

UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA

MAGISTRSKO DELO

**EVALVACIJA NOVEJŠIH TEHNOLOGIJ ZA RAZŠIRITEV
ZMOGLJIVEJŠIH OPTIČNIH OMREŽIJ**

Ljubljana, oktober 2005

MARKO ROŽMAN

IZJAVA

Študent Marko Rožman izjavljam, da sem avtor tega magistrskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom prof. dr. Borke Jerman - Blažič in skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovolim objavo magistrskega dela na fakultetnih straneh.

V Ljubljani, dne 10.09.2005

Podpis:

Kazalo vsebine:

1	Uvod v optična omrežja.....	1
1.1	Namen in cilji magistrskega dela.....	2
1.2	Izhodišča in definicije za raziskavo.....	2
1.3	Arhitektura optičnih omrežij.....	3
1.4	Komponente zmogljivih optičnih omrežij.....	5
1.5	Digitalizacija analognega signala in tehnike multipleksiranja.....	6
2	Osnove optike.....	8
2.1	Osnovni optični principi.....	9
2.1.1	Odboj in lom svetlobe.....	9
2.2	Slabljenje optičnega vlakna.....	10
2.3	Disperzija v optičnih vlaknih.....	11
2.3.1	Kromatska disperzija.....	11
2.3.2	Nekromatska disperzija.....	12
2.4	Optično vlakno.....	12
3	Novejše tehnologije za razširitev zmogljivejših optičnih omrežij.....	14
3.1	SDH standard.....	14
3.1.1	Multipleksiranje.....	14
3.1.2	Struktura SDH okvirja.....	15
3.1.3	Nivoji SDH hierarhije.....	16
3.1.4	SDH fizični nivo.....	17
3.1.5	Topologije in elementi SDH optičnih omrežij.....	18
3.1.6	Zaporedno lepljenje koristne vsebine SDH signala.....	19
3.1.7	Zaščitne sheme v optičnih SDH omrežjih.....	22
3.2	WDM tehnologija.....	25
3.2.1	Izpeljanke WDM tehnologije.....	27
3.2.2	Osnovne komponente WDM sistemov prenosa.....	28
3.2.3	Topologije WDM omrežij.....	30
3.2.4	Zaščitne sheme v zmogljivih optičnih omrežjih, ki podpirajo WDM tehnologijo.....	32
3.3	SDH nove generacije.....	35
3.3.1	Virtualno lepljenje koristne vsebine SDH okvirjev.....	36
3.3.2	Protokol LCAS.....	38
3.3.3	Učinkovitost lepljenja koristne vsebine SDH okvirjev.....	38
3.3.4	Postopek »GFP« – Generic Framing Procedure.....	39
3.3.5	Funkcionalnosti drugega nivoja ISO/OSI referenčnega modela v SDH omrežjih nove generacije.....	42
3.4	Optična transportna omrežja – OTN.....	49
4	Optična omrežja druge generacije.....	54
4.1	Optično časovno multipleksiranje.....	55
4.2	Arhitektura optičnih omrežij druge generacije.....	57
5	Telekomunikacijske naprave v zmogljivejših optičnih omrežjih.....	58
5.1	Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena s čistimi DWDM napravami.....	59
5.2	Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena z OTN napravami.....	60
5.3	Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena s standardnimi SDH napravami.....	61
5.4	Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena z namenskim agregatnimi napravami.....	61
5.5	Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena z univerzalnimi vozlišči.....	62
5.6	Primerjava telekomunikacijskih naprav, ki podpirajo različne tehnologije.....	63

5.6.1	Lažje upravljanje omrežja in storitev	75
5.6.2	Optimalna izkoriščenost razpoložljive in rezervirane pasovne širine	76
6	Zaključek	83
7	Literatura	85
8	Viri	86
9	Priloge	1
9.1	Seznam uporabljenih kratic	1

Kazalo tabel:

Tabela 1:	Bitne hitrosti SDH digitalne hierarhije	14
Tabela 2:	SDH sekcije in njihove funkcije	17
Tabela 3:	Kapacitete zaporedno zlepljenih virtualnih vsebnikov	21
Tabela 4:	Izguba pasovne širine pri prenosu podatkovnih formatov preko SDH omrežja	22
Tabela 5:	Pasovna širina MS-SPRing zaščitnega mehanizma	24
Tabela 6:	Izkoriščenost pasovne širine z uporabo VCAT	37
Tabela 7:	Primerjava med zaporednim in virtualnim lepljenjem koristne vsebine	39
Tabela 8:	Primerjava zaporednega in virtualnega lepljenja s stališča izkoriščenosti pasovne širine	39
Tabela 9:	Razlike med protokoloma GFP-F in GFP-T	40
Tabela 10:	Razporejanje prometa po prioritetah	45
Tabela 11:	Nominalne bitne hitrosti OPU-k	50
Tabela 12:	Nominalne bitne hitrosti ODU-k	51
Tabela 13:	Nominalne bitne hitrosti OTU-k	52
Tabela 14:	Periode OPU-k, ODU-k in OTU-k signalov	52
Tabela 15:	Različni tipi telekomunikacijskih naprav v zmogljivejših optičnih omrežjih	59
Tabela 16:	Izguba pasovne širine pri prenosu preko čiste DWDM naprave	60
Tabela 17:	Podpora tehničnih lastnosti z napravami različnih tehnologij	65
Tabela 18:	Vrednotenje splošnih koristi posameznih tehnologij	75
Tabela 19:	Analiza rezervirane pasovne širine pri čistih DWDM napravah	78
Tabela 20:	Analiza rezervirane pasovne širine pri namenskih agregatnih napravah	80
Tabela 21:	Analiza izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine pri univerzalnih vozliščih	81
Tabela 22:	Izkoriščenost pasovne širine za promet 150Mbit/s	83

Kazalo slik:

Slika 1:	Multipleksna struktura, kot izhodišče raziskave	3
Slika 2:	Tehnika časovnega multipleksiranja na električnem ali optičnem nivoju	7
Slika 3:	Tehnika valovno-dolžinskega multipleksiranja	7
Slika 4:	Primerjava časovnega in valovno-dolžinskega multipleksiranja	8
Slika 5:	Kombinacija časovnega in valovno-dolžinskega multipleksiranja	8
Slika 6:	Odboj in lom svetlobe na meji dveh medijev	9
Slika 7:	Presek optičnega vlakna in širjenje svetlobe preko optičnega vlakna	10
Slika 8:	Slabljenje optičnega vlakna pri različnih valovnih dolžinah	11
Slika 9:	Kromatska disperzija	12

Slika 10: Mnogorodovno in enorodovno optično vlakno.....	13
Slika 11: Primerjava eno-rodovnih vlaken s stališča disperzije	13
Slika 12: SDH multipleksna struktura	15
Slika 13: STM-1 okvir.....	16
Slika 14: SDH sekcije.....	17
Slika 15: SDH optično omrežje	19
Slika 16: Razširjena SDH multipleksna struktura	20
Slika 17: Fiksna koristna vsebina	20
Slika 18: Zaporedno lepljenje koristne vsebine.....	21
Slika 19: Razdrobljenost pasovne širine.....	22
Slika 20: Delovanje zaščitne sheme v MS-SPRing	23
Slika 21: Obroč s SNCP zaščitno shemo	24
Slika 22: 1+1-MSP zaščitni mehanizem za točka-točka topologijo omrežja	25
Slika 23: WDM povezava z dvema optičnima linijskima terminaloma.....	26
Slika 24: Optični linijski terminal	28
Slika 25: Terminalni optični multiplekser in OADM.....	29
Slika 26: OADM.....	30
Slika 27: Topologije zmogljivih optičnih omrežij z WDM tehnologijo	31
Slika 28: Fizična in logična topologija omrežja	31
Slika 29: Enosmerna (unidirekcionalna) zaščitna shema pred prekinitvijo in po njej	32
Slika 30: Bidirekcionalna zaščitna shema pred prekinitvijo in po njej	33
Slika 31: Zaščitna shema z Y kablom	34
Slika 32: Zaščitna shema s podvojenima transponderjema	34
Slika 33: Zaščitna shema z optičnim razcepnikom/združevalnikom.....	35
Slika 34: Razlika med MSTP in MSPP platformo	36
Slika 35: VCAT preslikava v virtualno zlepljeni hranilnik VC-3-3v.....	37
Slika 36: Pozicija protokola GFP v multipleksni strukturi.....	40
Slika 37: GFP preko SDH nove generacije z uporabo WDM	41
Slika 38: Uporaba mapirne GbE kartice.....	43
Slika 39: Prenos Ethernet okvirja z internim Q-tag-om	45
Slika 40: Prenos Ethernet okvirja z lastnim Q-tag-om	45
Slika 41: Prenos Ethernet okvirja z interno določeno prioriteto	46
Slika 42: Prenos Ethernet okvirja z zunanjo prioriteto.....	46
Slika 43: Paketni prenos preko RPR omrežja.....	47
Slika 44: Prekinitev enega optičnega vlakna v RPR omrežju	48
Slika 45: Sprememba prenosne strukture za IP promet.....	49
Slika 46: OPU-k okvir	50
Slika 47: ODU-k okvir	51
Slika 48: OTU-k okvir.....	52
Slika 49: Formiranje optičnega transportnega modula OTM-n,m	54
Slika 50: Optično časovno multipleksiranje OTDM	56
Slika 51: Sinhronizacija niza bitov	57
Slika 52: Faktor poveztljivosti med omrežnimi elementi v mešani topologiji omrežja	58
Slika 53: Prometna obremenjenost GbE vmesnika	77
Slika 54: Izkoriščenost rezervirane pasovne širine pri čistih DWDM napravah.....	79
Slika 55: Izkoriščenost pasovne širine pri namenskih agregatnih napravah	80
Slika 56: Izkoriščenost pasovne širine pri univerzalnih vozliščih.....	82
Slika 57: Primerjava izkoriščenosti rezervirane pasovne širine	82

1 Uvod v optična omrežja

V zadnjih dveh desetletjih smo priča dramatičnim spremembam v telekomunikacijski industriji. Razlogov za dramatične spremembe je več. Prvi in glavni razlog so vedno večje potrebe po prenosnih kapacitetah v telekomunikacijskih omrežjih, ki jih narekuje predvsem strma rast internetnega ter ostalega podatkovnega prometa. Omenjeni telekomunikacijski promet še vedno strmo raste, medtem ko se telekomunikacijski promet, ki ga predstavlja prenos govora, povečuje le nekaj odstotkov letno (Ramaswami, 2002, str. 668).

V preteklosti so telekomunikacijska omrežja temeljila predvsem na brezžičnih tehnologijah ter tehnologijah, ki so za prenosni medij uporabljale bakrene pare ali koaksialne kable. Sredi osemdesetih so se kot prenosni medij pojavile prve implementacije optičnih vlaken. Začelo se je obdobje optičnih omrežij prve generacije. V optičnih omrežjih prve generacije se uporablja optika le za prenos optičnih signalov, medtem ko se vsa ostala procesiranja signalov odvijajo na električnem nivoju. V zmogljivejših optičnih omrežjih prve generacije se uporablja kombinacija WDM (Wavelength Division Multiplex) optičnih povezav s procesiranjem električnih signalov na končnih točkah optičnega omrežja. Zaradi visokih stroškov optično/električnih pretvorb, še posebej pri signalih visokih bitnih hitrosti, je v optičnem omrežju smotrno število omenjenih pretvorb zreducirati na minimum. Prvi korak, ki je bil storjen v tej smeri, je bil razvoj optičnih sistemov za prenos na dolge razdalje. Ti sistemi omogočajo velike razdalje med regeneratorji. Naslednji korak je bil izdelati tak sistem, ki omogoča, da gre skozi njega čim več prometa v obliki optičnih signalov. Takšno funkcionalnost omogočajo popolnoma optični multiplekserji, ki omogočajo dodajanje in odvzemanje optičnih signalov različnih valovnih dolžin, ter optični prevezovalniki. Optična omrežja s sistemi, ki vsebujejo optične multiplekserje in optične prevezovalnike, imenujemo vse-optična ali transparentna optična omrežja. (Ramaswami, 2002, str. 704). Če povzamemo, omogočajo transparentna optična omrežja prenos optičnih signalov visokih bitnih hitrosti na dolge razdalje. Pri tem velja, da je potrebno na robovih optičnih omrežij še vedno delati na električnem nivoju. Na električnem nivoju se opravljajo funkcionalnosti, kot so pretvorba valovnih dolžin, regeneracija optičnih signalov ter priprava signalov nižjih bitnih hitrosti. V optičnih omrežjih prve generacije zato še ne moremo govoriti o popolnoma optični domeni. Sistemi v transparentnih optičnih sistemih bodo še nekaj časa vsebovali tako električne kot optične komponente. Optični prevezovalniki bodo prevezovali optične signale na optičnem nivoju, kolikor bo to mogoče, medtem ko bodo signali, ki jih bo potrebno pretvoriti v drugo valovno dolžino, regenerirani ali pripraviti, ustrezno obdelani na električnem nivoju.

V optičnih omrežjih druge generacije pa se poleg prenosa optičnih signalov na optični nivo sli tudi procesiranje signalov (Ramaswami, 2002, str. 704). Optična omrežja druge generacije bodo omogočala paketno preklapljanje na optičnem nivoju. Glavni cilj optičnih omrežij druge generacije je nuditi enake storitve, kot jih nudijo ATM (angl. Asynchronous Transfer Mode) in IP (angl. Internet Protocol; slov. internet protokol) omrežja, vendar z veliko višjimi bitnimi hitrostmi. Optična omrežja druge generacije so trenutno v zelo začetni fazi razvoja in obstajajo le v testnih laboratorijih. Zaradi omenjenega dejstva bodo takšna optična omrežja v tem delu obdelana tako, da bo možno razbrati, kakšne so smernice razvoja zmogljivejših optičnih omrežij, ne bodo pa evalvirana kot komercialno dosegljiva tehnologija.

1.1 Namen in cilji magistrskega dela

Namen magistrskega dela je definirati pojem optičnega omrežja ter osnovne pojme, kot so digitalizacija, pasovna širina ipd., ki so tesno povezani s pojmom optičnih omrežij. Namen dela je še predstaviti in med seboj primerjati novejša tehnologije, ki omogočajo razširitev zmogljivosti v optičnih omrežjih.

Cilji magistrskega dela so seznanimi se s:

- pojmom optičnega omrežja ter posameznimi komponentami optičnih omrežij, med katere spadajo optična vlakna, telekomunikacijske naprave ter nadzorno upravljalni sistemi za nadzor in upravljanje optičnih omrežij,
- pojmom digitalizacije analognih signalov, pojmom pasovna širina in različnimi tehnikami multipleksiranja,

ter predstaviti in oceniti:

- standarde, ki se uporabljajo v optičnih omrežjih ter njihovimi specifičnimi lastnostmi s področja pritočnih vmesnikov, pritočnih signalov, linijskih vmesnikov, linijskih signalov, topologij zmogljivejših optičnih omrežij, digitalnega prevezovanja ter zaščitnih shem,
- protokole, procedure ter sheme, ki omogočajo optimalno izkoriščenost razpoložljive pasovne širine,
- komercialno dosegljive telekomunikacijske naprave, ki podpirajo posamezen standard ali več med seboj komplementarnih standardov v optičnih omrežjih ter primerjavo prednosti in slabosti, ki jih nudi posamezen tip telekomunikacijske naprave,
- smernice razvoja vse-optičnih omrežij.

1.2 Izhodišča in definicije za raziskavo

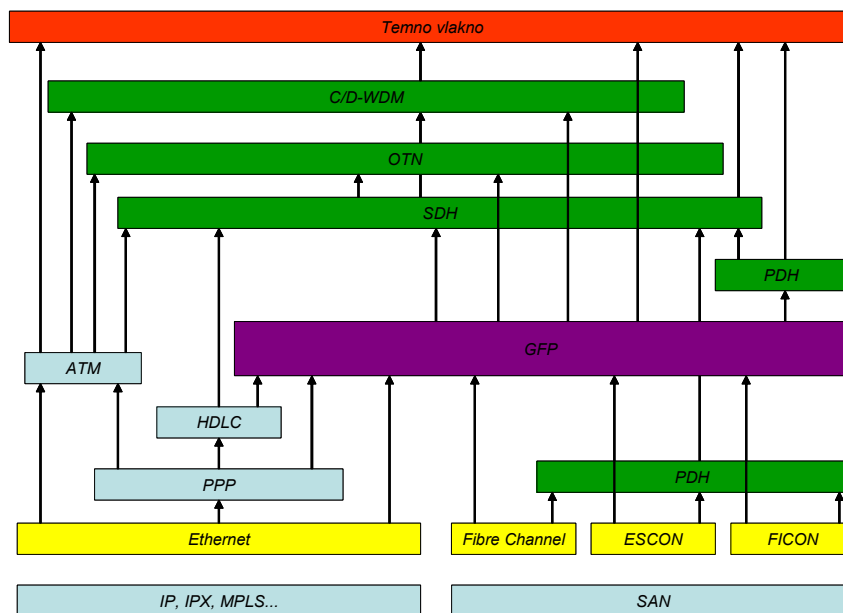
Zmogljiva optična omrežja omogočajo prenos govora in podatkov visokih bitnih hitrosti preko fizične infrastrukture, ki jo predstavljajo optična vlakna. Kot izhodišče za raziskavo novejših tehnologij za razširitev zmogljivejših optičnih omrežij bo uporabljena slika 1, ki prikazuje multipleksno strukturo za različne pritočne signale.

Slika 1 nazorno prikazuje tehnologije, protokole in prenosni medij, ki se uporablja v zmogljivih optičnih omrežjih. Na začetku je potrebno definirati nekaj pojmov, ki se bodo uporabljali ves čas raziskave. Ti pojmi si pritočni signal, linijski signal, zunanja naprava ter bitna hitrost.

- *Pritočni signal*; v zmogljivih optičnih omrežjih se uporabljajo telekomunikacijske naprave, ki omogočajo večkratno izrabo prenosnega medija. To so tako imenovani multiplekserji. Vsak multiplekser ima svojo pritočno in linijsko stran. Na pritočno stran se priključuje pritočne signale, ki se na multiplekser priključujejo iz *zunanje naprave*. Zunanja naprava je lahko Ethernet stikalo, usmerjevalnik, FC (Fibre Channel) stikalo in podobno. Bitna hitrost pritočnih signalov je nižja od bitne hitrosti linijskega signala.
- *Linijski signal*; linijski signal je signal, ki ga dobimo na izhodu multiplekserja in ima višjo bitno hitrost, kot jo imajo pritočni signali.

- *Bitna hitrost*; bitna hitrost je hitrost prenosa bitov preko telekomunikacijskega omrežja. Zelo pogosto se namesto pojma bitna hitrost uporablja pojem *pasovna širina*. Bitno hitrost oziroma pasovno širino se meri v bit/s.

Slika 1: Multipleksna struktura, kot izhodišče raziskave



Predmet raziskave sodobnih tehnologij za razširitev zmogljivejših optičnih omrežij bodo:

- *optična vlakna*, kot osnovni gradnik zmogljivejših optičnih omrežij,
- *sodobne tehnologije oziroma standardi*, ki se uporabljajo v zmogljivejših optičnih omrežjih. Predmet obravnave so PDH (angl. Plesiochronous Digital Hierarchy; slov. plesiohrona digitalna hierarhija), SDH (angl. Synchronous Digital Hierarchy; slov. sinhrona digitalna hierarhija), OTN (angl. Optical Transport Network; slov. optična transportna omrežja) ter C/D WDM (angl. Coarse/Dense Wavelength Division Multiplex; slov. grobo/zgoščeno valovno dolžinsko multipleksiranje) tehnologije,
- *novi protokoli*, ki omogočajo vstavljanje in nato prenos podatkov preko SDH omrežij nove generacije. Na sliki 1 je naveden le en protokol, ki se imenuje GFP (angl. Generic Framing Procedure; slov. univerzalna procedura okvirjanja). Poleg protokola GFP bo v raziskavi precej prostora namenjeno tudi protokolu VCAT (angl. Virtual Concatenation; slov. virtualno lepljenje) koristne vsebine SDH signalov ter protokolu LCAS (angl. Link Capacity Adjustment Scheme; slov. shema za uravnavanje kapacitete na povezavi), ki omogoča dinamično dodeljevanje pasovne širine. Omenjeni trije protokoli (GFP, LCAS in VCAT) tvorijo skupaj z lastnostmi standardne SDH tehnologije, SDH tehnologijo nove generacije.

1.3 Arhitektura optičnih omrežij

Predmet tega dela so tako imenovana javna omrežja, ki jih upravljajo ponudniki telekomunikacijskih storitev. Ponudniki telekomunikacijskih storitev uporabljajo omrežja

zato, da svojim strankam nudijo določene storitve. Danes niso ponudniki telekomunikacijskih storitev samo podjetja, ki nudijo storitev govorne telefonije, ampak obstaja vrsta različnih ponudnikov, ki delujejo pod različnimi poslovnimi modeli. Nekateri ponudniki govorne telefonije sploh ne ponujajo, ker so popolnoma orientirani na prenos podatkov. Ti ponudniki nudijo med-omrežne povezave ponudnikom internetnih storitev ter omogočajo prenosne kapacitete oziroma pasovno širino drugim ponudnikom in podobno (Ramaswami, 2002, str. 3).

Osnovni gradnik telekomunikacijskega omrežja je prenosni medij. Poleg optičnih vlaken se v današnjih telekomunikacijskih omrežjih kot prenosni medij še vedno uporabljajo bakreni pari. Ne glede na prenosni medij pa komercialno dosegljive tehnologije omogočajo tako imenovane širokopasovne komunikacije, ki potekajo v širokopasovnih omrežjih. Širokopasovno omrežje je telekomunikacijsko prenosno omrežje, ki za prenos signalov uporablja različne prenosne medije, katerih prenosna zmogljivost je uporabljena tako, da omogoča tvorbo večjega števila kanalov za istočasen prenos govora, podatkov in slike (Strategija razvoja širokopasovnih podatkovnih omrežij v Republiki Sloveniji, 2004).

Širokopasovna omrežja so hierarhično razdeljena na več nivojev. Meje med posameznimi nivoji dostikrat ni mogoče enostavno in enoumno določiti. Zato na nivoje širokopasovnih omrežij obstajajo različni pogledi. Najsplošnejša oziroma globalna hierarhija širokopasovnih omrežij zajema dostopovna omrežja, mestna omrežja ter omrežja za povezovanje na dolge razdalje.

Dostopovna omrežja so najbližje končnim uporabnikom in se nahajajo na robovih mestnih omrežij. Dostopovna omrežja torej povezujejo končne uporabnike na mestna omrežja. Spekter uporabnikov gre vse od posameznikov do velikih podjetij. Za dostopovna omrežja je značilno, da uporabljajo različne prenosne medije, kot so optična vlakna in bakreni pari, da se po njih prenašajo različni protokoli ter različne bitne hitrosti.

Omrežja za prenos na dolge razdalje predstavljajo hrbtenico globalnih omrežij in jih upravlja majhna skupina telekomunikacijskih operaterjev. Glavni namen omrežij za prenos na dolge razdalje je transport večjega števila signalov visokih bitnih hitrosti na dolge razdalje. V teh omrežjih je torej poudarek na visokih kapacitetah. Kot prenosni medij se uporabljajo izključno optična vlakna.

Med omrežji za povezovanje na dolge razdalje in dostopovnimi omrežji se nahajajo mestna omrežja. V mestnih omrežjih se prenaša promet na geografsko omejenem področju. Prenašajo se različni protokoli ter različne bitne hitrosti. Kot prenosni medij se uporabljajo optična vlakna. Temeljijo predvsem na SDH in WDM tehnologijah, ki omogočajo točka-točka, obročne in mešane topologije omrežij.

Dostikrat se uporablja mnenje, da so mestna omrežja pomanjšana omrežja za prenos na dolge razdalje. Poleg dejstva, da obsegajo mestna omrežja manjši teritorij kot omrežja za prenos na dolge razdalje, obstajajo še nekatere bistvene razlike:

- topologije omrežij za prenos na dolge razdalje so bolj stabilne oziroma dolgotrajne, medtem ko se topologije mestnih omrežij spreminjajo bolj dinamično oziroma pogosteje,
- v omrežjih za prenos na dolge razdalje prevladujejo točka-točka topologije, v mestnih omrežjih pa se največ uporabljata obročna in mešana topologija omrežij,

- mestna omrežja morajo podpirati precej širši spekter storitev in tipov prometa, kot so prenos govora, podatkov in videa, medtem ko so omrežja za prenos na dolge razdalje transparentna glede protokolov in bitnih hitrosti.

Globalna hierarhija omrežij velja globalno, vendar se pri primerjavi posameznih telekomunikacijskih trgov kažejo velike razlike. V Severni Ameriki se kot mestna omrežja obravnavajo omrežja, ki se razprostirajo na razdaljah reda sto kilometrov, omrežja za prenos na dolge razdalje pa na nekaj sto do tisoč kilometrov. V Evropi so razdalje krajše, kar pogojuje bolj kompaktna omrežja za prenos na dolge razdalje (Ramaswami, 2002, str. 4).

Za evropske in še posebej za slovenske razmere je bolj primerna delitev širokopasovnih omrežij, ki je uporabljena v dokumentu Strategiji razvoja širokopasovnih omrežij v Sloveniji, izdelanem leta 2004 na Ministrstvu za informacijsko tehnologijo. Omenjeni dokument deli širokopasovna omrežja na hrbtenična omrežja, mestna omrežja in dostopovna omrežja. Hrbtenična omrežja medsebojno povezujejo mestna omrežja, s čimer omogočajo telekomunikacijski promet med končnimi uporabniki (Strategija razvoja širokopasovnih podatkovnih omrežij v Republiki Sloveniji, 2004). Takšna delitev oziroma hierarhija omrežij bo uporabljena v tem delu. Poudarek bo na hrbteničnih omrežjih, ki uporabljajo za prenosni medij optična vlakna. Ker so takšna omrežja namenjena za prenos velikih kapacitet, bodo obravnavana kot zmogljiva optična omrežja.

1.4 Komponente zmogljivih optičnih omrežij

Zmogljiva optična omrežja so sestavljena iz treh osnovnih gradnikov. To so prenosni medij, ki ga predstavljajo optična vlakna, pasivne in aktivne komponente telekomunikacijskih naprav ter na programski in strojni opremi temelječi sistemi za nadzor in upravljanje optičnih omrežij (Gumaste, 2003, str. 4).

Optično vlakno je pasivni medij, ki se pokorava zakonom optike. Ko se optični impulzi širijo preko optičnega vlakna, so izpostavljeni učinkom, kot so odboj, lom, slabljenje, disperzija in polarizacija. Vseh omenjenih učinkov se je potrebno pri načrtovanju zmogljivega optičnega omrežja zavedati in jih upoštevati. Osnovni koncepti optičnih vlaken in učinkov v njih so obdelani v drugem poglavju.

Komponente, ki delujejo v zmogljivih optičnih omrežjih in so odgovorne za komunikacijo, so na splošno deljene na pasivne in aktivne komponente. Pasivne komponente so tiste, ki s popolnoma funkcionalnega stališča ne potrebujejo napajalne napetosti. Sem štejemo optične razcepnike, optične združevalnike ter optične multiplekserje. Pasivne komponente imenujemo tudi optične komponente. Aktivne naprave so tiste, ki potrebujejo za svoje delovanje napajalno napetost. Z aktivnimi napravami se signali na električnem in optičnem nivoju ustrezno pripravijo za prenos preko optičnega vlakna. Na aktivnih komponentah pripravljeni signali se lahko prenašajo preko optičnih vlaken z vključitvijo pasivnih komponent ali brez njih. Med aktivne naprave štejemo pritočne ter linijske enote, optične ojačevalnike, prevezovalnike ter procesorske enote sistemov. Aktivne in pasivne komponente bodo skupaj s sodobnimi tehnologijami v zmogljivih optičnih omrežjih obdelane v tretjem poglavju.

Sistemi za nadzor in upravljanje so zelo pomembna komponenta zmogljivih optičnih omrežij. Omeniti je potrebno vsaj nekaj osnovnih funkcij nadzorno upravljalnih sistemov:

- konfiguriranje sistemov in omrežja,
- zaznavanje in javljanje napak na sistemih in v omrežju,
- spremljanje kakovosti delovanja sistemov in omrežja,
- varnostni mehanizmi, ki podajajo različne pravice posameznim uporabnikom,
- zaračunavanje storitev.

1.5 Digitalizacija analognega signala in tehnike multipleksiranja

V zadnjem desetletju smo priča veliki rasti podatkovnega prometa. Rast podatkovnega prometa temelji na velikem številu uporabnikov interneta. Varnost podatkov povečuje potrebe po zrcaljenju in kopiranju podatkov med pomnilnimi enotami na različnih lokacijah. Vse večje prometne potrebe zahtevajo stalne razširitve zmogljivosti v optičnih omrežjih. Kljub omenjenim dejstvom pa predstavlja govorna telefonija še vedno relativno velik delež telekomunikacijskega prometa. Za prenos govora sta bili razviti PDH in SDH tehnologiji. Obe tehnologiji sta še vedno zelo prisotni v vseh zmogljivih optičnih omrežjih. SDH tehnologija se še vedno razvija in s svojimi novimi lastnostmi vedno bolj postaja optimalna tudi za prenos podatkov. SDH tehnologija omogoča razširitev zmogljivih optičnih omrežij s časovnim multipleksiranjem. Časovno multipleksiranje se lahko opravlja na digitalnih signalih. Osnovni digitalni signal, ki se v SDH hierarhiji preslika v svoj hranilnik, je signal bitne hitrosti 2048 kbit/s. Ta signal imenujemo tudi E1. E1 signal je produkt časovnega multipleksiranja 32 oziroma 30 digitaliziranih analognih govornih kanalov. Temelj digitalizacije je PCM (angl. Pulse Code Modulation; slov. pulzno kodna modulacija). S PCM se analogni signal v treh korakih pretvori v digitalnega. Omenjeni trije koraki so vzorčenje analognega signala, ovrednotenje ter kodiranje vzorcev.

Pri postopku vzorčenja je potrebno upoštevati Nyquist-Shannon-ov teorem vzorčenja. Ta teorem je osnova informacijske teorije in telekomunikacij. Omenjeni teorem pravi, da mora biti vzorčevalna frekvenca vsaj dvakrat višja, kot je najvišja frekvenca signala, ki ga vzorčimo. Teorem lahko zapišemo z enačbo:

$$f_{vz} = 2 \times f_{max}$$

V primeru prenosa govora se je v analognih sistemih prenašal frekvenčni pas od 30 Hz do 3400 Hz. Omenjeni frekvenčni pas se obravnava kot pas od 0 Hz do 4000 Hz. Najvišja frekvenca je torej 4000 Hz. Po Nyquist-Shannon-ovem teoremu mora biti vzorčevalna frekvenca:

$$f_{vz} = 2 \times f_{max} = 2 \times 4000 \text{ Hz} = 8000 \text{ Hz}$$

Naslednji korak pri digitalizaciji analognega signala je ovrednotenje posameznih vzorcev. Ovrednotenje vzorcev pomeni pretvorbo analogne vrednosti posameznega vzorca v diskretno obliko, ki se jo nato v tretjem koraku, ki se imenuje kodiranje, zapiše z osmimi biti. Na ta način smo prišli do bitne hitrosti oziroma pasovne širine enega analognega kanala/govornega signala:

$$B_{kan} = f_{vz} \times N_{bit} = 8 \text{ k Hz} \times 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$$

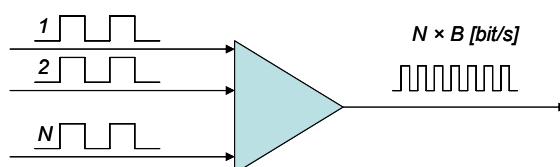
S časovnim multipleksiranjem dvaintridesetih digitalnih kanalov dobimo po principu bit po bit primarno bitno hitrost oziroma pasovno širino plesiohrone digitalne hierarhije (PDH) 2048 kbit/s:

$$B = B_{kan} \times N_{kan} = 64 \text{ kbit/s} \times 32 = 2048 \text{ kbit/s}$$

Potreba po časovnem multipleksiranju signalov TDM (angl. Time Division Multiplex) izhaja iz dejstva, da je veliko bolj ekonomično po istem optičnem vlaknu prenašati en signal visoke bitne hitrost, kot prenašati več signalov nižjih bitnih hitrosti po več optičnih vlaknih. V osnovi obstajata dve tehniki za razširitev zmogljivosti optičnega vlakna.

Prva tehnika za razširitev zmogljivosti optičnega vlakna povečuje bitno hitrost. Večje število pritočnih signalov nižjih bitnih hitrosti se po principu časovnega multipleksiranja multipleksira v en signal višje bitne hitrosti. Multipleksirani signal višje bitne hitrosti se imenuje linijski signal. V primeru PDH hierarhije poteka časovno multipleksiranje tako, da se vzame prvi bit prvega pritočnega signala, nato prvi bit drugega pritočnega signala in tako naprej. Ker obstaja perioda linijskega signala enako dolga, kot je perioda pritočnih signalov, so impulzi v linijskem signalu krajši. Trajanje periode je $125 \mu\text{s}$ ($T=1/8\text{kHz}$). V primeru SDH hierarhije se izvaja časovno multipleksiranje po principu bajt po bajt (angl. Byte by byte). Kot primer, štiriinšestdeset 155Mbit/s signalov se lahko multipleksira v en 10 Gbit/s signal. Danes so komercialno dosegljivi sistemi, ki podpirajo 10 Gbit/s bitne hitrosti. Časovno multipleksiranje se danes opravlja na električnem nivoju. Da bi TDM tehnologija podpirala tudi višje bitne hitrosti, gre razvoj te tehnike v smeri časovnega multipleksiranja na optičnem nivoju. Ta pristop se imenuje optično časovno multipleksiranje. Laboratorijski eksperimenti so že pokazali rezultate multipleksiranja petindvajset 10 Gbit/s signalov v signal bitne hitrosti 250 Gbit/s. Tehniko časovnega multipleksiranja na električnem ali optičnem nivoju podaja slika 2.

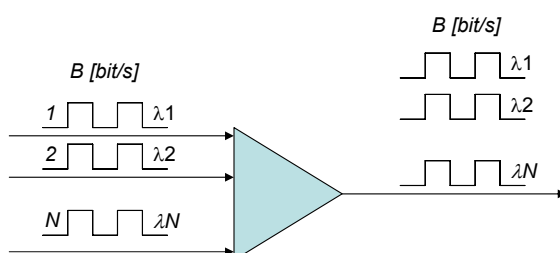
Slika 2: Tehnika časovnega multipleksiranja na električnem ali optičnem nivoju



Vir: Ramaswami, 2002, str. 13.

Druga tehnika za razširitev zmogljivosti na optičnem vlaknu je valovno-dolžinsko multipleksiranje. Ideja valovno-dolžinskega multipleksiranja je, po skupnem optičnem vlaknu prenašati istočasno in med seboj neodvisno večje število optičnih signalov. Za istočasen in medsebojno neodvisen prenos večjega števila optičnih signalov mora biti vsak optični signal prestavljen na svojo, točno določeno valovno dolžino, ki so predpisane v ITU-T priporočilu G.692. Tehniko valovno-dolžinskega multipleksiranja podaja slika 3.

