параметри на цифрови системи с DWDM

Спектрално разположение на каналите

Разположението на каналите е стандартизирано, за да:

- Има приемственост между едноканалните и многоканалните системи;
- Има възможност за ъпгрейждане на оптични системи;
- Съществува споменатата по-горе унификация на устройствата, произвеждани от различни фирми.

Табл. 7.1. Гама от дължини на вълните							
Честота, THz	Интервал между каналите при брой на каналите n, GHz						Дължина на вълната, nm
	100, n>8	200, n>8	400, n=4	500/400, 4=8	600, n=4	1000, n=4	
196,1	*	*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12
195,7	*	*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82
195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,36
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,37
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*	*	*			1546,12
193,8	*						1546,92
193,7	*	*	*		*		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	*			*	1549,32
193,4	*			*			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
192,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

Съществува стандартен честотен план, с разстояние между съседни канали не по-малко от 100 GHz (0,8 nm). В Табл. 7.1 е показана гамата от дължини на вълните по този план, като са стандартизирани различни отстояния (защитни ленти) между отделните канали за системите с различен брой канали [45-47].

Всички гами освен тези за 500/400 имат равноотдалечени канали. Най-плътно са разположени каналите с интервал между тях равен на около 0,8 nm. Така най-голямата стандартна скорост, предавана по такъв канал не може да бъде по-голяма от 10 Gbit/s (STM-64). Диапазонът от 1529.....1560 nm носи наименованието централен стандартизиран диапазон. Над него и под него са съответно късовълновият и свръхдълговълновият диапазони, които също са стандартизирани.

Параметри на оптическите интерфейси за потребителските потоци

В препоръка G709 интерфейсите, както и самите нискоскоростни входно/изходни информационни потоци, постъпващи в/от оптичната мрежа от/в SDH мрежата се наричат „клиентски”. В Табл. 7.2 са показани стойностите на електрическите параметри на оптичния изходен интерфейс на компонентните потоци (постъпващи към входовете на SDH мултиплексора), т.е. на изходите на оптичния демултиплексор [48].

Табл. 7.2. Електрически параметри			
Параметър	Скорост на предаване на цифровия сигнал, Mbit/s		
	≤ 622	2 500	10 000
Ниво на изходна мощност, dB и коефициент на подтискане на странични моди, dB	+3 до -5	+3 до -5	+3 до -5
Затихване от отражение, dB	≥ 30	≥ 30	≥ 30
Отклонение на централната честота на оптичния канал при разстояние на оптичните канали не повече от, GHz			
≥ 200 GHz	±20,0	±20,0	±20,0
100 GHz	±10,0	±10,0	±10,0
50 GHz	±10,0	±10,0	±5,0
Ширина на спектъра на ниво -20 dB, (обхват 50 - 200 GHz)	14,0	20,0	40,0 (30 за 50 GHz)

Табл. 7.3. Параметри на входния сигнал			
Параметър	Скорост на предаване на цифровия сигнал, Mbit/s		
	≤ 622	2 500	10 000
Ниво на чувствителност, dB, не повече от	-23	-15	-12
Ниво на претоварване, dB, не повече от	-8	0	0
Коефициент на отражение на приемника, dB, не повече от	-27	-27	-27

Таблица 7.3 представя параметрите на входния сигнал за компонентните потоци (пристигащи от изходите на SDH оборудването на портовете на оптичния мултиплексор) на оптичния интерфейс (виж фиг. 7.1).

Параметри на линейния тракт

DWDM системите са стандартизирани и по отношение на интерфейсите им към линейния тракт. Зададени са параметрите на многокомпонентния групов сигнал – изходен за мултиплексорите и входен за демултиплексорите.

В Табл. 7.4 са показани стойностите на най-характерните параметри, дефиниращи изходния групов сигнал на интерфейса на оптичния мултиплексор, както и на изхода на междинно устройство – усилвател, регенератор и др. [45-47]

Табл. 7.4. Параметри на изходния групов сигнал		
Параметър	Точка на нормиране	
	Изход на крайно устройство	Изход на междинно устройство
Ниво на сумарна мощност, dB	$\leq +27$	$\leq +27$
Ниво по мощност на един канал, dB	+20	+20
Разлика в нивото на оптичните канали, dB	2	2
Преходен шум между оптичните канали, dB	≤ -30	-
Сигнал/Шум в оптичния канал, dB	≥ 20	≥ 20

В Табл. 7.5 са показани стойностите на най-характерните параметри, дефиниращи входния групов сигнал на интерфейса на оптичния демултиплексор, постъпващ от линейния тракт.

Табл. 7.5. Параметри на входния групов сигнал		
Параметър	Точка на нормиране	
	Вход на крайно устройство	Вход на междинно устройство
Ниво на сумарна мощност, dB	$\leq +1$	$\leq +1$
Ниво по мощност на един канал, dB	от -30,0 до -15	от -30,0 до -15
Разлика в нивото на оптичните канали, dB	2	2
Преходен шум между оптичните канали, dB	≤ -27	-
Сигнал/Шум в оптичния канал, dB	≥ 20	≥ 20

Параметри на каналите за сервиз

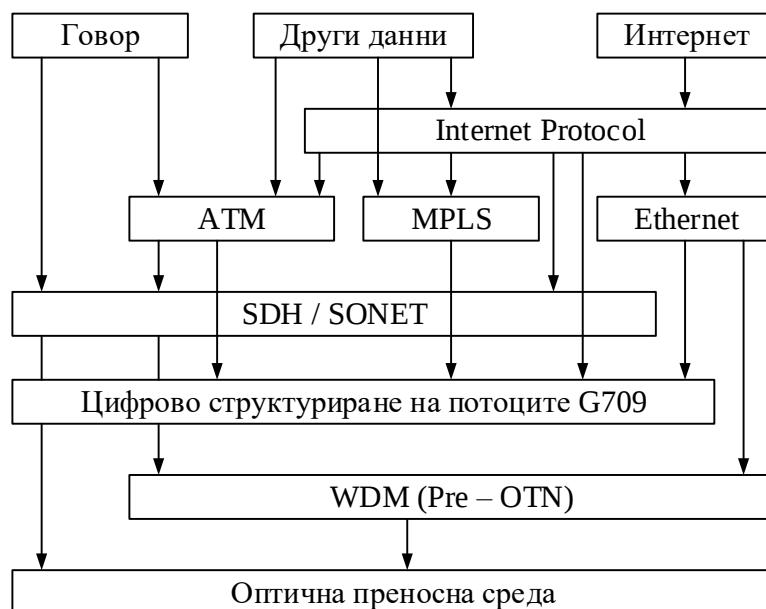
В съвременните влакнесто-оптични мултиплексни системи е предвиден независим оптически контролен (служебен) канал на дължина на вълната 1510 nm и скорост на предаване 1544 Kbit/s. По този канал се организират до шест дуплексни канали за служебна връзка (на скорост 64 Kbit/s всеки), канали за предаване на данни за конфигуриране на системата и за предаване на предупреждаващи (алармени) сигнали. Коефициентът на грешка по бит при дълговременни измервания в контролния канал не трябва да превишава стойността 10^{-11} . Допуска се на всеки 10 Gbit/s поток до 700 Mbit/s допълнителен информационен капацитет за мониторинг и управление на различните нива на оптичната преносна мрежа [47].

7.4. Изграждане на оптични системи

7.4.1. Модел на оптична мрежа

Оптичната преносна мрежа (OTN), аналогично на PDH и SDH цифровите преносни мрежи е изградена на йерархичен принцип, като функционирането, пренасянето и обработването на цифровите потоци изцяло отговарят на концепцията на слоестата структура на мрежата [48].

Самата оптична мрежа се явява най-горният слой на транспортната телекомуникационна мрежа. На съответните интерфейси на оптичната мрежа, които са регламентирани от препоръка G709, постъпват потоци с различна структура, скорости и формати (рамки) за пренасяне. Фигура 7.5 илюстрира въвеждането на съществуващите видове информация – говор, данни от Интернет мрежата, цифрова информация (в това число и видео от широколентови услуги), които след обработването им (структуриране) според изискванията на съответните интерфейси на оптичните мрежови възли ONNI попадат в оптичната мрежа DWDM, където се пренасят прозрачно, т.е. не се деструктурират на границата на тази мрежа.



MPLS – Multi Protocol Layer Service

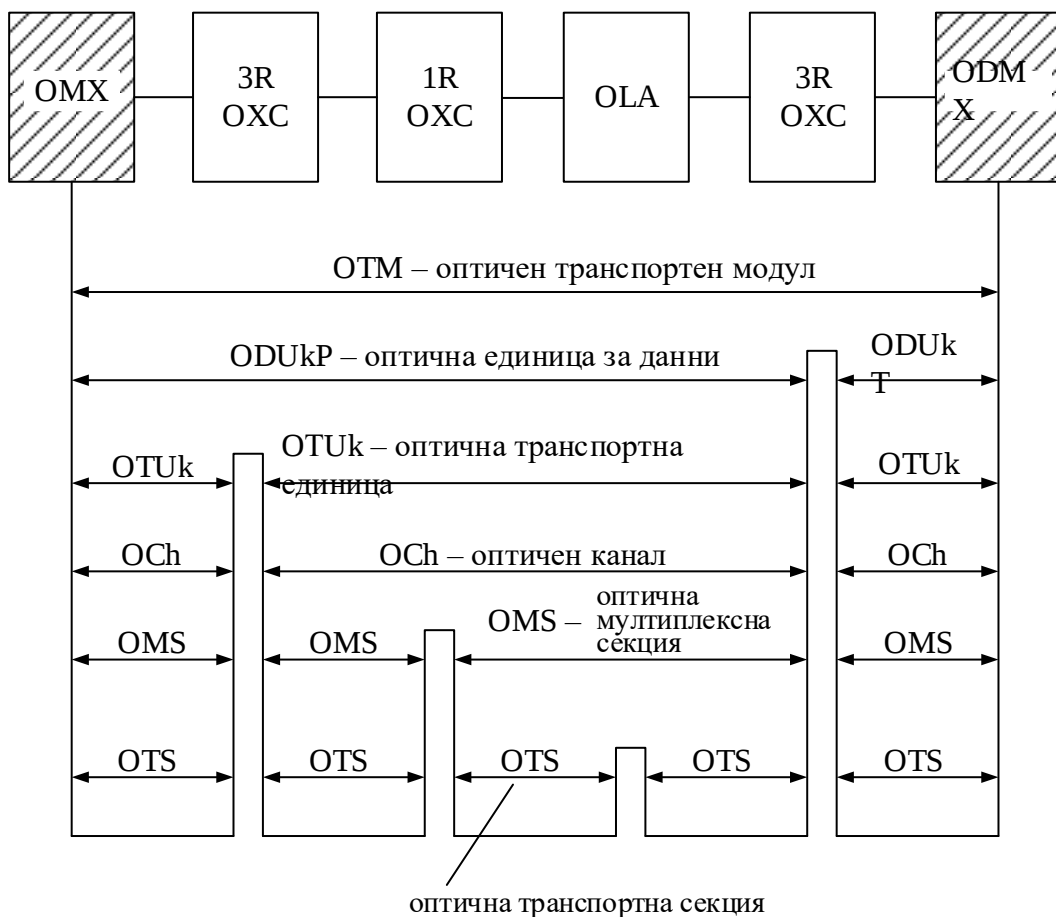
SONET – Мрежа за цифров пренос по американски стандарт

ATM – Asynchronous Transfer Mode

Фиг. 7.5. Въвеждане на постъпващи потоци с различна структура, скорости и формати, регламентирани от G709

Пренасянето на потоците става чрез т.нар. оптичен транспортен модул (ОТМ), който се формира в крайното оптично устройство мултиплексор/демултиплексор. На фиг. 7.6 е показан модел на оптична мрежа, в който са отразени устройствата – мрежовите елементи, които изграждат оптичната връзка (тракта) между две крайни устройства. На схемата са отразени устройства със следната функционалност:

- OMX, ODMX – оптичен мултиплексор, респективно демултиплексор;
- 3R – регенератор на оптичния сигнал по амплитуда, форма и фаза;
- 1R – амплитуден коректор;
- OXC – крос-конектор на оптични канали;
- OLA – оптичен лазерен усилвател.



Фиг. 7.6. Модел на оптична мрежа с мрежовите елементи, изграждащи оптичната връзка (тракта) между две крайни устройства

Схемата отразява и съответните слоеве на оптичната мрежа, както и формирането на отделните информационни структури в отделните слоеве на оптичния тракт [48, 49].

7.5. Структура и формиране на OTM съгласно G709 на ITU-T

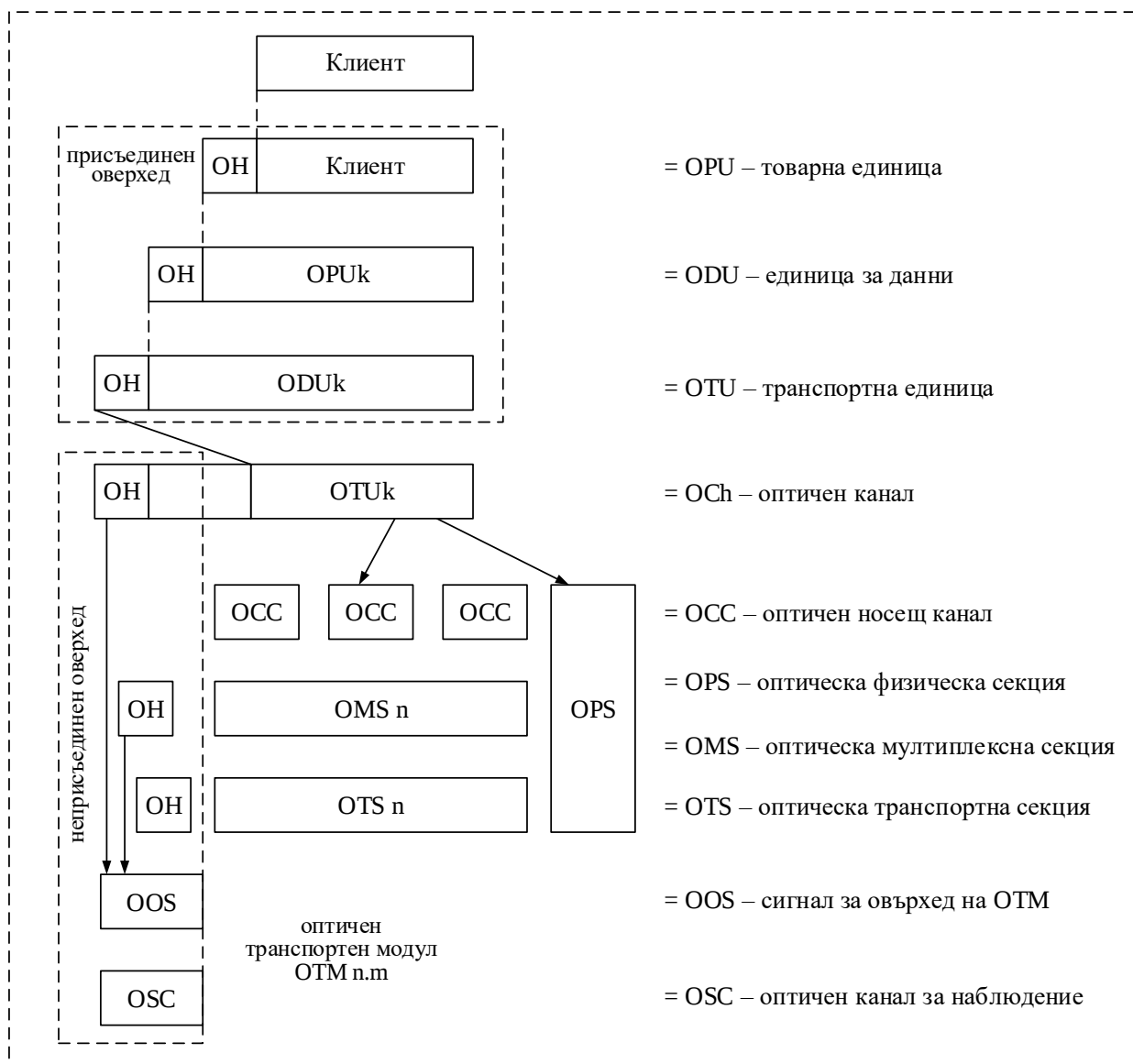
Оптичният транспортен модул представлява информационна структура, която пренася товара през интерфейсите на възлите на оптичната мрежа ONNI – Optical Network Node Interface. Оптичният транспортен модул се означава по следния начин: OTM- $n[r].m$. индексите n и m определят съответно броя на носещите дължини на вълната и битовата скорост на интерфейса [49].

Дефинирани са две OTM структури:

1. Оптичен транспортен модул с пълна функционалност – OTM- $n.m$, който съдържа n мултиплексирани оптични канала и канал за пренасяне на неприсъединен ОН на OTM (поле от управляващи байтове). OTM- $n.m$ е информационна структура за поддържане на слоя на оптичните транспортни секции (OTS), изграждащи връзки в мрежата. Редът на OTM- n се определя от реда на OMU (мултиплексора), който го пренася.
2. Оптичен транспортен модул с редуцирана функционалност – OTM- $nr.m$, OTM-O. m , които са информационни структури, използвани за поддържане на слоя оптичната физическа секция (OPS) за връзки в оптичната мрежа. Информационните характеристики на този слой съдържат информация за вида на товара. OTM с редуцирана функционалност е дефиниран в два варианта:
 - OTM-O. m , който съдържа единичен оптичен канал без указване цвета на интерфейса (дължината на вълната);

- OTM-r.m, който съдържа до **m** мултиплексирани оптични канали. Не поддържа неприсъединен овърхед. Редът на OTM-n.r се определя от реда на OCG-n.r (груповия оптичен канал), който го поддържа.

Съществуват два стандартизирани варианта на OTM с редуцирана функционалност: OTM-0 и OTM-16.r, които имат строго определен формат.



Фиг. 7.7. Последователното формиране на OTM – OTMn.m от един клиентски поток

Индексите, използвани за означение на OTM имат следния смисъл:

- Индексът **n** се използва за определяне на реда на OTM, OTS, OMS, OPS, OMU. **n** представлява максималният брой дължини на вълната, които могат да поддържат съответната за слоя битова скорост. Възможно е намаляване на броя на дължините на вълната за най-високата скорост. Индексът **n=0** представлява случая на единичен канал без да е специфициран цвят на канала (т.е. използва се „сива” интерфейсна дължина на вълната);
- Индексът **r** се използва за означаване на редуцирана функционалност на OTM, OCG, OCC. Например при **n=16**, означението на OTM е: OTM-16r.m;
- Индексът **m** се използва за представяне на битовата скорост на гамата от скорости, поддържани на интерфейса. **m** съдържа една или повече цифри “k”,

където **k** представлява отделната битова скорост. Валидни стойности за **m** са: 1, 2, 3, 12, 123, 23;

- Индексът **k** се използва, за да се отрази битовата скорост и да се дефинират версиите на OPU_k, ODU_k и OTU_k. При:

- * **k=1** апроксимираната (закръглената) стойност на скоростта е 2,5 Gbit/s;
- * **k=2** апроксимираната (закръглената) стойност на скоростта е 10 Gbit/s;
- * **k=3** апроксимираната (закръглената) стойност на скоростта е 40 Gbit/s.

На фиг. 7.7 е онагледен процеса на последователното формиране на OTM – OTM_{n,m} от един клиентски поток (информационен блок с определена дължина), постъпващ в оптичната мрежа [45-48].

Табл. 7.6. Битова скорост на елементите на OTM					
k	Скорост	Скорост	Скорост	Време за предаване	Апроксимирана
	OPU, Kbit/s	ODU, Kbit/s	OTU, Kbit/s	на цикъла, ms	скорост
1	2 488 320	2 498 775	2 666 320	48,971	2.5 Gbit/s
2	9 995 279	10 037 274	10 709 225	12,191	10 Gbit/s
3	40 150 519	40 319 219	43 018 414	3,035	40 Gbit/s

В Табл. 7.6 е показано последователното увеличаване на битовата скорост на елементите на OTM за потоци от различен ред (скоростите, съответстващи на **k=1,2** и **3**) [49].

7.5.1. Формиране на мултиплексна структура на OTM_k

Процедурата за формиране на оптичния транспортен модул OTM за различни входни за оптичната мрежа потоци, които образуват три различни товарни единици (OTU1, OTU2 и OTU3) е регламентирана от ITU-T.

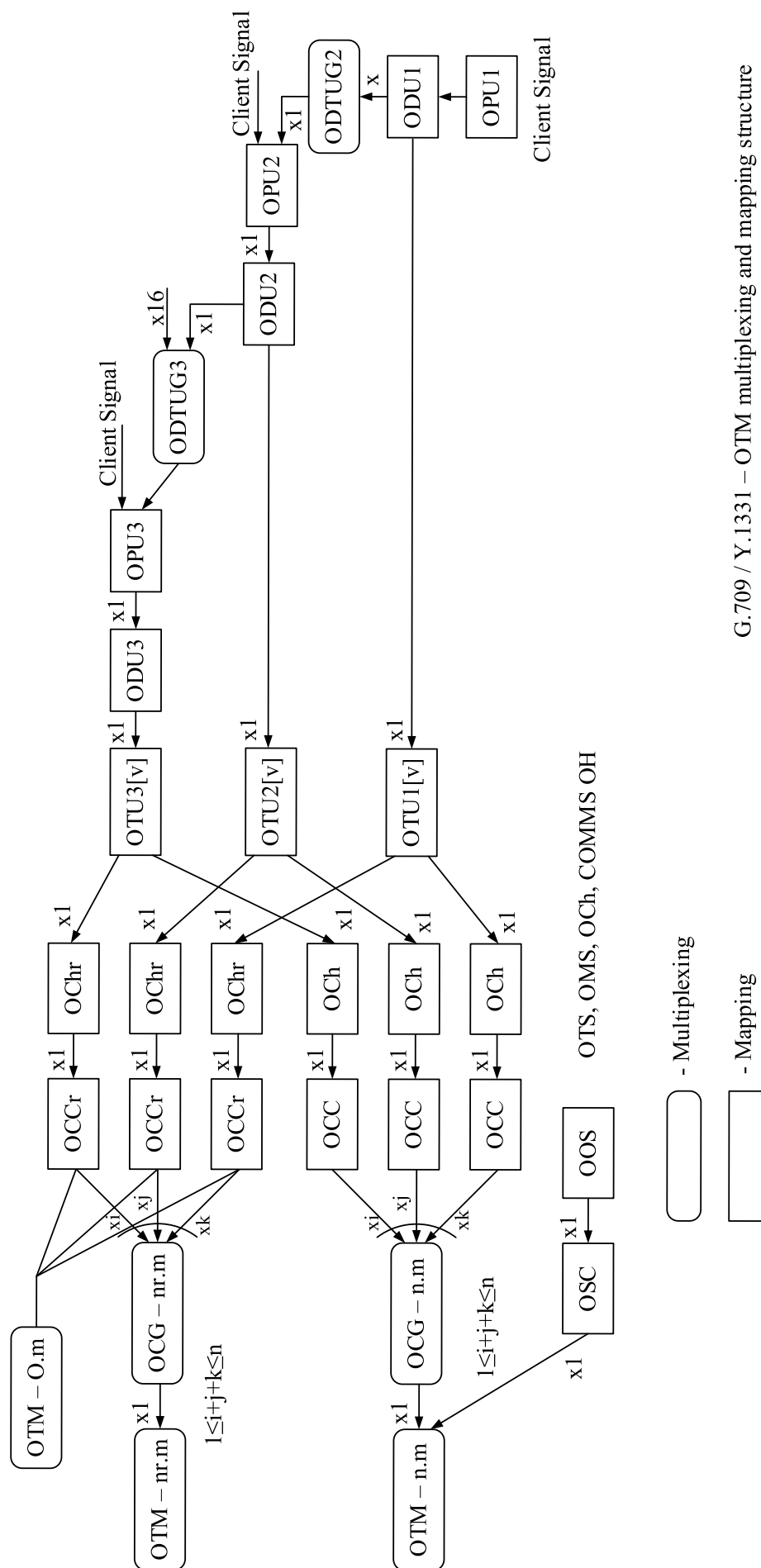
На схемата от фиг. 7.8 е показана пълната обобщена схема на мултиплексната структура за формиране на транспортния оптичен модул от входни (клиентски) потоци чрез операциите структуриране (Mapping) и обединяване (Multiplexing), които са характерни и за SDH мултиплексорите.

Мултиплексната структура позволява да се обединяват както пълен брой **n** потоци, така и редуциран брой, всеки със собствена носеща дължина на вълната за достигане на съответната OTM [50].

Основните елементи в процеса на структурирането на потоците са:

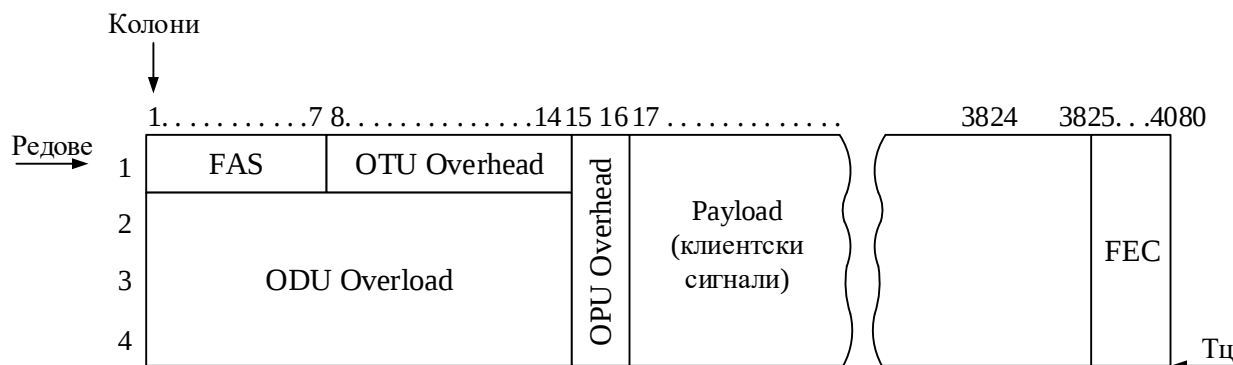
- OTU – оптична транспортна единица;
- OCh – оптичен канал;
- OCC – оптичен носещ канал;
- OOS – оптичен сигнал за пренасяне на ОН на OTM;
- OCG – оптичен групов сигнал;
- OSC – оптичен канал за наблюдение.

Форматът на цикъла на OTM е двумерен с размерност 4080 колони и 4 реда. Структурирането на информационните потоци е побайтово, подобно на рамката в SDH мултиплексорите [50].



Фиг. 7.8. Обобщена схема на мултиплексната структура за формиране на транспортния оптичен модул

Един цикъл се състои от $4080 \times 4 = 16\,320$ байта, които се предават последователно ред по ред след окончателно изграждане на рамката. В Табл. 7.6 е посочено времето за предаване на един цикъл на OTMk (за различни скорости на оптичните канали).



Фиг. 7.9. OTMk рамка

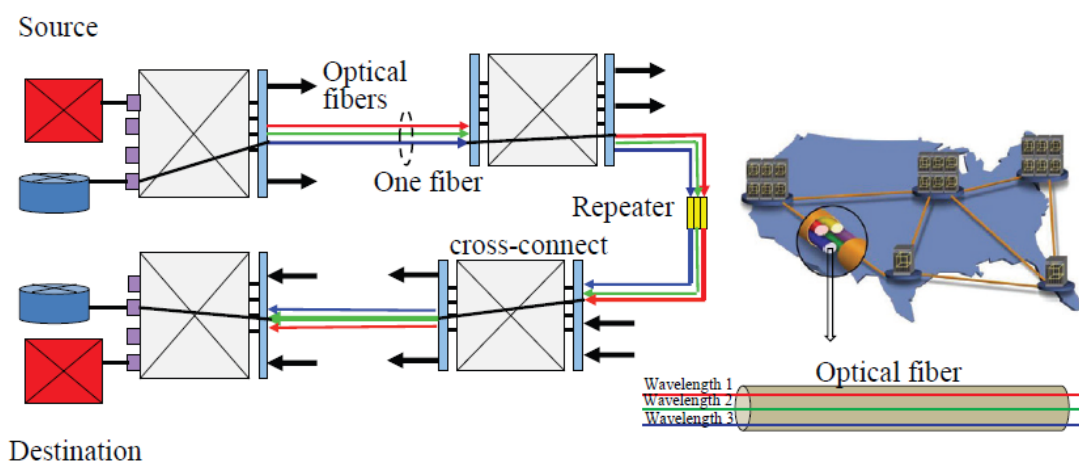
На фиг. 7.9 е дадено графично представяне на рамката OTMk. Отражена е и размерността на овърхедите на съответните структурни елементи (на товарната, на данните и на транспортната дължина) според фиг. 7.7. Началото на рамката започва със синхронизираща по цикъл последователност FAS. В рамката е предвиден информационен капацитет от 175×4 байта за защита на пренасяната чрез OTMk информация от грешки, който е означен с FEC – Forward Error Correction. След структурирането на рамката, информацията се предава последователно ред по ред в оптичния канал [48-50].