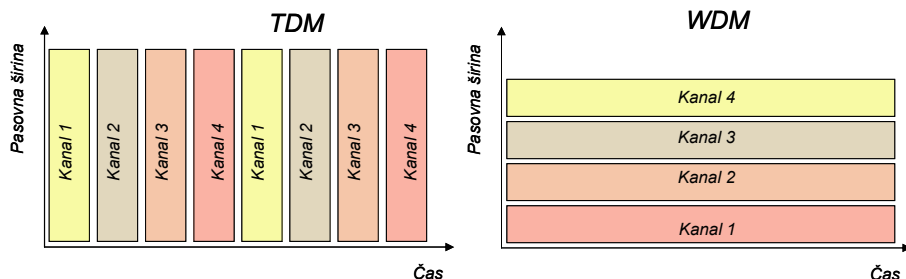
Slika 3: Tehnika valovno-dolžinskega multipleksiranja



Vir: Ramaswami, 2002, str. 13.

Primerjavo obeh tehnik za razširitev zmogljivosti na optičnem vlaknu podaja slika 4.

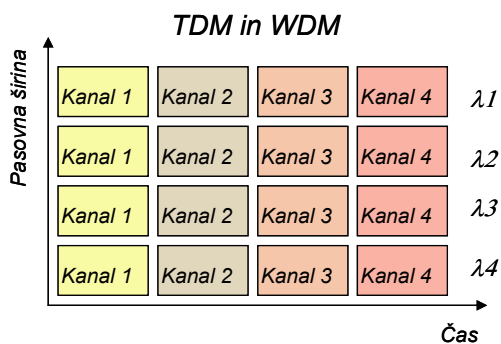
Slika 4: Primerjava časovnega in valovno-dolžinskega multipleksiranja



Vir: Black, 2002, str. 7.

Obe tehnologiji, TDM in WDM, omogočata razširitev zmogljivosti optičnih omrežij, vendar vsaka na svoj način. Kljub omenjenemu dejstvu sta obe tehnologiji medsebojno komplementarni in se v zmogljivejših optičnih omrežjih uporabljata istočasno. Posamezno valovno dolžino lahko predstavlja katerikoli signal, ki je formiran na osnovi TDM tehnologije. S predhodnim časovnim multipleksiranjem pritočnih signalov se precej izboljša izkoriščenost posamezne valovne dolžine, ki pa še vedno ni optimalna in je še vedno relativno nizka (Black, 2002, str. 8). Slika 5 podaja kombinacijo obeh tehnik multipleksiranja.

Slika 5: Kombinacija časovnega in valovno-dolžinskega multipleksiranja



Vir: Black, 2002, str. 7.

2 Osnove optike

Za pravilno načrtovanje zmogljivejših optičnih omrežij je potrebno poznavanje osnove optike. Dejstvo je, da je optično vlakno v primerjavi z bakrom in zrakom najzmogljivejši prenosni medij. Zaradi nizkega slabljenja omogoča optično vlakno prenos signalov visokih bitnih hitrosti na zelo dolge razdalje. Pasovna širina, ki jo omogoča optično vlakno, je do 25 THz. Takšna pasovna širina zadostuje za prenos stotine milijonov istočasnih telefonskih pogovorov ali milijone spletnih strani na sekundo (Ramaswami, 2002, str. 47). Zavedati pa se je potrebno, da je optično vlakno kljub prednostim izpostavljeno določenim parametrom, ki vplivajo na poslabšanje optičnega signala v optičnem vlaknu. Ti parametri so slabljenje, disperzija in nelinearni efekti (Krauss, 2002, str. 28).

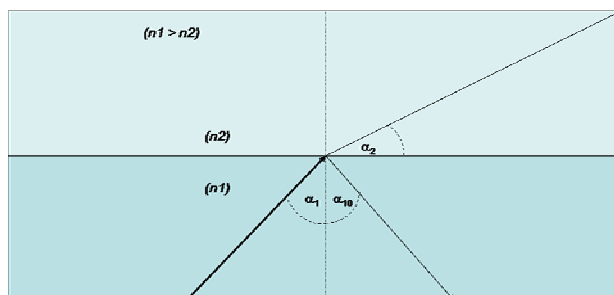
2.1 Osnovni optični principi

Optično vlakno je cilindrični valovod, ki ga sestavljata jedro in ovoj. Preko optičnih vlaken se v sodobnih telekomunikacijskih omrežjih prenaša svetloba oziroma se prenašajo optični signali. Širjenje svetlobe preko optičnih vlaken lahko obravnavamo s pomočjo valovne teorije ali s pomočjo geometrijske teorije. Če obravnavamo širjenje svetlobe po optičnem vlaknu s pomočjo valovne teorije, definiramo vlakno kot cilindrični valovod, preko katerega se širijo različni rodovi. Rodovi so rešitve Maxwellovih enačb, z upoštevanjem točno določenih robnih pogojev (Gumaste, 2003, str. 15). Enostavnejše je obravnavanje širjenja svetlobe preko optičnega vlakna s pomočjo geometrijske teorije. Geometrijska teorija je sprejemljiva takrat, ko je polmer jedra optičnega vlakna veliko večji, kot je valovna dolžina optičnega signala, ki se po optičnem vlaknu prenaša (Ramaswami, 2002, str. 50). Za razumevanje širjenja svetlobe preko optičnega vlakna je potrebno razumeti vsaj dva osnovna optična principa, ki sta odboj in lom svetlobe. Oba optična principa sta v nadaljevanju opisna na osnovi geometrijske teorije.

2.1.1 Odboj in lom svetlobe

Predstavljajmo si žarek svetlobe, ki vpada na mejo dveh različnih medijev pod kotom α_1 . Vsak od medijev ima svoj lomni količnik, ki se ju označi z n_1 in n_2 . Velja naj tudi $n_1 > n_2$. Omenjeno situacijo prikazuje slika 6.

Slika 6: Odboj in lom svetlobe na meji dveh medijev



Vir: Krauss, 2002, str. 2.

Vpadni kot svetlobe je kot med vpadno svetlobo ter pravokotnico na mejo obeh medijev. Del energije se odbije nazaj v medij z lomnim količnikom n_1 kot odbiti žarek, del energije pa gre v drugi medij z lomnim količnikom n_2 , kot lomni žarek. Odbojni kot α_{10} je kot med odbitim žarkom in pravokotnico na mejo dveh medijev, medtem ko je lomni kot definiran kot kot med lomljenim žarkom ter pravokotnico na mejo obeh medijev. Zakon geometrijske optike pravi:

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \text{ in } n_1 \times \sin \alpha_1 = n_2 \times \sin \alpha_2$$

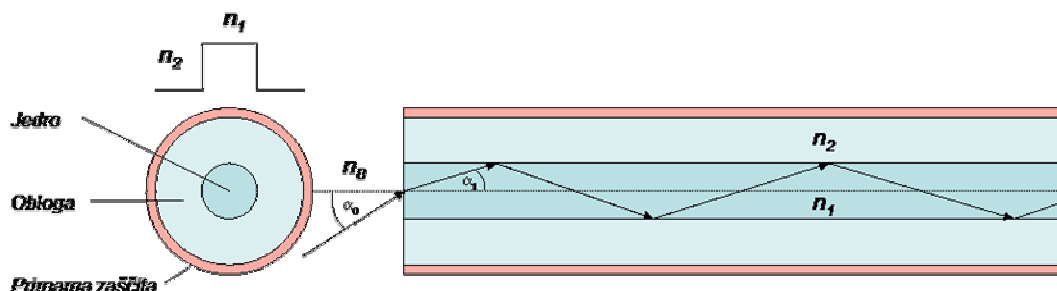
Napisana enačba je poznana kot Snell-ov zakon.

Z naraščanjem vpadnega kota narašča tudi lomni kot. Če je n_1 večji od n_2 , pridemo do situacije, ko je α_2 enak $\pi/2$. To se zgodi takrat, ko je α_1 enak $\sin^{-1}(n_2/n_1)$. Za večje vrednosti vpadnega kota α_1 ni lomnega žarka in vsa energija vpadnega žarka se odbije nazaj v medij z lomnim količnikom n_1 . Pojav imenujemo popolni odboj. Najmanjši kot,

pri katerem imamo popolni odboj, se imenuje kritični kot in je $\sin^{-1}(n_2 / n_1)$ (Gumaste, 2003, str. 9).

S pogleda geometrijske optike se v optičnem vlaknu svetloba širi na osnovi zaporednih popolnih odbojev, ki se dogajajo na meji dveh medijev, ki ju predstavljata jedro in ovoja optičnega vlakna. Presek optičnega vlakna z lomnimi količniki jedra, ovoja in medija, od koder svetloba vpada v optično vlakno, ter širjenje svetlobe preko optičnega vlakna prikazuje slika 7.

Slika 7: Presek optičnega vlakna in širjenje svetlobe preko optičnega vlakna



Vir: Ramaswami, 2002, str. 52.

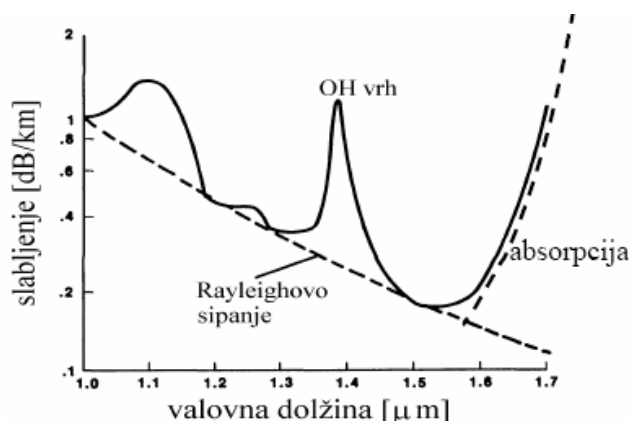
2.2 Slabljenje optičnega vlakna

Kljub zelo velikim dometom, ki jih omogočajo optična vlakna, se svetloba skozi optična vlakna ne širi popolnoma brez izgub. Razlog za izgube so nečistoče in nepravilnosti v optičnih vlaknih. Efekt, ki povzroča izgube na optičnem signalu, se imenuje slabljenje. Dva osnovna mehanizma, ki povzročata v optičnem vlaknu slabljenje, sta absorpcija in sipanje svetlobe v optičnem vlaknu.

Ločimo dve vrsti absorpcije svetlobe v optičnem vlaknu. Vzrok absorpcije, ki se imenuje notranja, so silicijeve molekule, ki absorbirajo svetlobo v ultravioletnem in infrardečem področju. Drugi tip absorpcije se imenuje zunanja. Vzrok zanjo so nečistoče v optičnih vlaknih, ki jih ni mogoče popolnoma odpraviti. Največjo težavo predstavlja kot nečistoča voda. Naslednji mehanizem, ki povzroča slabljenje optičnega vlakna je sipanje svetlobe. Svetloba se v optičnem vlaknu sipa oziroma odbija od nečistoč, ki so v vlaknu prisotne. Sipanje v optičnem vlaknu se imenuje Rayleighovo sipanje.

Slabljenje optičnega vlakna pri različnih valovnih dolžinah prikazuje slika 8.

Slika 8: Slabljenje optičnega vlakna pri različnih valovnih dolžinah



Vir: Disperzija v optičnem vlaknu, str.3.

2.3 Disperzija v optičnih vlaknih

Disperzija se imenujejo efekti, kjer se pri prenosu preko optičnega vlakna različne spektralne komponente optičnega signala prenašajo z različnimi hitrostmi. Posledica je, da prispejo posamezne komponente do sprejemnika v različnih časih, kar povzroči, da se optični impulzi na prenosni poti razmažejo (Ramaswami, 2002, str. 308). Razmazani impulzi so širši z znižano amplitudo. Dejstvo, da se impulzi razširijo, povzroča med-simbolno interferenco, ki otežuje razpoznavanje, ali je sprejeti signal nič ali ena, medtem ko vpliva znižanje amplitude impulza na optično moč signala (Krauss, 2002, str. 35). Koliko barvne disperzije je sistem sposoben kompenzirati, je odvisno od optičnega sprejemnika v sistemu. Ker je disperzija efekt, ki zelo vpliva na prenosne sposobnosti sistema, še posebej pri prenosu signalov visokih bitnih hitrosti, se ga je potrebo pri načrtovanju zmogljivejših optičnih omrežij dobro zavedati.

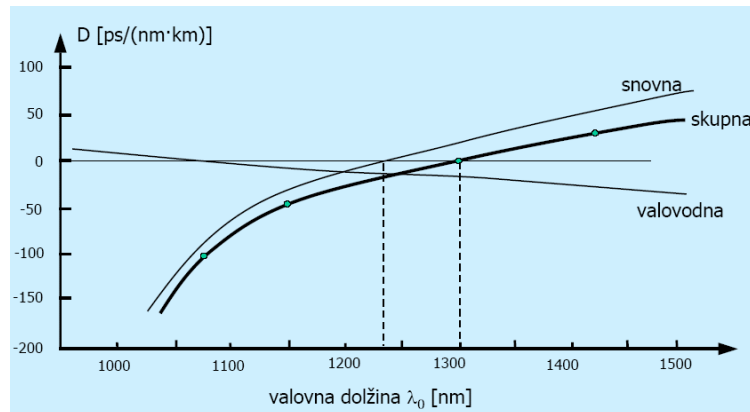
Skupna disperzija na optičnem vlaknu se meri v ps/nm (piko sekunde na nano meter), koeficient disperzije optičnega vlakna pa v ps/nm km (piko sekunde na nano meter na kilometer).

Disperzijo delimo na kromatsko in nekromatsko. Kromatska disperzija je odvisna od spektralne širine optičnega vira, medtem ko je nekromatska disperzija od spektralne širine vira neodvisna.

2.3.1 Kromatska disperzija

Kromatsko disperzijo predstavlja efekt, da se različne spektralne komponente po optičnem vlaknu širijo z različnimi hitrostmi. Prva komponenta kromatske disperzije se imenuje snovna disperzija. Ta nastane, ker je lomni količnik silicija frekvenčno odvisen. Drugo komponento kromatske disperzije predstavlja valovodna disperzija. Ta temelji na dejstvu, da se lomni količnik spreminja z valovno dolžino (Black, 2002, str. 44). Slika 9 prikazuje snovno, valovodno in skupno kromatsko disperzijo na optičnem vlaknu.

Slika 9: Kromatska disperzija



Vir: Disperzija v optičnem vlaknu, str. 21.

Na sliki 9 se vidi, da je kromatska disperzija enaka nič pri valovni dolžini 1300 nm.

2.3.2 Nekromatska disperzija

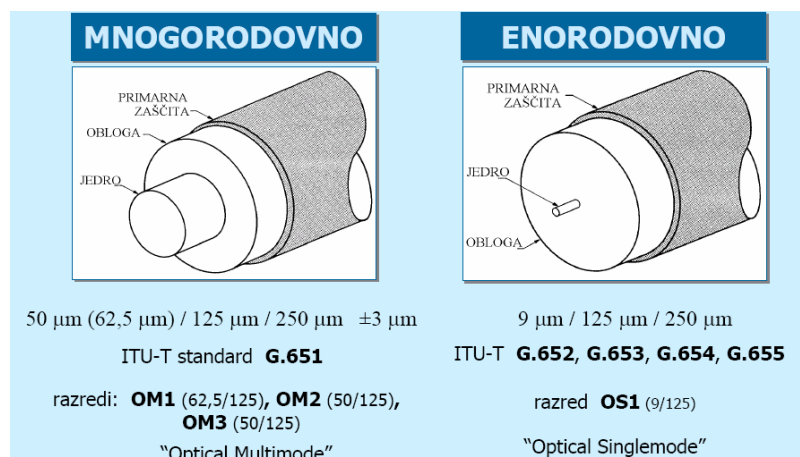
Tipičen predstavnik nekromatske disperzije je polarizacijska disperzija. Osnovni rod, ki se širi preko eno-rodovnega optičnega vlakna, je sestavljen iz dveh med seboj pravokotno polariziranih komponent. Komponenti sta polarizirani vertikalno in horizontalno. Problem polarizacijske disperzije nastane zaradi nekonsistentnosti optičnega vlakna vzdolž njegove dolžine. Zaradi upogibov, zvijanja in sprememb temperature jedro optičnega vlakna ni popolnoma okroglo. Zaradi omenjenih nepravilnosti se vsaka komponenta širi s svojo hitrostjo, ki zopet povzroči razširjeni impulz (Black, 2002, str. 47).

V primeru razširitve zmogljivosti optičnega omrežja s sistemi, ki omogočajo bitne hitrosti 10 Gbit/s ali več, predstavlja polarizacijska disperzija veliko težavo, če se uporabljajo starejša optična vlakna. Vrednosti polarizacijske disperzije na starejših optičnih vlaknih so $0,5 \text{ ps/km}^{-1/2}$, kar ne omogoča prenosa 10 Gbit/s signala na razdalje, daljše od 25 km. Novejša optična vlakna imajo vrednost polarizacijske disperzije $0,1 \text{ ps/km}^{-1/2}$, kar omogoča prenos 10 Gbit/s signala na razdalje do 625 km (Black, 2002, str. 48). Seveda se je potrebno zavedati, da je polarizacijska disperzija le eden od omejitvenih faktorjev na optičnem vlaknu.

2.4 Optično vlakno

Širjenje svetlobe preko optičnega vlakna je bilo obdelano v točki 2.3.1. Na sliki 10 je prikazana struktura optičnega vlakna, ki ga sestavljajo jedro, obloga in primarna zaščita. Jedro in obloga definirata tip optičnega vlakna (Krauss, 2002, str. 31). Ko govorimo tipih optičnih vlaken, je potrebno definirati termin rod. Najenostavnejša razlaga pravi, da je rod pot, ki jo opravi svetloba, ko potuje preko optičnega vlakna. Mnogorodovno vlakno omogoča različne poti širjenja svetlobe preko optičnega vlakna, medtem ko dovoljuje enorodovno optično vlakno samo eno pot (Black, 2002, str.40). Razlike med mnogorodovnimi in enorodovnimi optičnimi vlakni podaja slika 10.

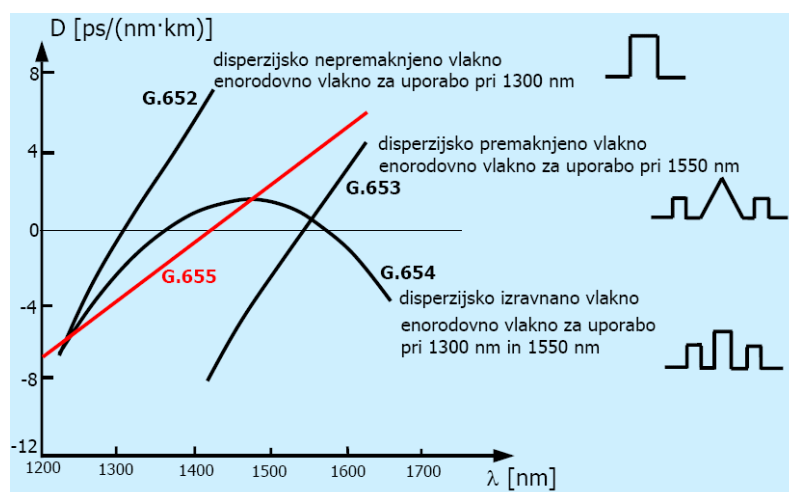
Slika 10: Mnogorodovno in enorodovno optično vlakno



Vir: Disperzija v optičnem vlaknu, str. 2.

Prvi optični sistemi prenosa so kot prenosni medij uporabljali mnogorodovna optična vlakna. Delovali so v tako imenovanem prvem oknu, pri valovni dolžini 850 nm. Na sliki 7 se vidi, da je v prvem oknu slabljenje zelo visoko. Mnogorodovna optična vlakna se še vedno uporabljajo v lokalnih omrežjih. PDH in SDH sistemi prenosa delujejo v drugem in tretjem oknu. Drugo okno je v okolici valovne dolžine 1300 nm, medtem ko je tretje okno v bližini valovne dolžine 1550 nm. WDM sistemi prenosa delujejo izključno v tretjem oknu. Poleg slabljenja na optičnih vlaknih, ki jih podaja slika 8, je zelo pomemben tudi podatek o disperziji. Slika 11 podaja primerjavo štirih tipov enorodovnih optičnih vlaken, ki podpirajo ITU-T (International Telecommunication Union-Telephony) priporočila G.652, G.653, G.654 in G.655.

Slika 11: Primerjava eno-rodovnih vlaken s stališča disperzije



Vir: Disperzija v optičnem vlaknu, str. 23.

V obstoječih optičnih omrežjih je največ optičnih vlaken, ki podpirajo ITU-T priporočilo G.652. Ta tip optičnih vlaken je s stališča disperzije optimalen za prenos optičnih signalov valovne dolžine 1300 nm. V tretjem oknu pa ima ta tip optičnih vlaken disperzijo okoli 16 ps/nm km. Zato se je potrebno zavedati, da je v primeru zelo

zmogljivih optičnih omrežij, ki vključujejo WDM tehnologijo pri daljših razdaljah računati s težavami. Efekt disperzije gre jemati zelo resno in po potrebi načrtovati kompenzatorje disperzije.

3 Novejše tehnologije za razširitev zmogljivejših optičnih omrežij

3.1 SDH standard

Pred uveljavitvijo SDH standarda so bila optična omrežja zgrajena s telekomunikacijskimi napravami, ki so podpirale PDH tehnologijo. PDH je robustna, zelo stabilna in v telekomunikacijskih omrežjih še vedno zelo razširjena tehnologija. PDH multiplekserji omogočajo časovno multipleksiranje primarne bitne hitrosti 2048 kbit/s (E1) v 8448 kbit/s, 34368 kbit/s (E3) ali 139269 kbit/s (E4) bitne hitrosti. Predvsem v večjih telekomunikacijskih omrežjih se je izkazalo, da PDH tehnologija ne izpolnjuje vedno višjih zahtev s stališča sinhronizacije ter delovanja, upravljanja in vzdrževanja telekomunikacijskega omrežja (Kartalopoulos, 2004, str. 8). Zaradi omenjenih zahtev so se morale v telekomunikacijskih omrežjih zgoditi zelo velike spremembe, za katere večina avtorjev trdi, da niso bile samo evolucija temveč revolucija. S standardizacijo leta 1986 so se uvedli novi telekomunikacijski standardi, ki so vpeljali popolnoma novo strukturo telekomunikacijskih omrežij. Revolucionarna sinhrona digitalna hierarhija ali na kratko SDH, v popolnosti izpolnjuje zahteve s stališča sinhronizacije, delovanja, upravljanja in vzdrževanja telekomunikacijskih omrežij, namenjenih predvsem prenosu govora. Za razliko od PDH telekomunikacijskih omrežij, ki imajo izrazito vertikalno organizacijsko strukturo ter točka–točka topologijo telekomunikacijskega omrežja, imajo SDH telekomunikacijska omrežja izrazito horizontalno organizacijsko strukturo z obročno topologijo (Helvoort, 2005, str. 2). Velika prednost SDH tehnologije je tudi multipleksna struktura, v kateri se pritočni signali kot koristna vsebina preslikavajo v kontejnerje oziroma hranilnike. Vsak hranilnik se skupaj s svojo lastno informacijo o sinhronizaciji ter dodatnimi bajti za delovanje, nadzor in upravljanje prenaša po telekomunikacijskem omrežju neodvisno. To omogoča enostavno dodajanje in odvzemanje hranilnikov nižjih bitnih hitrosti v hranilnike višjih bitnih hitrosti oziroma odvzemanje iz njih brez predhodnega multipleksiranja oziroma demultipleksiranja.

3.1.1 Multipleksiranje

Osnovni signal SDH hierarhije se po principu časovnega multipleksiranja multipleksira v signale višjih bitnih hitrosti. Signali višjih bitnih hitrosti v SDH hierarhiji so podani v tabeli 1.

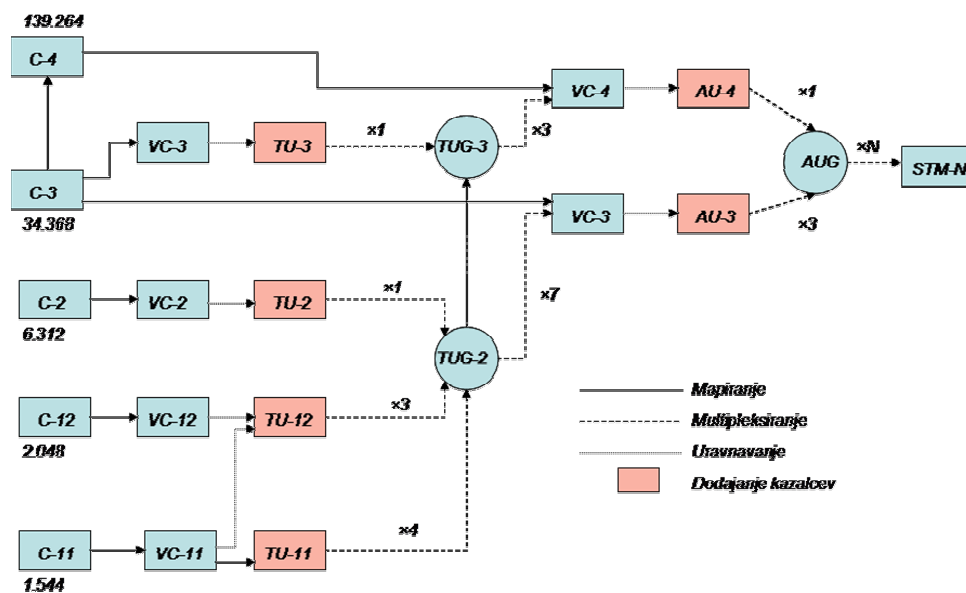
Tabela 1: Bitne hitrosti SDH digitalne hierarhije

SDH signal	Linijska hitrost [Mbit/s]	Koristna vsebina [Mbit/s]
STM-1	155.520	150.336
STM-4	622.080	601.344
STM-16	2488.320	2405.376
STM-64	9953.280	9621.504

Vir: Gumaste, 2002 str. 224.

Multipleksiranje signalov nižjih bitnih hitrost v signale višjih bitnih hitrosti poteka po multipleksni shemi, ki je definirana v ITU-T priporočilu G.709. Signali nižjih bitnih hitrosti se najprej preslikajo v enega od petih možnih hranilnikov C (angl. Container; slov. hranilnik), glede na pasovne širine, ki jih potrebujejo. Vsakemu hranilniku se doda POH (angl. Path Overhead; slov. glava poti). Na ta način se formirajo virtualni hranilniki VC (angl. Virtual Container; slov. virtualni hranilnik), ki zagotavljajo enotno ovojnico koristne vsebine. Virtualni hranilniki se nato uravnavaajo s tributarnimi enotami TU (angl. Tributary Unit; slov. tributarna enota). Uravnavanje se opravi z dodajanjem polnilnih bitov, ki po potrebi višajo bitno hitrost oziroma spravijo vse vhode na isto bitno hitrost. Na tem nivoju sledi še dodajanje kazalcev, ki omogočajo identifikacijo koristne vsebine v ovojnicah. Dosedanje funkcije omogočajo, da se koristna vsebina multipleksira v skupino tributarnih enot TUG (angl. Tributary Unit Group; slov. skupina tributarnih enot). Naslednji korak je multipleksiranje skupin tributarnih enot TUG v virtualne hranilnike višjega reda. TUG-2 in TUG-3 so multipleksirani v VC-3 oziroma VC-4. Ti virtualni hranilniki so uravnani s polnilnimi biti na administrativne enote AU (angl. Administrative Unit; slov. administrativna enota), ki se nato multipleksirajo v skupino administrativnih enot AUG (angl. Administrative Unit Group; slov. skupina administrativnih enot), le ti pa se nato multipleksirajo v STM-N (angl. Synchronous Transport Mode) signal. SDH multipleksno strukturo prikazuje slika 12.

Slika 12: SDH multipleksna struktura



Vir: Black, 2002, str. 99.

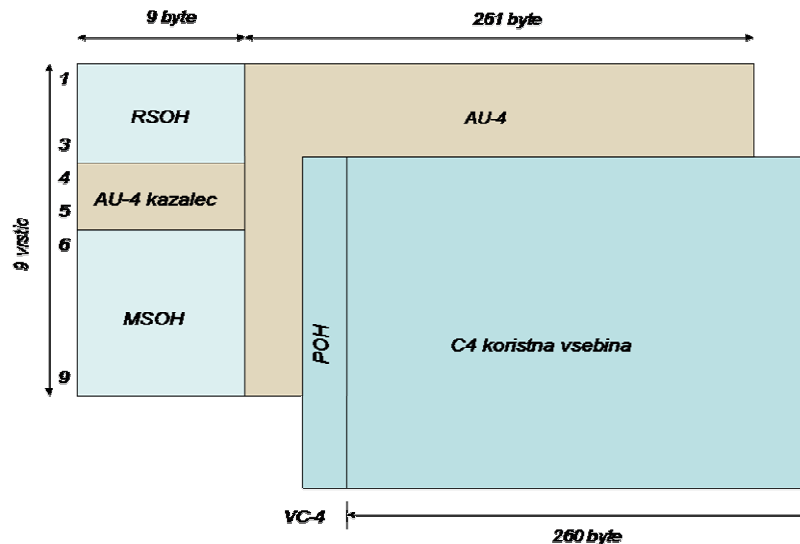
3.1.2 Struktura SDH okvirja

Osnovni blok oziroma okvir SDH digitalne hierarhije se imenuje STM-1 (Synchronous Transport Mode). Velikost okvirja STM-1 je bila izbrana tako, da omogoča vstavljanje PDH signalov E1, E3 in E4. Perioda enega STM-1 okvirja 125 μ s. Vsak okvir je sestavljen iz 270 stolpcev ter 9 vrstic. V preseku vsakega stolpca in vrstice se nahaja 8 bitov oziroma en bajt. Iz podanih podatkov se da izračunati bitno hitrost STM-1 signala:

$$9 \text{ vrstic} \times 270 \text{ stolpcev} \times 1/125 \mu\text{s} \times 8 \text{ (bit/byte)} = 155.52 \text{ Mbit/s}$$

Bitna hitrost STM-1 signala je torej 155.52 Mbit/s. Koristna vsebina STM-1 signala je manjša za približno 5 Mbit/s in znaša 149.76 Mbit/s. 5 Mbit/s pasovna širina je v primeru STM-1 signala namenjena sinhronizaciji, nadzoru, upravljanju in vzdrževanju sistema in omrežja. Strukturo STM-1 signala prikazuje slika 13.

Slika 13: STM-1 okvir



Vir: Gumaste, 2003, str. 223.

Na sliki 13 se vidi, da se v STM-1 signalu uporablja za prenos informacij 260×9 bytov (149,76 Mbit/s), vsi ostali pa so namenjeni sinhronizaciji, nadzoru, upravljanju ter vzdrževanju sistema in omrežja. Dodatni bajti za sinhronizacijo, nadzor, upravljanje ter vzdrževanje so razvrščeni v treh glavah:

- RSOH (angl. Regenerator Section Overhead; slov. glava regeneratorske sekcije),
- MSOH (angl. Multiplex Section Overhead; slov. glava multipleksne sekcije),
- POH (angl. Path Overhead, slov. glava povezave).

STM-1 okvir se zgradi po naslednjem vrstnem redu:

- C-4; (149.76 Mbit/s),
- C-4 + POH = VC-4; (150.336 Mbit/s),
- VC-4 + AU-4 kazalec = AU-4,
- AU-4 + RSOH + MSOH = STM-1; (155.52 Mbit/s).

3.1.3 Nivoji SDH hierarhije

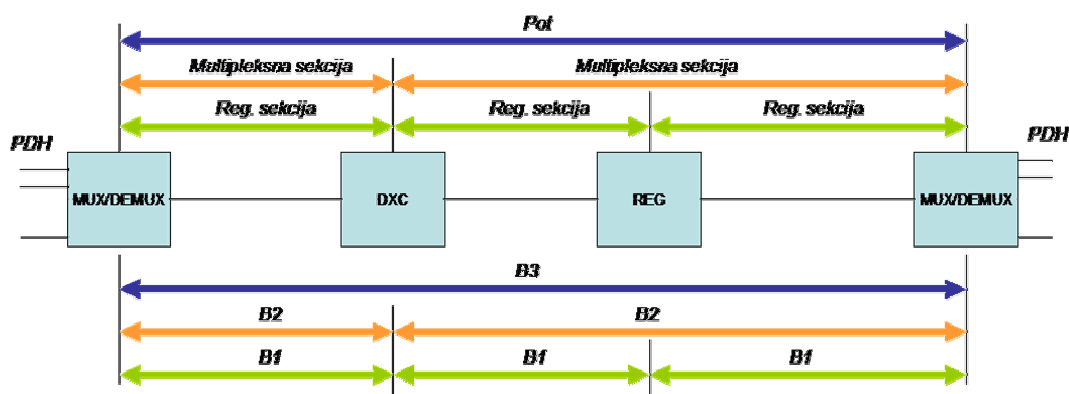
SDH hierarhija je razdeljena na štiri nivoje oziroma sekcije. Sekcije ter njihove definicije podajata tabela 2 ter slika 14.

Tabela 2: SDH sekcije in njihove funkcije

SDH sekcija	Funkcije sekcije
Pot	Preslika signale v STM okvir
Multipleksna sekcija	Sinhronizacija in multipleksne funkcije za sekcijo poti
Regeneratorska sekcija	Transport STM okvirjev preko fizičnega medija
Optika	Pretvorba med električnim STM in linijskim optičnim signalom

Vir: Gumaste, 2003, str. 225.

Slika 14: SDH sekcije



Vir: Ramaswami, 2002, str. 371

Osnovna naloga sekcije, ki se imenuje pot, je preslikava signalov v zahtevan format, ki je definiran v multipleksni sekciji SDH. V sekciji pot se za spremljanje kakovosti prenosa in izvajanja zaščitnih shem bere, modificira in interpretira glava poti POH. Multipleksna sekcija skrbi za sinhronizacijo in multipleksiranje poti. Prav tako skrbi za prenos glav in koristne vsebine na nivoju poti, vse z namenom spremljanja napak in zaščitnih preklapov na nivoju multipleksne sekcije. Regeneratorska sekcija je namenjena prenosu STM-N okvirjev preko prenosnega medija. Ta sekcija vključuje okvirjanje, mešanje in vzdrževanje signala. Optični nivo je tam, kjer se opravi električno optična pretvorba. Na tem nivoju se signal pripravi za prenos preko optičnega prenosnega medija in definira optični nivo, obliko ter frekvenco optičnega impulza (Gumaste, 2003, str. 225).

3.1.4 SDH fizični nivo

SDH hierarhija definira širok spekter vmesnikov na fizičnem nivoju. Definirani so glede na bitno hitrost ter glede na razdaljo med lokacijami, med katerimi se določen optični signal prenaša. Glede razdalj ločimo vmesnike za:

- prenos optičnih signalov med pisarnami (I), za razdalje do 2 km,
- prenos optičnih signalov na kratke razdalje (S) do 15 km pri 1310 nm in do 40 km pri 1550 nm,
- prenos optičnih signalov na dolge razdalje (L) do 40 km pri 1310 nm in do 80 km pri 1550 nm,
- prenos optičnih signalov na zelo dolge razdalje (V) do 60 km pri 1310 nm in do 120 km pri 1550 nm,
- prenos optičnih signalov na ultra dolge razdalje (U) do 160 km pri 1550 nm.

Različni fizični vmesniki SDH hierarhije so določeni v ITU-T priporočilih G.957 in G.691.

3.1.5 Topologije in elementi SDH optičnih omrežij

SDH optična omrežja podpirajo na fizičnem nivoju tri različne topologije omrežij. Te topologije so:

- točka-točka topologija,
- verižna oziroma linearna topologija ter
- obroč.

Za razliko od PDH telekomunikacijskih omrežij, ki imajo izrazito vertikalno organizacijsko strukturo ter točka-točka topologijo telekomunikacijskega omrežja, imajo SDH telekomunikacijska omrežja izrazito horizontalno organizacijsko strukturo z obročno topologijo (Helvoort, 2005, str. 2). Obročna topologija telekomunikacijskega omrežja je s stališča zaščite telekomunikacijskega prometa veliko boljša od topologije točka-točka.

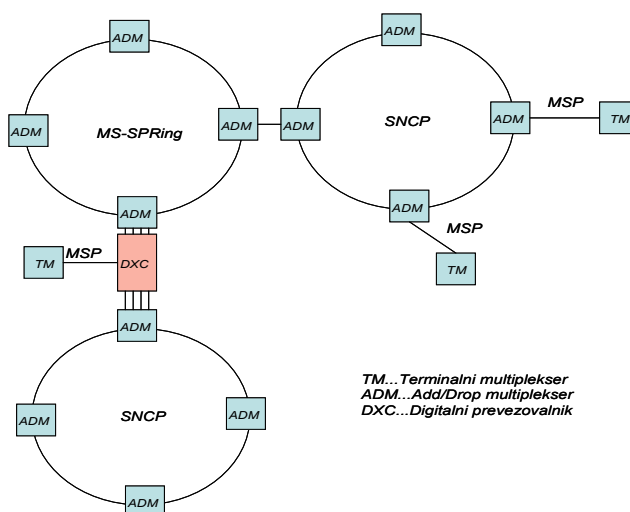
Prve implementacije SDH telekomunikacijskih naprav so bile v topologiji točk-točka. Ta topologija se še vedno uporablja na robovih SDH obročev, kot pristopna omrežja. Multiplekserji, ki se uporabljajo v točka-točka topologijah, se imenujejo terminalni multiplekserji in jih označujemo s kratico TM. V veliko primerih pa obstaja potreba, da se iz signala višje bitne hitrosti odvzame en ali več signalov nižje bitne hitrosti, oziroma da se v signal višje bitne hitrosti doda en ali več signalov nižje bitne hitrosti. Te funkcije se izvajajo s tako imenovanimi Add/Drop multiplekserji, ki jih označujemo s kratico ADM (angl. Add Drop Multiplexer). Dodajanje in odvzemanje signalov nižjih bitnih hitrosti neposredno v signale višjih bitnih hitrosti oziroma odvzemanje iz njih omogoča struktura SDH signala, ki vsebuje kazalce. Kazalci v vsakem trenutku kažejo, kje se v SDH okvirju nahaja določen virtualni kontejner. ADM omogočajo izgradnjo omrežij v obliki obroča. V primeru, ko se ADM vstavi med dva TM, dobimo verižno topologijo omrežja.

V zmogljivejših optičnih omrežjih se zahteva velika zanesljivost. Veliko zanesljivost predstavlja možnost, da ob okvari določene komponente sistema ali prekinitve optičnega vlakna telekomunikacijski promet deluje nemoteno. Najpogosteje uporabljena topologija optičnega omrežja, ki omogoča zanesljivost, je obroč. Obroč namreč poleg glavne prometne poti vedno nudi tudi alternativno oziroma zaščitno pot. ADM telekomunikacijske naprave omogočajo poleg dodajanja in odvzemanja signalov torej še zaščitne mehanizme, ki bodo obdelani v nadaljevanju (Ramaswami, 2002, str. 379).

Pomembna komponenta v SDH optičnih omrežjih so tudi digitalni prevezovalniki, ki se označujejo s kratico DXC. DXC omogočajo upravljanje telekomunikacijskega prometa v glavnih vozliščih. Za razliko od standardnih SDH naprav, ki vsebujejo po dve linijski kartici, vsebujejo DXC naprave več linijskih kartic, ki so medsebojno povezane z zelo močno matriko. Matrika omogoča prevezovanje signalov, ki prihajajo iz različnih smeri.

Tipično SDH optično omrežje, ki je sestavljeno iz različnih tipov SDH naprav in vključuje različne topologije, prikazuje slika 15.

Slika 15: SDH optično omrežje

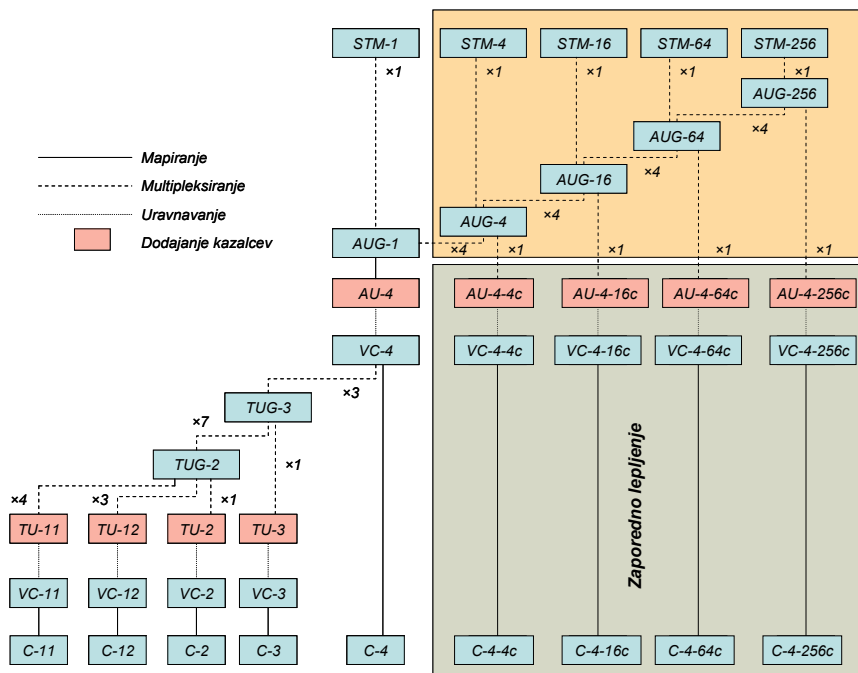


3.1.6 Zaporedno lepljenje koristne vsebine SDH signala

SDH tehnologija je bila razvita in vpeljana za prenos govora. Koristna vsebina SDH okvirjev je takšna, da omogoča prenos večjega števila virtualnih hranilnikov nižjih bitnih hitrosti. Najmanjši virtualni hranilnik v SDH okvirju je VC-12. V zadnjem desetletju pa smo priča veliki rasti podatkovnega prometa. Rast podatkovnega prometa temelji na velikem številu uporabnikov interneta. Varnost podatkov povečuje potrebe po zrcaljenju in kopiranju podatkov med pomnilnimi enotami na različnih lokacijah. Zaradi vedno večjih koristnih vsebin, ki so potrebne za prenos podatkov, standardni SDH okvirji niso več primerni. Velikost koristne vsebine C-4 osnovnega SDH signala STM-1 je 149.76 Mbit/s. Signali višjih bitnih hitrosti SDH hierarhije omogočajo bitne hitrosti, ki so štirikratniki osnovne bitne hitrosti, vendar ne v obliki enega samega hranilnika (Helvoort, 2005, str. 10).

S stališča prenosa podatkov predstavlja prvo izboljšavo v SDH telekomunikacijskih omrežjih prve generacije možnost zaporednega lepljenja koristne vsebine SDH okvirjev. Z zaporednim lepljenjem koristne vsebine SDH okvirjev je možno preko SDH telekomunikacijskih omrežij prenašati podatke, ki zahtevajo bitne hitrosti do 599.04 Mbit/s (VC-4-4c), 2.39 Gbit/s (VC-4-16c) ali 9.58 Gbit/s (VC-4-64c) (Kartalopoulos, 2004, str. 33). Zaporedno lepljenje koristne vsebine SDH signalov zahteva razširitev osnovne SDH multipleksne strukture. Razširjena SDH multipleksna struktura omogoča, da so posamezni hranilniki med seboj povezani tako, da je njihova skupna kapaciteta razpoznavna kot en hranilnik (Helvoort, 2005, str. 11). Razširjeno SDH multipleksno strukturo prikazuje slika 16.

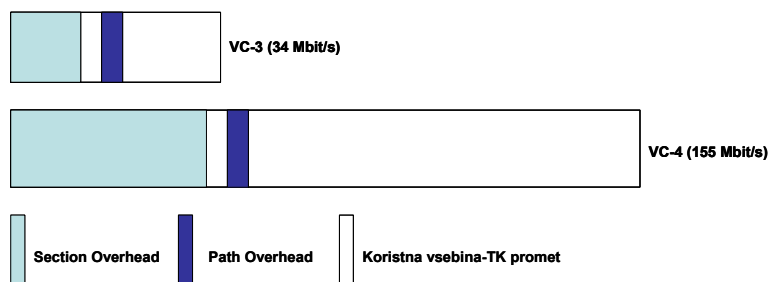
Slika 16: Razširjena SDH multipleksna struktura



Vir: Helvoort, 2005, str. 11.

V nadaljevanju sledi nekoliko bolj plastičen prikaz zaporednega lepljenja koristne vsebine SDH signala. Slika 17 prikazuje SDH okvir s fiksno koristno vsebino C-3 (34 Mbit/s) in C-4 (155 Mbit/s).

Slika 17: Fiksna koristna vsebina



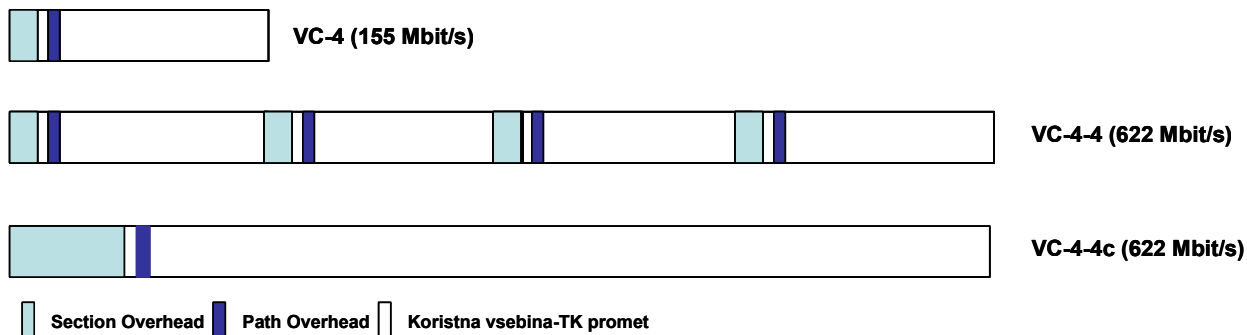
Vir: Leveraging Transport for Data Services with VCAT and LCAS, 2003, str. 2.

V primeru uporabe osnovne bitne hitrosti SDH standarda VC-3 lahko prenašamo signale, ki ne presežejo bitne hitrosti 34 Mbit/s, navzdol pa gredo do bitne hitrosti 2 Mbit/s. V virtualni kontejner VC-3 lahko preslikamo 16×2 Mbit/s signalov. Enako velja za VC-4, ki omogoča prenos signalov bitnih hitrosti do 155 Mbit/s.

Za prenos formatov, kot sta ATM in PoS (Packet Over SDH), pa potrebujemo precej višjo hitrost koristne vsebine. To težavo rešuje zaporedno lepljenje koristne vsebine. Z lepljenjem koristne vsebine dobimo večjo skupno koristno vsebino. Pri n-krat zlepljeni vsebini se glava sekcije (SOH) poveča za n-krat, medtem ko ostane glava poti (POH)

popolnoma nespremenjena oziroma je konstantna. Slika 18 prikazuje zaporedno lepljenje koristne vsebine oziroma virtualnih hranilnikov VC-4.

Slika 18: Zaporedno lepljenje koristne vsebine



Vir: Leveraging Transport for Data Services with VCAT and LCAS, 2003, str. 3.

V prvi vrstici je prikazan virtualni kontejner SDH hierarhije VC-4. Njegova bitna hitrost je 150.336 Mbit/s. Druga vrstica prikazuje štiri zaporedne VC-4 (VC-4-4). Vidimo, da je koristna vsebina razdeljena na štiri dele. Tak signal omogoča prenos štirih signalov s prenosno hitrostjo 150.336 Mbit/s. Če želimo prenašati signal, katerega bitna hitrost je višja od 150.336 Mbit/s, je potrebno koristno vsebino zlepliti. Tak primer je naveden v tretji vrstici. Rezultat zaporednega lepljenja je signal VC-4-4c. Splošno velja, da je VC-4-Xc signal skonstruiran z bajt po bajt multipleksiranjem X posameznih virtualnih hranilnikov VC-4. Vidi se, da je Section Overhead (SOH) štirikrat povečan, medtem ko je glava poti (POH) nespremenjen. POH prvega virtualnega hranilnika VC-4 se uporabijo kot POH zlepljenega virtualnega hranilnika VC-4-Xc. Koristna vsebina signala je zlepljena in omogoča preslikanje signala, katerega bitna hitrost ne preseže 600 Mbit/s. Pri tem načinu lepljenja koristne vsebine SDH signala govorimo o zaporednem lepljenju. Tabela 3 podaja kapacitete zaporedno zlepljenih virtualnih hranilnikov VC-4:

Tabela 3: Kapacitete zaporedno zlepljenih virtualnih vsebnikov

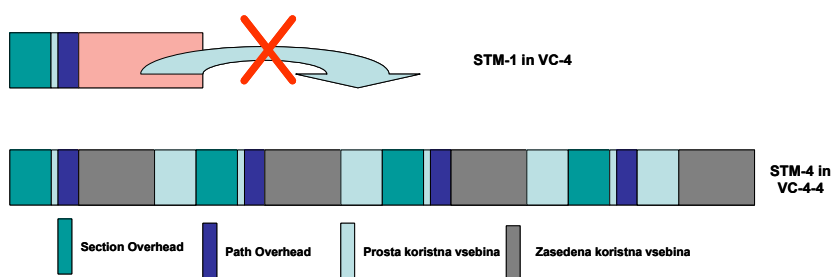
Virtualni hranilnik	Kapaciteta virtualnega hranilnika [Mbit/s]
VC-4	149.76
VC-4-4c	599.04
VC-4-16c	2396.16
VC-4-64c	9584.64
VC-4-256c	38.338.56

Pri fiksni in zaporedno zlepljeni koristni vsebini lahko pride do določene izgube pasovne širine. Izguba pasovne širine negativno vpliva na celotne performance telekomunikacijskega omrežja. Navedena sta dva primera:

- Neprevidno konfiguriranje posameznih prometnih tokov pripelje do velike razdrobljenosti razpoložljive pasovne širine. Takšne razdrobljene pasovne širine ni mogoče zaporedno lepiti in s tem ustvariti pogojev za preslikanje nekega signala z višjo bitno hitrostjo. Preslikanje tega signala ni mogoče niti v primeru, ko je skupna vsota posameznih fragmentov enaka ali večja od potrebne pasovne širine.

Takšni razdrobljenosti pasovne širine se je praktično nemogoče izogniti. Razlogi za to so, da se prometnih potreb za daljše prihodnje časovno obdobje ne pozna, napake operaterjev, nepoznavanje pravil konfiguriranja povezav za učinkovito izrabo razpoložljive pasovne širine in podobno. V primeru, da imamo na določeni linijski povezavi zelo razdrobljeno pasovno širino, je potrebno za pridobitev prostora za neko novo storitev prekonfigurirati obstoječe prometne povezave. Tak postopek je lahko drag zaradi časa, ki je potreben za te aktivnosti, predvsem pa zaradi možnosti določenih napak, ki potencialno povzročijo izpad telekomunikacijskega prometa. Čas za te aktivnosti je lahko nekaj ur, v primeru večjih omrežij pa vse do nekaj dni. Težave z razdrobljenostjo pasovne širine, ki ne omogoča preslikave koristne vsebine STM-1 signala, podaja slika 19.

Slika 19: Razdrobljenost pasovne širine



Vir: Leveraging Transport for Data Services with VCAT and LCAS, 2003, str. 6.

- Pri preslikanju Ethernet in SAN protokolov v fiksne in zaporedno zlepljene koristne vsebine pride do precejšnje izgube pasovne širine. Medtem ko se lahko nepravilnemu oziroma neefektivnemu konfiguriranju prometnih povezav z načrtnim in kakovostnim delom izognemo, se izgubi pasovne širine pri preslikanju GbE in SAN protokolov v SDH okvirje ne moremo izogniti. Izkoriščenost pasovne širine pri preslikanju podatkovnih formatov v SDH okvirje podaja tabela 3.

Tabela 4: Izguba pasovne širine pri prenosu podatkovnih formatov preko SDH omrežja

Protokol	Bitna hitrost protokola	Potrebna bitna hitrost za prenos protokola	Izkoriščenost pasovne širine [%]
ESCON	200Mbit/s	VC-4-4c	33%
FICON IG	1 Gbit/s	VC-4-16c	42%
Fibre Channel	1Gbit/s	VC-4-16c	42%
Fast Ethernet	100Mbit/s	VC-4	67%
Gigabit Ethernet	1Gbit/s	VC-4-16c	42%

Vir: Leveraging Transport for Data Services with VCAT and LCAS, 2003, str. 6

3.1.7 Zaščitne sheme v optičnih SDH omrežjih

Zaščitne sheme imajo v zmogljivejših optičnih omrežjih, ki so namenjena prenosu signalov visokih bitnih hitrosti, zelo velik pomen. Noben ponudnik telekomunikacijskih storitev si ne sme privoščiti, da v primeru prekinitve optičnega vlakna ali odpovedi ene od komponent sistema pade telekomunikacijski promet. V zmogljivejših optičnih omrežjih, ki podpirajo SDH tehnologijo, obstajajo sledeče zaščitne sheme:

- zaščitna shema v MS-SPRing (angl. Multiplex Section Protection Ring, slov. obroč z zaščitno shemo na multipleksni sekciji) za delo po dveh optičnih vlaknih,
- zaščitna shema v MS-SPRing za delo po štirih optičnih vlaknih,
- SNCP (angl. Sub Network Connection Protection; slov. zaščita povezanih podomrežij),
- 1+1 MSP (angl. Multiplex Section Protection; slov. zaščita multipleksne sekcije).

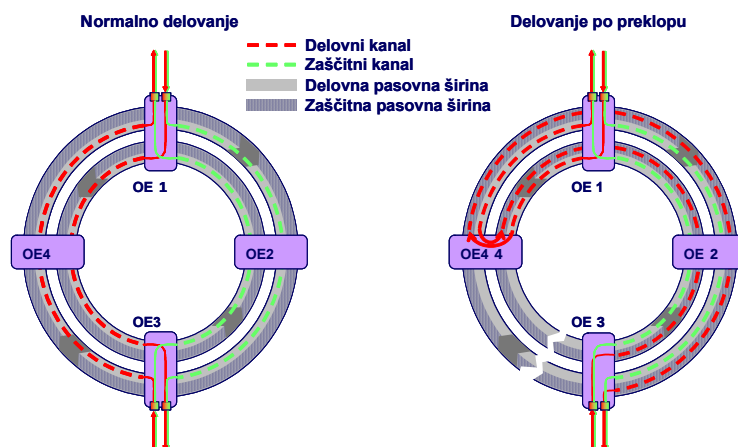
MS-SPRing je topologija omrežja, ki uporablja zaščitno shemo, ki temelji na programski opremljenosti. Sam protokol, ki omogoča preklapljanje delovnih povezav v primeru odpovedi ene od linijskih kartic ali prekinitve optičnih vlaken, je zelo zahteven. Zato obstaja omejitev števila omrežnih elementov v enem MS-SPRing obroču. To število je dvajset, če želimo preklapljanje časa manjše od 50ms. V primeru, da je v istem obroču več kot dvajset omrežnih elementov in ne več kot trideset, je preklapljanje čas 100ms. Obstajata dva tipa MS-SPRing obročev:

- MS-SPRing za delo po dveh optičnih vlaknih (2F MS-SPRing).
- MS-SPRing za delo po štirih optičnih vlaknih (4F MS-SPRing).

Ker se v večini primerov uporablja MS-SPRing z dvema vlaknoma, bo v nadaljevanju na kratko opisan ta sistem. Pri 2F MS-SPRing zaščitnem mehanizmu je pasovna širina vsakega vlakna razdeljena na dva dela: na delovno in zaščitno pasovno širino. Kot primer navedimo, da se pri STM-16 2F MS-SPRing uporabljajo VC-4 od 1 do 8 za prenos delovnega prometa, VC-4 od 9 do 16 pa so rezervirani za zaščito. Delovni promet (VC-4 od 1 do 8) potuje v eni smeri po prvem vlaknu in v obratni smeri po drugem vlaknu. Nadzorno-upravljalni sistemi izračunajo najkrajše poti za posamezne prometne tokove na osnovi več kriterijev (uporabnikove zahteve, gostota prometa in razdalje med vozlišči). V primeru prekinitve optičnega vlakna se delovni promet, ki je namenjen omrežnemu elementu na drugi strani prekinitve, preklaplja na zaščitno pasovno širino na drugem optičnem vlaknu. Promet nato poteka v obratni smeri na zaščitni pasovni širini, dokler ne doseže ciljnega omrežnega elementa. V tej točki je promet preklapljen nazaj na delovno pasovno širino.

Delovanje zaščitne sheme v MS-SPRing pri prekinitvi dveh optičnih vlaken prikazuje slika 20.

Slika 20: Delovanje zaščitne sheme v MS-SPRing



Kot je bilo omenjeno, zaščitni mehanizem v MS-SPRing deli pasovno širino obroča enakomerno med delovni in zaščitni promet. Polovica pasovne širine je rezervirana za zaščito v vsaki smeri, kar predstavlja tako imenovano polovično normalno delovanje.

Zaščitni mehanizem v MS-SPRing omogoča ponovno uporabo pasovne širine in s tem možnost prenosa večje količine prometa. Prometni tokovi imajo tako različne prioritete. Prometni tokovi z višjimi prioritetami ne bodo nikoli prekinjeni. V primeru prekinitve optičnih vlaken se prometni tokovi z nižjimi prioritetami namreč iz omrežja odstranijo. Na ta način se naredi prostor za prometne tokove z višjimi prioritetami. Tabela 7 prikazuje kapacitete 2F MS-SPRing zaščitnega mehanizma za bidirekionalne povezave. Kapaciteta MS-SPRing zaščitnega mehanizma je STM-N deljeno z dva in pomnoženo s številom omrežnih elementov v obroču minus število VC4 kontejnerjev, ki se ne zaključujejo na omrežnih elementih, ampak gredo samo skozi omrežni element.

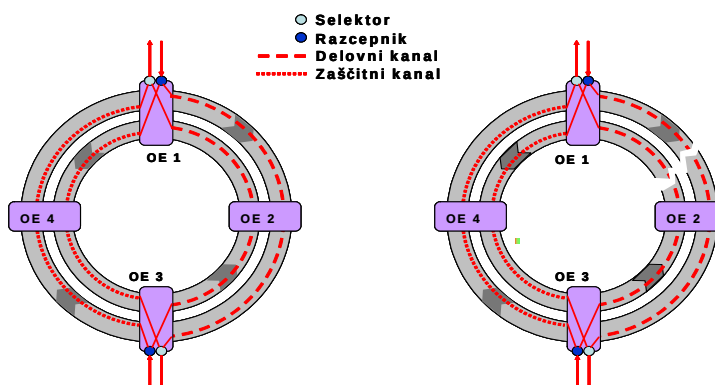
Tabela 5: Pasovna širina MS-SPRing zaščitnega mehanizma

STM-N	Virtualni hranilniki delovne pasovne širine	Virtualni hranilniki zaščitne pasovne širine	Kapaciteta obroča
STM-4	VC-4; 1-2	VC-4; 3-4	2XN-PTexp2
STM-16	VC-4; 1-8	VC-4; 9-16	8XN-PT
STM-64	VC-4; 1-32	VC-4; 33-64	32XN-PT

Vir: ONS 15454 Reference manual, 2005, str. 11.

SNCP obroči nudijo zaščito telekomunikacijskega prometa s podvojitvijo poti v omrežju. Delovni promet se prenaša po obroču v eni smeri, zaščitni promet pa v obratni smeri. Vsak pritočni vmesnik vsebuje razcepnik in selektor. To nazorno prikazuje slika 11. Razcepnik razdeli vhodni signal na dva identična signala, ki potujeta po omrežju vsak v svoji smeri. V sprejemni smeri selektor odloči, kateri od obeh signalov je boljši. Boljšega postavi za delovnega. Če se pojavi težava na poti, kjer se prenaša delovni promet, sprejemni omrežni element preklopi promet na pot, ki prihaja iz nasprotne smeri. Pri SNCP obročih se preklopi vršijo na koncu poti in so sproženi na osnovi napak ali alarmov na prenosni poti. Slika 21 prikazuje osnovno SNCP obroč topologijo. Če pošilja omrežni element OE 1 signal do omrežnega elementa OE 3, potuje delovni signal po delovni poti skozi omrežni element OE 2. Isti signal se pošilja še po zaščitni poti skozi omrežni element OE 4. Če pride do prekinitve optičnega vlakna med omrežnima elementoma OE 1 in OE 2, omrežni element OE 3 preklopi svoj aktivni sprejemnik na zaščitni signal, ki prihaja skozi omrežni element OE 4.

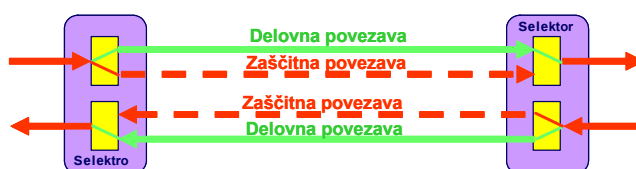
Slika 21: Obroč s SNCP zaščitno shemo



Ker se vsaka prometna potreba prenaša skozi ves obroč, je SNCP primeren zaščitni mehanizem za omrežja, kjer se promet koncentrira na eni ali več lokacijah in ni široko distribuiran po vsem omrežju. Kapaciteta SNCP obroča je enaka njegovi bitni hitrosti.

V primeru točka-točka topologije omrežja se uporabljajo terminalni multiplekserji. Za razliko od obročev, kjer so zaščitne sheme programske, je potrebno za linearno oziroma verižno topologijo zagotoviti zaščito 1+1 MSP zaščitni mehanizem. Za to je potrebno nastaviti eno STM-N kartico za delovno pot in drugo STM-N kartico za zaščitno pot. V primeru prekinitve delovne povezave se promet avtomatično preklopi na zaščitno povezavo. Za realizacijo 1+1 MSP zaščitnega mehanizma potrebujemo med lokacijami po dva para optičnih vlaken. Slika 22 prikazuje 1+1 MSP zaščitni mehanizem za točka-točka topologijo omrežja.

Slika 22: 1+1-MSP zaščitni mehanizem za točka-točka topologijo omrežja



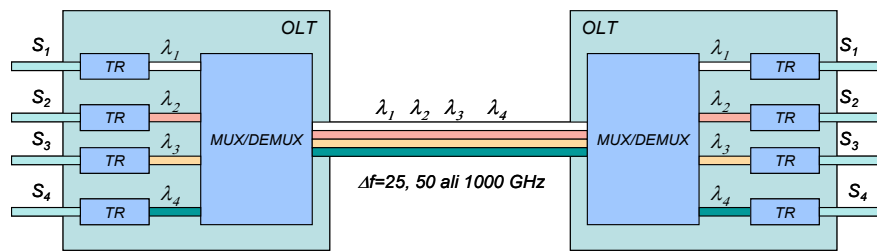
V vsakem omrežnem elementu je tako imenovani selektor, ki na osnovi kakovosti sprejemnega optičnega signala odloči, kateri signal je boljši. Boljši od obeh sprejemnih signalov je določen kot delovni. Delovni par optičnih vlaken je na sliki 20 označen s polno črto, zaščitni par optičnih vlaken pa s prekinjeno črto. Delovni par in zaščitni par sta običajno vodena po dveh fizično ločenih poteh. V primeru prekinitve delovnega optičnega para 1+1 MSP zaščitni mehanizem poskrbi, da se promet v času, manjšem od 50 ms, preklopi na zaščitno pot.

3.2 WDM tehnologija

WDM tehnologija sloni na dobro poznanem konceptu, ki se imenuje frekvenčna modulacija. Pri tej tehnologiji je pasovna širina kanalov razdeljena med več kanalov, pri čemer zaseda vsak kanal del večjega frekvenčnega spektra. V WDM optičnih omrežjih se vsak kanal imenuje valovna dolžina. To ime se uporablja zato, ker deluje vsak kanal na drugi frekvenci oziroma valovni dolžini. Od tod izvira ime tehnologije: Wave Division Multiplex (WDM).

Za opis WDM kanalov se uporabljajo tudi termini optični kanal, frekvenca ali lambda. Ne glede na izraz, ki se uporablja za imenovanje kanalov, je ideja WDM tehnologije prenos uporabnikovega signala preko optičnega kanala. Slika 23 prikazuje WDM povezavo z dvema optičnima linijskima terminaloma OLT (angl. Optical Line Terminal; slov. optični linijski terminal).

Slika 23: WDM povezava z dvema optičnima linijskima terminaloma



Na sliki 23 so pritočni signali označeni kot S_1 do S_4 . Pritočni signali so lahko različnih protokolov in različnih bitnih hitrosti. Značilnost pritočnih signalov je tudi, da so lahko enake valovne dolžine. Na primer vsi štirje pritočni signali so valovne dolžine 1550 nm. Za prenos preko skupnega optičnega vlakna je potrebno vsak pritočni signal prestaviti po ITU-T priporočilih natančno določeno valovno dolžino. Pravimo, da ne-obarvano valovno dolžino pretvorimo v obarvano. Komponenta, ki opravi omenjeno pretvorbo, se imenuje transponder in je na sliki 22 označen s TR. Izhodi iz transponderjev so tako imenovane obarvane valovne dolžine, ki so označene kot λ_1 do λ_4 . Frekvenčni razmaki med posameznimi valovnimi dolžinami so 25, 50, 100 ali 200 GHz. Frekvenčni razmaki so potrebni zato, da med posameznimi valovnimi dolžinami ne pride do medsebojnih vplivov. Najpogosteje uporabljeni razmak je 100 GHz (Black, 2002, str. 113). Obarvane valovne dolžine λ_1 do λ_4 se na pasivni optični komponenti, ki se imenuje optični multiplekser, multipleksirajo tako, da se istočasno ter medsebojno neodvisno prenašajo preko skupnega optičnega vlakna.

V sprejemni smeri je postopek obraten. Na optičnem demultiplekserju se kompozitni WDM signal demultipleksira tako, da dobimo na linijski strani transponderjev posamezne valovne dolžine od λ_1 do λ_4 . Obarvane valovne dolžine se nato na transponderjih pretvorijo v svojo osnovno frekvenčno lego. Tak signal je pripravljen, da se ga priključi na uporabnikovo napravo, ki je lahko na primer standardna SDH naprava, ATM stikalo, Ethernet stikalo in podobno.

Kompleksnejša WDM omrežja so sestavljena iz optičnih linijskih terminalov (OLT), optični add/drop multiplekserjev (OADM), optičnih ojačevalnikov ter optičnih prevezovalnikov OXC (angl. Optical Cross Connect). Zmogljivo optično omrežje, zgrajeno z omenjenimi komponentami, omogočajo tako imenovane optične poti med posameznimi omrežnimi elementi. Optično pot predstavlja optični kanal (valovna dolžina) med dvema omrežnima elementoma, ki se usmerja skozi vmesne omrežne elemente (Ramaswami, 2002, str.403).

WDM zmogljiva optična omrežja podpirajo različne topologije, ki so točka-točka, linearna, obroč ter mešana topologija. OLT multipleksirajo množico valovnih dolžin v kompozitni signal, ki se prenaša preko skupnega optičnega vlakna in demultipleksira kompozitni optični signal v posamezne valovne dolžine. OLT vsebujejo transponderje ter optične multiplekserje in demultiplekserje. Zato so primerni predvsem za točka-točka topologije. V primeru, da želimo z OLT napraviti topologijo obroča, morata biti na vsaki lokaciji inštalirana dva OLT-ja. Zato je v teh primerih bolje uporabljati OADM-e. OADM-i se uporabljajo tam, kjer obstaja potreba po odvzemanju samo določenih valovnih dolžin, medtem ko se določene valovne dolžine usmerjajo skozi omrežni element. OADM-i bodo podrobneje obdelani v nadaljevanju. OXC opravljajo podobno funkcijo kot OADM-i, le da nudijo večje število vhodnih vmesnikov in s tem večje število

valovnih dolžin, ki se jih usmerja in prenaša. Končne stranke se priključuje na OLT, OADM ali OXC glede na to, ali že poseduje obarvano ali ne-obarvano valovno dolžino.

Zmogljiva optična omrežja, ki podpirajo WDM tehnologijo, imajo določene specifične lastnosti oziroma prednosti. Najpomembnejše prednosti so:

- *večkratna uporaba iste valovne dolžine*; dokler se v WDM zmogljivem optičnem omrežju dve ali več valovnih dolžin ne prekriva, se jih lahko uporablja na različnih odsekih,
- *pretvorba valovnih dolžin*; valovne dolžine se lahko na posameznih WDM napravah pretvarjajo iz ene v drugo. V določenih primerih omogočajo pretvorbe valovnih dolžin boljše izkoriščenost valovnih dolžin v optičnem omrežju.
- *transparentnost*; transparentnost se nanaša na dejstvo, da lahko optične poti prenašajo podatke različnih bitnih hitrosti in protokolov istočasno,
- *zanesljivost*; zmogljivo WDM optično omrežje se lahko konfigurira tako, da v primeru napake na optičnem vlaknu ali na določeni komponenti sistema telekomunikacijski promet poteka nemoteno. Zaščitne sheme v WDM zmogljivih optičnih omrežjih bodo obdelane v nadaljevanju,
- *topologija optičnih poti*; topologija optičnih poti se lahko razlikuje od dejanske fizične topologije WDM zmogljivega optičnega omrežja. Topologijo optičnih poti imenujemo tudi logična topologija omrežja. Ker ni nujno, da se valovne dolžine vzpostavljajo samo med sosednjimi omrežnimi elementi, je lahko v fizični topologiji omrežja obroč logična topologija mešana.

3.2.1 Izpeljanke WDM tehnologije

Omenili smo že, da morajo biti v WDM sistemih posamezne valovne dolžine medsebojno razmaknjene. Razmaknjene morajo biti zato, da med njimi ne pride do medsebojnih vplivov. V primeru velikih razmikov med valovnimi dolžinami, to je 200 GHz govorimo o CWDM (angl. Coarse Wavelength Division Multiplex; slov. grobo valovno dolžinsko multipleksiranje) tehnologiji, medtem ko v primeru 25, 50 ali 100 GHz razmikih o DWDM (angl. Dense Wavelength Division Multiplex; slov. zgoščeno valovno dolžinsko multipleksiranje) tehnologiji.