ГЛАВА VIII

ЕЛАСТИЧНИ ОПТИЧНИ МРЕЖИ

8.1. Основи на съвременните оптични мрежи

Оптичната мрежа обикновено е комуникационна мрежа за данни, която е изградена на базата на влакнесто-оптична технология. Преносните кабели, структурирани от оптични влакна, се използват като основна комуникационна среда в оптичните мрежи, където данните се конвертират и предават под формата на светлинни импулси между предаващите и приемащите възли. Оптичната мрежа не е изцяло оптична, т.е. предаването със сигурност се реализира на основата на оптична преносна среда, но също така е налице оптично, електрическо или хибридно пренасяне в зависимост от спецификацията на трасето. Оптичната мрежа по същество не е пакетна - може да бъде мрежа, базирана на комутация на вериги. Тя може да следва или фиксирана мрежа, или гъвкава мрежа [51, 52].



Фиг. 8.1. Блокова схема на съвременна оптична мрежа

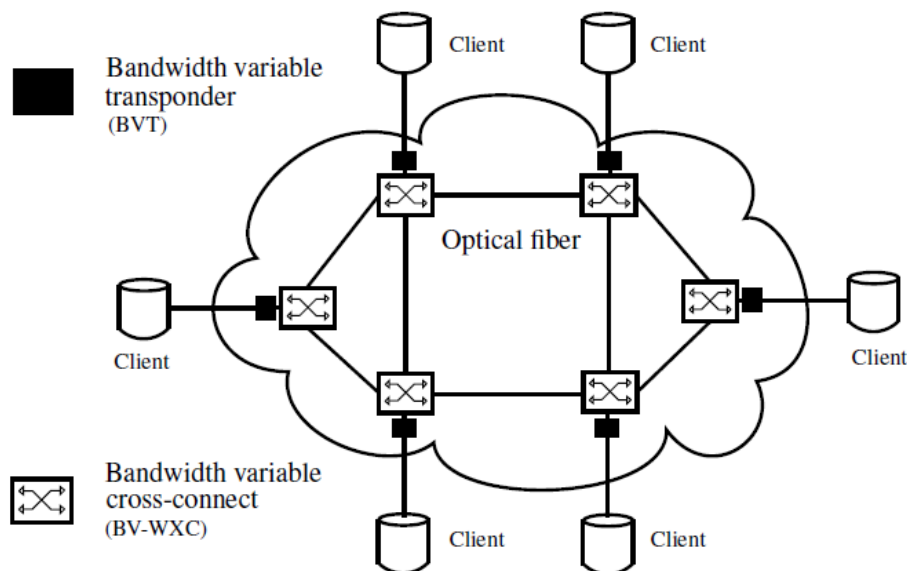
В комуникационната услуга се използва верига за свързване на комуникационни терминали от край до край. Задължително е веригата да може да бъде установена на всеки два терминала и следователно верижната мрежа може да осигури мрежова връзка. Ако няколко преносни възела са директно подадени във физическа комуникационна среда като мрежа с оптични влакна, мрежовият оператор може да се сблъска с трудности при експлоатацията и управлението на преносната линия и преносната среда. Съществуват големи различия в спецификацията между капацитетите на средите (Kbps) и капацитетите на преносните линии (няколко стотици Mbps до Gbps). За да се отстрани това несъответствие е въведено преносно устройство между мрежовите възли и слоя на преносната среда, както е показано на фиг. 8.1. Дефинира се информационно направление на пренос на пакети от възлите, представляващи отделни комуникационни единици в структурата на преносната линия. Преносните възли се използват за внедряване на иновативни мрежови технологии. Предвидени са възможности за възстановяване от повреда на предавателната линия по отношение на възлите и управлението на трафика [51, 52].

8.2. Архитектура на EON

Еластичните оптични мрежи (EONs) са въведени, за да се отговори на проблемите на съществуващите оптични мрежи за мултиплексване със спектрално разделяне по дължината на вълната (WDM) чрез осигуряване на спектрална ефективност и скорости при пренос на услуги от 100 Gbps и извън него. Това се постига чрез въвеждане на гъвкаво насочване в областта на оптичната честотна област. EONs притежават потенциала за разпределяне на спектър към светлинни канали в съответствие с изискванията за широчина на честотната

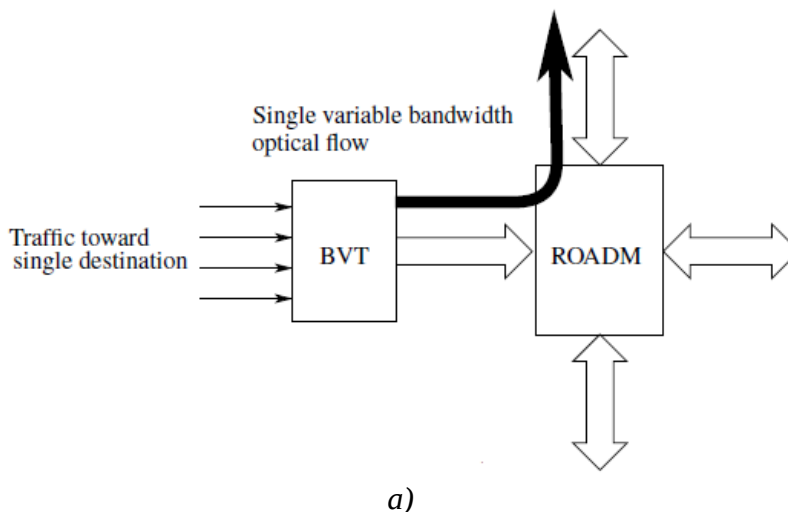
лента на потребителите. Спектърът е разделен на тесни канали, разпределени в различни количества към структурните оптични връзки. В резултат на това ефективността на използване на мрежата е значително подобрена в сравнение с оптичните мрежи, базирани на WDM.

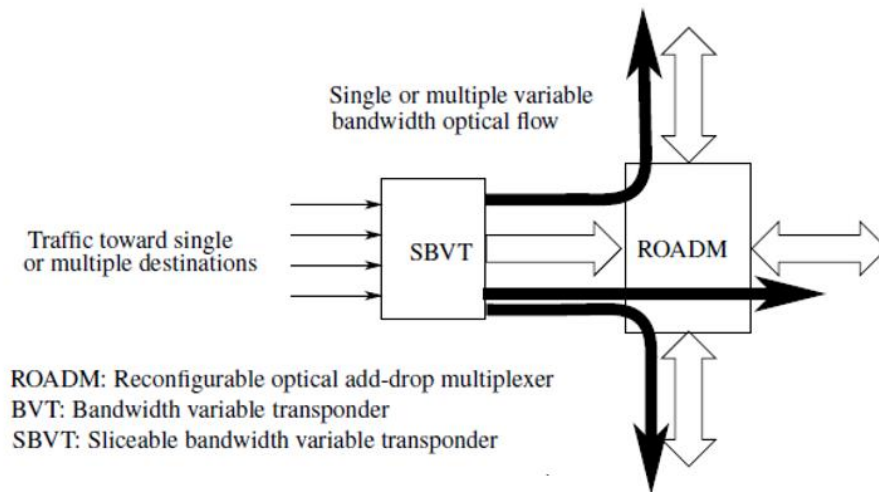
Фигура 8.2 представя типичната архитектура на EON, която се състои главно от приемо-предаватели с променлива честотна лента (BVT) и напречни свързващи комуникационни възли с променлива честотна лента (BV-WXC). BVT звената се използват за настройка на честотната лента чрез регулиране на скоростта на предаване или вида на модулацията. Те поддържат високоскоростно предаване, използвайки спектрално ефективни модулационни формати, например 16-квадратурна амплитудна модулация (QAM), като 64 - QAM се използва за светлинни канали на по-къси разстояния [52].



Фиг. 8.2. Архитектура на еластична оптична мрежа

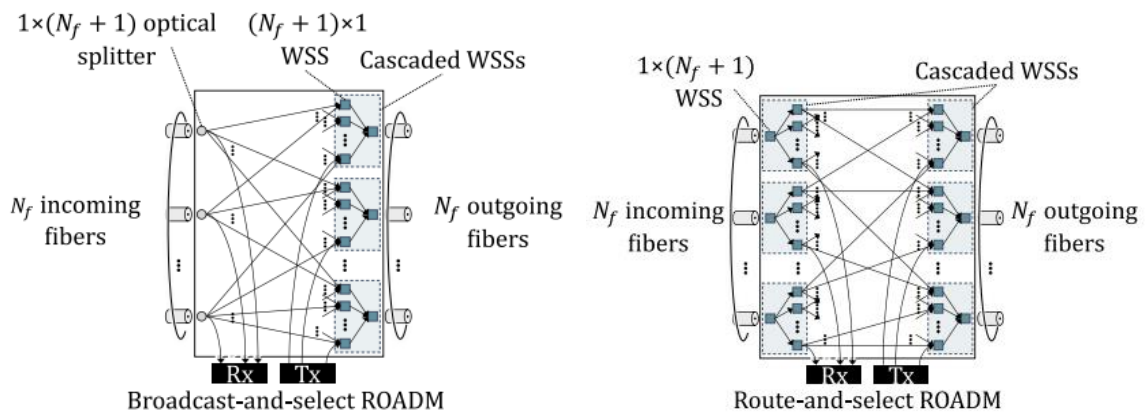
Когато високоскоростен BVT работи с по-ниска от максималната си скорост, поради необходимия обхват или възникнали повреди в структурата на оптичното трасе, част от капацитета на BVT се губи. За да бъде разрешен този проблем, са въведени приемо-предаватели с възможности за предаване от едно към много крайни устройства, с индивидуално регулиране на скоростта по всяко отделно направление SBVT. SBVTs притежават способността да разпределят поддържаения си честотен капацитет в един или няколко оптични потока. Функционалността на BVT и SBVT приемо-предавателите е показана на фиг. 8.3 [52-54].





б)

Фиг. 8.3. Функционалности на комуникационни звена а) BVT и б) SBVT



Фиг. 8.4. ROADM архитектури за SCF - базирани мрежи

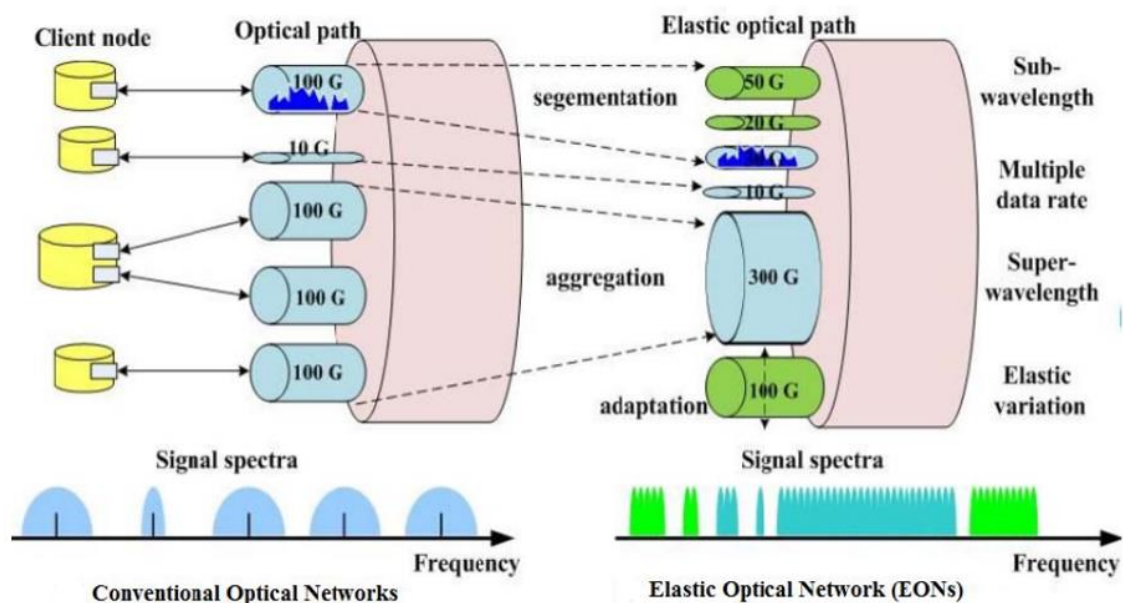
Фигура 8.4 показва две ROADM архитектури, приложени за съществуващите SCF - базирани мрежи. Представена е $N_f \times N_f$ ROADM архитектура, където N_f е броят на влакната. B&S ROADM се състои от $1 \times (N_f + 1)$ оптични сплитери и $(N_f + 1) \times 1$ WSS, докато в структурата на R&S ROADM са включени $1 \times (N_f + 1)$ WSS и $(N_f + 1) \times 1$ WSS. При двете ROADM архитектури един порт на сплитер и WSS се назначават към add/drop порт. Максималният брой ROADM портове е ограничен, тъй като броят на портовете на комерсиалните WSS системи е лимитиран до около 35. Въпреки че количеството на портовете може да бъде разширено чрез каскадни WSS системи, броят на WSS системи от по-висок клас се увеличава предимно линейно с нарастване на броя на структурните ROADM портове. Възможни са загуби по отношение на сигналите при внедряване на високоскоростни оптични сплитери и силно стесняване на спектъра поради каскадните WSS системи [52-54].

8.3. Характеристики и концепции при EON

В EON спецификата на централната честота на всеки канал позволява разширяване и свиване на оптичните линии. Следователно, тези мрежи притежават няколко уникални характеристики, както следва [52]:

- ❖ *Гъвкава честотна лента:* EON поддържат вариационни скорости на информационен трансфер и променлив трафик, позволявайки поддържане на “sub-wavelength” и “super wavelength” диаметри на структурните влакнесто-оптични

влакна. Фигура 8.5 онаглеждава процеса на сегментиране на честотната лента при конвенционалните и еластичните оптични мрежи. Тук 100 Gbps честотна лента се сегментира в подвълнови дължини от 50 Gbps, 20 Gbps и 30 Gbps чрез подходяща конфигурация на BV-WXC и BVT във всеки възел на оптичната линия. По този начин се осигурява адекватно разпределяне на честотна лента и ефективно използване на мрежовите ресурси. По аналогичен начин EON поддържат функцията за агрегиране на честотната лента, създавайки оптична линия със свръхдължина на вълната. Три отделни честотни ленти от 100 Gbps са мултиплексирани с помощта на OFDM, получавайки 300 Gbps суперканал за ефективно използване на спектъра;



Фиг. 8.5. Използване на спектъра при а) конвенционалните и б) еластичните оптични мрежи

- ❖ **Подържане на множество скорости на пренос на данни:** EONs поддържат множество скорости на предаване на данни и имат способността да осигуряват висока ефективност чрез гъвкаво разпределение на спектъра и подобряване на степента на неговото използване над WDM мрежите в оптичната честотна лента;
- ❖ **Повишена спектрална ефективност:** Използването на OFDM в EON дава възможност за ефективно използване на спектралните ресурси, поради ортогоналността, съседните субносеци могат да се припокриват в спектъра, без да причиняват ISI и да влияят върху адаптивността във връзка със скоростите на трансфер на данни;
- ❖ **Енергоспестяване:** EON притежават уникално свойство за енергийно спестяване, поради изключване на неизползваните OFDM субносеци, докато трафичното пакетно предаване е минимизирано [55].