CWDM tehnologija omogoča tipično prenos do osem 1 Gbit/s ali 2 Gbit/s optičnih signalov preko skupnega optičnega vlakna. Vsak optični signal se najprej pretvori v točno določeno valovno dolžino. Obarvani optični signali se potem multipleksirajo na terminalnih ali add/drop optičnih multiplekserjih. Terminalni optični multiplekserji omogočajo točka-točka topologije omrežij, medtem ko add/drop multiplekserji tudi ostale topologije, od katerih je najpogostejše uporabljena topologija obroča. CWDM valovne dolžine se ne ojačujejejo. To je razlog, da je domet prenosa pri tej tehnologiji precej omejen. Tipični optični oddajnik, ki se uporablja v CWDM napravi, ima do 30 dBm dometa. To pomeni v točka-točka topologiji do 90 km, v obročni topologiji pa do 40 km. Tako kot v primeru temnega vlakna je lahko zaščita prometa realizirana na končnih točkah s stikali ali z naprednejšimi programskimi zaščitnimi shemami. Možne so tudi kombinacije zaščitnih shem, ki jih podpira CWDM naprava in zaščite na strani stranke. CWDM tehnologija ne vnaša dodatnih zakasnitev. Zakasnitev, ki jo je potrebno pri CWDM tehnologiji upoštevati, so zakasnitve potovanja svetlobe skozi optično vlakno. Zaradi omenjenega so CWDM kanali optimalni za sinhrono kopiranje podatkov na relativno kratkih razdaljah.

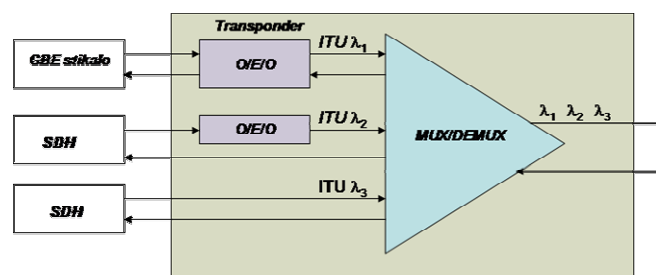
DWDM tehnologija omogoča istočasen prenos večjega števila valovnih dolžin preko skupnega optičnega vlakna. Vsaka valovna dolžina oziroma kanal lahko podpira prenosne hitrosti do 10 Gbit/s. V nasprotju s CWDM pasivno optično tehnologijo so DWDM naprave za prenos optičnih signalov bolj napredne, saj omogočajo različne zaščitne sheme. Le te so programsko podprte. DWDM sistemi so zato zelo zanesljivi in omogočajo zelo visoke prenosne kapacitete ter visoko razpoložljivost. Ker je mogoče DWDM signale optično ojačevati in to ne vnaša dodatnih zakasnitev, je ta tehnologija primerna za prenos na večje razdalje. DWDM je torej optimalna rešitev za sinhrono kopiranje med podatkovnimi centri na mestnem področju ali celo na medmestnih in mednarodnih relacijah.

3.2.2 Osnovne komponente WDM sistemov prenosa

Osnovne komponente WDM sistemov prenosa so optični linijski terminali (OLT), optični ojačevalniki ter optični add/drop multiplekserji (OADM).

Z arhitekturne perspektive je optični linijski terminal relativno enostaven omrežni element. Uporablja se kot končni element v točka-točka topologijah optičnih omrežij. Sestavljen je iz transponderjev, optičnih multiplekserjev/demultiplekserjev ter opcijsko vgrajenih optičnih ojačevalnikov. Slika 24 podaja blok diagram optičnega linijskega terminala.

Slika 24: Optični linijski terminal



Vir: Ramaswami, 2002, str. 406.

Transponder je v OLT namenjen za pretvorbo pritočnega optičnega signala tako, da je primeren za prenos znotraj zmogljivega optičnega omrežja. V nasprotni smeri transponder pretvori signal, ki se prenaša znotraj zmogljivega optičnega omrežja v signal, ki je primeren za priključitev na zunanjo napravo. Na sliki 23 sta navedena dva primera zunanjih naprav. Ena je GBE stikalo, drugi dve napravi pa predstavlja standardna SDH naprava.

Pretvorba pritočnega optičnega signala zajema več funkcij:

- transponder pretvori valovno dolžino zunanje naprave v valovno dolžino, ki je primerna za prenos znotraj zmogljivega optičnega omrežja. Te valovne dolžine podpirajo ITU-T priporočila za WDM sisteme in se nahajajo v tretjem, 1.55 μm oknu,
- transponder doda določene glave, ki so namenjene za upravljanje zmogljivega optičnega omrežja,
- transponder doda FEC (Forward Error Correction), še posebej pri signalih bitne hitrosti 10Gbit/s,

- transponder spremlja bitne napake v sprejemni in oddajni smeri. V ta namen se na transponderju opravlja optično/električno/optična pretvorba.

V določenih primerih je potrebno valovno dolžino iz zunanje naprave pretvoriti le v oddajni smeri. V tem primeru zunanja naprava ne podpira ITU-T priporočil za WDM. V oddajni smeri je potrebno opraviti pretvorbo valovne dolžine zato, da se lahko na optičnem multiplekserju multipleksira. V sprejemni smeri pretvorba načeloma ni potrebna, ker so optični sprejemniki v večini primerov širokopasovni in ne zahtevajo zelo natančno določene valovne dolžine. Tak primer predstavlja na sliki 23 srednja (SDH) zunanja naprava.

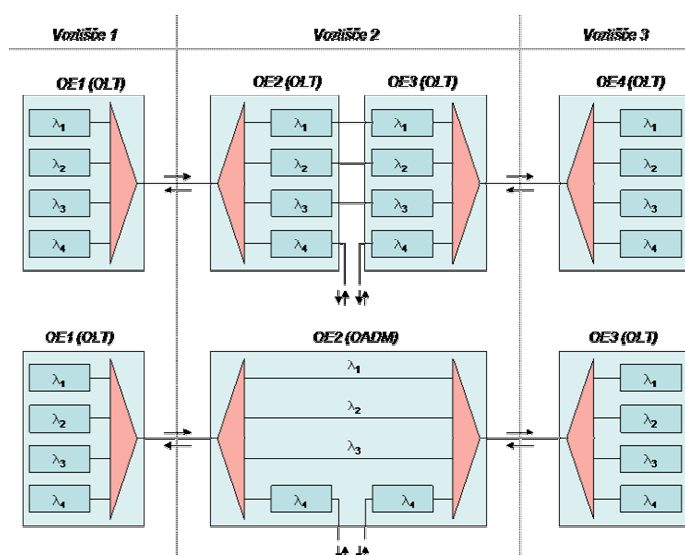
Obstajajo tudi primeri, ko linijske kartice zunanjih naprav podpirajo ITU-T priporočila za WDM. V tem primeru so valovne dolžine že natančno določene in se lahko neposredno multipleksirajo na optičnih multiplekserjih. Tak primer podaja na sliki 23 spodnja zunanja naprava.

Signal točno določene valovne dolžine, ki prihaja iz transponderja ali neposredno iz zunanje naprave, se v OLT priključi na terminalni optični multiplekser. Na optičnem terminalnem multiplekserju se različne valovne dolžine multipleksirajo v niz valovnih dolžin, ki se med seboj neodvisno prenašajo preko skupnega optičnega vlakna.

V primeru daljših razdalj med posameznimi OLT-ji je potrebno na optičnih vlaknih namestiti optične ojačevalnike.

Za obravnavo topologij zmogljivih optičnih omrežij, ki podpirajo WDM tehnologijo, je potrebno spoznati še optične »add/drop« multiplekserje (OADM). OADM-i omogočajo cenovno ugodno upravljanje valovnih dolžin, ki jih je potrebno na določenem vmesnem omrežnem elementu dodati ali odvzeti. Z OADM-i v zmogljivih optičnih omrežjih zmanjšamo potrebno število omrežnih elementov in poenostavimo samo strukturo omrežja. Slika 24 nazorno prikazuje prednosti, ki jih v primerjavi s terminalnimi multiplekserji prinašajo OADM-i. Slika 25 podaja primer verižne topologije, ki pa se lahko razširi tudi v obroč.

Slika 25: Terminalni optični multiplekser in OADM



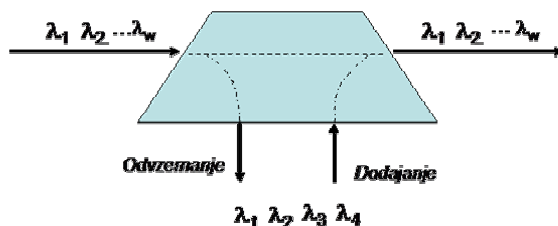
V obeh primerih na sliki 24 imamo enake prometne potrebe. Med vozliščem 1 in vozliščem 3 so potrebne tri valovne dolžine, ki so označene kot λ_1 do λ_3 . Med vozliščem 1 in vozliščem 2 ter vozliščem 2 in vozliščem 3 pa je potrebna ena valovna dolžina λ_4 .

V zgornjem primeru je zmogljivo optično omrežje realizirano s štirimi optičnimi linijskimi terminali. V vozlišču 1 in 3 sta po en terminal, v vozlišču 2 pa sta dva. Valovne dolžine λ_1 do λ_3 je potrebno v vozlišču 2 fizično prevezati iz transponderjev v OE2 na transponderje v OE3. Na ta način se te tri valovne dolžine prenese iz OE1 do OE4. Za prometno potrebo med vozliščem 1 in vozliščem 2 se v omenjenih vozliščih valovna dolžina λ_4 multipleksira/demultipleksira v niz valovnih dolžin oziroma iz niza valovnih dolžin ter vodi do zunanje naprave. Enako velja tudi za prometno potrebo med vozliščem 2 in 3.

Primer na sliki 24 prikazuje rešitev z uporabo OADM-a. Število omrežnih elementov se v podani topologiji zmanjša za eno, prav tako pa se poenostavi prehod valovnih dolžin λ_1 do λ_3 skozi vozlišče 2. Omrežni element v vozlišču 2 iz niza štirih valovnih dolžin odvzame oziroma doda le eno, medtem ko ostale tri valovne dolžine le potujejo skozi ta omrežni element.

Blok diagram tipičnega OADM-a prikazuje slika 26.

Slika 26: OADM



OADM na sliki 25 je štirikanalni. To pomeni, da je sposoben iz niza valovnih dolžin od λ_1 do λ_w odvzeti oziroma dodati štiri valovne dolžine od λ_1 do λ_4 .

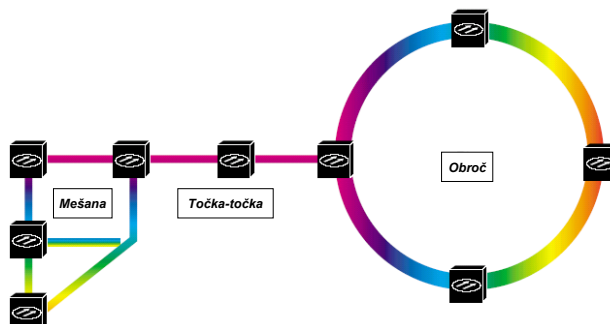
3.2.3 Topologije WDM omrežij

Topologije zmogljivih optičnih omrežij, ki podpirajo WDM tehnologijo, so odvisne od več faktorjev. Ti so vsaj tip aplikacij in protokolov, ki se prenašajo, dolžine med posameznimi omrežnimi elementi ter fizična topologija obstoječega optičnega omrežja. Fizično topologijo optičnega omrežja predstavljajo optična vlakna, ki so na določenem teritoriju že nameščena. V mestnih omrežjih se uporabljajo točka-točka, obroč in mešane topologije. Točka-točka topologija je primerna za priključevanje končnih uporabnikov, medtem ko je obroč topologija primerna za medsebojno povezovanje lokacij v istem mestu ali med mesti. V primeru, ko se obroči priključujejo na sisteme za prenos na dolge razdalje, pridemo do mešane topologije zmogljivih optičnih omrežij (Gumaste, 2003, str. 143).

Pri načrtovanju zmogljivega optičnega omrežja je potrebno izbrati najustreznejšo topologijo omrežja. Nobena topologija ni najboljša topologija, temveč se lahko le bolje ali slabše približa želenim rezultatom. Topologija zmogljivega optičnega omrežja mora biti sposobna nuditi rešitve za različne scenarije telekomunikacijskega prometa oziroma

prometnih potreb. Slika 27 prikazuje točka-točka, obroč in mešano topologijo zmogljivih optičnih omrežij, ki podpirajo WDM tehnologijo v istem omrežju.

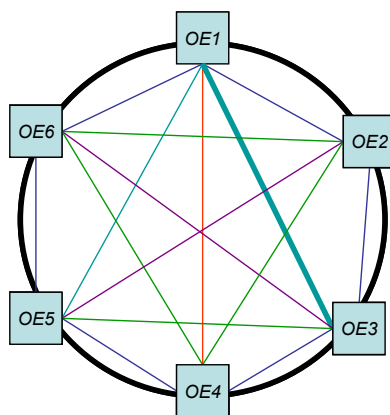
Slika 27: Topologije zmogljivih optičnih omrežij z WDM tehnologijo



Vir: Introduction to DWDM Technology, 2000, str. 58

Pri obravnavi topologij zmogljivih optičnih omrežij, ki podpirajo WDM tehnologijo je potrebno ločiti med fizično in logično topologijo omrežja. Fizična topologija omrežja je določena z omrežjem, ki ga tvorijo nameščena optična vlakna. Slika 28 omogoča obravnavo fizične in logične topologije omrežja.

Slika 28: Fizična in logična topologija omrežja



S polno črto na robu omrežja je označena fizična topologija omrežja. Predstavljajo jo optična vlakna, ki medsebojno povezujejo šest omrežnih elementov. Šest omrežnih elementov povezuje šest parov optičnih vlaken. V samem obroču so označene povezave, ki povezujejo vsak omrežni element z vsakim. Če si predstavljamo te povezave kot fizične, vidimo, da bi v tem primeru potrebovali veliko večje število optičnih vlaken. Realizacija takšnega omrežja bi bila zelo draga. Rešitev obstaja z uvedbo tako imenovane logične topologije omrežja.

Predstavljajmo si prometno zahtevo med omrežnima elementoma OE1 in OE 3. Ker med tema dvema omrežnima elementoma ni fizične povezave, vpeljemo pojem logične povezave. Povezavo med OE1 in OE3 realiziramo skozi OE2 tako, da le ta predstavlja omrežni element, skozi katerega gre optični signal brez zaključevanja. To lahko storimo z izbiro valovne dolžine, ki mora biti neuporabljena med omrežnimi elementi OE1 in OE2 ter med OE1 in OE3. Uporabljena valovna dolžina med OE1 in OE3 je na sliki 24

označena z odebeljeno turkizno črto. Po enakih pravilih se lahko v zmogljivem optičnem omrežju, ki podpira WDM tehnologijo, vzpostavi še več logičnih povezav. Te povezave tvorijo logično topologijo omrežja (Gumaste, 2003, str. 146).

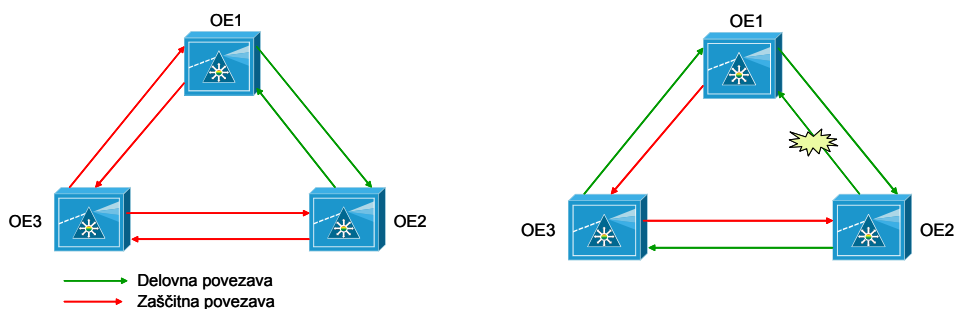
Pri določevanju valovnih dolžin v logični topologiji zmogljivega optičnega omrežja je potrebno upoštevati tudi problem zaščite telekomunikacijskega prometa. Za zaščito telekomunikacijskega prometa mora biti v zmogljivem optičnem omrežju na razpolago dvakratna pasovna širina v primerjavi z nezaščitenimi prometnimi povezavami. V primeru potrebe po zaščiti logične povezave med OE1 in OE3 na sliki 24 je potrebno enako valovno dolžino rezervirati tudi za povezave, ki bodo šle skozi omrežne elemente OE6, OE5 in OE4. Ta valovna dolžina ne sme biti uporabljena na nobenem drugem odseku.

3.2.4 Zaščitne sheme v zmogljivih optičnih omrežjih, ki podpirajo WDM tehnologijo

Zaščitne sheme v zmogljivih optičnih omrežjih, ki podpirajo WDM tehnologijo, imenujemo tudi zaščitne sheme na optičnem nivoju. Zaščitne sheme na optičnem nivoju so v primerjavi z SDH zaščitnimi shemami bolj okorne, saj delujejo na fizičnem nivoju.

Zelo pomembno je, da je zaščitna shema v telekomunikacijskem omrežju izbrana na osnovi zahtev, ki jih postavljajo protokoli, ki se prenašajo. Tako so nekateri protokoli popolnoma neobčutljivi, nekateri protokoli so občutljivi na zakasnitve, nekateri pa na različne dolžine prenosne poti. Neobčutljiv je prenos PDH in SDH signalov, medtem ko je na zakasnitve občutljiv protokol FC (angl. Fibre Channel). Določeni protokoli, kot na primer ETR/CLO (angl. External Timer Reference/Control Link Oscillator; slov. zunanja časovna referenca/kontrolni oscilator povezave), so občutljivi na različne dolžine optičnih vlaken. Razlika med unidirekciionalno in bidirekciionalno zaščitno shemo je opisana v nadaljevanju. Unidirekciionalna zaščitna shema deluje na način, kot ga prikazuje slika 29.

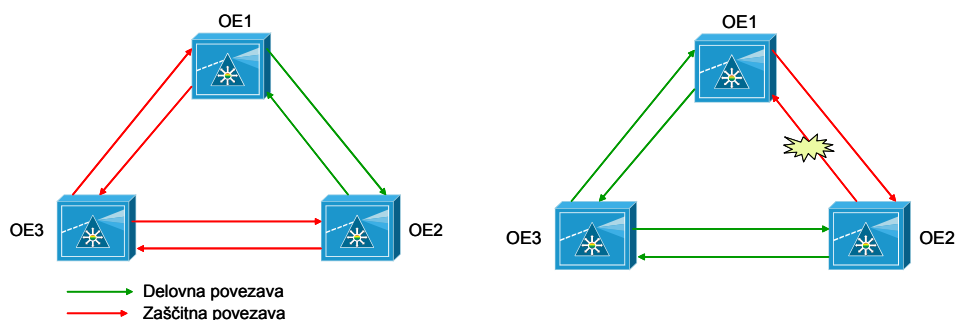
Slika 29: Enosmerna (unidirekciionalna) zaščitna shema pred prekinitvijo in po njej



- Omrežni element OE 2 pošilja signal do omrežnega elementa OE 1 po delovni in zaščitni povezavi,
- omrežni element OE 1 prejme oba signala (po delovni in zaščitni povezavi) in izbere tistega, ki je sprejet po delovni, krajši povezavi,
- omrežni element OE 1 opazi izgubo signala na delovni povezavi, zato preklopi svoj sprejem na zaščitno povezavo,
- omrežni element OE1 ne preklopi svoje oddaje tako, da le-ta deluje po krajši, delovni povezavi.

Iz opisanega protokola sledi, da sta po preklopu oddajna in sprejemna smer med omrežnima elementoma OE1 in OE2 različni. Omenjeno dejstvo pri prenosu protokolov, ki so občutljivi na različne dolžine oddajnega in sprejemnega optičnega vlakna, povzroča težave. Omenimo še enkrat, da je tipičen predstavnik takšnih protokolov ETR/CLO. Dvosmerno (bidirekcionalno) zaščitno shemo pa prikazuje slika 30.

Slika 30: Bidirekcionalna zaščitna shema pred prekinitvijo in po njej



- Omrežni element OE 2 pošilja signal do omrežnega elementa OE 1 po delovni in zaščitni povezavi,
- omrežni element OE 1 prejme oba signala (po delovni in zaščitno povezavi) in izbere tistega, ki je sprejet po delovni, krajši povezavi,
- omrežni element OE 1 opazi izgubo signala na delovni povezavi, zato preklopi svoj sprejem na zaščitno povezavo,
- omrežni element OE1 preklopi tudi svojo oddajo, ki gre nato po daljši, zaščitni povezavi.

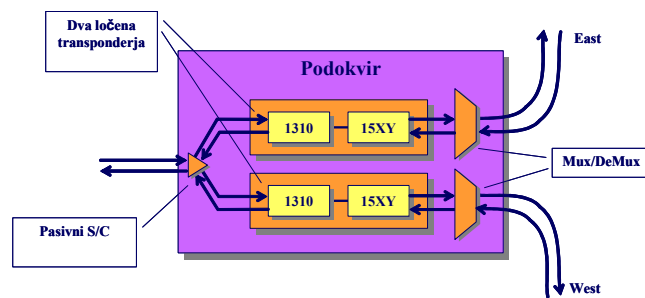
Na koncu preklompnega postopka sta dolžini oddajnega in sprejemnega optičnega vlakna med omrežnima elementoma OE1 in OE2 zopet enaki. Omenjena postopek je tako primeren tudi za prenos protokolov, ki so občutljivi na različne dolžine oddajne in sprejemne poti.

Zaščitne sheme na optičnem nivoju delimo v tri skupine:

- zaščitna shema z Y kablom,
- zaščitna shema s podvojenimi transponderji,
- zaščitna shema z optičnimi razcepniki/spojniki.

Zaščitno shemo z Y kablom prikazuje slika 31.

Slika 31: Zaščitna shema z Y kablom



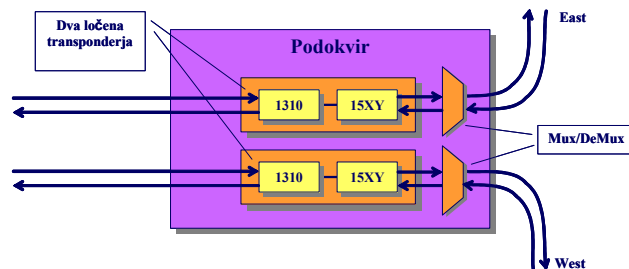
V oddajni smeri se optični signal priključi na optično pasivno komponento, ki se imenuje Y kabel. Y kabel optični signal razdeli na dva signala. Optična signala se nato priključi vsakega na svoj transponder. V sprejemni smeri je postopek ravno obraten. Na optično pasivni komponenti Y kabel, se dva optična signala združita in vodita proti strankini napravi. V primeru uporabe te zaščitne sheme ščitimo:

- transponderje, ker so le ti podvojeni,
- prenosno pot, ker se istočasno prenašata dva optična signala.

V primeru zaščitne sheme zaščita transponderjev potrebuje stranka le en vmesnik, na primer GbE, FC...

Zaščitno shemo s podvojenima transponderjema prikazuje slika 32.

Slika 32: Zaščitna shema s podvojenima transponderjema



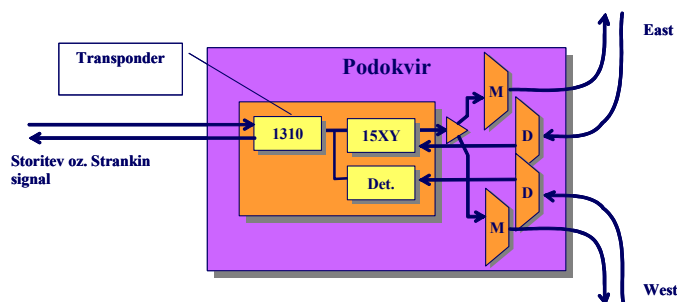
V primeru zaščitne sheme s podvojenima transponderjema se ne uporablja pasivne optične komponente. Zato mora imeti strankina naprava dva vmesnika, na primer 2×GbE, 2×FC... V primeru uporabe te zaščitne sheme ščitimo:

- transponderje, ker so podvojeni,
- prenosno pot, ker se isti signal prenaša po dveh poteh,

Strankina naprava skrbi za zaščitni mehanizem na svojem nivoju, saj vsebuje dva vmesnika (lahko delujeta oba ves čas, lahko je en aktiven, drugi v čakanju itd).

Zaščitno shemo z optičnim razcepnikom/združevalnikom prikazuje slika 33.

Slika 33: Zaščitna shema z optičnim razcepnikom/združevalnikom



V sistemu prenosa uporabljamo samo en transponder, na njegovem izhodu pa pasivno optično komponento – optični razcepnik. Ta razcepi obarvani oddajni signal iz transponderja. Vsakega od signalov se priključi na svoj optični multiplekser. Tako se isti signal prenaša po dveh različnih poteh. V sprejemni smeri se opravi odločitev, kateri sprejeti signal je boljši. Boljši se nato vodi do strankine naprave, ki ima v tem primeru samo en vmesnik. V primeru uporabe te zaščitne sheme ščitimo:

- prenosno pot, ker se isti signal prenaša po dveh različnih poteh.

Obstaja tudi zaščitna shema, ki vsebuje dva transponderja in dva optična združevalnika. V tem primeru je poleg optičnih vlaken ščiten tudi transponder.

3.3 SDH nove generacije

Obe tehnologiji, TDM in WDM, omogočata razširitev zmogljivosti optičnih omrežij, vendar vsaka na svoj način. Kljub omenjenemu dejstvu sta obe tehnologiji medsebojno komplementarni in se v zmogljivejših optičnih omrežjih uporabljata istočasno. Posamezno valovno dolžino lahko predstavlja katerikoli signal, ki je formiran na osnovi TDM tehnologije. S predhodnim časovnim multipleksiranjem pritočnih signalov se precej izboljša izkoriščenost posamezne valovne dolžine, ki pa še vedno ni optimalna in je še vedno relativno nizka. Kljub vsemu je potrebno standardni SDH hierarhiji in WDM tehnologiji pripisati določene pozitivne lastnosti, ki so bile vodila za nadaljnji razvoj SDH tehnologije:

- transport signalov visokih bitnih hitrosti,
- zanesljivost,
- kakovost storitev QoS,
- mehanizmi za kontrolo zakasnitev,
- mehanizmi za sinhronizacijo ter tolerance za tresenje in pomikanje faze,
- robustnost,
- zaščitni, obnovitveni ter usmerjevalni mehanizmi,
- načrtovanje in upravljanje telekomunikacijskega prometa,
- zelo natančne definicije fizičnih vmesnikov,
- osnova za optično in fotonsko tehnologijo.

Z naraščanjem potreb po prenosu podatkov visokih bitnih hitrosti so se pojavile določene pomanjkljivosti standardne SDH hierarhije. Glavne pomanjkljivosti so:

- ne podpira razdrobljene pasovne širine, kar je potrebno pri določenih aplikacijah,
- ne uravnava izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine,
- ne podpira učinkovito veliko podatkovnih protokolov,
- podpira omejeno število topologij omrežij,
- za cenene podatkovne aplikacije je SDH hierarhija draga.

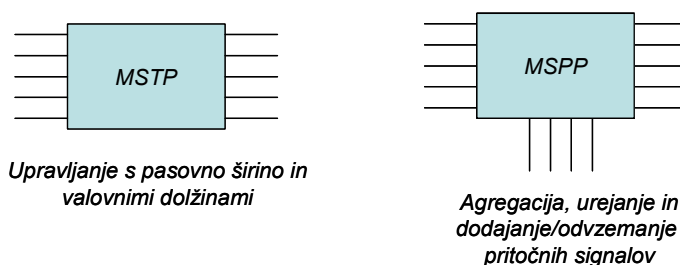
Optimalno izkoriščenost razpoložljive pasovne širine omogočajo virtualno lepljenje VCAT (Virtual Concatenation), protokol LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme) in procedura GFP (Generic Framing Procedure). Vse tri funkcionalnosti podpirajo SDH naprave nove generacije.

Omenjene funkcionalnosti omogočajo SDH naprave nove generacije. SDH nove generacije podpirajo dve različni platformi:

- MSPP (Multiservice Provision Platform) in
- MSTP (Multiservice Transport Platform).

MSSP platforma omogoča agregacijo, urejanje in preklopne funkcionalnosti, medtem ko omogoča MSSP platforma upravljanje s pasovno širino in valovnimi dolžinami. Na trgu so razpoložljive tudi telekomunikacijske naprave, ki podpirajo v isti platformi MSPP in MSTP. Razliko med obema platformama nazorno prikazuje slika 34.

Slika 34: Razlika med MSTP in MSPP platformo



3.3.1 Virtualno lepljenje koristne vsebine SDH okvirjev

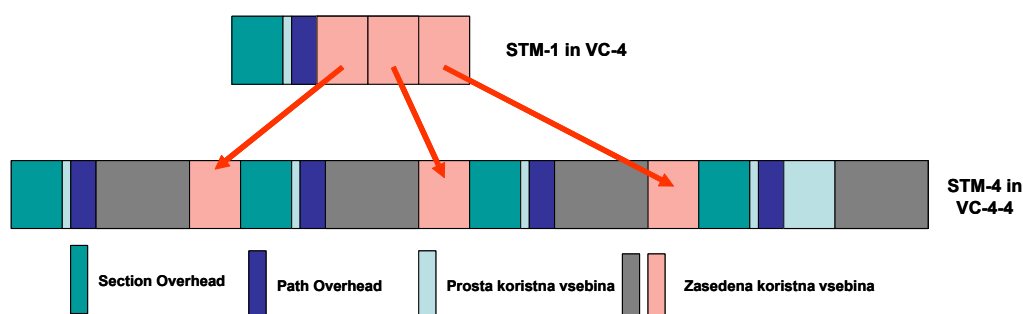
Pri obravnavni zaporednega lepljenja koristne vsebine SDH okvirjev smo ugotovili, da s tem postopkom rešimo težavo s prenosom podatkov visokih bitnih hitrosti preko SDH omrežja. Z zaporednim lepljenjem koristne vsebine se namreč poveča koristna vsebina SDH okvirja.

Čeprav zaporedno lepljenje rešuje zgoraj omenjeni problem, se je potrebno vprašati, kakšna je v tem primeru izkoriščenost razpoložljive pasovne širine. Izkoriščenost razpoložljive pasovne širine je v povezavi z dolžinami paketov in bitno hitrostjo podatkov, ki se prenašajo. Kot primer, pri preslikanju 10 Mbit/s Ethernet v virtualni vmesnik VC-3 je izkoriščenost razpoložljive pasovne širine približno 20%. V primeru preslikanja 100 Mbit/s Ethernet v VC-4 je 67% in preslikanju 1 Gbit/s Ethernet v zlepljeno koristno vsebino VC-4-16c 42%. Podani podatki veljajo za največje bitne hitrosti za 10 M bit/s, 100 Mbit/s in 1Gbit/s Ethernet. V primeru, da je izkoriščenost

posameznih signalov nižja, so tudi izgube v koristni vsebini SDH okvirjev večje (Kartalopoulos, 2004, str. 103).

VCAT omogoča kreiranje razpoložljive pasovne širine glede na dejansko količino podatkov, ki se prenašajo. VCAT najprej razbije podatkovne pakete in jih nato preslika v osnovne enote TDM okvirjev. V primeru SDH omrežij je osnovna enota TDM okvirjev VC-4 (150.336 Mbit/s) ali VC-3 (34 Mbit/s). Virtualno lepljenje koristne vsebine omogoča pošiljanje in sprejemanje določenega števila osnovnih enot, ki si ne sledijo kot skupen podatkovni pretok. Tako grupirane virtualne hranilnike imenujemo virtualno zlepljene grupe VCG (Virtual Concatenation Group) (Kartalopoulos, 2004, str 105). Slika 35 prikazuje, kako se koristna vsebina v VC-4 pretvori v VCAT koristno vsebino s preslikavo v tri VC-3, ki niso zaporedni.

Slika 35: VCAT preslikava v virtualno zlepljeni hranilnik VC-3-3v



Vir: Leveraging Transport for Data Services with VCAT and LCAS, 2003, str. 7.

Izkoriščenost razpoložljive pasovne širine je pri uporabi VCAT veliko boljša. Izkoriščenost razpoložljive pasovne širine pri prenosu Ethernet in SAN (Storage Area Networks) z VCAT podaja tabela 6.

Tabela 6: Izkoriščenost pasovne širine z uporabo VCAT

Protokol	Bitna hitrost protokola [Mbit/s]	Potrebna velikost virtualnih hranilnikov	Izkoriščenost pasovne širine [%]
ESCON	200	VC-3-4v	100
FICON IG	1000	VC-4-7v	95
Fibre Channel	1000	VC-4-7v	95
Fast Ethernet	100	VC-3-2v	100
Gigabit Ethernet	1000	VC-4-7v	95

Vir: Leveraging Transport for Data Services with VCAT and LCAS, 2003, str. 7.

Notacija oznak virtualno zlepljenih koristnih vsebin je:

VC-n-m, kjer pomeni

n...velikost VC fragmenta, ki ni zaporeden in bo uporabljen za prenos določene VCG (Virtual Concatenation Group) in
m...končno število n fragmentov, ki bodo tvorili VCG.

3.3.2 Protokol LCAS

Vsak operater telekomunikacij nudi storitve različnim strankam. Določene stranke so zelo statične in nimajo potreb po spreminjanju pasovne širine. Druge stranke so veliko bolj dinamične in imajo dokaj pogosto zahteve po različnih pasovnih širinah. V večini primerov seveda zahteve naraščajo, zgodi pa se tudi, da zahteve nekoliko padejo. Vsako spreminjanje pasovne širine zahteva določene človeške vire, kakor tudi čas za izvedbo nove konfiguracije. Pri vsakem novem konfiguriranju obstaja tudi možnost določene napake in s tem prekinitve ali vsaj poslabšanja izvedbenih lastnosti telekomunikacijskega prometa. Zavedati se je potrebno, da bodo stranke vedno bolj zahtevne oziroma bodo zahtevale podpis pogodbe, v kateri bodo definirani visoki standardi glede dinamičnosti in razpoložljivosti omrežja.

Pri povečevanju zahtevane pasovne širine je optimalno, če ima operater telekomunikacij na razpolago dovolj pasovne širine. V tem primeru lahko nove prometne potrebe enostavno doda k že obstoječim. V primeru, da pasovne širine ni dovolj, obstaja možnost, da operater telekomunikacij stranki pove, da novih prometnih potreb ne more realizirati ali pa da obstoječi promet odstrani in realizira novega. S stališča doseganja konkurenčne prednosti nobena od opisanih variant ni primerna. Zato je bil razvit protokol LCAS, ki omogoča spreminjanje pasovne širine na enostavnejši in varnejši način. LCAS omogoča kontrolni mehanizem za povečevanje in zmanjševanje kapacitete v VCG povezavi glede na strankine potrebe po pasovni širini. Protokol LCAS omogoča tudi začasno odstranjevanje članov prometne povezave, ki se razpoznajo kot napačni.

LCAS vnaša v SDH omrežja dve osnovni lastnosti - dinamično povečevanje in zmanjševanje prenosne kapacitete v VCG povezavi glede na strankine potrebe po pasovni širini, ki lahko s časom zelo varirajo, ter začasno odstranjevanje članov povezave, ki se razpoznajo kot napačni (Helvoort, 2005, str. 35).

3.3.3 Učinkovitost lepljenja koristne vsebine SDH okvirjev

Standardna SDH hierarhija podpira pasovne širine 2 Mbit/s, 34 Mbit/s in 155 Mbit/s. Virtualni hranilniki SDH hierarhije imajo fiksno kapaciteto. Vsebine, ki so manjše od največjih kapacitet virtualnih hranilnikov, zmanjšujejo izkoriščenost razpoložljive pasovne širine. Zato je bila razvita in uvedena metoda virtualnega lepljenja koristne vsebine, ki se uporablja v SDH omrežjih nove generacije.

Če povzamemo metode lepljenja koristne vsebine SDH okvirjev, lahko napišemo:

- osnovni gradniki SDH omrežij nove generacije so hranilniki,
- zaporedno lepljenje koristne vsebine je metoda, ki uporablja zaporedne hranilnike v istem STM okvirju, s čimer se proizvede večji hranilnik,
- virtualno lepljenje koristne vsebine je metoda, ki uporablja več hranilnikov v različnih STM okvirjih, s čimer se proizvede večji hranilnik, ki je precej blizu dejansko potrebnih pasovni širini.

Primerjavo med zaporednim in virtualnim lepljenjem koristne vsebine podaja tabela 7.

Tabela 7: Primerjava med zaporednim in virtualnim lepljenjem koristne vsebine

Zaporedno lepljenje koristne vsebine	Virtualno lepljenje koristne vsebine
Omejena razdrobljenost velikosti virtualnih hranilnikov.	Bolj fleksibilna razdrobljenost virtualnih hranilnikov nižjega in višjega reda.
Zaporedno zlepljeni hranilniki se prenašajo po isti poti.	Hranilniki se lahko prenašajo po različnih poteh.
Vsi omrežni elementi na prenosni poti morajo podpirati zaporedno lepljenje.	Samo omrežni elementi na koncu prenosne poti morajo podpirati virtualno lepljenje.
Ni različnih zakasnitev pri prenosu paketov.	Obstaja možnost različnih zakasnitev pri prenosu paketov.
Ni označevanja oziroma oštevilčenja posameznih okvirjev.	Označevanje oziroma oštevilčenje posameznih okvirjev je potrebno.

Vir: Kartalopoulos, 2004, str. 108.

Preko zmogljivega optičnega omrežja se prenašajo različni signali tako po protokolu kakor tudi po bitni hitrosti oziroma pasovni širini. Najvišje pasovne širine nekaterih protokolov se dokaj dobro skladajo s pasovnimi širinami zaporedno lepljene koristne vsebine, nekatere pa precej odstopajo. V prvem primeru imamo relativno dobro izkoriščenost pasovne širine, v drugem primeru pa visoke izgube. Boljši rezultati se dosežejo z virtualnim lepljenjem. Primerjavo izkoriščenosti pasovne širine pri zaporednem in virtualnem lepljenju pri različnih pritočnih signalih podaja tabela 8.

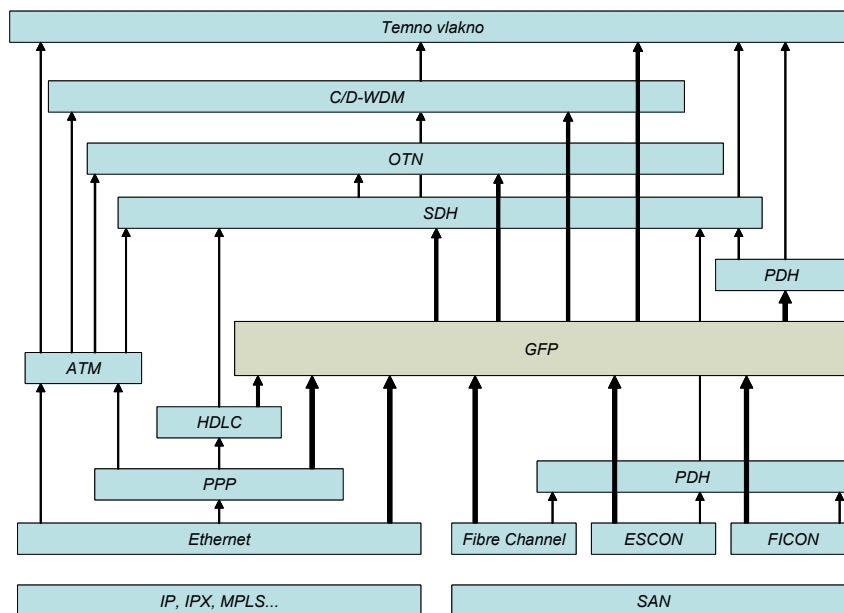
Tabela 8: Primerjava zaporednega in virtualnega lepljenja s stališča izkoriščenosti pasovne širine

Protokol	Bitna hitrost protokola [Mbit/s]	Potrebna velikost virtualnih hranilnikov	Izkoriščenost pasovne širine [%]	Potrebna velikost virtualnih hranilnikov	Izkoriščenost pasovne širine [%]
		Zaporedno lepljenje koristne vsebine		Virtualno lepljenje koristne vsebine	
ESCON	200	VC-4-4c	33	VC-3-4v	100
FICON 1G	1000	VC-4-16c	42	VC-4-7v	95
Fibre Channel	1000	VC-4-16c	42	VC-4-7v	95
Fast Ethernet	100	VC-4	67	VC-3-2v	100
Gigabit Ethernet	1000	VC-4-16c	42	VC-4-7v	95

3.3.4 Postopek »GFP« – Generic Framing Procedure

GFP je relativno nov ITU-T standard G.704, ki definira ogrodje za fleksibilno vstavljanje podatkov v širokopasovne prenosne aplikacije. GFP podpira kontrolne funkcije za pritočne signale, tako da si lahko le ti delijo skupni kanal. Omogoča učinkovit mehanizem za preslikanje širokega spektra pritočnih signalov, kot so FC, ESCON (angl. Enterprise System Connection), FICON (angl. Fiber Connection) in GbE (angl. Gigabit Ethernet) v več zlepljenih virtualnih hranilnikov VC-4. Pozicijo protokola GFP v multipleksni strukturi prikazuje slika 36.

Slika 36: Pozicija protokola GFP v multipleksni strukturi



Vir: Helvoort, 2005, str. 100.

Iz slike 35 se da razbrati, da omogoča protokol GFP najenostavnejše multipleksne poti za paketno orientirane aplikacije, kakor tudi za aplikacije, ki zahtevajo učinkovito uporabo pasovne širine ter majhne zakasnitve. V tem primeru govorimo o vstavljanju in transportu celih okvirjev, v drugem primeru pa o preslikanju in transportu podatkovnih karakterjev. V prvem primeru se uporablja protokol GFP-F (angl. F=Frame), v drugem pa GFP-T (angl. T=Transparent). Pri paketno orientiranih aplikacijah imamo v mislih protokole, kot so na primer IP/PPP (angl. Internet Protocol/Point to Point Protocol; slov. internet protokol/točka točka protokol) in MAC (angl. Medium Access Control) okvir, pri podatkovnih karakterjih pa na primer Fibre Channel, ESCON in FICON (Helvoort, 2005, str. 101). Razlike med protokoloma GFP-F in GFP-T podaja tabela 9.

Kot primer s slike 35 navedimo prenos GbE preko SDH. V primeru, da telekomunikacijska naprava podpira GFP, so GbE okvirji v SDH hranilnike vstavljeni preko GFP neposredno. V nasprotnem primeru je potrebna pot preko protokolov PPP in HDLC.

Tabela 9: Razlike med protokoloma GFP-F in GFP-T

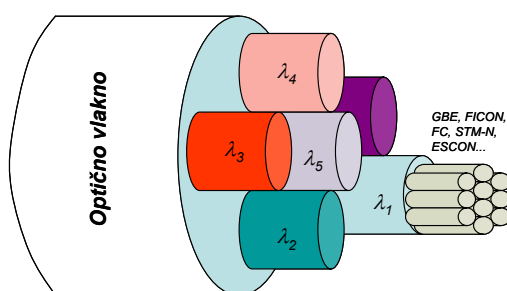
Protokol GFP-F	Protokol GFP-T
Različne dolžine okvirjev.	Stalne dolžine okvirjev.
1 po 1 princip preslikanje paketov.	N proti 1 princip preslikanje paketov.
Operacije nad celotnim okvirjem.	Operacije nad vsakim sprejetim bajtom.
Zahteva vmesne pomnilnike.	Ne zahteva vmesnih pomnilnikov.
Vnaša zakasnitve.	Ne vnaša zakasnitev.
Za prenos paketov zahteva MAC.	Za prenos ne zahteva MAC.
Odvrne prazne okvirje.	Ohrani prazne okvirje.

Vir: Kartalopoulos, 2004, str. 96

Bistvena razlika med standardno SDH hierarhijo in SDH hierarhijo nove generacije je fleksibilno vstavljanje različnih protokolov v splošne GFP okvirje, ki se nato preslikajo v hranilnike SDH signalov. Na osnovi omenjenega omogoča GFP integrirano prenosno platformo, ki podpira PDH, SDH, paketno orientirane protokole in podatkovne karakterje, s čimer se zniža strošek omrežja, zagotavlja kakovost storitev in na osnovi vsega pogodbe o nivoju storitve med ponudniki in uporabniki telekomunikacijskih storitev (Kartalopoulos, 2004, str. 83).

V primeru, da podpira zmogljivo optično omrežje tudi WDM tehnologijo, omogoča GFP preko SDH nove generacije zelo dobro izkoriščenost razpoložljive pasovne širine. Primer podaja slika 37.

Slika 37: GFP preko SDH nove generacije z uporabo WDM



Vir: Kartalopoulos, 2004, str. 84

S podporo WDM tehnologije lahko preko skupnega optičnega vlakna prenašamo večje število valovnih dolžin. Preko posamezne valovne dolžine se lahko prenaša transparentno katerikoli protokol, katerekoli bitne hitrosti. Drugi način prenosa je, da se v vsaki valovni dolžini prenaša GFP preko SDH nove generacije. V tem primeru je pasovna širina vsake valovne dolžine veliko bolje izkoriščena.

GFP definira različne dolžine okvirjev in glede na tip pritočnega signala tudi različne tipe okvirjev. GFP omogoča časovno na osnovi principa byte po byte multipleksiranje različnih okvirjev. Na ta način se poveča učinkovitost prenosa. V primeru, da na pritočni strani ni signala, se v linijski signal vstavi tako imenovani prazni signal. Velikost koristne vsebine definira GFP s svojimi lastnimi kontrolnimi polji. Multipleksiranje koristne vsebine istega tipa, na primer GbE, se lahko opravlja na dva načina. Prvi način je TDM princip, drugi način pa uporablja princip čakalnih vrst. Prvi princip se uporablja takrat, ko so pritočni signali oziroma okvirji skoraj sinhroni in po možnosti enako dolgi. Drugi princip je primeren tedaj, ko so pritočni signali oziroma okvirji asinhroni in se spreminjajo po svoji dolžini. V tem primeru je potrebno s strani zunanje naprave sprejete okvirje najprej spraviti v vmesne pomnilnike, da se popravi njihova sinhronizacija in šele nato multipleksira. Omenjeni postopek je težaven in podprt z zahtevnim algoritmom.

Za strukture GFP okvirja velja, da je fleksibilna oziroma s stališča koristne vsebine spremenljiva. Kot večina vseh okvirjev je tudi GFP okvir sestavljen iz glave in področja, ki je namenjeno za koristno vsebino. Glava GFP okvirja omogoča podatkovno povezavo za upravljanje samega okvirja. Glava podaja opis dolžine koristne vsebine ter omogoča kontrolo napak med vstavljanjem pritočnih okvirjev v GFP okvir. Področje, ki je namenjeno za koristno vsebino, omogoča povezavo med končnima uporabnikoma in kontrolo napak pri prenosu.

Podrobnejši opis GFP okvirja presega obseg tega dela. Podrobnejše informacije o sestavi GFP okvirja je možno najti v Helvoort, 2005, str. 103.

3.3.5 Funkcionalnosti drugega nivoja ISO/OSI referenčnega modela v SDH omrežjih nove generacije

Do tega poglavja je bil obravnavan po ISO/OSI referenčnem modelu prenos na prvem oziroma fizičnem nivoju. SDH naprave nove generacije pa vsebujejo tudi komponente, ki podpirajo tudi drugi nivo ISO/OSI referenčnega modela.

Zavedati se je potrebno, da postaja Ethernet protokol eden najbolj razširjenih in uporabljenih protokolov. Ethernet se ne uporablja več samo v lokalnih omrežjih za komunikacijo med računalniki, temveč se uporablja tudi za povezovanje lokalnih omrežij na zelo oddaljenih lokacijah, kakor tudi za prenos ostalih podatkov preko Etherneta.

V tej točki bo obravnavan prenos Ethernet protokola preko optičnih sistemov prenosa. Ethernet kartice se v sodobnih sistemih prenosa delijo v dve skupini:

- Ethernet kartice, ki omogočajo vstavljanje Ethernet paketov v SDH format. To so tako imenovane mapirne Ethernet kartice,
- Ethernet kartice, ki podpirajo funkcionalnosti drugega nivoja po OSI modelu.

Omeniti je potrebno tudi možnost transparentnega prenosa Ethernet signala preko transponderjev v čistih DWDM napravah. Katero metodo prenosa uporabiti je relativno težka odločitev, saj je potrebno pred odločitvijo dobro premisliti, katere funkcionalnosti Ethernet kartic so dejansko potrebne. Vprašanja, ki si jih pri tem lahko zastavimo, so naslednja:

- Koliko podatkovnega prometa pričakujemo?
- Kakšno strukturo oziroma kako zahtevne stranke pričakujemo?
- Ali smo pripravljeni biti ponudnik z najsodobnejšimi storitvami?
- Kakšna je TK, LAN in WAN infrastruktura potencialnih strank?
- Kako globoko se je potrebno posvetiti vprašanju izgub pasovne širine?
- Koliko smo pripravljeni investirati v sodobno telekomunikacijsko opremo?

V nadaljevanju so podani opisi posameznih tipov Ethernet kartic. Iz opisov bo nato mogoče izluščiti lastnosti naprav, ki so ali pa niso zanimive za določeno aplikacijo.

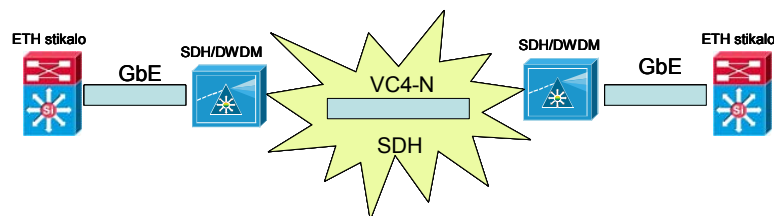
Mapirne Ethernet kartice

Mapirne Ethernet kartice omogočajo prenos Ethernet protokola preko SDH hrbteničnega omrežja. Ethernet signal se vstavlja v SDH format, ki se nato prenaša skozi omrežje. Ne glede na dejstvo, da so mapirne Ethernet kartice najenostavnejše, omogoča njihova uporaba niz prednosti pred transparentnim prenosom.

Najprej omenimo izkoriščenost pasovne širine. Za razliko od transparentnih kartic pričakujemo od mapirnih Ethernet kartic v sodobnih vozliščih lastnost, ki jo imenujemo drobljenje pasovne širine. Drobljenje pasovne širine lahko temelji na zveznih nastavitvah, po korakih (npr. 100) Mbit/s ali na osnovi VC-4 hranilnikov. Drobljenje pasovne širine na osnovi VC-4 hranilnikov se izvede na primer na naslednje načine: VC4, VC4-2c, VC4-3c,

VC4-4c, VC4-8c in VC4-16c. V primeru dejanskega prometa pasovne širine 100 Mbit/s uporabimo samo en VC4 hranilnik, v primeru prometa pasovne širine 1 Gbit/s pa potrebujemo za ta signal VC4-8c hranilnik. Za vmesne bitne hitrosti izberemo ustrezno zlepljeno koristno vsebino, ki je najboljši približek zahtevani. Drobljenje pasovne širine upravičuje uporabo Ethernet kartic z več vmesniki. Tako ni sporna kartica z na primer štirimi Ethernet vmesniki, ker se nanjo lahko priključi štiri Ethernet signale z omejeno pasovno širino, ki se jih nato multipleksira v en STM-16 signal. V primeru štirih popolnoma izkoriščenih GbE signalov pa se na tej kartici lahko uporabita le dva vmesnika. Od sodobnih telekomunikacijskih naprav za prenos podatkovnih formatov se pričakuje, da je konfiguriranje in vzdrževanje zvez zelo podobno oziroma praktično enako, kot pri konfiguriranju in vzdrževanju SDH prometa. Slika 38 prikazuje uporabo mapirne GbE kartice.

Slika 38: Uporaba mapirne GbE kartice



Mapirna GbE kartica prenaša kateri koli L3 protokol, ki se lahko enkapsulira in prenaša preko GbE signala. Najznačilnejša L3 protokola sta IP in IPX. GbE signal se priključi na vhodni vmesnik SDH/DWDM naprave. Mapirna kartica transparentno preslika Ethernet pakete v koristno vsebino (payload) SDH signala. Ko doseže koristna vsebina SDH signala ciljno destinacijo, je postopek obraten. GbE signal se pošlje od vmesnika mapirne kartice proti GbE stikalu.

Mapirne kartice omogočajo tudi nekoliko naprednejše funkcionalnosti. Ena od njih je, da GbE kartica odvrže Ethernet pakete z določeno napako in jih ne prenaša ter s tem ne obremenjuje koristne vsebine SDH okvirja. Dva kriterija za odstranitve napačnih paketov sta:

- pokvarjeni paketi, razpoznani na osnovi CRC (angl. Cyclic Redundancy Checking; slov. parnostna kontrola),
- premajhni paketi, ki ne dosežejo minimalne dolžine Ethernet standarda 64 bajtov.

Veljavni paketi se pri tem tipu kartic prenašajo nespremenjeni. Informacije v glavih so med vstavljanjem in transportom nedotaknjene.

Za dobro delovanje oziroma kakovosten prenos Ethernet okvirjev podpirajo mapirne kartice standard IEEE 802.3 s kontrolo podatkovnega pretoka in vmesne pomnilnike (bufferiranje) za okvirje. Obe funkcionalnosti služita za zmanjšanje prometnih zamaškov. Vsak sprejemni in oddajni kanal vsebuje za odpravo prometne preobremenitve tudi vmesni pomnilnik ustrezne velikosti, tipično 512 kB. Ko se kapaciteta vmesnega pomnilnika bliža svojemu maksimumu, pošlje mapirna kartica s kontrolo pretoka izvoru zveze okvir »odmor« .

Okvir »odmor« da izvoru ukaz, naj preneha z oddajanjem paketov za določen čas. Postaja, ki oddaja za določen čas, preneha z oddajanjem. Zelo koristno je, če podpira Ethernet kartica simetrično kontrolo podatkovnega pretoka. Simetrična kontrola pomeni, da lahko Ethernet kartica sprejema okvirje »odmor« od zunanje naprave ali da te okvirje zunanjim napravam pošilja. Kontrola podatkovnega pretoka uskladi pretok med oddajno in sprejemno napravo na pasovno širino STM-N signala. Lahko navedemo primer: na GbE vmesnik mapirne GbE kartice je priključen usmerjevalnik. GbE vmesniku je dodeljena pasovna širina VC4-4c. V določenem trenutku bitna hitrost na izhodu usmerjevalnika preseže hitrost 622 Mbit/s. V tem primeru pošlje mapirna kartica usmerjevalniku okvir »odmor«, ki zahteva, da usmerjevalnik za določen čas preneha z oddajanjem.

Kontrola podatkovnega pretoka ima svoje pragove, ki jih lahko operater nastavi glede na promet, ki se prenaša. Operater dejansko nastavlja velikost vmesnega pomnilnika. Značilna sta osnovni prag, ki je namenjen splošni uporabi, ter prag, ki zagotavlja majhne zakasnitve. Slednji je primeren za aplikacije, kot je na primer VoIP. Obstaja tudi možnost, ko operater sam nastavlja dejansko velikost vmesnega pomnilnika.

L2 Ethernet kartice

Značilnost L2 Ethernet kartic je, da vključujejo funkcionalnosti drugega nivoja (Layer 2) ISO/OSI referenčnega modela. Najpomembnejše funkcionalnosti, ki jih podpirajo L2 Ethernet kartice, so:

- podpora VLAN-ov,
- podpora IEEE 802.1Q,
- podpora STP,
- podpora IEEE 802.1D,
- podpora RPR.

L2 Ethernet kartice se običajno lahko z izključitvijo L2 funkcij konfigurira tudi kot mapirne Ethernet kartice.

Podpora VLAN

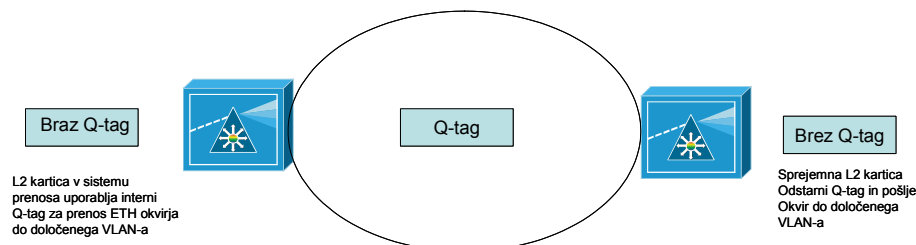
L2 Ethernet kartice omogočajo konfiguriranje VLAN-ov. Ta funkcionalnost je zelo zanimiva, saj omogoča preko iste pasovne širine kreiranje navideznih LAN povezav, ki med seboj ločujejo različne uporabnike. Uporabniki so logično in ne fizično ločeni na skupni transportni infrastrukturi. Tipične številke možnih VLAN povezav se gibljejo okrog 500.

Podpora IEEE 802.1Q Q-Tagging

Oprema, ki deluje po priporočilu IEEE 802.1Q, omogoča, da si isti Ethernet vmesnik deli več IEEE 802.1Q VLAN-ov. Vsak VLAN predstavlja logično drugo omrežje. Pri uporabi L2 GbE kartic v sistemu prenosa sta možni situaciji, kjer priključena naprava na sistem prenosa ustreza priporočilu IEEE 802.1Q ali pa ne ustreza priporočilu IEEE 802.1Q. V primeru, da priključena naprava ne ustreza priporočilu IEEE 802.1Q, uporablja L2 kartica v sistemu prenosa Q-tag interno. V tem primeru L2 Ethernet kartica sprejme od zunanje naprave Ethernet okvir brez Q-tag-a in mu zato dodeli svojega za umeščanje v ustrezni VLAN, ki je konfiguriran na sistemu prenosa. Na sprejemni napravi (sistemu prenosa) se

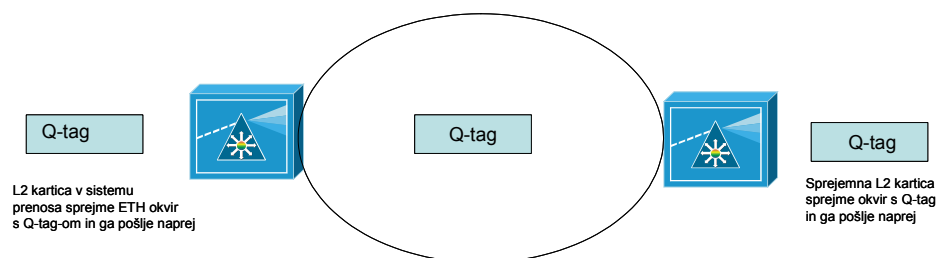
ta Q-tag odstrani, saj bi v nasprotnem primeru zunanja naprava (Ethernet stikalo) zaznala prejete okvirje kot neveljavne. Tak primer prikazuje slika 39.

Slika 39: Prenos Ethernet okvirja z internim Q-tag-om



V primeru, da zunanja naprava podpira IEEE 802.1Q in pošilja proti L2 Ethernet kartici Ethernet okvirje, opremljene s Q-tag, L2 Ethernet kartice uporabijo te oznake. Tudi ko Ethernet okvirji pridejo do sprejemne postaje, jih tam L2 Ethernet kartica ne odstrani, temveč jih pošlje opremljene do zunanje sprejemne postaje. Le v tem primeru jih bo sprejemna zunanja naprava imela za pravilne. Tak primer prikazuje slika 40.

Slika 40: Prenos Ethernet okvirja z lastnim Q-tag-om



Podpora IEEE 802.1P Priority Queuing

Omrežja, ki ne podpirajo razporejanja prometa po prioritetah, delijo le-tega po principu FIFO (First In First Out). Razporejanje po prioritetah zmanjšuje vpliv gostega prometa na zgoščevanje in s tem na hitrost prenosa. Ethernet promet se na ta način razporeja na različne prioritete nivoje. IEEE 802.1P specificira osem prioritete, ki so razporejene v dve »čakalni vrsti«, z nizko in visoko prioriteto. Informacijo o prioritetah prenašajo po omrežju Q-tag-i. Delitev podaja tabela 10.

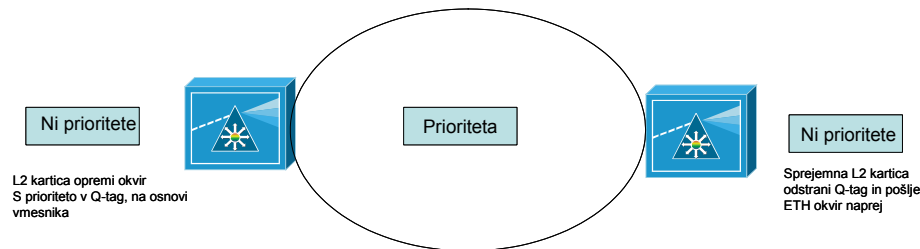
Tabela 10: Razporejanje prometa po prioritetah

Prioriteta uporabnika	Čakalna vrsta	Dodeljena pasovna širina [%]
0, 1, 2, 3	Nizka prioriteta	30
4, 5, 6, 7	Visoka prioriteta	70

Tudi glede prioritete velja, da lahko zunanja naprava (Ethernet stikalo) to funkcionalnost podpira ali pa ne. V primeru, da je priključen okvir brez prioritete, se mu lahko le-to doda na L2 Ethernet kartici v sistemu prenosa. Ta prioriteta se prenaša po omrežju preko Q-tag-a. Na sprejemni lokaciji oziroma sprejemni L2 Ethernet kartici se Q-tag odstrani, saj

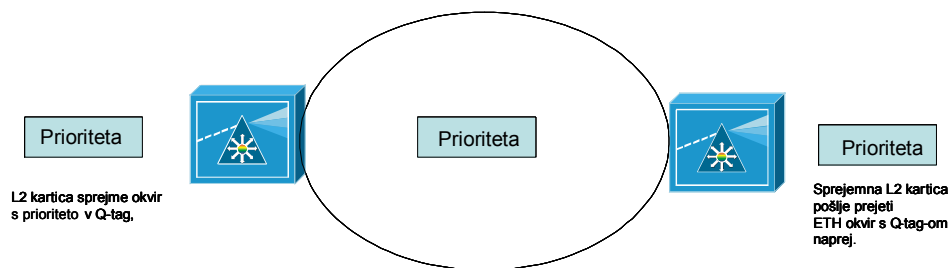
bi se drugače na sprejemni zunanji napravi sprejeti Ethernet okvirji razpoznali kot nepravilni. Tak primer prikazuje slika 41.

Slika 41: Prenos Ethernet okvirja z interno določeno prioriteto



V primeru, ko zunanja naprava podpira razporejanje prometa po prioritetah in pošilja proti L2 Ethernet kartici v sistemu prenosa okvir s prioriteto, le-tega prenese preko omrežja in na sprejemni strani pošlje proti sprejemni zunanji napravi skupaj s Q-tag-om. Tak primer prikazuje slika 42.

Slika 42: Prenos Ethernet okvirja z zunanjo prioriteto



Različne naprave, oziroma različne L2 Ethernet kartice, uporabljajo različne algoritme za realizacijo prenosa okvirjev po prioritetah. Nekatere L2 Ethernet kartice upoštevajo postavljene prioritete striktno, nekatere bolj ohlapno. To pomeni, da dajejo nekatere izvedbe popolno prednost prometu z višjo prioriteto, nekatere pa delijo promet glede na prioritete po principu 70 proti 30. V primeru preveč zgoščenega prometa pride tudi v primeru uporabe prioritet do tega, da se določene okvirje odvrže.

Podpora Spanning tree protokola (STP)

STP (Spanning Tree Protocol) je L2 upravljalni protokol, ki omogoča zaščito prenosne poti in zaščito pred zankami v omrežju. Da deluje Ethernet omrežje pravilno, mora med dvema postajama obstajati samo ena pot. Tudi kadar je omrežje sestavljeno iz več podomrežij, morajo biti povezave med vsemi napravami v podomrežjih brez zank. STP algoritem izračuna najboljšo pot brez zank skozi L2 omrežje. Stikala pošiljajo in sprejemajo STP okvirje, ki se imenujejo BPDU (angl. Bridge Protocol Data Units). Stikala teh okvirjev ne pošiljajo naprej, ampak jih uporabljajo za realizacijo povezav brez zank. STP definira drevesno strukturo z glavnim stikalom ter povezave med tem glavnim stikalom in ostalimi stikali v strukturi brez zank. STP prisili redundantno prenosno pot v stanje mirovanja. V primeru prekinitve na delovni povezavi STP algoritem preračuna STP topologijo in aktivira prenosno pot v mirovanju (seveda, če ta povezava obstaja).

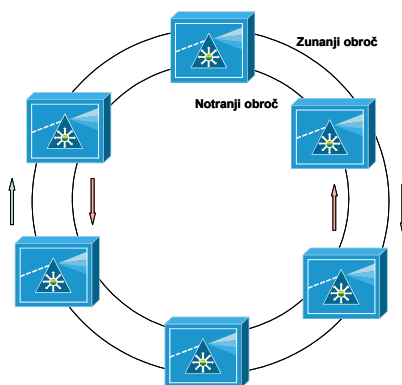
Podpora RPR

RPR (angl. Resilient Packet Ring; slov. elastično paketno omrežje) je topologija omrežja, ki je bila razvita kot nov standard za optična hrbtenična omrežja. Omogoča paketno optimiziran optični prenos, ki vnese v standardna SDH omrežja arhitekturo, ki omogoča IP promet in storitve na nadgradljiv, robusten in cenovno ugoden način. RPR omogoča napredne prenosne rešitve za storitve, kot so VoIP (Voice over IP) in IP VPN (IP Virtual Private Network).

RPR uporablja SDH okvirje s spojeno koristno vsebino preko dveh obročev, ki ju predstavljajo omrežni elementi, med seboj povezani s parom optičnih vlaken v vsako smer. Bitna hitrost vsakega obroča je od STM-4 do STM-64. RPR lahko deluje preko temnega optičnega vlakna (angl. Dark Fiber), SDH omrežja ali DWDM infrastrukture. Deluje tudi preko mešane infrastrukture oziroma kombinacije vseh prej omenjenih transportnih medijev. Za delovanje v RPR uporabljajo naprave SRP (angl. Spatial Reuse Protocol) protokol. Bistvena lastnost SRP protokola je, da omogoča prenos podatkovnih paketov vedno po najkrajši poti od izvora do ponora. Poleg te prednosti skrbi SRP protokol tudi za to, da paketi ne krožijo po vsem omrežju, temveč se na destinaciji vedno odstranijo. Omenjeno dejstvo omogoča zelo dobro izkoriščanje razpoložljive pasovne širine. Dodatni in nov protokol, ki se uporablja v RPR, je IPS (angl. Intelligent Protection Switching).

Vsako RPR omrežje je sestavljeno iz omrežnih elementov, ki so med seboj povezani s parom optičnih vlaken. S povezavami se realizirata dva obroča, od katerih imenujemo enega notranji (angl. Inner), drugega pa zunanji (angl. Outer). Po zunanjem obroču se prenaša promet v smeri urinega kazalca, po notranjem obroču pa v obratni smeri urinega kazalca. Podatkovni paketi se prenašajo v eni smeri, medtem ko se ustrezni kontrolni paketi prenašajo v obratni smeri. Oba obroča optimizirata pasovno širino za prenos podatkovnih paketov in zagotavljata, da uporabljajo paketi najkrajšo pot do svoje destinacije. Dvojni obroč je s stališča zaščite prometa optimalna rešitev in omogoča visoko razpoložljivost omrežja. V primeru prekinitve katerega koli kabla v obroču, se promet avtomatsko preusmeri na alternativno pot. Produkti, ki podpirajo SRP protokol, združujejo prednosti IP s samoozdravitvenimi lastnostmi optičnih obročev. Omenimo še enkrat, da je SRP protokol neodvisen od medija in se lahko uporablja v SDH ali DWDM omrežjih, kakor tudi na najetih optičnih vlaknih. Slika 43 prikazuje paketni prenos preko RPR omrežja.

Slika 43: Paketni prenos preko RPR omrežja



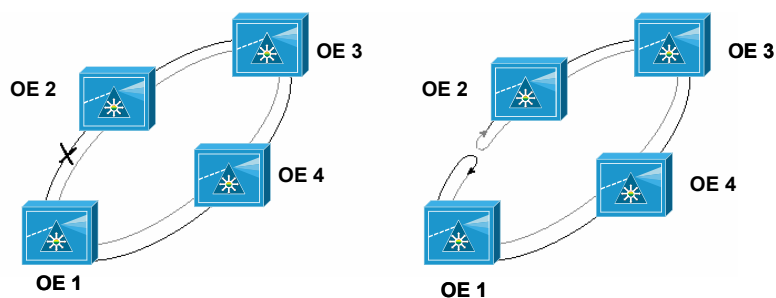
IPS protokol (Intelligent Protection Switching)

IPS je ena najpomembnejših lastnosti oziroma funkcionalnosti RPR omrežij. Njegova funkcionalnost je zelo podobna APS zaščitni shemi v SDH. Kljub podobnosti ima nekaj prednosti:

- deluje preko SDH ali DWDM omrežja, kakor tudi preko temnega optičnega vlakna,
- omogoča 50 ms preklon v primeru napake na omrežju, ki lahko vsebuje več kot 16 omrežnih elementov,
- za potrebe zaščite ne zahteva dodatne pasovne širine, kar poveča delovno pasovno širino,
- opazuje in upravlja z dogodki v L1, L2 in L3 nivojih ISO/OSI protokolnega sklada.

Primer prekinitve enega optičnega vlakna in aktiviranje zaščitne sheme v RPR omrežju, prikazuje slika 44.

Slika 44: Prekinitev enega optičnega vlakna v RPR omrežju



V primeru prekinitve optičnega vlakna med omrežnima elementoma OE 1 in OE 2 se zgodi:

- omrežni element OE 2 zazna prekinitev in na strani napake zaznava optična vlakna,
- omrežni element OE 2 nato pošlje po notranjem obroču kratko sporočilo omrežnemu elementu OE 1 in daljše sporočilo preko omrežnih elementov OE 3 in OE 4 po zunanem obroču,
- na osnovi sprejema kratkega sporočila od omrežnega elementa OE 2 omrežni element OE 1 zaznava optična vlakna in pošlje kratko sporočilo do omrežnega elementa OE 2 po zunanem obroču (to sporočilo je zaradi prekinitve izgubljeno) in dolgo sporočilo preko omrežnih elementov OE 3 in OE 4 po notranjem obroču.

Rezultat zgoraj omenjenega postopka je, da so vsi omrežni elementi med seboj povezani in promet poteka nemoteno.

Kot je bilo že omenjeno, lahko deluje RPR na temnih vlaknih, SDH ali DWDM omrežju. RPR si lahko predstavljamo kot aplikacijsko nadgradnjo klasičnih telekomunikacijskih omrežij. Iz povedanega sledi, da v primeru vpeljave RPR v telekomunikacijskem obroču ni potrebno spreminjati osnovne specifikacije DWDM/SDH večstoritvene platforme,

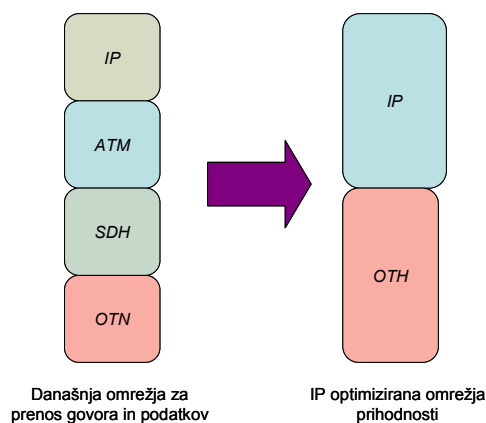
temveč je potrebno izbrati le ustrezne Ethernet kartice, ki podpirajo funkcionalnosti RPR protokola.