EONs предоставят не само възможности, но и поставят няколко нови предизвикателства като например: прилагането на техники за маршрутизиране и задаване на дължината на вълната (RWA) в EON създава предизвикателства, поради въведената нова гъвкавост на спектъра. Ограничението за непрекъснатостта на спектъра в WDM мрежите трябва да бъде заменено с ограничение за непрекъснатост на дължината на вълната на RWA. За да се приспособят субносеците на OFDM, ограничението на неприпокриващия се спектър в WDM

мрежите следва да бъде променено в ограничение за назначаване на единична дължина на вълната на RWA. Субносещите трябва да бъдат присвоени последователно, за да се използва ефективността на спектъра, осигурени от ортогонални съседни субносеци [52, 55].

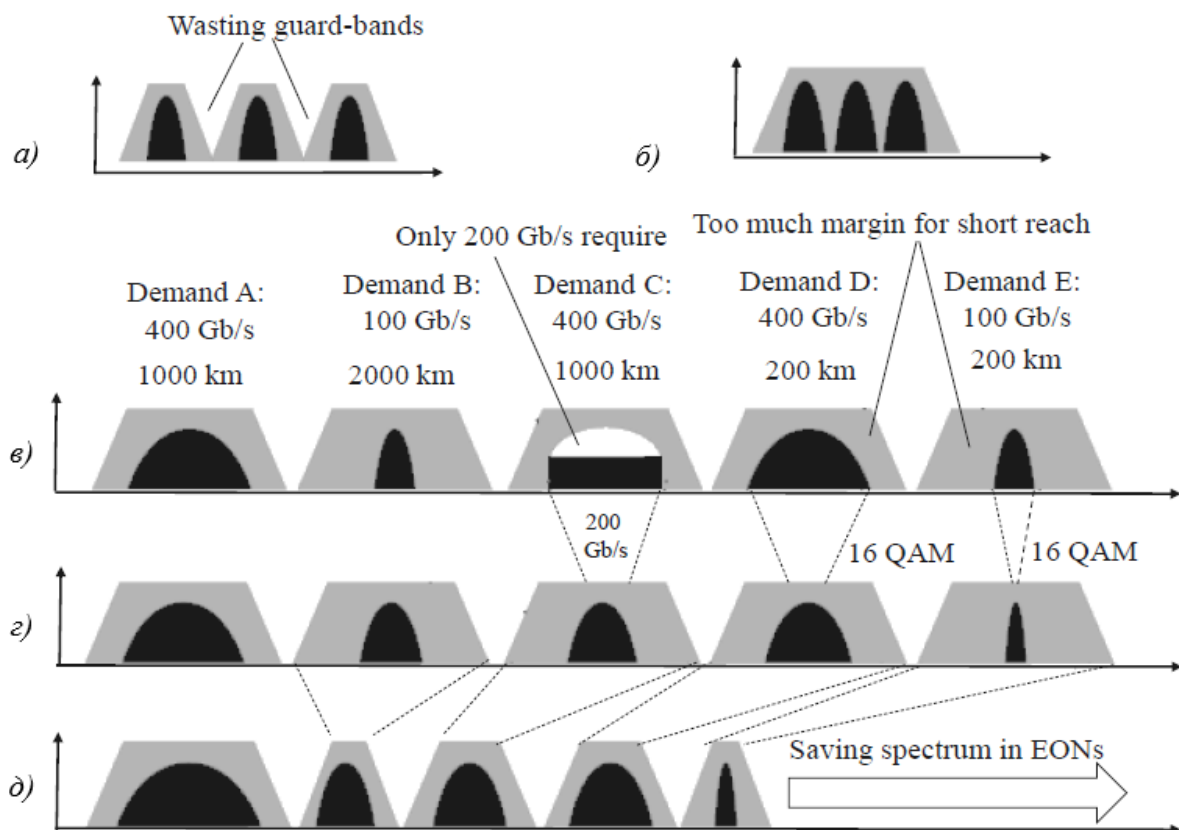
За да бъдат разбрани по-пълно EONs и техните уникални свойства, е необходимо да бъдат разгледани няколко концепции, които обикновено не са част от фиксирани оптични мрежи, базирани на WDM. Уникалните характеристики на EON са:

- ✓ сегментиране на честотната лента;
- ✓ агрегиране на честотната лента;
- ✓ ефективно въвеждане на множество скорости на данни;
- ✓ гъвкаво вариране на разпределените ресурси;
- ✓ адаптивна за достигане скорост на оптичната линията и др.

Разглеждайки фиксираната оптична мрежа, базирана на WDM, обикновено има един начин за изпълнение на дадено пакетно предаване, където битовата скорост, оптичният обхват и спектърът са фиксирани. В резултат на това пакетното предаване може да заема повече от една дължина на вълната - фиг. 8.6.а) (за поддържане на 300 Gbps са необходими множество дължини на вълната) или по-малко от пълна дължина на вълната, и следователно е налице постигане на загуба на капацитет - например пакетно предаване С на фиг. 8.6.в). Като се има предвид, че EON позволяват на мрежовите оператори множество възможности за избор за изпълнение на пакетно предаване, то каналите за поддържане на 300 Gbps пакетно предаване могат да бъдат уплътнени в “super canal” и осигурени като единно комуникационно звено, както е показано на фиг. 8.6.б). Възможните избори са:

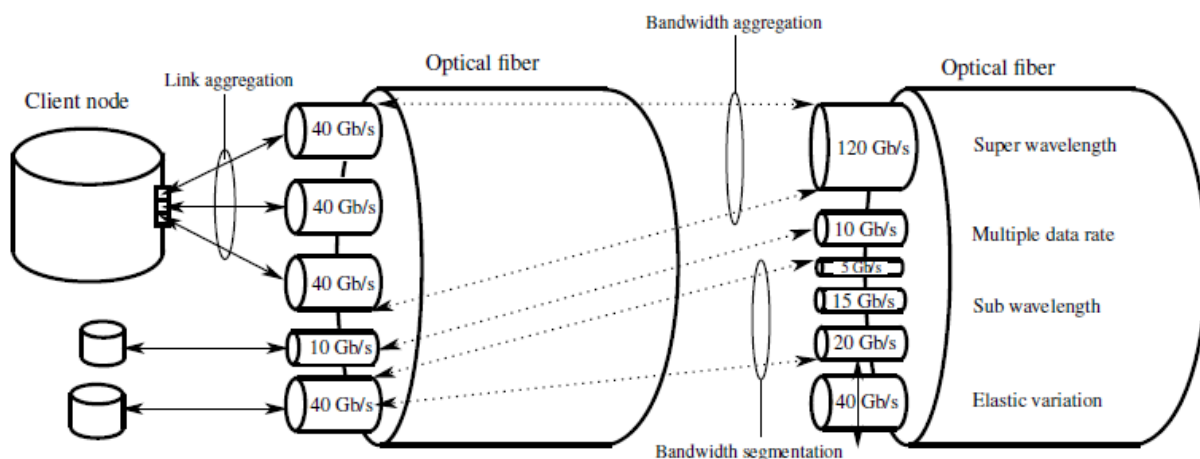
- на дадено пакетно предаване може да бъде назначен формат на модулация, който дава достатъчна производителност за достигане на необходимото разстояние, като същевременно минимизира спектралната честотна лента, заета от оптичната линия - пакетни предавания D и E на фиг. 8.4.г);
- съотношението между размера на корекцията на грешките напред (FEC) и полезния товар е фиксирано, но може да се направи адаптивно в EON, за да се даде възможност за достигане на по-големи разстояния, когато необходимата честотна лента е по-ниска;
- всеки път, когато дадена оптична връзка преминава през ROADM, архитектурата изпълнява ролята на филтър, който ограничава оптичната честотна лента за канала. Когато този процес се повтаря непрекъснато, получената честотна лента може да е твърде тясна, което да повлияе на
- качеството на сигнала и да редуцира обхвата.

Оптичната мрежа, базирана на WDM, изисква пълно разпределение на капацитета на дължината на вълната по оптичен път между двойка крайни възли. Въпреки това, EON предоставят ефективен механизъм за сегментиране на честотната лента (понякога наричан “sub wavelength”), който осигурява достъп до услуга за свързване с “fractional bandwidth (дефинира се като отношение между абсолютната честотна лента спрямо централната честота)“. При изискване за частична честотна лента, EON може да разпредели достатъчно оптична честотна лента, за да обхване клиентския трафик. Процесът е онагледен на фиг. 8.7, където оптичната честотна лента от 40 Gbps е сегментирана на три дължини на вълната, съответно 5 Gbps, 15 Gbps и 20 Gbps. Същевременно всеки възел по маршрута на оптичното направление разпределя свързаност с подходящата спектрална честотна лента, за да създаде цялостно коректно оразмерена оптична линия. Ефективното използване на мрежовите ресурси ще позволи рентабилно обезпечаване на “fractional bandwidth” услугата [55, 56].



Фиг. 8.6. Сравнение на оптичните мрежи, базирани на WDM, и еластичните оптични мрежи - а) фиксираната мрежа изисква строги ограничаващи ленти между оптичните линии за имплентиране на пакетно предаване 300 Gb/s, б) каналите за пакетно предаване могат да бъдат уплътнени в "super canal", в) пет пакетни предавания и техните спектри с необходимост от поддържане на 100 GHz фиксирана мрежа, предполагайки QPSK модулация (д) пакетни предавания с адаптивна модулация за оптимизиране на изискваната за достигане побитова скорост

EON комбинират множество физически портове/свързвания в комутатор/маршрутизатор в един логически порт, за да се даде възможност за постепенно нарастване на скоростта на връзката. Позволяват функцията за агрегиране на честотната лента и така може да създаде оптична линия със "super wavelength", непрекъснато комбинирана в оптичната преносна среда, като по този начин се гарантира високо използване на спектралните ресурси. Тази уникална особеност е изобразена на фиг. 8.7, където три оптични честотни ленти от 40 Gbps се мултиплексират с оптичен OFDM, за да се осигури "super channel" от 120 Gbps. Super channel съдържа множество теснолентови канали, които преминават през мрежата като едно цяло, но могат да бъдат демултиплексирани при приемника. Според фиг. 8.7, EON притежава способността да осигури спектрално ефективно директно назначаване на смесени скорости на предаване на данни в структурата на оптичната преносна среда, поради своето гъвкаво разпределение на спектралните ресурси. Дадена еластична оптична мрежа има възможността да осигури самата виртуализация на мрежата, тъй като ресурсите на спектъра се сегментират и агрегират, за да се създаде sub-wavelength и super-wavelength channel. Тъй като EON поддържа формат за адаптивна модулация на разстояние, спектралните източници на влакното се използват ефективно в сравнение с оптичните мрежи, базирани на WDM [56].



Фиг. 8.7. Сегментиране и агрегиране на честотната лента, назначаване на множество скорости на данни и гъвкавост на ресурсите на еластичните оптични мрежи

На разстояние при адаптивна модулация максималният брой бит за символ, която е обект на дадената предавателна характеристика - например влошаване на QoT, се избира специфично за всяко направление на светлинния поток. Процедурата е възможна, ако се приложи ефективен формат на модулация - 16-(QAM), относно каналите за пренос на светлинни импулси на по-къси разстояния, и по-надежден, като QPSK, за канали на по-дълги разстояния. Необходимият брой спектрални канали се задава съответно спрямо всяко направление за пренос на светлинни импулси с цел осигуряване на заявената честотна лента.



Фиг. 8.8. Изследователски области в направление на еластичните оптични мрежи

Според изложеното еластичната оптична мрежа се дефинира като обещаваща концепция, но по отношение на някои сфери може да се каже, че нейното внедряване все още е далеч. Фигура 8.8 обобщава различните области, очертаващи изисквани бъдещи активности за доближаване до този процес [52, 55, 56].

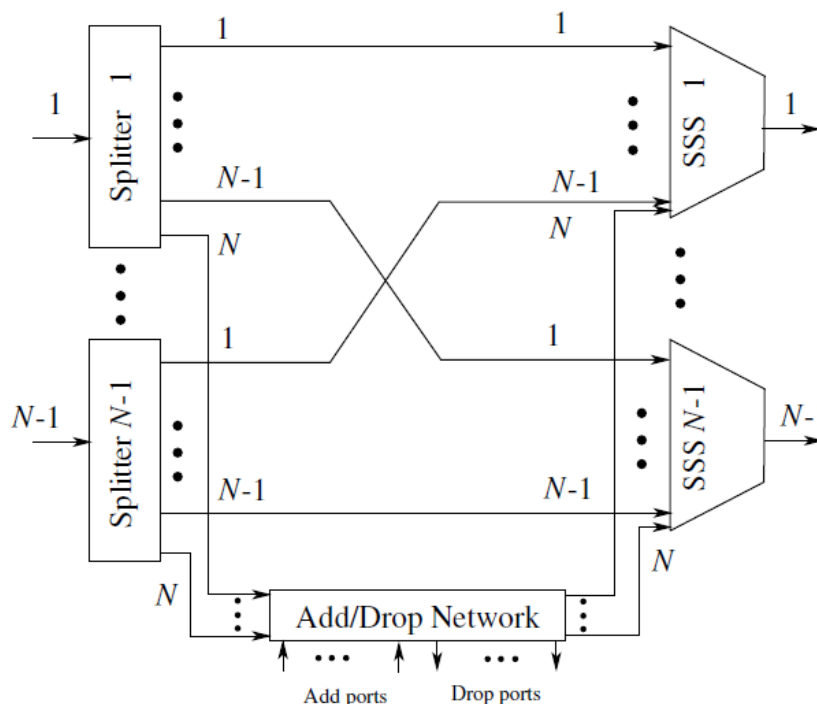
8.4. Възлови структурни архитектури при EON

• *Broadcast-and-select архитектура*

Broadcast-and-select архитектура, използвана за определяне на еластичната архитектура на оптичните възли със селективни комутатори по отношение на спектъра, е показана на фиг. 8.9. Архитектурата се реализира с помощта на сплитери при входните портове. Указаното

оптично оборудване служи за генериране на копия на входящите сигнали, които впоследствие се филтрират чрез спектрално селективни комутатори, за да се направи подбор на необходимите сигнали от страната на приемника. Add/drop мрежата може да имплементира еластична Add/drop функционалност, като по този начин позволява автоматично добавянето на един или повече канали с поддържане на единична дължина на вълната към съществуващи спектрални сигнали. Процесът може да добави или премахне един или повече структурни канали от преминаващите сигнали към друго мрежово направление динамично. Основните недостатъци на Broadcast-and-select архитектурата са следните:

- изисква синхронизация и бърза настройка;
- налага голям брой спектрални канали;
- мощността на сигнала е разделена между различните възли, така че този тип възел не може да се използва за комуникация на дълги разстояния [52].