3.4 Optična transportna omrežja – OTN

V prejšnjih poglavjih smo videli, da omogoča WDM tehnologija zmogljivejša optična omrežja. Bistveni prednosti WDM tehnologije sta dobra izkoriščenost optičnega vlakna ter transparentnost glede protokolov in bitnih hitrosti, ki se prenašajo po skupnem optičnem vlaknu.

Prenos govora in podatkov v sodobnih in zmogljivih optičnih omrežjih nista več dve ločeni storitvi. Obe se lahko opravljata s sistemi, ki temeljijo na IP protokolu. Ideja je, da bi se IP promet prenašal neposredno preko WDM omrežij brez vmesnih nivojev, kot sta ATM in SDH. Spremembo prenosne strukture za IP promet podaja slika 45.

Slika 45: Sprememba prenosne strukture za IP promet



Na sliki 45 je za prenos govora in podatkov v današnjih omrežjih naveden le eden od možnih primerov. S pomočjo slike 36 je možno definirati še več različnih multipleksnih poti. Pri IP optimiziranih omrežjih prihodnosti pa naletimo na vsaj dve veliki težavi:

- za doseganje zelo kakovostnega prenosa brez napak je potrebno po določeni razdalji signal, ki se prenaša, ustrezno regenerirati po amplitudi, času in obliki. Ker je IP protokol za kratke razdalje, ne podpira omenjene regeneracije,
- za visoko zanesljivost in kakovost, ki se zahtevata v zmogljivih optičnih omrežjih, IP protokol prav tako ni primeren. Za zagotavljanje zanesljivosti in kakovosti je potrebno IP pakete vstavljati v SDH okvirje (Krauss, 2002. str. 144).

Za premostitev omenjenih težav je bilo leta 2001 definirano ITU-T priporočilo G.709, ki predpisuje optično prenosno hierarhijo OTH (angl. Optical Transmission Hierarchy; slov. optična prenosna hierarhija). Za OTH je značilno, da je za opazovanje in inženiring prometa prevzela možnosti, ki jih nudi SDH, vendar brez večine kompleksnosti, ki jih ponuja SDH hierarhija. Omenjena trditev bo razvidna nekoliko kasneje, ko bodo podani okvirji OTH hierarhije. OTH struktura še vedno omogoča transparenten prenos signalov visokih bitnih hitrosti od 2.5Gbit/s pa navzgor, z možnostjo spremljanja kakovosti prenosa, lociranje in odpravo napak FEC (angl. Forward Error Correction; slov. vnaprejšnja korekcija napak) in alarmiranja.

V OTH se za prenos signalov visokih bitnih hitrosti opravljata dva koraka. Prvi korak je preslikanje pritočnih signalov v nov okvir, ki se mu doda dodatne byte oziroma glavo. Pritočni signali se preslikajo v okvirje stalne velikosti, čeprav je bila osnovna ideja prilagajanje okvirja glede na pritočne signale. Ta ideja bi vnesla veliko kompleksnost in je bila zato zavrnjena. Postopek preslikav gre v treh korakih formiranja: OPU (angl. Optical Channel Payload Unit, slov. enota koristne vsebine optičnega kanala), ODU (angl. Optical Channel Data Unit; slov. podatkovna enota optičnega kanala) in OTU (angl. Optical Channel Transport Unit; slov. transportna enota optičnega kanala). Drugi korak predstavlja optično multipleksiranje in dodajanje dodatnih bajtov glave, ki se prenašajo ob glavnem optičnem signalu kot svoja valovna dolžina. To valovno dolžino imenujemo optični nadzorno upravljalni kanal.

Enota koristne vsebine optičnega kanala (Optical Channel Payload Unit - OPU-k)

OPU-k je osnovna enota OTH, v katero se preslikajo pritočni signali. Črka k predstavlja nominalno bitno hitrost, ki jo določen OPU podpira. Nominalne bitne hitrosti OPU-jev pri različnih vrednostih k ter korespondenco s SDH hierarhijo podaja tabela 11.

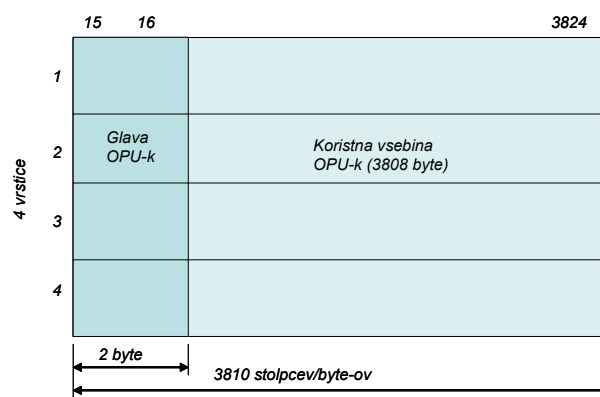
Tabela 11: Nominalne bitne hitrosti OPU-k

k	OPU-k	Bitna hitrost [Gbit/s]	Ekvivalentni SDH signal
1	OPU-1	2.488	STM-16
2	OPU-2	9.995	STM-64
3	OPU-3	40.150	STM-256

Vir: Kartalopoulos, 2002, str. 133

OPU-k enota je sestavljena iz štirih vrstic po 3810 bajtov. Prva dva bajta v vsaki vrstici predstavljata glavo OPU-ja in služita za adaptacijo pritočnega signala na koristno vsebino OPU-k. Ker se lahko v OPU-k preslikajo signali različnih bitnih hitrosti, se v koristni vsebini OPU-k uporabljajo za izravnavo bitnih hitrosti dodatni, polnilni byti. Po ITU-T priporočilu G.709 se začnejo stolpci OPU-k šteti s 15. Slika 46 podaja OPU-k osnovno enoto.

Slika 46: OPU-k okvir

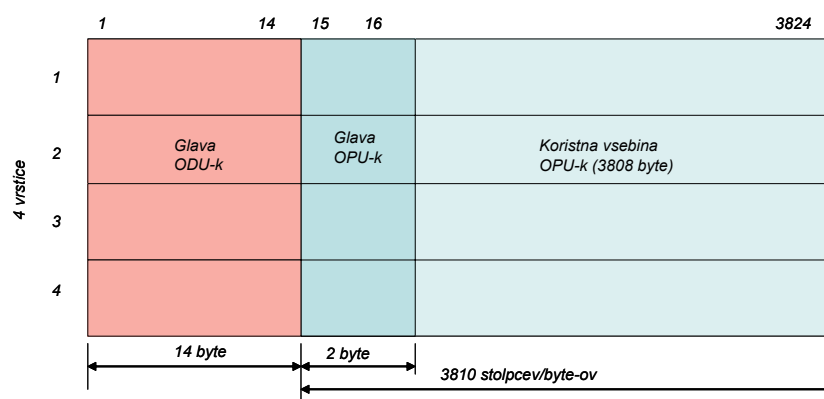


Vir: Krauss, 2002, str. 147

Podatkovna enota optičnega kanala (Optical Channel Data Unit - ODU-k)

Ko se OPU-k doda dodatnih štirinajst stolpcev ODU glave dobimo enoto, ki se imenuje Optical Channel Data Unit ODU-k. ODU-k glava se uporablja za sinhronizacijo ter nadzor in upravljanje optične povezave. Tudi ODU-k obstaja v treh različnih velikostih ODU-1, ODU-2 in ODU-3. ODU-k se kreira takoj, ko optični signal vstopi v zmogljivo optično omrežje in ostane nedotaknjen v vsem omrežju. Če napravimo primerjavo s SDH hierarhijo, lahko rečemo, da je ODU-k primerljiv z virtualnim hranilnikom (Krauss, 2002. str. 147). Slika 47 podaja enoto ODU-k.

Slika 47: ODU-k okvir



Ker so lahko kapacitete OTH standarda glede na večino pritočnih signalov prevelike, imamo precej visoko izgubo razpoložljive pasovne širine. Zato je OTH standard vpeljal časovno multipleksiranje (TDM) ODU-jev. Trenutno so v ITU-T priporočilu G.802 definirane naslednje stopnje multipleksiranja:

- $4 \times \text{ODU-1}$ se multipleksira v $1 \times \text{ODU-2}$,
- $16 \times \text{ODU-1}$ se multipleksira v $1 \times \text{ODU-3}$,
- $4 \times \text{ODU-2}$ se multipleksira v $1 \times \text{ODU-3}$.

Nominalne hitrosti posameznih ODU-k podaja tabela 12.

Tabela 12: Nominalne bitne hitrosti ODU-k

k	ODU-k	Bitna hitrost [Gbit/s]
1	ODU-1	2.498
2	ODU-2	10.037
3	ODU-3	40.319

Vir: Kartalopoulos, 2002, str. 135

Transportna enota optičnega kanala (Optical Channel Transport Unit - OTU-k)

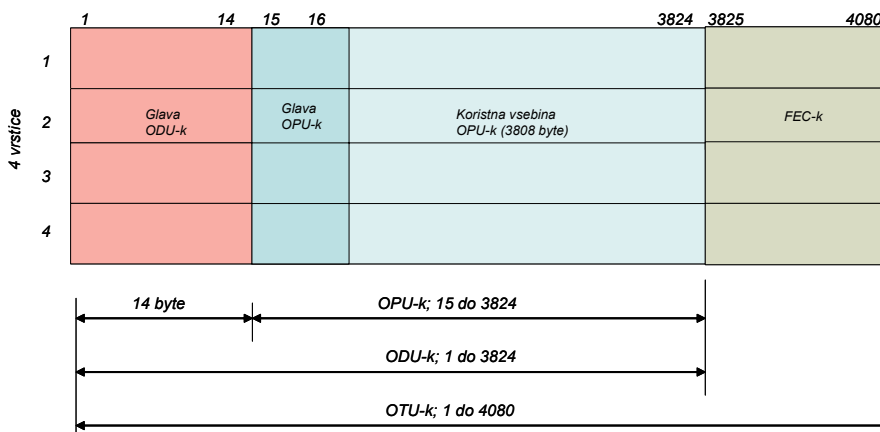
Konstrukcija OTU-k je narejena, ko se ODU-k okvirju doda OTU-k glavo ter FEC kodo na koncu ODU-k okvirja (Krauss, 2002. str. 147). Glava OTU služi za generalni komunikacijski kanal ter nadzor sekcije. FEC področje zaseda štiri vrstice s 256 bajti. Končne nominalne hitrosti OTU-k podaja tabela 13, OTU-k okvir pa slika 48.

Tabela 13: Nominalne bitne hitrosti OTU-k

k	OTU-k	Bitna hitrost [Gbit/s]
1	OTU-1	2.666
2	OTU-2	10.709
3	OTU-3	43.018

Vir: Kartalopoulos, 2002, str. 136

Slika 48: OTU-k okvir



Časovno trajanje enega okvirja OPU-k, ODU-k in OTU-k za različne vrednosti k podaja tabela 14.

Tabela 14: Periode OPU-k, ODU-k in OTU-k signalov

k	OPU-k, ODU-k, OTU-k	Perioda [μ s]
1	OPU-1, ODU-1, OTU-1	48.971
2	OPU-2, ODU-2, OTU-2	12.191
3	OPU-3, ODU-3, OTU-3	3.035

Optični kanal OCh (angl. Optical Channel)

OTU-k nivo, definiran v ITU-T priporočilo G.709/Y.1331, je električni signal. Ta signal se pretvori v optični signal, poznan pod imenom optični kanal. Označuje se ga kot OCh. Specifikacije OCh so podane v ITU-T priporočilih G.872 (Kartalopoulos, 2002, str. 137).

Do OCh pridemo tako, da OTU-k dodamo dodatno glavo. Za razliko od formiranja OPU-k, ODU-k in OTU-k, kjer se glave dodajajo dejansko signalu, se pri formiranju OCh glava dodaja oziroma prenaša ločeno od OTU-k. Prenaša se v tako imenovanem optičnem kanalu za nadzor. Optični kanal OCh je na ta način sestavljen iz dveh komponent.

Nosilec optičnega kanala OCC (angl. Optical Channel Carrier)

Za transport optičnega kanala OCh preko WDM sistema je potrebno za ta kanal določiti točno frekvenco oziroma valovno dolžino. OCh je namreč še vedno samo signal z določeno pasovno širino. OCh se zato preslika v nosilec optičnega kanala (OCC). Definirana sta dva nosilca optičnega kanala:

- OCC z zmanjšano (reducirano) funkcionalnostjo je sestavljen iz koristne vsebine. Ta OCC prenaša OCh koristno vsebino v valovni dolžini, ki je skladna z ITU-T priporočili za DWDM.
- OCC s polno funkcionalnostjo je sestavljen iz koristne vsebine OCCp ter glave OCCo. OCCp prenaša koristno vsebino OCh preko točno določene valovne dolžine, ki je skladna z ITU-T priporočili za DWDM. OCCo prenaša glavo optičnega kanala preko svoje valovne dolžine.

V primeru več nosilcev optičnih kanalov govorimo o grupi nosilcev optičnih kanalov, ki jo označimo kot OCG-n. Grupo predstavljajo kanali, ki so valovno dolžinsko multipleksirani, kot to zahteva DWDM standard. Tudi za grupo nosilcev optičnih kanalov obstajata dve definiciji:

- OCG-n z omejeno funkcionalnostjo je sestavljen iz $n \times$ OCCp koristne vsebine brez pripadajoče glave,
- OCG-n s polno funkcionalnostjo je sestavljen iz $n \times$ OCCp koristne vsebine in njene pripadajoče glave.

Optična multipleksna enota OMU (angl. Optical Multiplex Unit)

Poleg multipleksiranja v OCG tečeta paralelno še dva procesa. Prvi je dodajanje glave optične multipleksne sekcije. To glavo se dodaja tako, da se prenaša ločeno v nadzornem optičnem kanalu. Funkcija te glave je nadzor optičnega omrežja od začetne točke, ko se optični signal multipleksira, pa do končne točke, ko se optični signal demultipleksira. S tem postopkom pridemo do enote, ki se imenuje optična multipleksna enota OMU.

Optični transportni modul OTM (angl. Optical Transport Module)

Drugi proces, ki poteka paralelno z multipleksiranjem v OCG je dodajanje glave optične prenosne sekcije. Ta glava služi za nadzor in opazovanje optične prenosne sekcije. Ko je ta glava dodana, pridemo do zadnjega nivoja, ki se imenuje optični transportni modul OTM nivoja n, pri čemer je n večji od 1. To pomeni, da imamo vsaj dva signala, ki sta ustrezno preslikana v OPU, ODU in OTU strukture ter nato transportirana kot dve valovni dolžini z dodatnim nadzornim optičnim kanalom, ki prenaša dodatne glave (Krauss, 2002, str. 150).

Notacija optičnega transportnega modula OTM je: OTM-n,m. Razlaga notacije je:

- OTM-n,0 prenaša n signalov različnih bitnih hitrosti,
- OTM-n,1 prenaša n signalov bitne hitrosti 2.5Gbit/s,
- OTM-n,2 prenaša n signalov bitne hitrosti 10 Gbit/s,
- OTM-n,3 prenaša n signalov bitne hitrosti 40 Gbit/s.

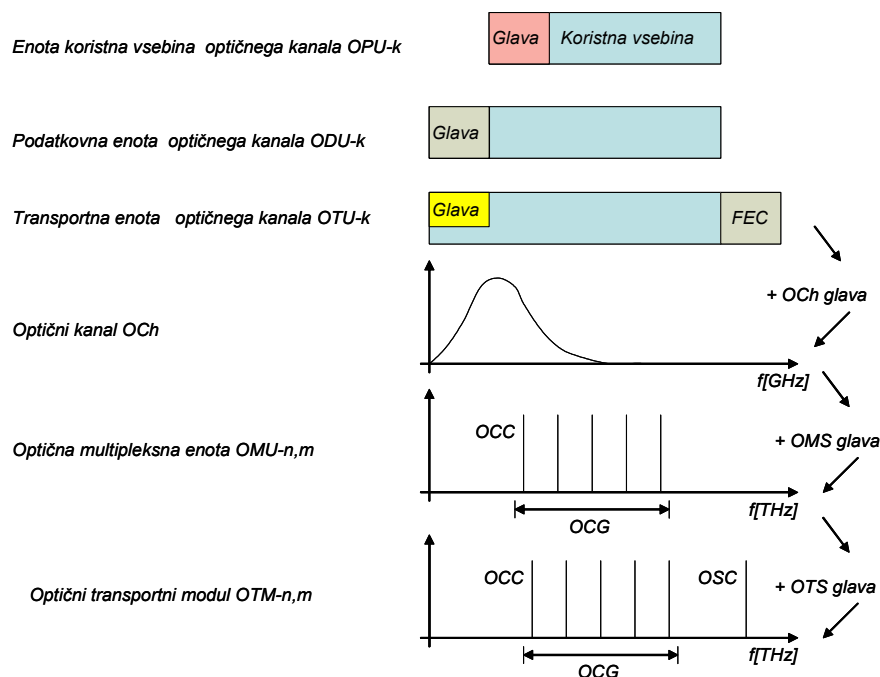
Povzetek formiranja optičnega transportnega modula OTM je

- 16 podokvirjev z 239 bajti se multipleksira po principu byte po byte. Podokvirji vsebujejo koristno vsebino pritočnih signalov,
- OPU-k okvir je sestavljen iz štirih vrstic. Vsaka vrstica vsebuje 2 byte-a za glavo in 16 byte-ov multipleksiranih podokvirjev,
- ODU-k je sestavljen iz štirinajst stolpcev glave in OPU-k okvirja,

- OTU-k je sestavljen iz ODU-k in 256 stolpcev FEC. Področje FEC je sestavljeno iz po principu byte po byte multipleksiranih FEC šestnajstih podokvirjev,
- OTU-k se premeša. Ta postopek se opravi zato, da v signalu ni večjih zaporednih nizov samih ničel ali enic, kar bi povzročalo v signalu enosmerno komponento,
- OTU-k se pretvori v optični signal, ki se imenuje optični kanal OCh,
- OCh se prestavi v točno določeno frekvenčno lego. Na ta način se dobi nosilec optičnega kanala OCC,
- OCC se grupirajo v skupino nosilcev optičnih kanalov OCG,
- dodajo se dodatne glave, ki se imenujejo OMS in OTS. Na ta način dobimo optični transportni modul OTM-n,m.

Postopek formiranja OTM prikazuje slika 49.

Slika 49: Formiranje optičnega transportnega modula OTM-n,m



4 Optična omrežja druge generacije

V tem poglavju bomo študirali zmogljivejša optična omrežja, v katerih se opravlja preklapljanje paketov na optičnem nivoju. Takšna optična omrežja se imenujejo fotonska paketno orientirana omrežja. Paketno orientirane storitve se danes v optičnih omrežjih opravljajo na elektronskih stikalih. Cilj fotonskega paketno orientiranega omrežja je nuditi enake storitve kot elektronska paketno orientirana omrežja, le da z veliko višjimi hitrostmi.

Zmogljivejša optična omrežja, ki smo jih obravnavali do sedaj, omogočajo tokokrogovno komutirane storitve. Ta omrežja omogočajo optične prenosne poti, ki se jih lahko vzpostavi in prekine glede na trenutne prometne potrebe. V teh omrežjih se signalov ne procesira na nivoju paketov, procesira pa se jih v času. To pomeni, da se določeno prenosno pot vzpostavi in prekine glede na prometno potrebo, ki v določenem času

obstaja. Paketno komutiranje se opravlja na elektronskem nivoju na IP in ATM stikalih. Ta stikala uporabljajo optične prenosne poti za vzpostavitev povezav med njimi.

Na tem mestu je potrebno poudariti, da je tehnologija, ki omogoča paketno preklapljanje na optičnem nivoju, na zelo začetni stopnji razvoja in je dosegljiva samo v določenih laboratorijih. Tudi daljna prihodnost fotonских paketno orientiranih omrežjih obljublja, da se bo optika uporabljala le za preklapljanje paketov, medtem ko se bodo zahtevne kontrolne in upravljske funkcije še vedno opravljale na elektronskem nivoju. Med te funkcije štejemo procesiranje paketov glave, določanje poti paketa, razporejanje paketov na osnovi QoS, vzdrževanje informacij o topologiji omrežja itd. Kljub obsežnemu spisku funkcij, ki se bodo vedno opravljale na elektronskem nivoju, obstaja nekaj motivacij, ki silijo k razvoju paketnega komutiranja na optičnem nivoju.

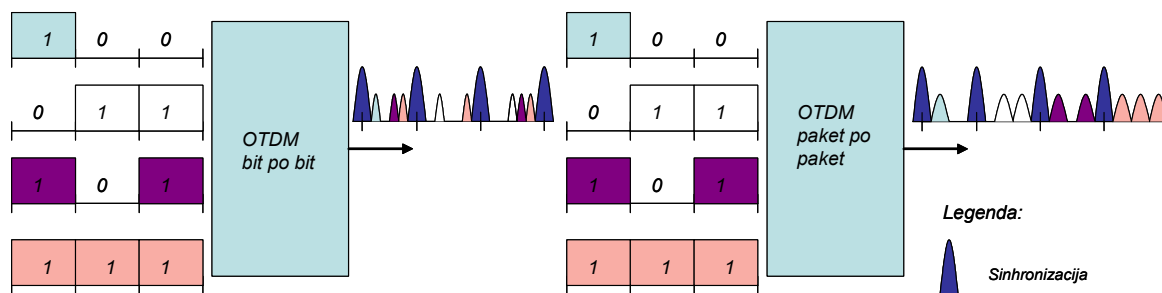
Prva motivacija je možnost realizacije višjih kapacitet, kot jih nudijo elektronska stikala. Največje kapacitete današnjih usmerjevalnikov se merijo v hitrostih, ki so manjše od enega Tbit/s z vmesniki, ki omogočajo hitrosti do 10 Gbit/s. Optična stikala so za večino delov transparentna za bitne hitrosti in omogočajo procesiranje do sto Tbit/s prometa. Časovno multipleksiranje, ki bi dalo na linijski strani signale bitne hitrosti 80 Gbit/s, na elektronskem nivoju ni in tudi ne bo mogoče. Tu se začne področje optičnega časovnega multipleksiranja (Ramaswami, 2002, str. 621).

Naslednja motivacija temelji na možnosti uravnavanja izkoriščenosti pasovne širine na optičnem nivoju. Trditev temelji na dejstvu, da so optične poti med usmerjevalniki, ki omogočajo zelo visoke bitne hitrosti precej slabo izkoriščene. Izkoriščenost naj bi se povečala z uporabo optičnih stikal. V primeru tokokrogovno komutiranih povezav je potrebno za vsako točka-točka povezavo rezervirati določen kanal WDM sistema, ne glede na velikost signala, ki se bo prenašal. V primeru fotonских paketno orientiranih omrežij se bo zaradi statističnega časovnega multipleksiranja dosegala veliko boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine (Aste, 2004, str. 1).

4.1 Optično časovno multipleksiranje

Na robu zmogljivih optičnih omrežij se signali nižjih bitnih hitrosti v oddajni smeri optično multipleksirajo v signale višjih bitnih hitrosti. V sprejemni smeri je potrebno signal nižje bitne hitrosti optično odvzeti iz signala višje bitne hitrosti. Funkcionalno je optično časovno multipleksiranje OTDM (angl. Optical Time Division Multiplex) identično elektronskemu časovnemu multipleksiranju (TDM). Edina razlika je v tem, da se pri OTDM opravlja časovno multipleksiranje neposredno na optičnih signalih visokih bitnih hitrosti. Slika 50 prikazuje princip časovnega multipleksiranja posameznih bitov in multipleksiranja paketov.

Slika 50: Optično časovno multipleksiranje OTDM



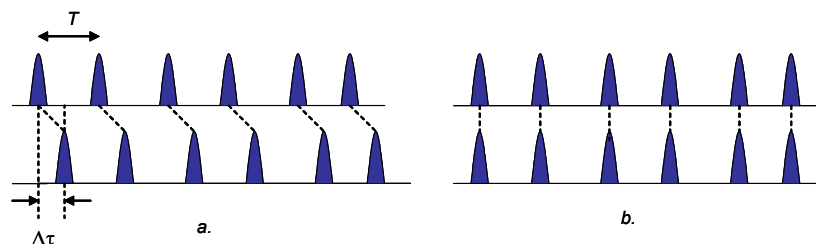
Vir. Ramaswami, 2002, str. 622

Optične signale na sliki 50 predstavljajo nizi bitov, ki prihajajo iz različnih zunanjih naprav. V primeru, ko se vrši multipleksiranje po principu bit po bit, se med dvema bitoma za sinhronizacijo časovno razvrstijo biti štirih pritočnih signalov po principu prvi bit prvega, drugega, tretjega in četrtega pritočnega signala, nato drugi bit prvega, drugega, tretjega in četrtega pritočnega signala in tako naprej. V primeru, ko se izvaja multipleksiranje po principu paket po paket, se med dvema bitoma za sinhronizacijo nahajajo celi paketi. Na sliki 50 je paket predstavljen kot niz treh bitov. V realnem svetu so seveda paketi veliko daljši. Pri OTDM velja enako kot pri elektronskem TDM, da je časovna perioda okvirja multipleksiranega signala enaka časovni periodi okvirjev na pritočni strani. Zato so biti na linijski strani ustrezno ožji. Poudarimo še enkrat, da se OTDM izvaja na optičnih, električno pasivnih komponentah.

Poznamo fiksno in statistično časovno multipleksiranje. Omenili smo, da uporabljajo OTDM-i statistično časovno multipleksiranje. Ta tip časovnega multipleksiranja je izbran zaradi narave podatkovnih nizov. V določenem trenutku je niz poln, nato pa lahko sledi obdobje, ko podatkov ni. Seveda je smotrno v »praznine« določenega niza vstaviti bite nekega drugega. Slediti je potrebno naključnemu pojavljanju bitov. Statistično multipleksiranje omogoča na ta način boljšo izkoriščenost pasovne širine z določenimi stranskimi efekti. Eden od efektov je zakasnitev, ki izhaja iz dejstva, da je potrebno vhodne podatkovne nize najprej vstaviti v tako imenovane vmesne pomnilnike. V teh pomnilnikih se biti zgostijo, kar omogoča časovno multipleksiranje kot v primeru, ko imamo na vseh časovnih multiplekserjih konstantne prometne obremenitve. V določenem trenutku se lahko zgodi, da je količina prometa na posameznih nizih takšna, da se vmesni pomnilniki popolnoma napolnijo. V teh primerih je potrebno določene pakete odstraniti in jih pošiljati na novo (Ramaswami, 2002, str. 8).

Pri postopku multipleksiranja je potrebno posebej poudariti vprašanje sinhronizacije. Sinhronizacija je proces časovnega uravnavanja dveh ali več bitov, ki so razporejeni v nize. V fotonjskih paketno orientiranih omrežjih se sinhronizacija nanaša na sinhronizacijo podatkovnega niza z internimi sinhronizacijskimi biti ali pa na tako imenovano relativno sinhronizacijo, ko se bitni nizi sinhronizirajo med seboj. Prvi primer mora biti zagotovljen pri multipleksiranju in demultipleksiranju, drugi pa na vseh usmerjevalnikih. Pri obravnavi sinhronizacije predpostavljamo, da so paketi fiksne dolžine. Če želimo, da predstavljajo sinhronizacijski biti meje paketa, si morajo le ti slediti periodično. Problem sinhronizacije prikazuje slika 51. V primeru a. niza bitov nista med seboj sinhronizirana. Niz v zgornji vrsti prehiteva spodnjega za čas $\Delta\tau$. Da bi se niza med seboj sinhronizirala, je potrebno zgornjega zakasniti ravno za čas $\Delta\tau$. Ta primer prikazuje na sliki 51 primer b.

Slika 51: Sinhronizacija niza bitov



Pri SDH tehnologiji so glave sestavni del STM-n okvirjev in se v sklopu njih tudi prenaša ter procesira. Pri OTH hierarhiji smo videli, da so določene glave sestavni del okvirjev, medtem ko se določene glave prenašajo neodvisno, kot svoja valovna dolžina.

Pri optičnih omrežjih druge generacije obstaja dilema, kakšno tehniko prepoznavanja glave uporabiti. Vse možne tehnike predvidevajo, da mora biti bitna hitrost glav veliko manjša, kot je bitna hitrost podatkov. Predvideva se, da bi bile bitne hitrosti glave do 1 Gbit/s, dolžina glave pa 10 bajtov, medtem ko bi bile bitne hitrosti koristne vsebine do 100 Gbit/s. Na ta način bi bilo glave enostavneje procesirati. Predlagane tehnike za prenos glave so:

- glava naj se prenaša skupaj s paketi, vendar z veliko nižjo bitno hitrostjo,
- glava naj se prenaša kot lastna valovna dolžina neodvisno od paketov,
- glava naj se prenaša v isti valovni dolžini, vendar kot svoj podatkovni kanal.

4.2 Arhitektura optičnih omrežij druge generacije

Arhitekturo fotonских paketno orientiranih omrežij bodo sestavljali optični paketno orientirani omrežni elementi, ki bodo med seboj povezani v mešano topologijo omrežja. Na robovih fotonškega omrežja bodo inštalirane naprave, ki spadajo v družino obstoječih IP elektronskih naprav. Imenujemo jih robne naprave. Robne naprave ustvarijo na svoji linijski strani optični signal oziroma optične pakete. Omenili smo že, da je optični paket sestavljen iz enostavne glave, ki vsebuje naslov končnega omrežnega elementa ter koristne vsebine, ki jo predstavlja en IP paket ali alternativno skupina IP paketov. Optični paketi se na paketno orientiranih optičnih napravah najprej vstavijo v vmesne pomnilnike, statistično multipleksirajo ter preko omrežja prenašajo do končne robne naprave. Glava paketov se obdeluje na končnih in vmesnih omrežnih elementih na elektronskem nivoju, medtem ko poteka vse procesiranje na optičnih paketih na optičnem nivoju (Aste, 2002, str. 1).

Samo delovanje transportnega omrežja je asinhrono. To pomeni, da se lahko paketi sprejemajo kadarkoli, brez časovne usklajenosti. Ker morajo signali biti za interno procesiranje sinhroni, se na omrežnih elementih opravlja sinhronizacija, kot je navedeno v točki 4.2.

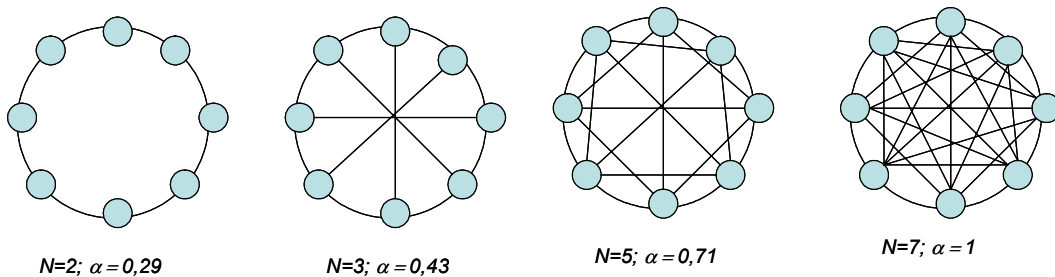
Za analizo povezljivosti v mešani topologiji omrežja predpostavimo, da je vsak omrežni element povezan z enakim številom omrežnih elementov. Število povezav enega omrežnega elementa z drugimi imenujemo stopnja omrežnega elementa in jo označimo s črko N . V primeru osmih omrežnih elementov se pri različnih vrednostih $N=2,3,5,7$ topologija omrežja začne pri topologiji obroč in gre do topologije, kjer je vsak omrežni

element povezan z vsakim. Z razmerjem število povezav v mešani topologiji omrežja proti vsem možnim povezavam v mešani topologiji definiramo pojem faktor povezljivosti α .

$$\alpha = N/N_{\max}$$

Slika 52 nazorno prikazuje problem povezljivosti omrežnih elementov v mešani topologiji omrežja.

Slika 52: Faktor povezljivosti med omrežnimi elementi v mešani topologiji omrežja



Vir: Aste, 2004, str. 3

Omrežni element optičnih omrežij druge generacije je v grobem sestavljen iz treh komponent. Te so demultiplekser kanalov, stikalo in multiplekser kanalov. Na vходу omrežnega elementa je N vhodnih vlaken, od katerih podpira vsak W valovnih dolžin. V prvi fazi se iz vhodnega optičnega vlakna demultipleksira G valovnih dolžin, ki gredo na stikalno matriko. Ko se signal v stikalni matriki obdelja, lahko signal doseže katerikoli izhod na drugi strani omrežnega elementa. Na izhod se iz stikala priključi statistično multipleksirani signal, ki se nato prenaša kot svoja valovna dolžina.

5 Telekomunikacijske naprave v zmogljivejših optičnih omrežjih

V zmogljivejših optičnih omrežjih se prenašajo govor in podatki. Ugotovili smo, da se količina podatkovnega prometa stalno povečuje, medtem ko prenos govora raste le nekaj odstotkov letno. Glede na omenjeno dejstvo bo v tem poglavju poudarek na prenosu podatkov. Glede prenosa govora lahko trdimo, da se v največji meri prenaša na naslednji način:

- TDM preko PDH preko SDH preko DWDM,
- TDM preko PDH preko SDH-CC preko DWDM,
- TDM preko PDH preko SDH-NG preko DWDM.

V spisku so našteje tri izvedbe SDH tehnologije in sicer: SDH kot standardna SDH tehnologija, SDH-CC kot SDH tehnologija, ki podpira zaporedno lepljenje koristne vsebine ter SDH-NG kot SDH tehnologija nove generacije, ki podpira virtualno lepljenje koristne vsebine. Seveda prenos preko naprav, ki podpirajo DWDM ni nujno potreben.

Glede prenosa podatkov obstaja precej širši repertoar možnih načinov preslikanja pritočnih signalov ter nato prenos s pomočjo telekomunikacijskih naprav, ki podpirajo različne tehnologije. Kot pritočni signali bodo obravnavani:

- Gigabit Ethernet (GbE) za prenos IP podatkov,
- Fibre Channel (FC), FICON in ESCON za prenos SAN formatov, ki zahtevajo učinkovito uporabo pasovne širine ter prenos brez zakasnitev.

Možnost prenosa oziroma multipleksno strukturo za prenos GbE in SAN formatov podaja slika 36. Za različne poti v multipleksni strukturi obstajajo različni tipi telekomunikacijskih naprav. Različne tipe telekomunikacijskih naprav v zmogljivejših optičnih omrežjih podaja tabela 15. Tipi telekomunikacijskih naprav, ki bodo bolj natančno raziskani, so v tabeli 15 potemnjeni. Potemnjeni so tisti tipi naprav, ki podpirajo poleg svoje osnovne funkcionalnosti tudi valovno dolžinsko multipleksiranje oziroma DWDM tehnologijo. V večini zmogljivejših optičnih omrežjih so namreč nameščene takšne platforme. Princip platforme, ki podpira časovno in valovno dolžinsko multipleksiranje, podaja slika 5.