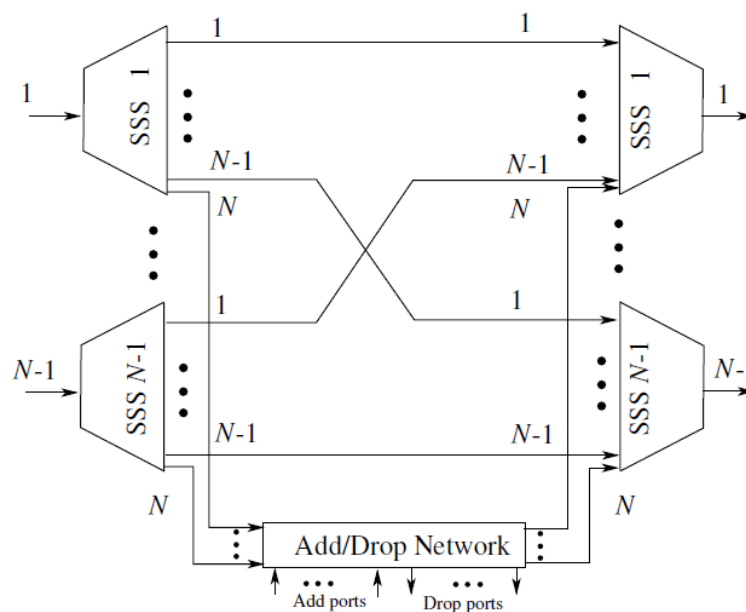


Фиг. 8.9. Архитектурен възел на broadcast-and-select

Broadcast-and-select архитектурата се използва най-вече във високоскоростни локални мрежи и градски мрежи. Необходимо е да се отбележи, че развитието на указаната комуникационна архитектурата е насочено към поддръжка на допълнителна функционалност за удовлетворяване на динамичните изисквания - например дефрагментиране на спектъра [53].

• Спектрално маршрутизиране

Spectrum routing техническото решение се проектира, за да се преодолеят проблемите с *broadcast-and-select* звената. Концепцията се реализира основно с подредена вълнова лента с решетки и оптични комутатори, показано на фиг. 8.10. При спектралното маршрутизиране както превключващите, така и филтриращите функции се контролират от спектрално селективни комутатори. Основното предимство на тази архитектура, в сравнение с *broadcast-and-select*, се състои в това, че загубата на мощност не зависи от номерата им. Разглежданото комуникационно решение обаче изисква допълнителни спектрално селективни комутатори при входните влакнесто-оптични влакна, което я прави по-скъпа за реализиране. Налице е затруднено изпълнение на функционалността, необходима за справяне с динамичните изисквания като дефрагментиране на спектъра и др. [53].

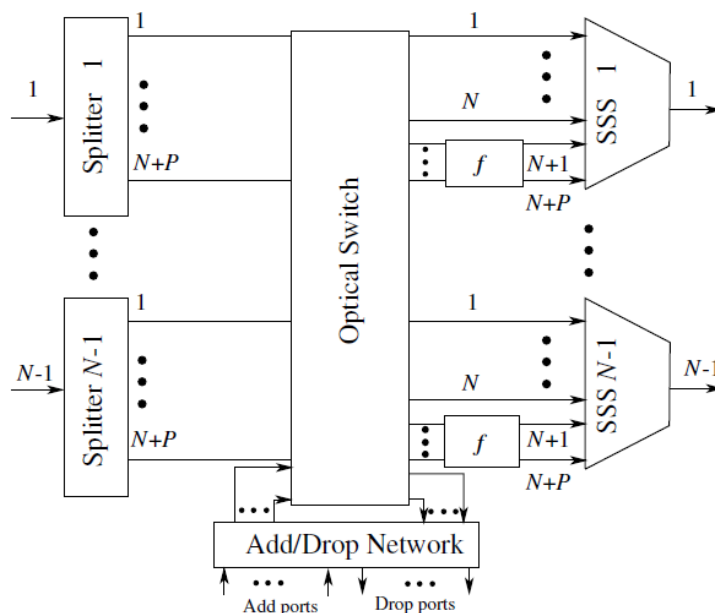


SSS: Spectrum selective switch

Фиг. 8.10. Архитектурен възел *Spectrum routing*

- **Комутация и селектиране с динамична функционалност**

Освен дефрагментирането на спектъра *broadcast-and-select* и *спектрално маршрутизирани архитектури* нямат способност за поддържане на динамични изисквания, като мултиплексване във времето, регенерация и др. За преодоляване на тези ограничения е въведена архитектурата *комутация и селектиране с динамична функционалност*. Техническото решение предполага използване на оптичен комутатор за директно копиране на входа към спектрално селективен комутатор или към модул (f), който осигурява желаните допълнителни функционалности — дефрагментиране, времево мултиплексване и регенериране. Изходите на модулите се свързват към спектрално селективни комутатори спектрално селективни комутатори, където изискваните сигнали са филтрирани за насочване по направление към съответното изходно влакнесто-оптично влакно [57].



SSS: Spectrum selective switch

Фиг. 8.11. Архитектурен възел *switch and select* с динамична функционалност

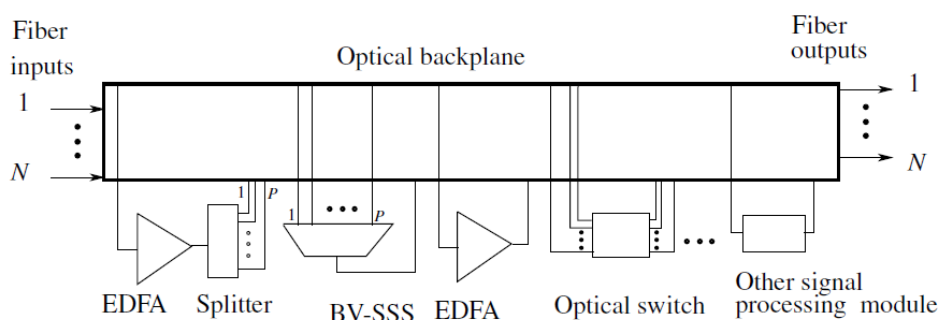
Фигура 8.11 представя възловата архитектура на EON с хардуерни възможности за изпълнение на изискваните динамични функционалности. Указаните процеси се свързват с включване на допълнителни оптични комутатори и спектрално селективни комутатори с голям брой портове. Количеството портове служи за осигуряване на конкретна функционалност и следователно броят на модулите може да бъде изчислен от очакваното пакетно предаване [58].

- **Architecture on demand**

Architecture on demand (AoD) комуникационна архитектура се състои от optical backplane, имплементиран многопортов оптичен комутатор, свързана към няколко обработващи модула, съответно:

- ✓ spectrum selective switch;
- ✓ fast switch;
- ✓ Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA);
- ✓ spectrum defragmenter,
- ✓ splitter.

Входовете и изходите на възела са свързани посредством optical backplane, както е дадено на фиг.8.12. Различните подредби на входовете, модулите и изходите се реализират чрез задаване на подходящи кръстосани връзки в оптичното базово ниво.



EDFA: Erbium-doped fiber amplifier

BV-SSS: Bandwidth-variable spectrum selective switch

Фиг. 8.12. Комуникационен възел *Architecture on demand* с N входа/изхода и модули за обработка на сигнали.

Техническото звено предлага по-голяма гъвкавост от разглежданата преди това архитектурата. Предимството се дължи главно на незадължителния характер на компонентите (спектрален селективен комутатор, разделител на мощност и други функционални модули) за разлика от статичните архитектури, те могат да бъдат свързани заедно по произволен начин. Количеството на спектрални селективни комутатори и други налични обработващи устройства не е твърдо фиксирано, но може да бъде определено въз основа на специфичното желано пакетно предаване за тези функционалности. По този начин с ограничаването на броя на устройствата може да балансира спрямо допълнителните разходи за структурни optical backplanes и следователно този тип архитектура осигурява едно рентабилно от икономическа гледна точка решение. Освен това AoD осигурява значителни допълнителни предимства в сравнение с static architectures, изразяващи се в техническите свойства „машабируемост“ и „устойчивост“ [52, 58].

8.5. Маршрутизиране и спектрално разпределение при EONs

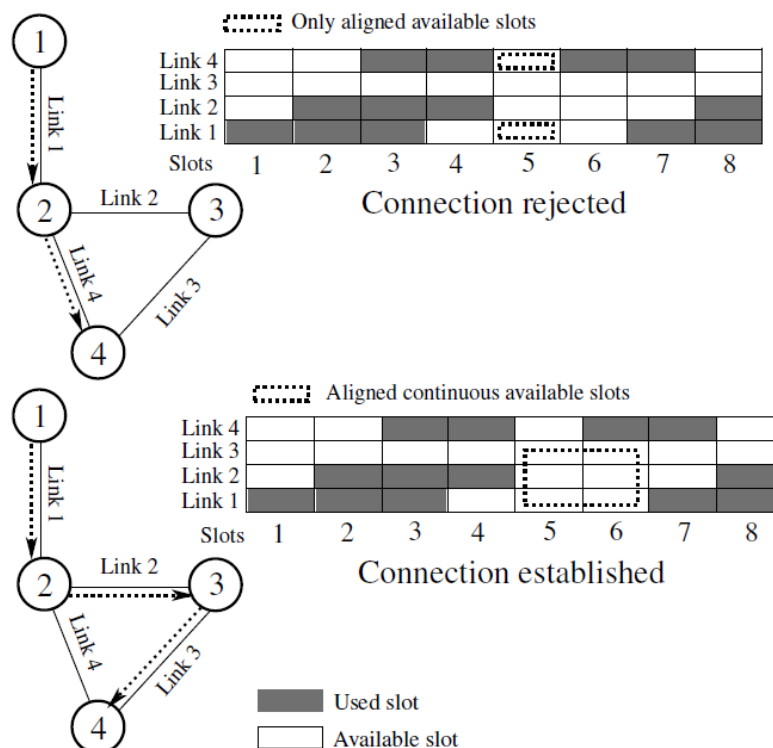
Routing and spectrum allocation (RSA) в еластичните оптични мрежи се счита за една от съществените функционалности поради спецификата на пренасяната информация и процедурното повторно използване на спектралните характеристики. Приложението на техническия подход RSA се свежда до следните основни моменти:

- намиране на подходящия маршрут за двойка източник и местоназначение на пакетното получаване на данни;
- разпределяне на подходящи спектрални канали към заявеното направление на светлинния информационен поток.

Проблемът с използване на RSA включва две основни ограничения, а именно ограничения за непрекъснатост на спектъра, непосредствена близост и установена свързаност между източника и получателя на пакетни данни [52, 59].

• RSA спрямо RWA

Указаното техническо затруднение с RSA [71-76] в структурните EONs е равнопоставено с Routing and Wavelength Assignment (RWA) проблема в подхода с мултиплексиране с разделяне на дължината на вълната (WDM) при оптичните мрежи. Процесът на установяването на направления за предаване на светлинни потоци по отношение на всяка заявена връзка чрез определяне на подходящ маршрут и задаване на необходимата дължина на вълната, е известен като RWA проблем. В оптичните мрежи, базирани на WDM, без преобразуватели с дължина на вълната, трябва да се използва една и съща дължина на вълната за всички маршрутни участъци от край до край по цялото направление на връзката. Това свойство е известно като „ограничение за непрекъснатост на дължината на вълната“. Разликата между RSA и RWA се дължи на способността на архитектурата EON да предлага гъвкаво разпределение на спектъра, за да отговори на изискваните скорости на трансфер на данни по отношение на потребителите [60].



Фиг. 8.13. Пример за ограничения за „непрекъснатост“ и „свързаност“

По-горе е илюстрирана концепцията за ограниченията за „свързаност между източника и получателя“ и „непрекъснатост на разпределението на радиочестотния спектър“. За целта е разгледан мрежовият сегмент, представен на фиг. 8.13. Сценарият предполага заявка за връзка, която изисква битова скорост, еквивалентна на два канала за RSA от изходния възел 1 до целевия възел 4. Заявката за свързване не може да бъде установена чрез най-краткия маршрут 1 – 2 - 4, тъй като връзките от мрежови звена 1 - 2 и 2 - 4 имат два съседни канала, които не са непрекъснати, поради тази причина в този случай ограниченията за „непрекъснатост“ и „свързаност“ не са изпълнени. Ограниченията могат да бъдат удовлетворени, ако връзката използва дефинирания маршрут 1 – 2 – 3 - 4 и спектралните канали 5 и 6 [59].

RWA в оптичните мрежи, опериращи на основата на WDM технологията, е недетерминиран Polynomial Time (NP)-hard проблем, който е задълбочено изучаван през последните двадесет години. Тъй като броят на дължините на вълните е еквивалентен на количеството на спектралните канали във всяка оптична връзка, то проблемът с RWA се свежда до такъв с RSA. За всяка отправена заявка за направление за предаване на светлинен поток, ако RWA изисква 1 дължина на вълната по съответното направление (канал), това се определя като равносилно на заявка за канал с 1 спектър по направление за предаване на светлинен поток в проблема с RSA. Тази редукция е в рамките на установеното Polynomial Time. Решаването на двата проблема с RWA и RSA е строго взаимосвързано [52, 60].

8.6. Сравнителен анализ между политики за маршрутизиране

Таблица 4.1 обобщава основните дефинирани правила за маршрутизиране и дава сравнителна характеристика относно тяхното представяне по отношение на „вероятността за блокиране“ и „средното време за настройка“. Вероятността за блокиране в мрежата се дефинира като съотношението на броя на заявките за блокирани мрежови направления за предаване на светлинни потоци спрямо тяхното заявеното общо количество в мрежата. Средното време за настройка в мрежата се определя като общо време за изпълнение, което е необходимо за установяване на стабилна мрежова свързаност спрямо всички изисквани направления за предаване на светлинни потоци в мрежата до броя на вече реализираните успешни връзки. Анализирайки резултатите трябва да се отбележи, че при FR подхода е налице най-ниската средна продължителност на настройката и количествена времева оценка за алгоритмично изпълнение спрямо всички политики за маршрутизиране [52].

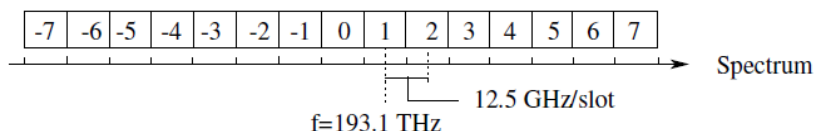
Табл. 8.1. Характерисики на различните политики за маршрутизиране

Мрежови процес	Подход	Анализ на производителността		Състояние	
		БР	AST	Онлайн / Офлайн	
/проблем/ МАРШРУ - ТИЗИРАНЕ	Статичен	FR	Вероятност за блокировка С по-висока БР от останалите	Средно време за настройка С по-малка продължителност AST от останалите	Офлайн
		FAR	С по-ниска БР в сравнение с FR	По-продължителен AST в сравнение с FR	Офлайн
		LCR	Почти същата като FAR	Почти същия като FAR	Офлайн
	Динамичен	AR	С по-ниска БР от останалите	По-продължителен AST от останалите	Онлайн

Неговата вероятност за блокиране обаче е най-висока. AR осигурява най-добрата производителност по отношение на вероятността за блокиране, но времевата му сложност е най-висока. FAR предлага компромис между сложността на времето и вероятността за блокиране.