Tabela 15: Različni tipi telekomunikacijskih naprav v zmogljivejših optičnih omrežjih

Tehnologija	Izpeljanka	Podpora	Ime naprave
DWDM	DWDM	DWDM tehnologije	Čista DWDM naprava
OTN	OTN	OTN tehnologije	Čista OTN naprava
OTN	OTN + DWDM	OTN in DWDM tehnologije	OTN naprava s podporo DWDM tehnologije
SDH	SDH	Standardne SDH tehnologije	Standardna SDH naprava
SDH	SDH + DWDM	Standardne SDH tehnologije in DWDM tehnologije	Standardna SDH naprava s podporo DWDM tehnologije
SDH	SDH-CC	SDH tehnologije z zaporednim lepljenjem	SDH naprava s podporo zaporednega lepljenja koristne vsebine
SDH	SDH-CC + DWDM	SDH tehnologije z zaporednim lepljenjem koristne vsebine in DWDM tehnologije	Namenska agregatna naprava
SDH	SDH-NG	SDH tehnologije z virtualnim lepljenjem koristne vsebine ter protokola GFP-F in GFP-T	SDH naprava nove generacije
SDH	SDH-NG + DWDM	SDH tehnologije z virtualnim lepljenjem koristne vsebine, GFP-F, GFP-T ter DWDM tehnologije	Univerzalno vozlišče

5.1 Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena s čistimi DWDM napravami

Čiste DWDM naprave omogočajo transparenten prenos optičnih signalov visokih bitnih hitrosti. Večina transponderjev omogoča namreč prenos signalov, katerih bitna hitrost ni nižja od 100 Mbit/s. Najvišje bitne hitrosti, ki se prenašajo, gredo do 10 Gbit/s. Transparentnost se nanaša na dejstvo, da se signali preko čistih DWDM naprav prenašajo v svoji izvorni obliki. To pomeni, da se pritočnim signalom nič ne dodaja, ampak se jih samo prestavi v točno določeno frekvenco, ki ustreza ITU-T predpisom za DWDM.

Zgoraj omenjene lastnosti pravzaprav govorijo v korist DWDM tehnologije za prenos podatkovnih formatov. Le-ti so zelo različni, tako po protokolih, kakor tudi po bitnih hitrostih (ESCON 200 Mbit/s, FC 1 Gbit/s ali 2 Gbit/s...). Transparentnost je torej zelo zanimiva lastnost, ki jo je mogoče s pridom izkoriščati.

Seveda pa obstajajo določene omejitve čiste DWDM tehnologije. Najvišje bitne hitrosti, ki jih omogočajo transponderji, so v večini primerov omejene na STM-4 (622 Mbit/s), STM-16(2.5 Gbit/s) ali STM-64 (10 Gbit/s). Omenjene bitne hitrosti se v večini primerov ne ujemajo z bitnimi hitrostmi pritočnih signalov. Zato imamo v večini primerov prenosa podatkovnih formatov preko čiste DWDM naprave velike izgube pasovne širine. Izguba pasovne širine je nezaželena iz naslednjih razlogov:

- pasovna širina je draga, saj je omejena s številom optičnih vlaken, kakor tudi zaradi visokih cen optičnih komponent v DWDM napravi,
- pasovna širina je dobrina, ki se jo prodaja, zato jo je nesmiselno prodajati neizkoriščeno.

Izgube pasovne širine podaja tabela 16.

Tabela 16: Izguba pasovne širine pri prenosu preko čiste DWDM naprave

Protokol	Bitna hitrost protokola [Mbit/s]	Potrebna bitna hitrost za prenos protokola [Mbit/s]	Izguba pasovne širine [%]
ESCON	200	622	67,8
FICON 1G	1000	2500	60,0
FICON 2G	2000	2500	20,0
Fibre Channel 1G	1000	2500	60,0
Fibre Channel	2000	2500	20,0
Fast Ethernet	100	622	83,9
Gigabit Ethernet	1000	2500	60,0

Iz tabele 16 se nazorno vidi, da so pri uporabi čiste DWDM tehnologije za prenos podatkovnih formatov relativno visoke izgube pasovne širine. Izgube se zmanjšajo z uporabo naprav, ki omogočajo agregacijo pritočnih signalov ter nato prenos agregiranih signalov.

Ker gre pri prenosu podatkovnih formatov za prenos signalov visokih bitnih hitrosti velike pomembnosti, je s stališča razpoložljivosti omrežja zelo pomembno, da zaradi odpovedi določene komponente sistema ali prekinitve optičnega vlakna ne pride do prekinitve prometa. Za visoko razpoložljivost, ki mora biti 99.999%, morajo čiste DWDM naprave podpirati ustrezne zaščitne sheme. Zaščitne sheme v DWDM tehnologiji temeljijo na optičnem nivoju.

5.2 Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena z OTN napravami

OTN omrežja so bila definirana za prenos na zelo dolge razdalje. Omogočajo prenos relativno majhnega števila pritočnih signalov, vendar le teh z visokimi bitnimi hitrostmi. OTN naprave omogočajo preslikanje in prenos pritočnih signalov, ki so preko GFP protokola že preslikani v STM-n okvirje. V primeru, ko se prenaša samo en STM-n signal, oziroma samo en optični kanal OCh, govorimo o prenosu STM-n preko OTN. V primeru, ko se prenaša skupina optičnih kanalov OCh, ki se označuje z OCG, govorimo o prenosu STM-n preko OTN preko DWDM. GFP protokol ter virtualno lepljenje in protokol LCAS v SDH napravi nove generacije poskrbijo za zelo dobro izkoriščenost pasovne širine v STM-n okvirju. Zaradi korespondence med bitnimi hitrostmi SDH hierarhije ter bitnimi hitrostmi OPU-k je tudi izkoriščenost pasovne širine OTN zelo dobra. DWDM tehnologija služi v tem primeru za večkratno izkoriščenost optičnega vlakna. Seveda se porodi vprašanje, zakaj se med DWDM in SDH-NG nivo vrine še OTN

nivo. Odgovor so dodatne glave z informacijami, ki omogočajo preko OTN bolj kakovosten ter bolj nadzorovan prenos, kot je to v primeru prenosa preko čiste DWDM naprave. Omenjena trditev dobi še večjo težo, če ponovimo, da so OTN namenjeni za prenos na zelo dolge razdalje.

V primeru preslikave GbE ali SAN formatov preko GFP-F oziroma GFP-T protokola se lahko GFP okvirji preslikajo v OPU-k neposredno, brez vmesnega nivoja, ki ga predstavlja SDH-NG. V tem primeru so lahko izgube pasovne širine nekoliko višje. GFP okvirji imajo lahko različne dolžine.

Ker je OTN zelo nov standard, ki še ni uveljavljen in je namenjen prenosu signalov na zelo dolge razdalje (prekokontinentalne in prekooceanske), ne bo obravnavan pri primerjavi posameznih tehnologij.

5.3 Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena s standardnimi SDH napravami

Velika prednost SDH tehnologije je multipleksna struktura, v kateri se pritočni signali kot koristna vsebina preslikavajo v hranilnike. Vsak hranilnik se skupaj s svojo lastno informacijo o sinhronizaciji ter z dodatnimi bajti za delovanje, nadzor in upravljanje prenaša po telekomunikacijskem omrežju neodvisno. To omogoča enostavno dodajanje in odzemanje hranilnikov nižjih bitnih hitrosti v hranilnike oziroma iz hranilnikov višjih bitnih hitrosti brez predhodnega multipleksiranja oziroma demultipleksiranja.

Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena s standardnimi SDH napravami, so bila razvita in implementirana izključno za prenos govora. STM signali višjega reda ne omogočajo preslikav večjih koristnih vsebin. Ker je prenos govora v večini zmogljivejših optičnih omrežij rešen s prenosom preko standardnih SDH naprav, rast govornega prometa pa je le nekaj odstotkov letno, se ta tip naprav izključuje ali pa se jih priključuje na sodobnejša in zmogljivejša optična omrežja. Ena od možnosti je, da se vstavi v standardne SDH naprave linijske kartice, ki podpirajo ITU-T priporočila za DWDM ter se jih nato medsebojno povezuje preko valovnih dolžin.

Standardna SDH tehnologija zaradi svoje tehnične zastarelosti ne bo predmet primerjave z ostalimi sodobnimi tehnologijami oziroma napravami za razširitev zmogljivosti optičnih omrežij.

5.4 Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena z namenskim agregatnimi napravami

Značilnost namenskih agregatnih naprav za prenos signalov visokih bitnih hitrosti je, da omogočajo časovno multipleksiranje pritočnih signalov ter prenos le-teh po skupnem prenosnem mediju v eni ali več valovnih dolžinah. Naprave torej podpirajo TDM in DWDM tehnologijo.

Prvi vtis je, da so naprave popolnoma enake tistim, ki jih bomo omenili v točki univerzalna vozlišča. Bistvena razlika med univerzalnimi vozlišči in namenskim napravami za prenos podatkovnih formatov visokih bitnih hitrosti je v matriki za usmerjanje ali preklapljanje telekomunikacijskega prometa. Matrike univerzalnih vozlišč omogočajo prevezovanje virtualnih kontejnerjev nižjih bitnih hitrosti VC-12, kakor tudi višjih bitnih hitrosti VC-4, medtem ko namenske naprave le prevezovanje višjih bitnih

hitrosti. Namenske agregatne naprave ne podpirajo vmesnikov za signale bitnih hitrosti 2 Mbit/s, medtem ko se signali bitne hitrosti 34 Mbit/s ter višje lahko prenašajo transparentno preko transponderjev.

Namenske agregatne naprave imajo v primerjavi s čistimi DWDM napravami sledeče prednosti.

- Možnost agregacije pritočnih signalov na naslednje načine:

- 10 × ESCON signal v en 2.5 Gbit/s linijski signal,
- 8 × FC 1Gbit/s signal v en 10 Gbit/s signal,
- 8 × FICON signal v en 10 Gbit/s signal,
- 4 × FC 2Gbit/s signal v en 10 Gbit/s signal,
- 4 × FICON signal v en 10 Gbit/s signal,
- 8 × GbE signal v en 10 Gbit/s signal,
- 2 × GbE signal v en 2.5Gbit/s signal.

Signali se na zgoraj omenjene načine multipleksirajo na pritočnih, agregatnih karticah. Izhodi teh kartic so preko osnovne plošče povezani z linijskimi karticami. Linijske kartice so umeščene med OADM-e in agregatne kartice. Bistvena razlika med linijskimi karticami in transponderji je, da se v linijskih karticah opravlja električno/optična pretvorba, pri čemer je električni signal multipleksirani signal na izhodu agregatne kartice, optični pa podpira valovne dolžine, definirane po priporočilih ITU-T za DWDM tehnologijo. Pri transponderjih se opravlja samo optično/optična pretvorba. V primeru transponderjev se nanj priključi optični pritočni signal, ki ga transponder samo prestavi v točno določeno frekvenco.

Pri namenskih agregatnih napravah se uporabljajo enake zaščitne sheme, kot pri čistih DWDM napravah.

Pri namenskih napravah za prenos podatkovnih formatov visokih bitnih hitrosti je potrebno omeniti tudi, da omogočajo za razliko od čistih DWDM naprav dodatne funkcionalnosti, predvsem na področju prenosa protokolov iz SAN aplikacij. Tu je mišljena podpora različnih vmesnikov ter vmesno shranjevanje za prenos podatkovnih signalov višjih bitnih hitrosti na večje razdalje. Najbolj tipičen primer je prenos FC (Fibre Channel).

5.5 Zmogljivejša optična omrežja, zgrajena z univerzalnimi vozlišči

Univerzalno vozlišče je ime za napravo oziroma omrežni element, ki podpira zelo širok spekter protokolov, ki se lahko prenašajo po skupnem prenosnem mediju. V isti napravi so podprti pritočni vmesniki za:

- PDH in SDH signale,
- podatkovne formate (GbE, Fast Ethernet, Fiber Channel, FICON, ESCON),
- transparenten prenos.

Konfiguracije z univerzalnimi vozlišči omogočajo širok spekter pritočnih signalov, kakor tudi zelo velike pasovne širine oziroma prenosne hitrosti na linijski strani naprave.

Visoke pasovne širine na linijski strani so omogočene s podporo DWDM tehnologije, ki omogoča istočasen in neodvisen prenos večjega števila valovnih dolžin po skupnem prenosnem mediju. Pasovna širina posamezne valovne dolžine je lahko do 10 Gbit/s. V primeru, da sistem podpira 32 valovnih dolžin, je prenosna hitrost skozi eno optično vlakno lahko 3.2 Tbit/s. S stališča DWDM tehnologije moramo omeniti dva tipa vmesnikov. Prvi tip so SDH vmesniki, katerih laserji podpirajo ITU-T priporočila za DWDM. Drugi tip vmesnikov so tako imenovani transponderji. Transponderji so vmesniki, ki so bistveni za transparenten prenos podatkov. To pomeni, da priključen pritočni signal, ki še nima točno določene valovne dolžine DWDM kanala, pravimo da je nepobarvan, prestavi v valovno dolžino, ki je definirana po priporočilih ITU-T za DWDM prenosno tehnologijo. S prestavitvijo valovne dolžine je pritočni signal pripravljen za valovno dolžinsko multipleksiranje na optičnih multiplekserjih.

V vsako valovno dolžino se lahko »vstavi« SDH signal, ki pa je produkt časovnega multipleksiranja pritočnih signalov. Omenjeno dejstvo omogoča optimalno izkoriščenost posamezne valovne dolžine oziroma minimalno izgubo pasovne širine.

Značilnost univerzalnih vozlišč je tudi ta, da imajo zelo zmogljive matrike, ki omogočajo prevezovanje signalov, ki prihajajo iz različni smeri prenosa. Prevezovanja se lahko vršijo na signalih oziroma virtualnih kontejnerjih višjih bitnih hitrosti, na primer VC-4 ali pa na virtualnih kontejnerjih nižjih bitnih hitrosti, kot so VC-12.

Iz kratkega opisa univerzalnega vozlišča lahko razberemo, da so le ta primerna za telekomunikacijske operaterje, ki nudijo storitve, vezane na nižje in tudi višje prenosne hitrosti. Sodobna univerzalna vozlišča nudijo zelo napredne funkcije s stališča zaščitnih shem, topologij omrežja, napredne funkcije na področju prenosa GbE, medtem ko je prenos signalov ostalih podatkovnih protokolov v primerjavi z namenski napravami za prenos v SAN aplikacijah nekoliko omejena s podprtimi protokoli in številom vmesnikov na eni kartici.

5.6 Primerjava telekomunikacijskih naprav, ki podpirajo različne tehnologije

V tem poglavju sem opravil primerjave treh različnih družin telekomunikacijskih naprav, ki podpirajo različne tehnologije. Obravnaval sem čiste DWDM naprave, namenske agregatne naprave ter univerzalna vozlišča, ki so bila opisana v prejšnjih poglavjih. V primerjavi ne bom upošteval telekomunikacijskih naprav, ki podpirajo standardno SDH hierarhijo, ker se le ta počasi umikajo iz zmogljivejših optičnih omrežij. Poudarimo še enkrat, da je v današnjih zmogljivejših optičnih omrežjih poudarek na prenosu podatkov visokih bitnih hitrosti, medtem ko je bila standardna SDH tehnologija razvita in implementirana za prenos govora. V primerjavi prav tako ne bom upošteval tehnologije, ki je podprta v optičnih transportnih omrežjih OTN. OTN je namreč zelo nov standard, ki še ni uveljavljen in je namenjen prenosu podatkov na zelo dolge razdalje.

Za primerjavo telekomunikacijskih naprav, ki podpirajo različne tehnologije za razširitev zmogljivejših optičnih omrežij, je potrebno postaviti določena merila. Merila so lahko koristi, ki jih posamezna telekomunikacijska naprava s svojimi tehnološkimi specifičnostmi prinaša. Za lažjo primerjavo so koristi, ki jih prinaša posamezna tehnologija, združena v čistih DWDM napravah, namenskih agregatnih napravah ter univerzalnih vozliščih, zbrane v tabeli 17.

Posamezne lastnosti oziroma zahteve za posamezen tip naprav so razdeljene na podskupine. Podskupine so:

- *splošne lastnosti*; govorijo o pogojih vgraditve, okolja vgraditve ter napajanja,
- *pritočni vmesniki*; podani so pritočni vmesniki, ki jih posamezni tipi naprav podpirajo,
- *linijski vmesniki*; podani so pritočni vmesniki, ki jih posamezni tipi naprav podpirajo,
- *matrika*; govori o možnostih prevezovanja pritočnih signalov,
- *DWDM funkcionalnosti*; obravnava vprašanja v zvezi z valovno dolžinskim multipleksiranjem ter ojačevanju optičnih signalov,
- *topologije omrežja*; podane so topologije omrežij, ki jih posamezen tip naprav podpira,
- *zaščitne sheme*; podane so zaščitne sheme, ki jih posamezen tip naprav podpira,
- *SAN aplikacije*; podane so funkcionalnosti, ki jih lahko opravljajo tudi druge naprave, kot je na primer FC stikalo,
- *Ethernet aplikacije*; prenos Etherneta je zelo zanimiva storitev, zato so navedene lastnosti, ki predstavljajo s stališča sistemov prenosa napredne funkcionalnosti,
- *SDH funkcionalnosti pri prenosu Etherneta*; zelo pomembna točka, ki govorijo o izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine.

Tabela 17: Podpora tehničnih lastnosti z napravami različnih tehnologij

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
Splošne zahteve				
Vgradnja v ETSI stojalo	DA	DA	DA	1. Možnost namestitve novih podokvirjev v obstoječa vozlišča. 2. Uniformnost, v primeru potrebe po namestitvi novega stojala.
Enosmerna napajalna napetost -48V	DA	DA	DA	1. Podpora standardne TK enosmerne napajalne napetosti. 2. Možnost priključitve na obstoječe napajalne sisteme.
Izmenična napajalna napetost 230V	DA	DA	DA	1. Možnost priključitve na izmenično napajalno napetost, ko ni na razpolago enosmernega vira (predvsem v primeru prostorov, ki niso posebej namenjeni TK opremi).
Temperatura delovanja +5 do +40 stopinj C	DA	DA	DA	1. Velik razpon temperature delovanja. 2. Naprava lahko deluje v prostorih, ki ne izpolnjujejo popolnoma klimatskih pogojev oz. preživi v primeru odpovedi klimatizacije.
Delovanje v industrijskem okolju	DA	DA	DA	1. Omogočeno je delovanje v prostorih, ki so obremenjeni z industrijskimi motnjami (EM, šum...).
Pritočni vmesniki				
E1 (2Mbit/s)	NE	NE	DA	1. Multipleksiranje in prenos E1 signalov, skupaj z ostalimi protokoli s tem, da E1 preslika v VC-12.
E3 (34Mbit/s)	NE	NE	DA	1. Multipleksiranje in prenos E3 signalov, skupaj z ostalimi protokoli s tem, da E3 preslika v VC-3.
Fast Ethernet (100Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Enkapsulacija v SDH okvir.	1. Priključevanje in transport FE protokola.
Gigabit Ethernet (1000Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2×GbE v 2.5Gbit/s signal. Časovno multipleksiranje 8×GbE v 10Gbit/s signal.	DA Transparenten prenos. Enkapsulacija v SDH okvir in prenos preko SDH omrežja.	1. Priključevanje in transport GbE protokola.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
ESCON (200Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje (10) 12 ESCON kanalov in transport v 2.5Gbit/s signalu.	DA Transparenten prenos	1. Priključevanje in transport ESCON protokola.
FICON (1000Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2 X FICON 1G v 2.5Gbit/s signal. Časovno multipleksiranje 8XFICON 1G v 10Gbit/s signal.	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2 X FICON 1G v 2.5Gbit/s signal.	1..Priključevanje in transport FICON 1G protokola.
FICON (2000Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 4 X FICON 2G v 10Gbit/s signal.	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2 X FICON 2G v SDH signal.	1. Priključevanje in transport FICON 2G protokola.
FC (1000Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2 X FC 1G v 2.5Gbit/s signal. Časovno multipleksiranje 8XFC 1G v 10Gbit/s signal.	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2 X FC 2G v SDH signal.	1. Priključevanje in transport FC 1G protokola.
FC(2000Mbit/s)	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 4 X FC 2G v 10Gbit/s signal.	DA Transparenten prenos. Časovno multipleksiranje 2 X FC 2G v SDH signal.	1. Priključevanje in transport FC 2G protokola.
ETR/CLO	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	NE	1. Priključevanje in transport ERT/CLO protokola.
ISC1	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	1. Priključevanje in transport ISC1 protokola.
ISC3	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	1. Priključevanje in transport ISC3 protokola.
POS	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Logični POS vmesniki	1. Priključevanje in transport POS protokola.
FDDI	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	1. Priključevanje in transport FDDI protokola.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
D1 Video	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	1. Priključevanje in transport D1 video signala.
STM-1e	NE	NE	DA	1. Priključevanje in transport STM-1e signala.
STM-1o	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Uporaba STM-1o vmesnikov.	1. Priključevanje in transport STM-1e signala/ov.
STM-4o	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Uporaba STM-4o vmesnikov.	1. Priključevanje in transport STM-4o signala/ov.
STM-16o	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos	DA Transparenten prenos. Uporaba STM-16o vmesnikov.	1. Priključevanje in transport STM-16o signala/ov.
TDM za E1 signale	NE	NE	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za E3 signale	NE	NE	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za ESCON kanale	NE	DA	NE	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
TDM za FC 1G signale	NE	DA	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za FC 2G signale	NE	DA	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za FICON 1G signale	NE	DA	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za FICON 2G signale	NE	DA	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za ISC1	NE	DA	NE	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za ISC 3	NE	DA	NE	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
TDM za Gigabit Ethernet	NE	DA	DA	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
TDM za kombinacijo FC/GbE	NE	DA	NE	1. Večja gostota vmesnikov na eni kartici. 2. Manj potrebne prenosne infrastrukture. 3. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 4. Manjše število porabljenih rež v podokvirju naprave.
Linijski optični vmesniki				
STM-1o	NE	NE	DA	1. Prenos optičnega neobarvanega STM-1 signala po optičnem vlaknu.
STM-4o	NE	NE	DA	1. Prenos optičnega neobarvanega STM-4 signala po optičnem vlaknu.
STM-16o	NE	NE	DA	1. Prenos optičnega neobarvanega STM-16 signala po optičnem vlaknu.
STM-64o	NE	NE	DA	1. Prenos optičnega neobarvanega STM-64 signala po optičnem vlaknu.
STM-16 DWDM	DA	DA	DA	1. Prenos optičnega obarvanega STM-16 signala po optičnem vlaknu. 2. Podpora ITU-T DWDM standarda, ki omogoča večkratno izrabo skupnega prenosnega medija - optičnega vlakna.
STM-64 DWDM	DA	DA	DA	1. Prenos optičnega obarvanega STM-64 signala po optičnem vlaknu. 2. Podpora ITU-T DWDM standarda, ki omogoča večkratno izrabo skupnega prenosnega medija - optičnega vlakna.
Matrika				
Digitalni električni prevezovalnik	NE	DA	DA	1. Prevezovanje pritočnih signalov brez blokiranja. 2. Prevezovanje HO in LO virtualnih kontejnerje. 3. Programsko podprto prevezovanje ne zahteva preklapanj na električnih ali optičnih delilnikih. 4. Povečana fleksibilnost TK omrežja.
Digitalni optični prevezovalnik	NE	NE	NE	1. Prevezovanje optičnih signalov brez predhodne O/E in nato E/O pretvorbe.
HO prevezovalnik (VC-4)	NE	DA	DA	1. Prevezovanje HO VC.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
LO prevezovalnik (VC-12)	NE	NE	DA	1. Prevezovanje LO VC.
DWDM funkcionalnosti				
Terminalni optični multiplekserji	DA	DA	DA	1. Optično multipleksiranje večjega števila obarvanih optičnih signalov (32), ki podpirajo DWDM standard. 2. Točka - točka topologija omrežja. 3. Odsekovno obročna topologija omrežja (sestavljena iz več točka - točka povezav).
Add/drop optični multiplekserji	DA	DA	DA	1. Optično multipleksiranje večjega števila obarvanih optičnih signalov (32), ki podpirajo DWDM standard. 2. Dodajanje in odvzemanje posameznih valovnih dolžin. 3. Točka-točka topologija omrežja. 4. Obroč topologija omrežja. 5. Mešana topologija omrežja.
Avtomatska regulacija optične moči	DA	DA	DA	1. Enostaven zagon omrežja. 2. Enostavno umirjanje omrežja. 3. Sprotna regulacija optične moči med delovanjem sistema, ko se spreminjajo karakteristike prenosnega medija, kakor tudi samih elektronskih in optičnih naprav.
Optično ojačevanje	DA	DA	DA	1. Povečanje dosega optičnega sistema, ki je omejen zaradi slabljenja na optičnem vlaknu.
Kompenzacija kromatske disperzije	DA	DA	DA	1. Povečanje dosega optičnega sistema, ki je omejen zaradi kromatske disperzije na optičnem vlaknu, predvsem v primeru 10Gbit/s linijskih kartic.
Topologije omrežja				
Točka-točka	DA	DA	DA	1. Zelo primerna topologija za DRC, kjer se izvaja kopiranje ali zrcaljenje med samo dvema lokacijama
Veriga	DA	DA	DA	1. Zelo primerna topologija za omrežja, kjer optična infrastruktura ne omogoča izgradnje optičnega obroča.
Zvezda (HUB)	DA	DA	DA	1. Zelo primerna topologija za DRC, ko imamo glavno postajo, ter iz nje v obliki zvezde razvejano omrežje do sekundarnih lokacij.
Obroč	DA	DA	DA	1. Zelo primerna topologija, ko imamo razpršene prometne potrebe med več lokacijami. 2. Zelo dobra topologija s stališča realizacije raznih zaščitnih shem.
Mešana	DA	DA	DA	1. Zelo primerna topologija, ko imamo razpršene prometne potrebe med več lokacijami. 2. Zelo dobra topologija s stališča realizacije raznih zaščitnih shem.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
Zaščitne sheme				
MS-SPRing	NE	NE	DA	1. Zaščitna shema v SDH omrežjih obročne topologije. 2. Omogoča zaščito prometnih povezav z rezervacijo polovice pasovne širine za zaščitno. 3. Preklopni čas je manjši od 50 ms v primeru, ko je število omrežnih elementov v obroču manjše od 30. 4. Preklopni čas je manjši od 100 ms, ko je v obroču več kot 30 omrežnih elementov. 5. V primeru uporabe DWDM tehnologije, se lahko MS-SPRing realizira v vsaki posamezni valovni dolžini. 6. Zaščitna shema omogoča kreiranje posebnega prometa nižje prioritete in teče po zaščitni pasovni širini.
SNCP	NE	NE	DA	1. Zaščitna shema v SDH omrežjih obročne topologije. 2. Omogoča zaščito prometnih povezav s podvojenimi prometnimi povezavami ter v sprejemu izbire boljšega signala. 3. Preklopni čas je manjši od 50 ms. 4. V primeru uporabe DWDM tehnologije, se lahko MS-SPRing realizira v vsaki posamezni valovni dolžini.
1+1 APS	NE	NE	DA	1. Zaščitna shema v SDH omrežjih točka - točka topologije. 2. Omogoča zaščito prometnih povezav s podvojitvijo prometne potrebe in v sprejemu izbire boljšega signala. 3. Preklopni čas je manjši od 50 ms. 4. V primeru uporabe DWDM tehnologije, se lahko MS-SPRing realizira v vsaki posamezni valovni dolžini.
Y-kabel	DA	DA	DA	1. Zaščitna shema na optičnem nivoju. 2. Zaščita optične prenosne poti. 3. Zaščita pred odpovedjo pritočne enote. 4. Zaščita pred odpovedjo linijske enote.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
Zaščita poti (podvojeni transponderji)	DA	DA	DA	1. Zaščitna shema na optičnem nivoju. 2. Zaščita optične prenosne poti. 3. Zaščita pred odpovedjo pritočne enote. 4. Zaščita pred odpovedjo linijske enote. 5. Dodatna zaščitna shema, ki jo nudi strankina naprava (dva vmesnika v strankini napravi se povežeta na dva vmesnika pritočnih kartic).
Splitter zaščita (zaščita optičnih vlaken)	DA	DA	DA	1. Zaščitna shema na optičnem nivoju. 2. Zaščita optične prenosne poti. 3. Cenovno ugodna rešitev.
O-UPSR	DA	DA	DA	1. Zaščitna shema na optičnem nivoju. 2. Primerna zaščitna shema za vse protokole, razen ETR/CLO.
O-BLSR	DA	DA	DA	1. Zaščitna shema na optičnem nivoju. 2. Primerna zaščitna shema za vse protokole.
Podvojena matrika	NE	DA	DA	1. Zaščita pred odpovedjo primarne matrične enote.
Podvojene pritočne kartice	DA	DA	DA	1. Zaščita pred odpovedjo pritočne enote.
Podvojene linijske kartice	DA	DA	DA	1. Zaščita pred odpovedjo linijske enote.
SAN aplikacije				
Asinhrono kopiranje	DA	DA	DA	1. Asinhrono kopiranje omogoča kopiranje na daljše razdalje (zaradi tehnike kopiranja).
Sinhrono kopiranje	DA	DA	DA	1. Sinhrono kopiranje je občutljivo na zakasnitve in zato primerno za kopiranje na krajših razdaljah.
Vmesni pomnilniki (bufferiranje)	NE	DA	DA	1. Omogoča kopiranje tudi na daljših razdaljah, saj se z bufferiranje odpravi efekt zakasnitve.
Agregacija SAN protokolov	NE	DA	DA	1. Boljša izkoriščenost optične infrastrukture. 2. Boljša izkoriščenost razpoložljive pasovne širine v posamezni valovni dolžini. 3. Manjše število uporabljenih rež v podokvirjih naprave.
Možna skupna agregacija SAN protokola FC in GbE	NE	DA	NE	1. Večja fleksibilnost naprave.
Možnost spremljanja kakovosti prenosa FC protokola	NE	DA	DA	1. Zagotavljanje kakovostnega prenosa FC protokola

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
ETHERNET				
Ethernet L1 funkcionalnosti				
10/100 base-Tx half duplex in full duplex prenos podatkov	DA	DA	DA	1. Direktna enkapsulacija ETH/FE signala v SDH signal in transport preko SDH/DWDM omrežja.
1000 base-SX full duplex prenos podatkov	DA	DA	DA	1. Direktna enkapsulacija GbE signala v SDH signal in transport preko SDH/DWDM omrežja.
SDH lastnosti pri prenosu ETHERNET-a				
POS virtualni vmesniki	NE	NE	DA	1. Omogoča funkcionalnosti, kot sta VCAT in LCAS.
VCAT	NE	NE	DA	1. Virtualno lepljenje koristne vsebine SDH signala. 2. Boljši izkoristek razpoložljive pasovne širine.
LCAS	NE	NE	DA	1. Enostavno povečevanje in zmanjševanje pasovne širine pri prenosu strankinih protokolov.
HDLC enkapsulacija za POS	NE	NE	DA	1. Podpora protokola za enkapsulacijo paketov v POS.
PPP/BCP enkapsulacija za POS	NE	NE	DA	1. Podpora protokola za enkapsulacijo paketov v POS.
Ethernet L2 /L3 funkcionalnosti				
Učenje MAC naslovov in HW preklapljanje	NE	NE	DA	1. Omogočena L2 funkcionalnost v sistemu prenosa. 2. Primerno za obroč topologije, ko se lahko deli pasovna širina za ETH promet in ni potrebno realizirati večjega števila točka - točka povezav. 3. Primerno takrat, ko ima stranka večje število lokacij, ki se medsebojno povezujejo preko optičnega sistema prenosa ponudnika TK storitev.
IEEE 802.1P/Q VLAN trunking	NE	NE	DA	1. Možnost kreiranja VLAN-ov, kot logičnih povezav. 2. Posameznim VLAN-om možnost dodeljevanja prioritet.
IEEE 802.1Q VLAN tunneling	NE	NE	DA	1. Možnost kreiranja VLAN-ov, kot logičnih povezav. 2. Označevanje posameznih VLAN-ov. 3. Ni težav, pri prenosu VLAN-ov različnih strank, ki imajo lahko enake oznake.
IEEE 802.1D STP	NE	NE	DA	1. STP protokol odstranjuje možnost realizacije zank v ETH omrežju. 2. STP predstavlja zaščitno shemo za ETH promet z dolgim časom konvergence omrežja.

Zahteva	Čisti DWDM	Namenske agregatne naprave	Univerzalna vozlišča	Koristi
IEEE 802.1W RSTP	NE	NE	DA	1. RSTP protokol odstranjuje možnost realizacije zank v ETH omrežju. 2. RSTP predstavlja zaščitno shemo za ETH promet z dolgim časom konvergence omrežja.
RPR (Resilient Packet Ring)	NE	NE	DA	1. Omogoča zaščitno shemo za ETH promet brez rezervacije pasovne širine. 2. Večja izkoriščenost razpoložljive pasovne širine kot pri SDH zaščitnih shemah (za 50 %).

V tabeli 17 zbrane lastnosti posameznih tehnologij lahko porabimo za oceno, katera tehnologija ima največ prednosti. Ocenjevanje bo upoštevalo:

- *Natančnost*; ali bo zmogljivejše optično omrežje omogočalo delovanje brez napak?
- *Razpoložljivost*; koliko časa v določenem obdobju je zmogljivejše optično omrežje razpoložljivo, oziroma koliko časa je v omenjenem obdobju v dobrem obratovanju?
- *Kompatibilnost*; ali je novo uvedena tehnologija kompatibilna z obstoječo tehnologijo? Ali zahteva neka tehnologija manj usposabljanja za delo z njo, kot to zahtevajo druge?
- *Učinkovitost*; ali omogoča določena tehnologija hitrejše in bolj natančne konfiguracije, obdelave in izpise prometnih tokov? Ali zahteva določena tehnologija manj resursov?
- *Vzdrževanje*; ali zahteva neka tehnologija manj in cenejše vzdrževanje kot druge?
- *Modularnost*; ali omogoča določena tehnologija večjo modularnost od drugih glede strojne in programske opreme?
- *Zanesljivost*; ali nudi določena tehnologija bolj zanesljivo delovanje od drugih tako s stališča delovanja strojne, kakor tudi programske opreme?
- *Varnost*; ali omogoča določena tehnologija boljše varnostne mehanizme s stališča vdorov, izgube ali zlorabe?
- *Lažje upravljanje prometa in omrežja*; ali omogoča določen sistem hitrejše vključevanje novega prometa ter lažje in učinkovitejše upravljanje prometa in zmogljivejšega optičnega omrežja?
- *Optimalna izkoriščenost pasovne širine*; koliko telekomunikacijskega prometa se lahko prenaša v razpoložljivi pasovni širini?

Pri ocenjevanju zgoraj navedenih prednosti, ki jih nudijo različne tehnologije, je uporabljeno sledeče vrednotenje:

- 1 ni posebnih prednosti,
- 2 obstajajo določene prednosti,
- 3 izstopa.

Rezultati vrednotenja so podani v tabeli 18.

Tabela 18: Vrednotenje splošnih koristi posameznih tehnologij

	Univerzalna vozlišča	Namenske agregatne naprave	Čiste DWDM naprave
Natančnost	1	1	1
Razpoložljivost	3	1	1
Kompatibilnost	3	2	1
Učinkovitost	3	2	1
Vzdrževanje	3	2	1
Modularnost	3	2	1
Zanesljivost	1	1	1
Varnost	1	1	1
Lažje upravljanje	3	1	1
Izkoriščenost razpoložljive pasovne širine	3	2	1
VSOTA TOČK:	24	15	10

Najvišje število točk so dobila univerzalna vozlišča, ki podpirajo SDH tehnologijo nove generacije ter DWDM tehnologijo. Največja razlika se je naredila na treh koristih. Te so:

- razpoložljivost,
- lažje upravljanje,
- izkoriščenost razpoložljive pasovne širine.