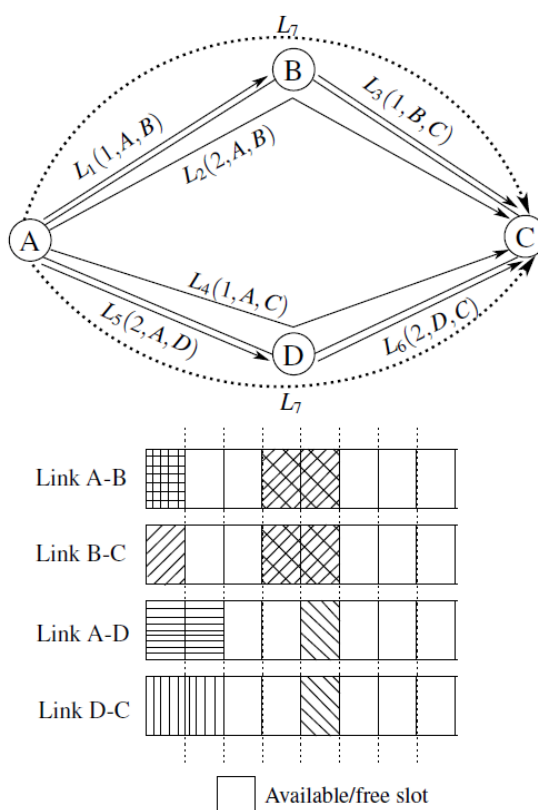
- **Маршрутизация с еластични характеристики**

При този подход честотните канали се основават на фиксираните мрежи ITU-T, където централната честота е зададена на 193,1 THz. Широчината на честотния канал зависи от предавателната система. В посочения по-долу сценарий оперативният честотен канал се приема да бъде 12,5 GHz (фиг. 8.14). По отношение на пакетното предаване в разглежданата честотна лента на заявената за конкретния пример свързаност е налице комплексно коректно разпределение на честотните канали, последователно детерминирани в честотната област [60].



Фиг. 8.14. Подход за дефиниране на честотен канал за еластични оптични мрежи

В архитектурните EONs маршрутизирането по един маршрут чрез RSA подхода, може да се свърже със създаване на проблема с фрагментацията на спектъра, което да предизвика неефективност. За да бъде преодолян този недостатък, за EON е разгледан сценарий на многовариантен маршрут за пакетно предаване на фиг. 8.15. В рамките на конкретния случай се реализира заявка за направление за предаване на светлинен поток $L(F;S;D)$, където F, S и D са съответно броят на необходимите съседни канали, източник и местоназначение за получаване на пакетни данни [61].



Фиг. 8.15. Концепция за многовариантен маршрут или маршрут с разпределен спектър в EONs

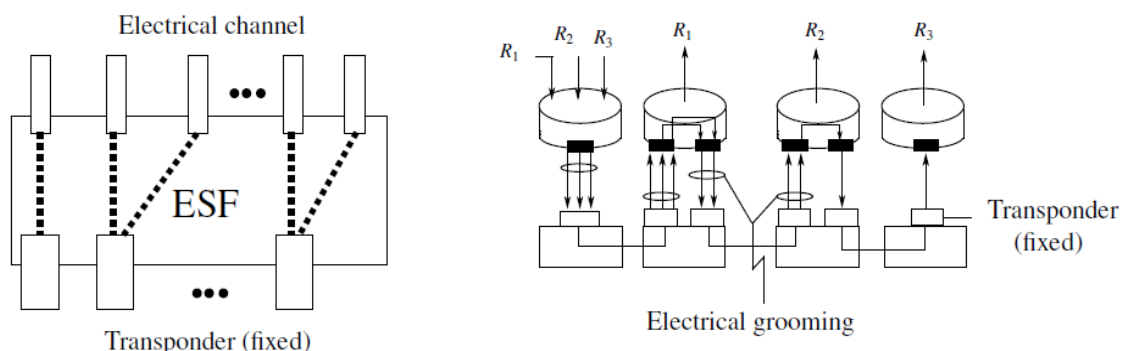
Предполага се, че заявките за направления за предаване на светлинни потоци постъпват в системата по сериен начин. Наличните канали се асоциират с фрагментирани канали след процедурно разпределение на спектъра към заявените направления $L1, L2, \dots, L6$. В рамките

на поставения контекст, ако заявката за направление за предаване на светлинен поток L7 постъпи в обхвата на възел А с прието назначение възел С с изискване за изключване на установените последователни канали, то следва тя да бъде отхвърлена, тъй като необходимите за целта канали не са налични. Въпреки този факт, две заявени направления за предаване на светлинни потоци, т.е. А - В - С и А - D - С, всяко, от които ще използва два последователни назначени канала, могат да бъдат настроени за обслужване от страна на звено L7. Този тип маршрутизация, наречена *multipath routing* или понякога маршрутизация със спектрално разделяне се разглежда като следствие от фрагментация на спектъра. Многовариантното маршрутизиране може да се използва като подход за обработка на фрагменти от спектъра, които са много често срещани при динамични сценарии за обслужвания мрежови трафик [52, 60, 61].

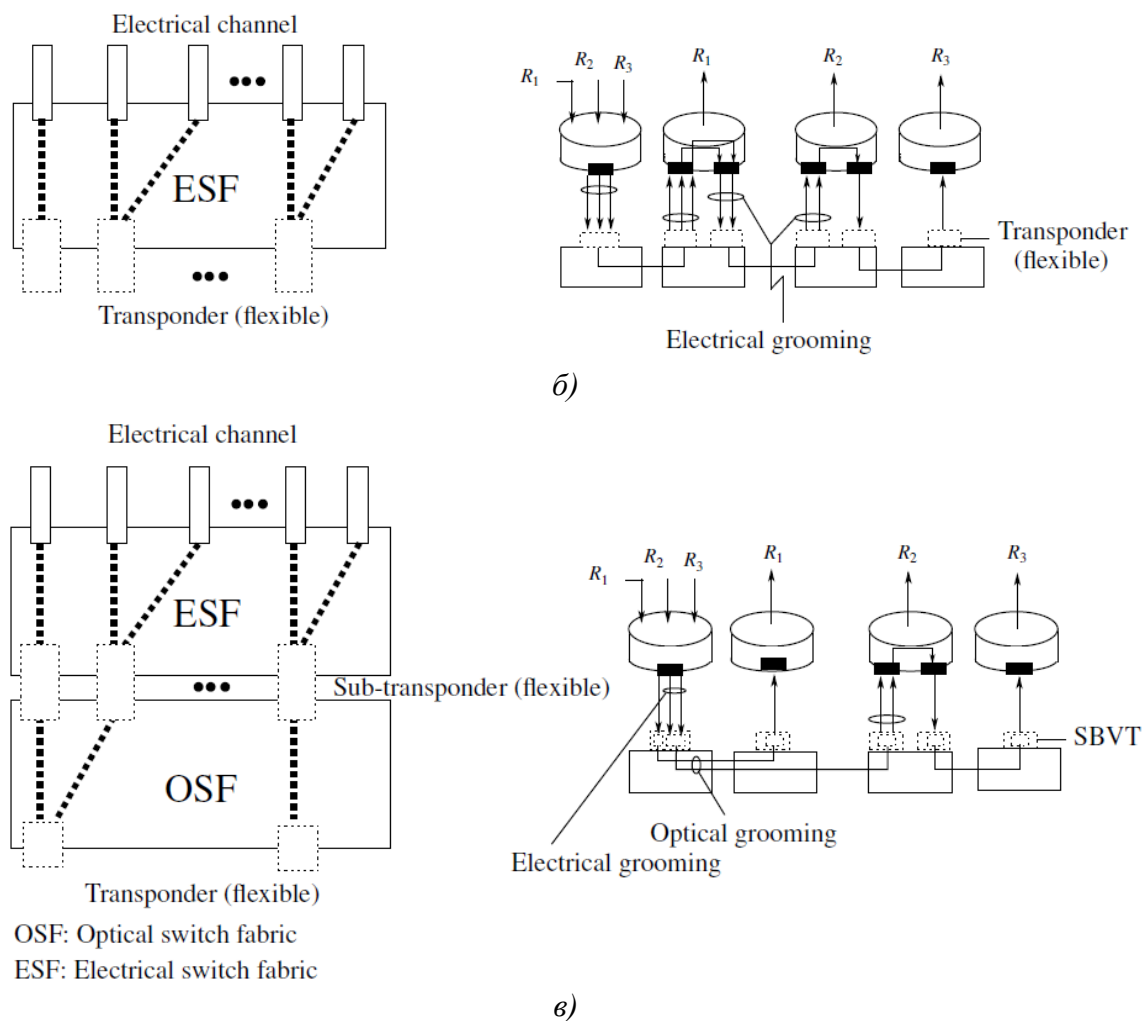
8.7. Traffic grooming или групиране на инициирани малки телекомуникационни потоци в единна голяма информационна единица

В оптичните мрежи, базирани на мултиплексиране с разделяне по дължината на вълната WDM, процесът *traffic grooming* служи за мултиплексиране на редица заявки за нискоскоростна връзка в WDM с голям капацитет за подобряване на използването на ресурсните канали. Групирането на информационни потоци подобрява използването на ресурсите чрез обединяване на множество канали за пренос на електрически сигнали в структурата на един оптичен канал [52].

EON разпределя спектралните ресурси с достатъчно ефективна честотна лента, за да задоволи нуждите по отношение на заявения обслужван трафик. BVT се проектират за непосредствено максимизиране на скоростта на трафика в мрежата. Процедурният *traffic grooming* се отнася до прилагане на техники за електрическо насочване на трафика, за да се използва ефективно капацитетът на приемопредавателя. В подобен вид системи се прилагат техники за спектрално разпределяне с обособяване на зони на неизползване на радиочестотния спектър между две честотни ленти за разрешаване на проблемите с оптичния филтър. Групирането на трафичните потоци може да минимизира тези зони, по отношение на филтъра чрез електрическо агрегиране на трафика. На този етап специализираната *electric switching* структура все още е необходима за процеса *traffic grooming* в EON, подобно на WDM мрежите. Основната разлика тук е, че приемо-предавателят, използван в EON, не следва строго централната честота на ITU-T. В резултат на това може да осигури значително по-добра гъвкавост на оптичните канали. Относно подобряване на гъвкавостта и премахване на електрическата обработка изследователските колективи в областта на оптичните комуникации са проектирали техническото решение SBVT за EON [58, 62].



a)



Фиг. 8.16. Сравнение на насочването на трафика в а) оптични мрежи, базирани на WDM, б) еластични оптични мрежи с BVT и в) еластични оптични мрежи с SBVT

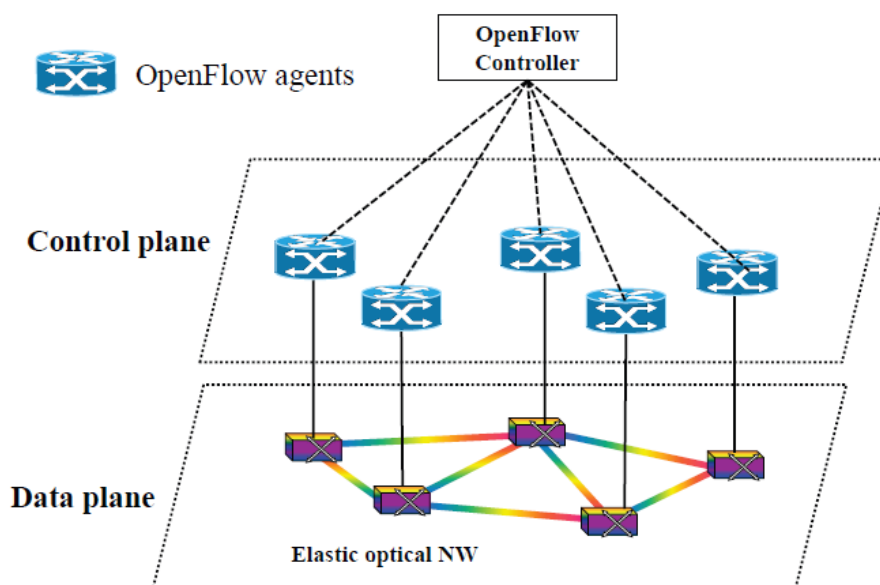
В EONs на основата на SBVT функцията за групиране на информационните потоци в комплексна единица за пакетно предаване може да бъде частично пренесена от електрическия към оптичния слой. Множеството sub-transponder или гъвкави оптични канали са насочени оптично по направление към единичен приемно-предавател, използвайки оптична комутационна структура (BV-OXC и т.н.), известна под названието optical traffic grooming. Фигура 8.16 онагледява разликата между насочване на трафичните потоци в единно направление в оптични мрежи с WDM технология, с BVT и SBVT технически решения в EON. Ефективността на спектъра и използването на приемно-предавателя се подобряват в WDM-базираните оптични мрежи. Впредвид процеса на формиране на единно трафично направление за пренос на пакетни данни с BVT в EON, се постига подобряване използването на приемно-предавателя и ограничава употребата на честотна лента. Обединяването на трафични потоци при приложение на SBVT в EON елиминира електрическата обработка чрез асоцииране на части от функцията за трафично насочване към оптичния слой [52, 58, 62, 63].

8.8. Софтуерно дефинирани еластични оптични мрежи

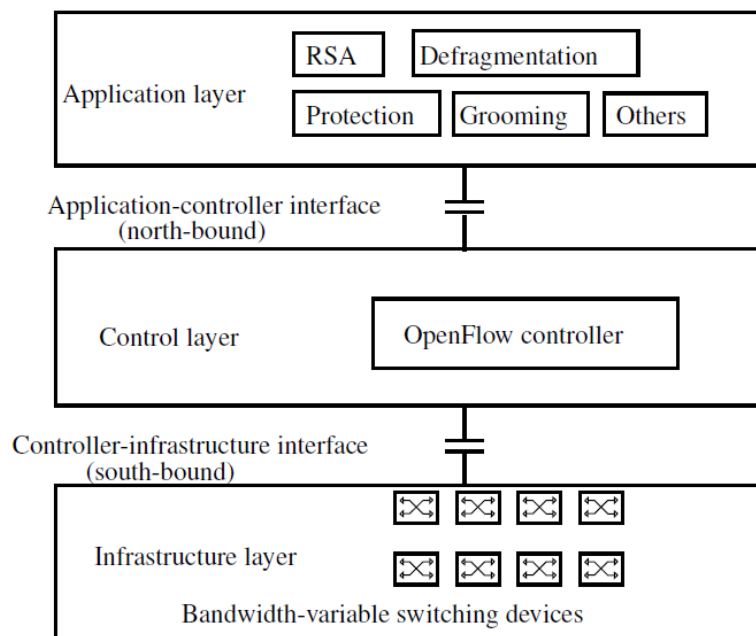
В днешно време *Software-Defined Networking (SDN)* е съчетана с Flex-Grid (гъвкава решетка) технологията за целево подобряване на използваемостта на източника на ресурсни данни. С постоянното експоненциално нарастване на изискванията към честотната лента традиционните оптични мрежи поставят нови предизвикателства пред бъдещите мрежови концепции. Именно тук появата и внедряването на SDN внася необходимата иновация в

технически мрежови решения за обслужване на потребителския трафик. Обикновено компютърните услуги и услугите за съхранение могат да използват предимствата на виртуализацията и автоматизацията. SDN технологията предлага мрежови инструменти за повече гъвкавост, контрол и директен подход към персонализация и виртуализация посредством използване на стандартизирани лимитирани мрежови ресурси [52, 64].

Софтуерно дефинираната EON (SD-EON) архитектура, дадена на фиг. 8.17, е създадена на основата на две разграничени структурни звена „ниво на данните“ и „ниво на управлението“. Нивото на данните се отнася до оптично мрежово оборудване – optical amplifiers, BVT и (BV-WXC), посредством което се създават оптични канали за пренос на оптични сигнали. Нивото за управление се състои от специфициран OpenFlow контролер и няколко OpenFlow звена. OpenFlow контролерът е предназначен за управление на честотните спектрални ресурси, докато OpenFlow звената служат за процедурен контрол на трансфера на данни.



Фиг. 8.17. Архитектура на SD-EON



Фиг. 8.18. Слоеове на референтния модел на SD-EON

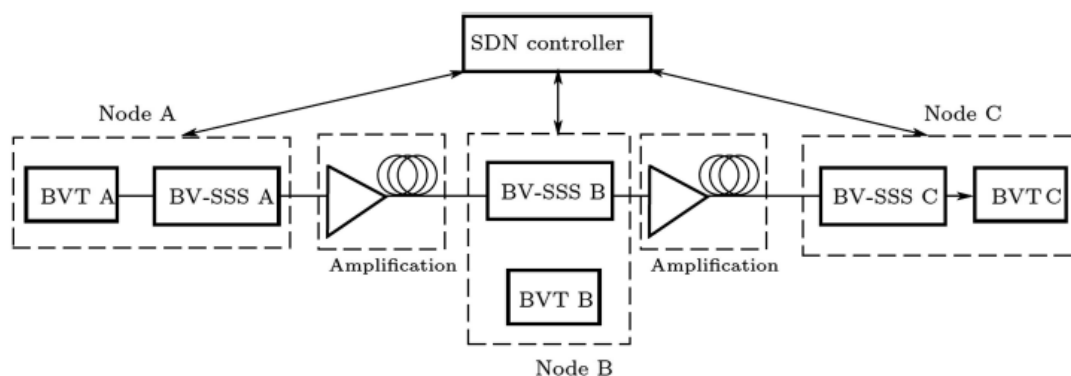
Референтният модел на SD-EON на фиг. 8.18 представлява съвкупност от три структурни слоя, които в последователност отдолу нагоре са: Infrastructure layer, Control layer и Application layer. В „нивото на данните“ обикновено се използват BVT, Optical Amplifiers и BV-WXC за изграждане на инфраструктурния слой. Характерни са две основни функционалности, изпълнявани от тези комуникационни устройства, изразяващи се в следното [52, 64, 65]:

- ❖ събиране на мрежова информация, времево информационно съхраняване в предвидени локални устройства и впоследствие насочването и към структурните контролери;
- ❖ допълнителна обработка на данни от страна на съхраняващите звена в съответствие с насоките, предоставени от администратора.

Control layer изпълнява ролята на хардуерен мост между Application и Infrastructure layer чрез два интерфейса - south-bound и north-bound интерфейси. С помощта на south-bound интерфейс Control layer реализира инициране на комуникационни устройства за активиране на функционалности за отчитане на състоянието на мрежата и регламентиране на правилата за изпращане и предаване на пакетни данни. Чрез north-bound интерфейса указаният структурен слой предлага достъп до услуги в различни формати - Application Programming Interface (API) и т.н. Използвайки съответния софтуерен инструмент API, SD-EON приложенията осъществяват събиране на мрежова информация от различни комуникационни компоненти за превключване на честотната лента и изграждат комплексни системни решения въз основа на натрупаната и обработената информация. Application layer е предназначен за удовлетворяване на изискванията на системните потребители. SD-EON специфицираните приложения реализират следните функции:

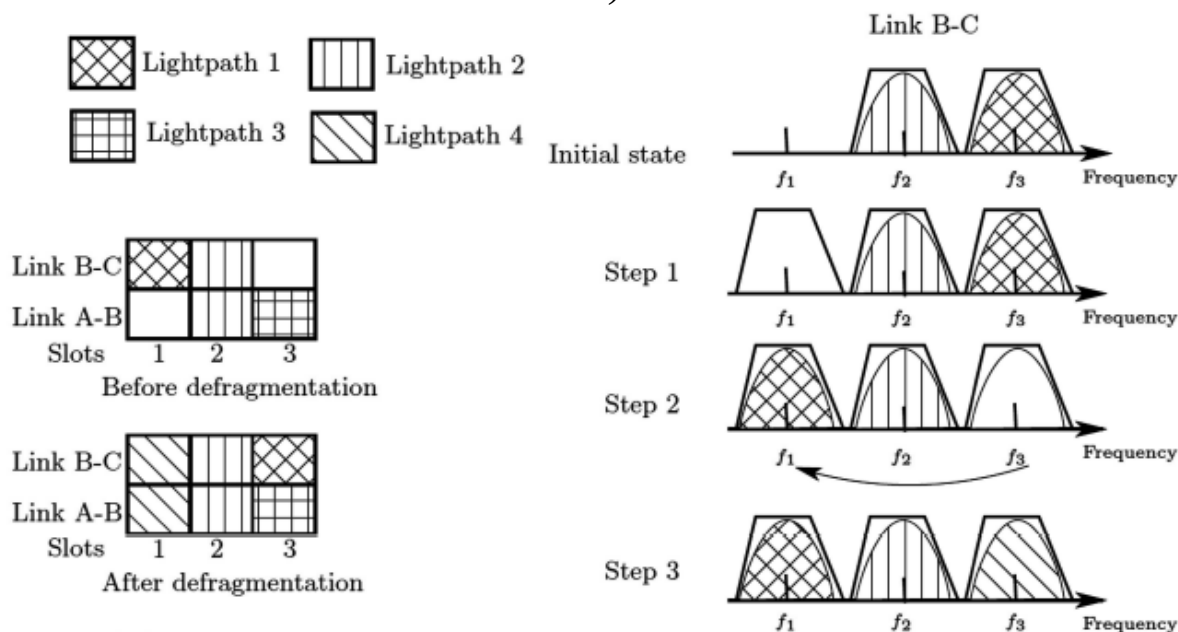
- оторизиран достъп и управление на ресурсните комутационни модули в Infrastructure layer посредством програмируемата платформа, предоставена от Control layer;
- маршрутизиране и RSA процедури, групиране на трафични потоци в комплексна информационна единица (traffic grooming), дефрагментиране, балансиране на натоварването на сървъра, персонализация и виртуализация на мрежата, динамичен контрол на достъпа и др. [64, 65].

Основната разлика между традиционните SDN и SD-EON архитектури се дължи на мрежовите елементи, които формират нивата на данните. Обикновено за изграждането на „нивото на данни“ на SD-EON се използват приемопредаватели с вариационна регулация на честотната лента и switching комуникационни компоненти, докато при SDN обикновени. От друга страна, в традиционната SDN се използват нормални switches. Ресурсният източник на данни в „нивото на управление“ в SD-EON се явяват унифицираните спектрални канали, което е още едно от различията между иновативната SD-EON и SDN технологията. Освен това, когато се извършва процедурно изчисляване на трафичните маршрути, Control layer в структурата на SD-EON разглежда няколко аспекта като формати на модулация и количество на необходимите изисквани спектрални канали [52, 66].



BV-SSS: Bandwidth-variable spectrum selective switch
 BVT: Bandwidth-variable transponders
 SDN controller: Software-defined network controller

a)



б)

в)

Фиг. 8.19. Концепция за дефрагментиране а) SD – EON архитектура с три възела, б) пренастройка на спектъра преди и след дефрагментиране и в) няколко стъпки за дефрагментиране за въвеждане на новосъздадения канал за предаване на светлинни сигнали

Фигура 8.19 представя типична SD-EON архитектура, основава се на пренастройване на междинните мрежови възли при предаване на съобщения (hops). В конкретния сценарий се разглежда техническо решение при три мрежови възела А, В и С, които са свързани към SDN контролер. Всеки hop е оборудван с приемопредавател с променлива честотна лента и BV-SSS модул за администриране на трафика. При възникнала необходимост от процедурна дефрагментация за направлението на предаване на светлинни потоци, SDN контролерът извършва синхронизация между междинните възли със съответното комуникационно оборудване. Пренастройката на спектъра на различните канали, за пренос на светлинни сигнали 1, 2 и 3 на направления А - В и В - С преди и след процес на дефрагментиране, е изобразена на фиг. 8.18.б). Когато заявката за канал за пренос на светлинен поток 4, се активира за установяване на канал от мрежови възел А до възел С, е наличен спектрален канал 1 за връзка по възлово направление А – В. Ако каналът за пренос на светлинни сигнали 1 се

измести или прехвърли от направление 1 в направление за пренос на светлинен поток 3 според пренастройката на мрежовия участък от структурни междинни звена при предаване на съобщения, то честотният ресурс на спектъра ще се използва ефективно. По този начин спектралният канал може да бъде достъпен по направление за предаване на светлинни сигнали В-С, вследствие, на което се осъществява процедурна настройка на ново направление за предаване на светлинен поток 4. Стъпково дефрагментиране с реконфигуриране на BV-SSS за въвеждане на новия създаден канал за пренос на светлинни сигнали е показано на фиг. 8.19.в). Относно разглеждания сценарий се предполага, че по отношение на всяко изградено направление за пренос на данни в светлинен формат е необходим един спектрален канал, а *централните честоти* f_1 , f_2 и f_3 се използват съответно за оптични направления 1, 2 и 3. Първоначално преди дефрагментацията е наличен канал за предаване на светлинни потоци 1 на централна честота f_1 и следователно разпределеният спектър на f_3 се пренастройва на честота f_1 . Сега спектърът на f_3 е наличен, за да се проведе настройка във връзка с новосъздаденото и въведено направление за пренос на светлинни сигнали 4 [52, 64-66].

СПИСЪК С ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ НА БЪЛГАРСКИ ЕЗИК

- **АТЦ** – Автоматична Телефонна Централa
- **АЧХ** – Амплитудно-Честотна Характеристика
- **Б** - кабел тип „Б“ – кабел Брониран с лентова броня
- **ВОСЛ** - Влакнесто-Оптичните Съобщителни Линии
- **Г** - кабел тип „Г“ – кабел Гол само със защитна оловна обвивка
- **ЕМВ** - Електромагнитни Вълни
- **ИКМ** – Импулсно-Кодова Модулация
- **КС** – Крайна Станция
- **М** - кабел тип „М“ – Магистрален симетричен кабел
- **МС** - Междинни ретранслаторни Станции
- **МХ** – Мултиплексор
- **ОК** – Оптичен Кабел
- **РКВ** - Разделяне на Каналите по Време
- **РКЧ** - Разделяне на Каналите по Честота
- **РРЛ** - Радиорелейна Линия
- **РРС** - Радиорелейна Система
- **СВЧ** – Свръхвисокочестотни
- **Т** – кабел тип „Т“ – Телефонен кабел
- **ТК** – Телекомуникационна
- **ТЦ** – Телефонна Централa;
- **УС** - Управление на Стафинга
- **УТС** - Уплътнителни Телефонни Системи
- **ФЧХ** - Фазово-Честотна Характеристика

СПИСЪК С ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ НА АНГЛИЙСКИ ЕЗИК

- **A/D** – Analog-to-Digital
- **AoD** – Architecture on Demand
- **ADMX** – ADD/DROP Multiplexer
- **ADPCM** – Adaptive Differential Pulse-Code Modulation
- **ADSL** – Asymmetrical Digital Subscriber Line
- **AG** – Auxiliary Graph
- **AM** – Amplitude Modulation
- **APD** – Avalanche Photodiode
- **API** – Application Programing Interface
- **AR** – Adaptive Routing
- **ATM** – Asynchronous Transfer Mode network
- **AST** – Average Setup Time
- **ATM** - Asynchronous Transfer Mode
- **AU** - Administration Unit
- **AUG** - Administration Unit Group
- **BER** – Bit Error Rate
- **BIP** - Bit Interlived Parity
- **BISDN** – Broadband Integrated Services Digital Network
- **BP** – Blocking Probability
- **BV-SSS** – Bandwidth-Variable Spectrum Selective Switch
- **BVT** – Bandwidth Variable Transponder
- **BV-WXC** – Bandwidth Variable Cross-Connect
- **CCMX** – Cross-Connect Multiplexer
- **CDM** - Code Division Multiplexing
- **DCC** – Direct Communication Channel
- **DF** – New Data Flag
- **DMX** – Демултиплексор
- **DWDM** – Dense Wavelength-Division Multiplexing
- **EDFA** – Erbium-Doped Fiber Amplifier
- **EON** – Elastic Optical Network
- **GSM** – Global System for Mobile Communication
- **FAR** – Fixed Alternative Routing
- **FAW** - Frame Aligument Word
- **FDM** - Frequency Division Multiplexing
- **FEBE** – Far End Blok Error
- **FEC** – Forward Error Correction
- **FERF** – Far End Receive Failur
- **FM** – Frequency Modulation

- **FR** – Frame Relay
- **FR** – Fixed Routing
- **HDB** – High Density Bipolar code
- **HDSL** – High-bit-rate Digital Subscriber Line
- **ITU** – International Telecommunication Union
- **ITU-T** – International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector
- **LAN** – Local Area Network
- **LCR** – Least Congested Routing
- **LED** – Light Emitting Diode
- **LTU** – Line Termination Unit
- **MILP** – Mixed Integer Linear Programming
- **MPLS** – Multiprotocol Layer Service
- **MSOH** - Multiplex Section Over Head
- **MSP** – Multiplex Section Protecting
- **MST** – Multiplex Section Termination
- **NSMX/SDMX** – Synchronous Multiplexer/Demultiplexer
- **NTU** – Network Terminal Unit
- **OCC** – Optical Channel Carrier
- **OCh** – Optical Channel
- **ODUk** – Optical Data Unit k level
- **OFDM** – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- **OH** - Over Head
- **OLA** – Optical Laser Amplifier
- **OMU** – Optical Master Unit
- **OMS** – Optical Multiplex Section
- **OMX/ODMX** – Optical Multiplexer/Optical Demultiplexer
- **ONNI** – Optical Network Node Interface
- **ONT** – Optical Network Terminal
- **OPS** – Optical Physical Section
- **OPUk** – Optical Payload Unit k
- **OSC** – Optical Supervisory Channel
- **OTM** – Optical Termination Module
- **OTS** – Optical Transmission Section
- **OUTk** – Optical Unit Tolerance k
- **OXC** – Optical cross-connect
- **PCM** – Pulse-Code Modulation
- **PDH** – Plesiochronous Digital Hierarchy
- **PCM** – Pulse Code Modulation
- **PLL** – Phase-Locked Loop
- **POH** - Path Over Head

- **POTS** - Plain Old Telephone Service
- **PTR** – Pointer
- **QAM** – Quadrature Amplitude Modulation
- **QPSK**- Quadrature Phase Shift Keying
- **REG** – Regeneration Gene
- **ROADM** – Reconfigurable Add/Drop Multiplexer
- **RSA** – Routing and Spectrum Allocation
- **RSOH** - Regenerdtor Section Over Head
- **RST** - Regenerator Section Termination
- **RWA** – Routing and Wavelength Assignment
- **SBVT** – Sliceable Bandwidth-Variable Transponder
- **SD-EON** - Software-Defined Elastic Optical Network
- **SDH** - Synchronous Digital Hierarchy
- **SDN** – Software-Defined Network
- **SONET** – Synchronous Optical Network
- **SDSL** – Symmetric Digital Subscriber Line
- **S/N (SNR)** – Signal to Noise Ratio
- **SMDS** - Switched Multimegabit Data Service
- **SOH** - Section Over Head
- **SPI** – Serial Peripheral Interface
- **SSS** – Spectrum Selective Switch
- **STM** – Synchronous Transport Module
- **TB** - Tributary Bit
- **TDM** - Time-Division Multiplex
- **TMN** - Telecommunication Management Network
- **TU** - Tributary Unit
- **TUG** - Tributary Unit Group
- **VC** - Virtual Container
- **VDSL** – Very high speed Digital Subscriber Line
- **WDM** - Wavelength Division Multiplexing
- **xDSL** –Digital Subscribers Line family
- **WSSs**– Wavelength Selective Switches

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Бичев Г., „Мултиплексни системи“. Изд. „Нови знания“, 1998.
2. Пулков В., Р. Димова, „Мултиплексиране в телекомуникациите“. Изд. „Нови знания“, София, 2000.
3. Sodha J., Fundamentals of Communication Systems. AppBooke Publishing, 2015.
4. Haykin S., M. Moher, Communication Systems. Wiley, 2021.
5. Bhooshan S., Fundamentals of Analogue and Digital Communication Systems. Springer, 2022.
6. Penttinen J., The Telecommunications Handbook Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems. John Wiley & Sons, 2015.
7. Lawrence L., Capacity of Large Communications Channels: Theory and Systems. Laurence Lawrence, 2020.
8. Мерджанов П., Е. Пенчева, З. Кирова, „Сигнализация в телекомуникациите“. Изд. „Нови знания“, София, 2000.
9. Spezia S., Digital Communication Systems: Signals, Channels and Signaling. Arcler Press, 2020.
10. Jain N., A. Yadav, A. Jain, Analog and Digital Communication. Ashirwad, 2019.
11. Мирчев С., „Цифрови комутационни съобщителни системи“. Изд. „Нови знания“, София, 2000.
12. „Alcatel Telecommunications Review“. Special Issue for TELECOM'95, 1995.
13. Regis J., „Broadband Telecommunications Handbook“. McGRAW Hill Telecom, 2004.
14. Freeman R., Telecommunication System Engineering. Wiley – Interscience, 2015.
15. Dodd A., Essential Guide to Telecommunications. Pearson, 2019.
16. Naugle M., „Network Protocol Hadbook“. McGraw - Hill, 1994.
17. Kerner H., „Rechnernetze nach OSI“. Addison – Wesley, Bonn, Munchen, Paris, 1992.
18. Black U., „OSI. A Model for Computer Communications Standards“. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey, 1991.
19. Martin J., Leben J., „TCP/IP – Network“. Prentice Hall, 1994.
20. Camp K., „IP Telephony Demistified“. McGraw – Hill, 2003.
21. Agrawal G., Fiber – Optic Communication Systems. John Wiley & Sons, 2010.
22. Sibley M., Optical Communications: Components and Systems. Springer, 2020.
23. Katralopoupos S., Free Space Optical Networks for Ultra-Broad Band Services. Wiley – IEEE Press, 2011.
24. G. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems. Wiley, 2021.
25. Elmaasarawy A., Fundamentals of digital transmission systems: Practical view of PCM, PDH, SDH, OTN and DWDM. Independently published, 2021.
26. Lingren B., „The X.25 Handbook“. INFOTRAN, Kalmar, Sveden, 1990.
27. Stottinger K., „Datenpaketvermittlung“. DATACOM – VERLAG, Bergheim, 1995.
28. Stottinger K., „X.25 Datenpeketvermittlung“, DATACOM's Verlag, Bergheim, 1995.
29. Elmaasarawy A., Understanding Different Types of Digital Transmission Systems: Practical Study of PCM, PDH, SDH, OTN and DWDM. Ayman Elmaasarawy, 2021.
30. Мерджанов П., Р. Голева, „ISDN Цифрова мрежа с инерция на услугите“. Изд. „Нови знания“, София, 1999.
31. Бичев Г., „Многоканални цифрови системи“. Изд. „Техника“, 1981.
32. Mills D., Computer Network Time Synchronization. CRC Press, 2016.
33. Пулков В., „Цифрови йерархии в телекомуникациите“. Изд. „Нови знания“, 1998.
34. Градинарова Е., „Цифрови уплътнителни системи“. Изд. „София“, 2000.

35. Collins R., Network Security Monitoring. Robert Collins, 2017.
36. "EI/TIA - Standard: "Commercial Building Telecommunications Wiring Standards", 1998.
37. Graham E., M. Hodge, T. Chapman, Practical Network Security Monitoring. Elizabeth Graham, 2020.
38. Станев И., Н. Първанова, Б. Бърдарски, „Преход към мрежи от следващо поколение“. ЦЕНТИ, София, 2004.
39. Katre J., V. Joshi, Techknowledge – Optical Communication and Networks. Techknowledge Publications, 2023.
40. Ненков А., „Уплътнителни телефонни системи“. Изд. „Техника“, 1990.
41. "MSF Technical Report: Next – Generation VoIP Network Architecture". Multiservice Switching Forum, 2003.
42. Blokdyk G., Core Multiplexing Technology A Complete Guide. 5STARCook, 2018.
43. Blokdyk G., Multiplexing Complete Self-Assessment Guide. 5STARCook, 2018.
44. Ashraf U., R. Jha, Hybrid Optical Networks: A step towards Next Generation Optical Networks. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
45. Badach A., „Integriert Unternehmens – Netze“. Hutig Verlag Heidelberg, 1997.
46. Градинарова Е., „Съпосочен интерфейс с пропускателна способност 64 kbit/s за предаване на данни». Сборник доклади на Международен симпозиум «Изграждане на цифрови съобщителни системи», Варна, 1983.
47. Hebbar H., Optical Fiber Communication. GENGAGE, 2016.
48. Chadha D., Optical WDM Networks: From Static to Elastic Networks. IEEE Press, 2019.
49. Parveen, Basics of Optical Transmission & DWDM. Parveen, 2016.
50. Cumar Ch., G. Kumar, Optical Amplifiers for WDM/DWDM Systems. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020.
51. Debasish D., Optical Networks. Oxford University Press, 2021.
52. Chatterjee B., E. Oki, Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design and Management, CRC Press – Taylor and Frances Group, 2020.
53. Velasco L., L. Lopez, Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies and Control. Springer International Publishing, 2018.
54. Kuno T., J. Mori, S. Subramaniam, M. Jinno, H. Hasegawa, "Design and Evaluation of a Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer With Flexible Wave-Band Routing in SDM Networks". Journal of Optical Communications and Networking, vol. 14, № 4, 2022.
55. Sharma D., S. Kumar, "An Overview of Elastic Optical Networks and Its Enabling Technologies". International Journal of Engineering and Technology, vol. 9, № 3, 2017.
56. Agarwal A., G. Mirsa, K. Agarwal, A Review and Analysis on Elastic Optical Networks (EONs): Concepts, Recent Developments and Research Challenges. Journal of The Institution of Engineers, vol. 103, 2022.
57. Chadra D., Optical WDM Networks From Static To Elastic Networks. IEEE Press Wiley, 2019.
58. Bar J., Elastic Optical Networks. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.
59. Chatterjee B., N. Sharma, E. Oki, Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. IEEE Communication Services & Tutorials, vol. 17, № 3, 2015.
60. Khodashenas P., Dynamic Routing and Resource Allocation in Elastic Optical Networks. Lap Lambert Academic Publishing, 2015.

61. Chand Chatterjee B., N. Sarma, P. Pratim Sahu, E. Oki, Routing and Wavelength Assignment for WDM-based Optical Networks. Springer International Publishing, 2026.
62. Miladić-Tešić S., G. Marković, V. Radojičić, Traffic Grooming Technique for Elastic Optical Networks: A Survey. ELSEVIER Optik, vol. 176, 2019.
63. Assis K., R. Almeida, A. Santos, Grooming Benefits on Designing Elastic Optical Networks: An Exact Formulation. IEEE SBFoton International Optics and Photonics Conference, vol. 1, 2018.
64. Rakesh J., B. Llah, Software Defined Optical Networks (SDON): Proposed Architecture and Comparative Analysis. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, vol. 15, № 16, 2019.
65. Jason J., V. Eramo, V. López, Z. Zhu, Software-Defined Elastic Optical Networks. Phonic Network Communications, vol. 28, 2014.
66. Monteiro N., A. Fontinele, D. Campelo, A. Soares, Provision of Adaptive Guard Band in Elastic Optical Networks. Journal of Internet Services and Applications, vol. 11, № 5, 2020.

СЪДЪРЖАНИЕ

I.	МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ И МУЛТИПЛЕКСНИ СИСТЕМИ	5
	1.1 Мултиплексиране	5
	1.2 Основни видове мултиплексиране	6
	1.3 Мултиплексни системи	10
	1.3.1 Основни понятия	10
	1.3.2 Етапи на развитие на мултиплексните системи	11
	1.4 Класификация на методи за мултиплексиране	12
	1.5 Основни величини и измервателни единици	13
	1.6 Канал. Параметри и норми за оценка	16
II.	СЪОБЩЕНИЯ, СИГНАЛИ И КАНАЛИ	19
	2.1 Съобщения в телекомуникациите	19
	2.2 Сигнали в телекомуникациите	21
	2.3 Комуникационни канали. Видове. Параметри	29
III.	ПРЕНОСНИ СРЕДИ И СИСТЕМИ В ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИТЕ	36
	3.1 Общи сведения	36
	3.2 Електропроводни линии с разделителни параметри	37
	3.2.1 Първични параметри	39
	3.2.2 Вторични параметри	41
	3.3 Въздушни съобщителни линии	49
	3.4 Кабелни електропроводни съобщителни линии	50
	3.5 Влакнесто – оптични съобщителни линии. Общи сведения	54
	3.6 Свободното пространство като преносна среда	62
	3.7 Радиорелейни линии	65
	3.8 Спътникови радиокомуникационни системи	66
IV.	ПЛЕЗИОХРОННА ЦИФРОВА ЙЕРАРХИЯ - PDH	68
	4.1 Общи характеристики на PDH	68
	4.2 Мултиплексиране на цифрови плезиохронни сигнали	69
	4.2.1 Метод на положителния стафинг	69
	4.3 Структура на циклите	71
	4.4 Принцип на работа на плезиохронен мултиплексор/демултиплексор	73
	4.5 Недостатъци на PDH – йерархията	73
V.	СИНХРОННА ЦИФРОВА ЙЕРАРХИЯ	75
	5.1 Произход и концепции	75
	5.2 Основни характеристики SDH	75
	5.3 Принципи на синхронното мултиплексиране	79
	5.3.1 Елементи на синхронния транспортен модул	79
	5.3.2 Изграждане на STM -1	81
	5.3.3 Изграждане на потоци от по – висок ред STM - N	84
	5.4 Структура и функции на управляващите полета ОН в STM-1	84
	5.4.1 Заглавна страница на секцията SOH	84
	5.4.2 Заглавна страница на пътя POH	86
	5.5 Синхронизация чрез поинтери	87

5.5.1	Пойнтер	88
5.5.2	Метод на двустранния стафинг	89
5.6	Синхронни мултиплексори	91
5.6.1	Функции	92
5.6.2	Видове синхронни мултиплексори	94
5.6.3	Системни конфигурации	98
5.7	Методи за управление и наблюдение на мрежата	100
5.7.1	Системи за наблюдение и контрол на телекомуникациите	103
5.8	Синхронни мултиплексори за въвеждане/извеждане	105
VI.	МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ В АБОНАТНАТА МРЕЖА	110
6.1	Технологии за абонатен достъп	110
6.2	Мултиплексирани устройства за абонатни линии	111
6.3	xDSL технологии	113
6.3.1	HDSL модеми	114
6.3.2	HDSL приложения	117
VII.	МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ С РАЗДЕЛЯНЕ ПО ДЪЛЖИНА НА ОПТИЧНАТА ВЪЛНА	120
7.1	Характеристики на развитие на оптичното мултиплексирание	120
7.2	Принципи на изграждане на мултиплексиращи устройства	122
7.3	Параметри на цифрови системи с DWDM	124
7.4	Изграждане на оптични системи	127
7.4.1	Модел на оптична мрежа	127
7.5	Структура и формиране на ОТМ съгласно G709 на ITU - T	129
7.5.1	Формиране на мултиплексна структура на ОТМк	131
XIII.	ЕЛАСТИЧНИ ОПТИЧНИ МРЕЖИ	134
8.1.	Основи на съвременните оптични мрежи	134
8.2.	Архитектура на EON	134
8.3.	Характеристики и концепции при EON	136
8.4.	Възлови структурни архитектури при EON	140
8.5.	Маршрутизиране и спектрално разпределение при EONs	144
8.6.	Сравнителен анализ между политики за маршрутизиране	145
8.7.	Traffic grooming или групиране на инициирани малки телекомуникационни потоци в единна голяма информационна единица	147
8.8.	Софтуерно дефинирани еластични оптични мрежи	148
	СПИСЪК С ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ НА БЪЛГАРСКИ ЕЗИК	153
	СПИСЪК С ИЗПОЛЗВАНИТЕ СЪКРАЩЕНИЯ НА АНГЛИЙСКИ ЕЗИК	154
	ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА	157

Fiber Optic

Patch Panel

Fiber Optic

PDH

STM

City

WEB

File Distribution

WDM

TMN

Monitoring

WDM

University

WEB

STM

SDH

File Distribution

Fiber Optic

Patch Panel

Fiber Optic