Razpoložljivost se nanaša na zahtevo po čim krajšem času, ko telekomunikacijski promet ne poteka. Zato so tu zelo pomembne zaščitne sheme, ki jih posamezna tehnologija podpira. Zaščitne sheme, ki jih podpira SDH tehnologija, in zaščitne sheme na optičnem nivoju so bile podrobno obdelane v tretjem poglavju.

Področji, ki govorita o lažjem upravljanju telekomunikacijskih naprav in zmogljivejših optičnih omrežij, ter področje, ki govori o izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine, pa zahtevajo še nekaj dodatnih pojasnil.

5.6.1 Lažje upravljanje omrežja in storitev

Kot dodatno funkcionalnost na področju Etherneta smo omenili podporo kreiranja in upravljanja VLAN-ov. Ta funkcionalnost omogoča logično delitev razpoložljive pasovne širine na logično deljena omrežja, ki so medsebojno neodvisna. S to funkcionalnostjo se strankam omogoči njihovo privatno omrežje. To je prav gotovo zelo zanimiva lastnost, ki jo je mogoče uspešno uporabljati.

Pri ponudbi VLAN-ov različnim strankam se lahko pojavijo določene težave. Težave so pogojene z dejstvom, da v večini primerov stranke že uporabljajo in upravljajo svojo informacijsko infrastrukturo (LAN). V svojih LAN omrežjih imajo lahko kreirane svoje VLAN-e, ki se med seboj razlikujejo, oziroma delujejo na osnovi priponk (Q-tag). Če nudi operater telekomunikacij storitev prenosa Etherneta večjemu številu strank, lahko pride do podvajanja Q-tag-ov. Omrežje s podvojenimi Q-tag-i ne bo delovalo. Zato je zelo pomembno, da omrežje operaterja telekomunikacij podpira standard IEEE 802.1Q, ki omogoča strankine VLAN-e še enkrat oviti s svojim Q-tagom. Na ta način VLAN-e različnih strank, tudi v primeru morebitnega podvajanja Q-tag-ov v strankinih VLAN-ih, lahko prenaša popolnoma neodvisno. S to funkcionalnostjo dosežemo naslednje:

- manjšo kompleksnost vključevanja storitve,
- krajši čas realizacije povezave,
- manjše število udeležencev pri realizaciji povezave.

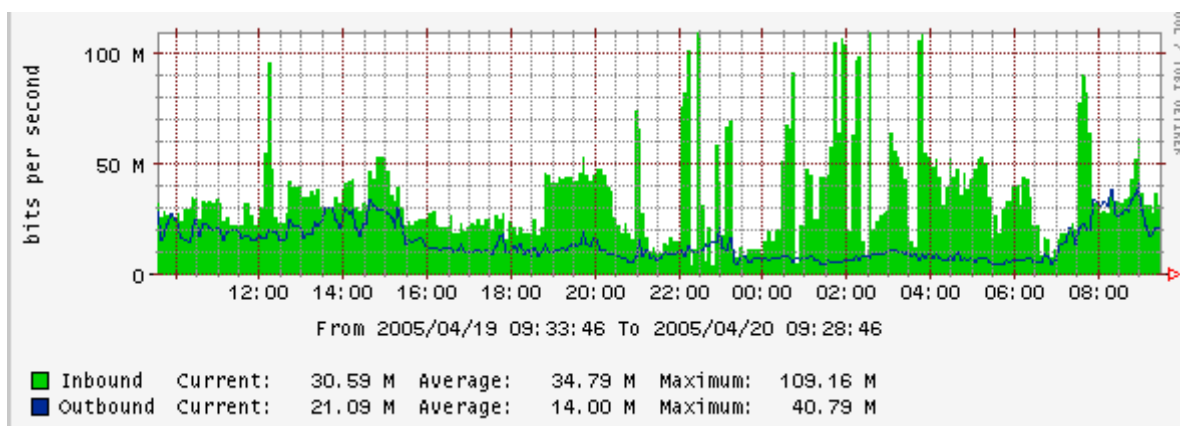
V primeru, ko telekomunikacijska naprava podpira standard IEEE 802.1Q, ni potrebna predhodna analiza strankinega LAN omrežja, saj se v primeru podvajanja Q-tag-ov VLAN-e ovije svoj, interni Q-tag. Zaradi poenostavitve se zelo zmanjša možnost slabe volje pri stranki, saj ji ni potrebno spreminjati parametrov in konfiguracij svojega LAN omrežja. Slaba volja stranke lahko posledično pripelje tudi do odpovedi storitve, saj bi bile zanjo potrebne previsoke žrtve, kot so na primer odpoved delovanja za krajši ali daljši čas, popraviljanje vse strankine dokumentacije ipd. Omeniti je potrebno, da spreminjanje konfiguracij LAN omrežij za stranke, kot so na primer bančne ustanove, praktično sploh ne pride v poštev. Prekonfiguracije so tehnično možne, vendar zahtevajo ogromno dela, ljudi in časa. Za primer Nove Ljubljanske banke se ocenjuje, da bi takšen poseg zahteval angažiranje štirih ljudi za obdobje dveh mesecev. Časi prekinitev bi bili predolgi, kar bi bilo s stališča stranke zagotovo nesprejemljivo, operater telekomunikacij pa dva meseca ne bi uspel realizirati storitve. Posledično se z zmanjševanjem kompleksnosti zmanjšuje tudi čas realizacije določene povezave in prenosa, kakor tudi število udeležencev pri postopku. Oba parametra kažeta, da se v primeru, da oprema podpira priporočilo IEEE 802.1Q, veliko privarčuje. Še bolj velja upoštevati dejstvo, da je pridobitev novih strank mogoča ravno zaradi omenjene funkcionalnosti.

Ko ponudnik telekomunikacijskih storitev pridobi nove naročnike, jim je potrebno nuditi kakovostne storitve. Le na ta način jih je mogoče obdržati. Poznamo promet, ki zahteva višje ali nižje prioritete. Za prenos govora so zahtevane visoke prioritete, medtem ko za prenos neke datoteke visoka prioriteta ni potrebna. Različne prioritete omogoča naprava, ki podpira standard IEEE 802.1P. S podporo tega standarda lahko operater telekomunikacij nudi dodatno storitev, ki omogoča različno zaračunavanje le te. Zagotavljanje transporta prometa višje prioritete je definitivno dražja storitev od zagotavljanja transporta prometa nižje prioritete. Granulacija takšnih storitev mora biti definirana v tako imenovani pogodbi o zagotavljanju ravni storitev SLA (Service Level Agreement).

5.6.2 Optimalna izkoriščenost razpoložljive in rezervirane pasovne širine

Pomen obravnave vprašanja izkoriščenosti razpoložljive in rezervirane pasovne širine nazorno prikazuje slika 53. Prikazana je prometna obremenjenost GbE vmesnika med dvema lokacijama enega izmed slovenskih operaterjev mobilne telefonije. Razbrati je možno povprečni ter trenutni, največji, vhodni in izhodni promet. Največji promet znaša 109.16 Mbit/s. Za omenjeno prometno obremenjenost se je smiselno vprašati, s katero tehnologijo je smiselno stranki zagotavljati pasovno širino.

Slika 53: Prometna obremenjenost GbE vmesnika



Vir: Interni merilni rezultat

Boljšo izkoriščenost razpoložljive pasovne širine dosežemo na različne načine. Pri obravnavi teh načinov je potrebno poudariti, da govorimo o napravah, ki podpirajo DWDM tehnologijo. Vsaka posamezna valovna dolžina predstavlja razpoložljivo pasovno širino 2.5 Gbit/s ali 10 Gbit/s. Da lahko to razpoložljivo pasovno širino optimalno izkoristimo, uporabljamo naslednje mehanizme:

- tehnologije, ki omogočajo delitev (share) razpoložljive pasovne širine,
- časovno multipleksiranje (TDM),
- granulacija in lepljenje razpoložljive pasovne širine,
- virtualno lepljenje koristne vsebine SDH signala.

Za delitev pasovne širine, namenjene prenosu podatkovnih formatov GbE, mora naprava podpirati vsaj L2 funkcionalnost. V primeru podpore L2 funkcionalnosti omogoča sam sistem prenosa funkcionalnost Ethernet stikala. V tem primeru ni potrebno imeti na vsaki lokaciji dodatnih zunanjih stikal. Ker se preklapljanje izvaja na ustreznih Ethernet karticah, ki so sestavni del naprave sistema prenosa, ni potrebe po transparentnem prenosu. Pri transparentnem prenosu je potrebno za vsak kanal zagotoviti polno pasovno širino. Poleg polne pasovne širine za vsak kanal je potrebno, v primeru zvezdaste oblike LAN omrežja (v največ primerih je tako), za vsako točka-točka povezavo uporabiti svoj kanal.

Časovno multipleksiranje omogoča boljšo izkoriščenost pasovne širine s tem, ko se v posamezno valovno dolžino oziroma razpoložljivo pasovno širino višje bitne hitrosti časovno multipleksirajo signali nižjih bitnih hitrosti (npr. 2×1 Gbit/s v 1×2.5 Gbit/s, 10×1 Gbit/s v 1×10 Gbit/s...). V nasprotnem primeru imamo precej visoke izgube pasovne širine. V primeru prenosa GbE, z bitno hitrostjo 1.025 Gbit/s, je potrebna standardna bitna hitrost 2.5 Gbit/s. Izguba pasovne širine je 50 odstotna.

Z granulacijo pasovne širine dosežemo, da se pritočni podatkovni signali enkapsulirajo v pasovno širino, ki je za prenos le-te potrebna. Vemo, da omogoča GbE protokol bitne hitrosti do 1 Gbit/s. V primeru manjše prometne obremenjenosti pa je hitrost GbE kanala lahko samo na primer 100 Mbit/s. Za prenos 100 Mbit/s signala je popolnoma nesmiselno uporabiti celotno pasovno širino 1 Gbit/s. Smotno je, da se 100 Mbit/s signal enkapsulira v virtualni kontejner ustrezne velikosti. Za konkreten primer 100 Mbit/s signala je dovolj virtualni kontejner VC-4 (155 Mbit/s). V primeru Ethernet signalov, ki potrebujejo večjo

pasovno širino, je primerno, če omogoča naprava lepljenje koristne vsebine SDH signala. Tako poznamo zlepljene vsebine velikosti VC-4-Xc (X= 4, 8, 16, ...). Možne so tudi ostale variante in so različne od proizvajalca do proizvajalca. Načini lepljenja koristne vsebine SDH signala so opisane v poglavju 4.5.2. V tem poglavju so navedene tudi vrednosti izgub oziroma izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine brez lepljenja.

Za obravnavo izkoriščenosti pasovne širine sta v tem delu uporabljena dva termina:

- razpoložljiva pasovna širina; pasovna širina linijskega signala, ki podpira DWDM standard in je lahko 2.5 Gbit/s ali 10 Gbit/s,
- rezervirana pasovna širina; pasovna širina, ki je zasedena v linijskem signalu in mora biti zagotovljena za prenos strankinega signala.

Tabela 19 podaja izkoriščenost rezervirane pasovne širine v primeru uporabe čistih DWDM naprav. Pri čistih DWDM napravah je rezervirana pasovna širina enaka razpoložljivi pasovni širini. Izkoriščenost pasovne širine je slaba že pri popolni prometni zasedenosti. Omenjeno velja za vse protokole, razen FC 2G, ki izkoristi razpoložljivo pasovno širino do 80%. Čiste DWDM naprave nudijo najslabšo izkoriščenost razpoložljive in rezervirane pasovne širine.

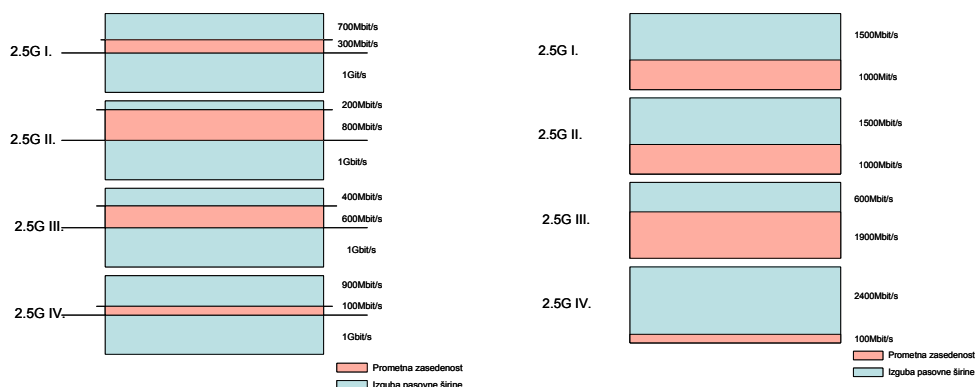
Tabela 19: Analiza rezervirane pasovne širine pri čistih DWDM napravah

Prometna zasedenost (%)					ESCON		FC 2G		FC 1G		GBE 1G	
	ESCON (Mbit/s)	FC 2G (Mbit/s)	FC 1G (Mbit/s)	GBE 1G (Mbit/s)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)
100%	200	2000	1000	1000	622	32,15	2500	80,00	2500	40,00	2500	40,00
95%	190	1900	950	950	622	30,55	2500	76,00	2500	38,00	2500	38,00
90%	180	1800	900	900	622	28,94	2500	72,00	2500	36,00	2500	36,00
85%	170	1700	850	850	622	27,33	2500	68,00	2500	34,00	2500	34,00
80%	160	1600	800	800	622	25,72	2500	64,00	2500	32,00	2500	32,00
75%	150	1500	750	750	622	24,12	2500	60,00	2500	30,00	2500	30,00
70%	140	1400	700	700	622	22,51	2500	56,00	2500	28,00	2500	28,00
65%	130	1300	650	650	622	20,90	2500	52,00	2500	26,00	2500	26,00
60%	120	1200	600	600	622	19,29	2500	48,00	2500	24,00	2500	24,00
55%	110	1100	550	550	622	17,68	2500	44,00	2500	22,00	2500	22,00
50%	100	1000	500	500	622	16,08	2500	40,00	2500	20,00	2500	20,00
45%	90	900	450	450	622	14,47	2500	36,00	2500	18,00	2500	18,00
40%	80	800	400	400	622	12,86	2500	32,00	2500	16,00	2500	16,00
35%	70	700	350	350	622	11,25	2500	28,00	2500	14,00	2500	14,00
30%	60	600	300	300	622	9,65	2500	24,00	2500	12,00	2500	12,00
25%	50	500	250	250	622	8,04	2500	20,00	2500	10,00	2500	10,00
20%	40	400	200	200	622	6,43	2500	16,00	2500	8,00	2500	8,00
15%	30	300	150	150	622	4,82	2500	12,00	2500	6,00	2500	6,00
10%	20	200	100	100	622	3,22	2500	8,00	2500	4,00	2500	4,00
5%	10	100	50	50	622	1,61	2500	4,00	2500	2,00	2500	2,00
PIRPS (%)						16,88		42,00		21,00		21,00

PIRPS = povprečna izkoriščenost rezervirane pasovne širine

Slika 54 prikazuje model izkoriščanja pasovne širine pri transparentnem prenosu štirih 1 Gbit/s in štirih 2 Gbit/s signalov, ki imajo različno prometno obremenjenost. Za vsako prometno obremenjenost se porabi celotna 2.5 Gbit/s pasovna širina, kar predstavlja visoke izgube.

Slika 54: Izkoriščenost rezervirane pasovne širine pri čistih DWDM napravah



Iz slike 54 lahko razberemo sledeči ugotovitvi:

- pri transparentnem prenosu signala bitne hitrosti 1Gbit/s preko 2.5Gbit/s transponderja, imamo v vsakem primeru vsaj 1Gbit/s izgube razpoložljive pasovne širine,
- pri transparentnem prenosu signala bitne hitrosti 2 Gbit/s preko 2.5 Gbit/s transponderja izgube predstavlja razlika med razpoložljivo in dejansko prenašano pasovno širino.

Tabela 20 podaja izkoriščenost rezervirane pasovne širine v primeru uporabe namenskih agregatnih naprav, ki podpirajo kombinacijo DWDM in TDM tehnologije. TDM tehnologija omogoča časovno multipleksiranje pritočnih signalov nižjih bitnih hitrosti v signale višjih bitnih hitrosti in nato prenos le teh preko skupnega prenosnega medija.

TDM tehnologija, ki se uporablja v namenskih agregatnih napravah, ne omogoča protokolov VCAT in LCAS, kar v primerjavi z univerzalnimi vozlišči nekoliko poslabša izkoriščenost rezervirane pasovne širine. Po TDM principu zlog po zlog se namreč multipleksirajo tudi proste časovne reže. Zato je zahtevana pasovna širina za vse protokole enaka, ne glede na trenutno prometno zasedenost. Tako je za prenos ESCON kanalov, ne glede na prometno zasedenost, potrebna 200Mbit/s, za FC 2G 2500 Mbit/s ter GBE 1G in FC 1G 1000Mbit/s pasovna širina. Pri popolni prometni zasedenosti (100%) je za ESCON, FC 1G in GBE 1G izkoriščenost pasovne širine 100%. V primeru ESCON kartice z več vmesniki so v primeru uporabe samo enega vmesnika vsi ostali še na razpolago za dodatne prometne potrebe. Zato v tem primeru ne moremo govoriti o izgubi pasovne širine. Tudi v primeru TDM kartice z več vmesniki (na primer osem) za priključitev FC 1G ali GBE 1G velja enako.

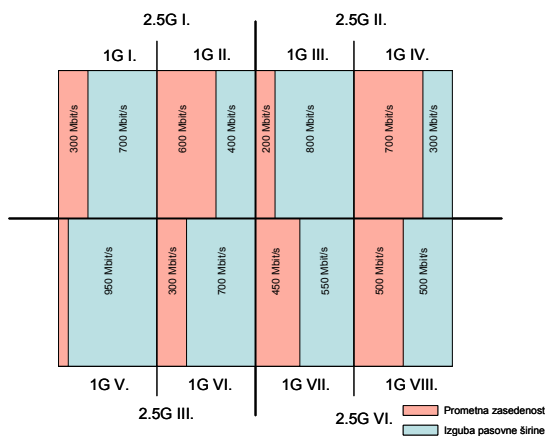
Tabela 20: Analiza rezervirane pasovne širine pri namenskih agregatnih napravah

					ESCON		FC 2G		FC 1G		GBE 1G	
Prometna zasedenost (%)	ESCON (Mbit/s)	FC 2G (Mbit/s)	FC 1G (Mbit/s)	GBE 1G (Mbit/s)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)
100%	200	2000	1000	1000	200	100,00	2500	80,00	1000	100,00	1000	100,00
95%	190	1900	950	950	200	95,00	2500	76,00	1000	95,00	1000	95,00
90%	180	1800	900	900	200	90,00	2500	72,00	1000	90,00	1000	90,00
85%	170	1700	850	850	200	85,00	2500	68,00	1000	85,00	1000	85,00
80%	160	1600	800	800	200	80,00	2500	64,00	1000	80,00	1000	80,00
75%	150	1500	750	750	200	75,00	2500	60,00	1000	75,00	1000	75,00
70%	140	1400	700	700	200	70,00	2500	56,00	1000	70,00	1000	70,00
65%	130	1300	650	650	200	65,00	2500	52,00	1000	65,00	1000	65,00
60%	120	1200	600	600	200	60,00	2500	48,00	1000	60,00	1000	60,00
55%	110	1100	550	550	200	55,00	2500	44,00	1000	55,00	1000	55,00
50%	100	1000	500	500	200	50,00	2500	40,00	1000	50,00	1000	50,00
45%	90	900	450	450	200	45,00	2500	36,00	1000	45,00	1000	45,00
40%	80	800	400	400	200	40,00	2500	32,00	1000	40,00	1000	40,00
35%	70	700	350	350	200	35,00	2500	28,00	1000	35,00	1000	35,00
30%	60	600	300	300	200	30,00	2500	24,00	1000	30,00	1000	30,00
25%	50	500	250	250	200	25,00	2500	20,00	1000	25,00	1000	25,00
20%	40	400	200	200	200	20,00	2500	16,00	1000	20,00	1000	20,00
15%	30	300	150	150	200	15,00	2500	12,00	1000	15,00	1000	15,00
10%	20	200	100	100	200	10,00	2500	8,00	1000	10,00	1000	10,00
5%	10	100	50	50	200	5,00	2500	4,00	1000	5,00	1000	5,00
PIRPS (%)						52,50		42,00		52,50		52,50

PIRPS = povprečna izkoriščenost rezervirane pasovne širine

Slika 55 prikazuje izkoriščanja pasovne širine pri prenosu štirih 1 Gbit/s signalov, ki imajo različno prometno obremenjenost preko namenske agregatne naprave, ki podpira poleg DWDM tudi TDM tehnologijo. Razpoložljiva pasovna širina primera na sliki 30 je 10 Gbit/s (4 X 2.5 Gbit/s). Razpoložljivo pasovno širino določa linijska kartica, ki je v tem primeru namenjena prenosu 10 Gbit/s signala. Takšne linijske kartice so specificirane in upoštevane pri določitvi stroškov za hrbtenično telekomunikacijsko omrežje ELES. Za vsako prometno obremenjenost se porabi pasovno širino 1Gbit/s, ne glede na trenutno prometno obremenjenost posameznega protokola. To pasovno širino smo označili kot rezervirano. Izguba pasovne širine je zato manjša, kot je to v primeru transparentnega prenosa preko 2.5 Gbit/s transponderjev.

Slika 55: Izkoriščenost pasovne širine pri namenskih agregatnih napravah



V primeru uporabe univerzalnih vozlišč, ki omogočajo VCAT in LCAS, se lahko zelo približamo zahtevani pasovni širini za posamezne prometne zasedenosti. Zahtevano pasovno širino se doseže z navideznim lepljenjem koristne vsebine SDH signala. Navidezno zlepljena vsebina predstavlja rezervirano pasovno širino. Zaradi dokaj goste granulacije pasovne širine, ki temelji na poljubnih navideznih lepljenih $n \times VC-3$ (50Mbit/s) in $n \times VC-4$ (155Mbit/s), se za vsako prometno potrebo zelo približamo zahtevani pasovni širini, kar pomeni zelo dobro izkoriščenost rezervirane pasovne širine. Ker je rezervirana pasovna širina zelo dobro izkoriščena, lahko istočasno v isti valovni dolžini, ki predstavlja razpoložljivo pasovno širino, prenašamo večje število kanalov, kot je to v primeru transparentnega prenosa ali pri uporabi kombinacije DWDM in TDM tehnologije. Tabela 21 podaja rezultate izkoriščenosti rezervirane pasovne širine pri različnih prometnih potrebah z uporabo univerzalnih vozlišč.

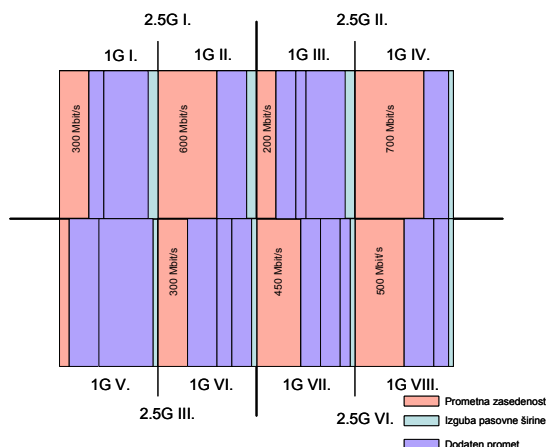
Tabela 21: Analiza izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine pri univerzalnih vozliščih

Prometna zasedenost (%)					ESCON		FC 2G			FC 1G			GBE 1G		
	ESCON (Mbit/s)	FC 2G (Mbit/s)	FC 1G (Mbit/s)	GBE 1G (Mbit/s)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana zlepljena vsebina (Mbit/s)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana zlepljena vsebina (Mbit/s)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)	Rezervirana zlepljena vsebina (Mbit/s)	Rezervirana pasovna širina (Mbit/s)	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine (%)
100%	200	2000	1000	1000	200	100,00	VC-4-14v	2170	92,17	VC-4-7v	1085	92,17	VC-4-7v	1085	92,17
95%	190	1900	950	950	200	95,00	VC-4-14v	2170	87,56	VC-4-7v	1085	87,56	VC-4-7v	1085	87,56
90%	180	1800	900	900	200	90,00	VC-4-12v	1860	96,77	VC-4-6v	930	96,77	VC-4-6v	930	96,77
85%	170	1700	850	850	200	85,00	VC-4-11v	1705	99,71	VC-4-6v	930	91,40	VC-4-6v	930	91,40
80%	160	1600	800	800	200	80,00	VC-4-11v	1705	93,84	VC-4-6v	930	86,02	VC-4-6v	930	86,02
75%	150	1500	750	750	150	100,00	VC-4-10v	1550	96,77	VC-4-5v	775	96,77	VC-4-5v	775	96,77
70%	140	1400	700	700	150	93,33	VC-4-10v	1550	90,32	VC-4-5v	775	90,32	VC-4-5v	775	90,32
65%	130	1300	650	650	150	86,67	VC-4-9v	1395	93,19	VC-4-5v	775	83,87	VC-4-5v	775	83,87
60%	120	1200	600	600	150	80,00	VC-4-8v	1240	96,77	VC-4-4v	620	96,77	VC-4-4v	620	96,77
55%	110	1100	550	550	150	73,33	VC-4-8v	1240	88,71	VC-4-4v	620	88,71	VC-4-4v	620	88,71
50%	100	1000	500	500	100	100,00	VC-4-7v	1085	92,17	VC-4-4v	620	80,65	VC-4-4v	620	80,65
45%	90	900	450	450	100	90,00	VC-4-6v	930	96,77	VC-4-3v	465	96,77	VC-4-3v	465	96,77
40%	80	800	400	400	100	80,00	VC-4-6v	930	86,02	VC-4-3v	465	86,02	VC-4-3v	465	86,02
35%	70	700	350	350	100	70,00	VC-4-5v	775	90,32	VC-4-3v	465	75,27	VC-4-3v	465	75,27
30%	60	600	300	300	100	60,00	VC-4-4v	620	96,77	VC-4-2v	310	96,77	VC-4-2v	310	96,77
25%	50	500	250	250	50	100,00	VC-4-4v	620	80,65	VC-4-2v	310	80,65	VC-4-2v	310	80,65
20%	40	400	200	200	50	80,00	VC-4-3v	465	86,02	VC-4-2v	310	64,52	VC-4-2v	310	64,52
15%	30	300	150	150	50	60,00	VC-4-2v	310	96,77	VC-4-2v	310	48,39	VC-4-1v	155	96,77
10%	20	200	100	100	50	40,00	VC-4-2v	310	64,52	VC-4-1v	155	64,52	VC-4-1v	155	64,52
5%	10	100	50	50	50	20,00	VC-4-1v	155	64,52	VC-4-1v	155	32,26	VC-4-1v	155	32,26
PIRPS (%)						79,17			89,52			81,81			84,23

PIRPS = povprečna izkoriščenost rezervirane pasovne širine

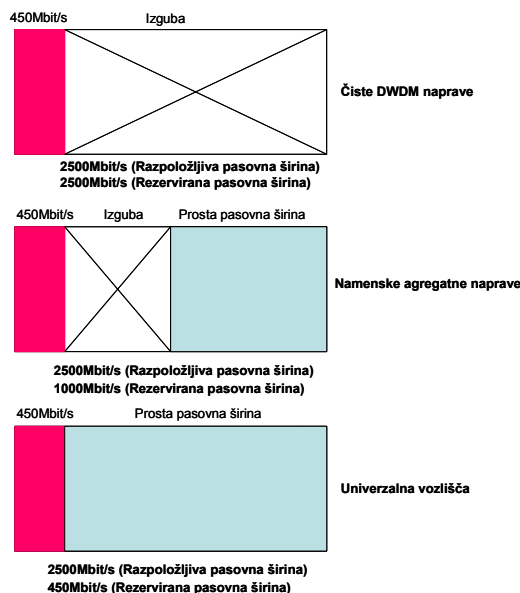
Slika 56 prikazuje model izkoriščanja pasovne širine pri prenosu štirih 1 Gbit/s signalov, ki imajo različno prometno obremenjenost preko univerzalnega vozlišča, ki podpira VCAT in LCAS. Za vsako prometno obremenjenost se porabi približno toliko pasovne širine, kot je za to potrebno. Poleg navidezno zlepljene vsebine, ki jo narekujejo prometne potrebe štirih signalov (označeno z vijoličasto barvo), je možno prenašati še vsebino, ki je označena s temno modro barvo. Kljub navideznemu lepljenju ostane še nekaj neizkoriščene pasovne širine. Le ta je označena s svetlo modro barvo. Kljub omenjeni izgubi pasovne širine je izkoriščenost zelo dobra.

Slika 56: Izkoriščenost pasovne širine pri univerzalnih vozliščih



Slika 57 podaja povzetek o izkoriščenosti rezervirane in razpoložljive pasovne širine pri prenosu gigabitnega signala, ki trenutno predstavlja 450 Mbit/s prometno obremenjenost. Najboljšo izkoriščenost nudijo univerzalna vozlišča.

Slika 57: Primerjava izkoriščenosti rezervirane pasovne širine



Če se za zaključek vrnemo na primer prometne obremenjenosti na sliki 53, lahko na osnovi podatka o največjem prometu 109.16 Mbit/s definiramo, da je potrebno tej stranki ponuditi zaradi določene rezerve vsaj 150 Mbit/s pasovne širine. Z uporabo podatkov v tabelah 19, 20 in 21 lahko razberemo, kakšne so izgube rezervirane pasovne širine pri posameznih tehnologijah. Rezultate podaja tabela 22.

Tabela 22: Izkoriščenost pasovne širine za promet 150Mbit/s

	Prometna zasedenost [%]	Bitna hitrost [Mbit/s]	Razpoložljiva pasovna širina [Mbit/s]	Rezervirana pasovna širina [Mbit/s]	Izkoriščenost rezervirane pasovne širine [%]
Čiste DWDM naprave	15%	150	2500	2500	6
Namenske agregatne naprave	15%	150	2500	1000	15
Univerzalna vozlišča	15%	150	2500	155	96,77

6 Zaključek

Telekomunikacijska industrija zaseda velik del svetovnega gospodarstva. Področje telekomunikacij se stalno razvija tako v smislu razvoja in proizvodnje telekomunikacijskih naprav, kakor tudi v smislu razvoja in razširitev zmogljivejših optičnih omrežij. Da je optično omrežje res zmogljivo ter da omogoča najsodobnejše telekomunikacijske storitve, je potrebno ločiti trenutno dosegljive tehnologije ter poznati prednosti in slabosti le teh.

Ugotovili smo, da prometne potrebe v zmogljivejših optičnih omrežjih naglo rastejo. Glavni razlog je strma rast internetnega prometa. Omenjeno dejstvo sili k adaptaciji zmogljivejših optičnih omrežij tako, da so sposobna zagotoviti velike zahteve po pasovnih širinah.

Osnovna komponenta zmogljivejšega optičnega omrežja je optično vlakno. S stališča pasovne širine nudi optično vlakno praktično neomejene širine. Seveda pa se je potrebno zavedati tudi omejitev optičnih vlaken, ki jih predstavljajo fizikalni pojavi, kot sta slabljenje in disperzija. V določenih obsegih je v zmogljivejših optičnih omrežjih možno fenomen slabljenja »odpraviti« z optičnimi ojačevalniki in regeneratorji, fenomen disperzije pa s kompenzatorji disperzije. Optično vlakno je samo po sebi mrtva infrastruktura. Če se po optičnem vlaknu ne prenaša svetloba, imenujemo takšna optična vlakna temna vlakna. Da optična infrastruktura zaživi, je potrebno dodati telekomunikacijske naprave, ki podpirajo določene tehnologije.

Tehnologije, primerne za zmogljivejša optična omrežja, lahko delimo na zastarela, obstoječa, omrežja nove generacije in omrežja prihodnosti. Med zastarele tehnologije lahko vsekakor štejemo PDH tehnologijo. Le ta je primerna za točka-točka topologije optičnih omrežij, ki so namenjena prenosu govora. Obravnava oziroma razporeditev standardne SDH tehnologije je nekoliko bolj težavna. Ker je bila standardna SDH tehnologija razvita in implementirana za prenos govora, je s stališča prenosa podatkov zastarela. Kljub vsemu pa je ta tehnologija zasnova, na kateri so se in se še vedno razvijajo nove aplikacije. SDH je še vedno zelo razširjena tehnologija in jo zato lahko definiramo kot obstoječo tehnologijo. Omenimo prvi korak, ki je standardno SDH tehnologijo popeljal bližje svetu prenosa podatkov. To je možnost zaporednega lepljenja koristne vsebine. Ker je izguba razpoložljive pasovne širine pri prenosu podatkov preko SDH sistemov z zaporednim lepljenjem relativno visoka, je bilo potrebno namestiti večje število optičnih omrežij. Vsako omrežje je zahtevalo svoj par optičnih vlaken. Ker optični

kabli, nameščeni pred desetletjem in več, niso vsebovali večjega števila optičnih vlaken, je začelo le teh primanjkovati. Porodila se je ideja po prenosu večjega števila valovnih dolžin po istem optičnem vlaknu. Razvili in implementirali so se prvi WDM sistemi prenosa. Bistvena lastnost WDM tehnologije je, da omogoča istočasen in transparenten prenos optičnih signalov preko skupnega optičnega vlakna tako, da se prenašajo medsebojno neodvisno. Transparentnost velja tako s stališča protokola, kakor tudi s stališča bitne hitrosti. Zato se preko posameznih valovnih dolžin prenašajo formirani SDH signali, kakor tudi razni podatkovni formati, kot so GbE; FICON, Fibre Channel in podobno. Ker je WDM tehnologija draga, z naraščanjem in prenosom podatkovnega prometa preko lastnih valovnih dolžin ni smotrna. WDM tehnologijo obravnavamo kot obstoječo. Zopet se je postavilo vprašanje izkoriščenosti razpoložljive pasovne širine. Za posebne namene so se razvile naprave, ki podpirajo tako SDH kakor tudi WDM tehnologijo. Govorimo o namenskih agregatnih napravah. Pritočne signale nižjih bitnih hitrosti se v teh napravah najprej časovno multipleksira v signale višjih bitnih hitrost ter nato prenaša v svoji lastni valovni dolžini. Izkoriščenost posamezne valovne dolžine je tu že veliko boljša. Obstaja pa značilnost podatkovnega prometa, da le ta ni ves čas konstanten, ampak se časovno zelo spreminja. Z razvojem tehnologije lepljenja koristne vsebine smo prišli do tako imenovanega virtualnega lepljenja koristne vsebine. Virtualno lepljenje ni več zaporedno. To pomeni, da se pritočne signale preslika v manjše enote, ki se po zmogljivejšem optičnem omrežju prenašajo neodvisno in se na ciljni destinaciji zopet združijo. Te manjše enote omogočajo, da se podatki prenašajo v hranilnikih, ki so zelo blizu dejanski potrebni pasovni širini. V istem času, kot je bilo razvito virtualno lepljenje, sta se razvila tudi protokola GFP in LCAS. GFP omogoča preslikanje vseh podatkovnih formatov v SDH hranilnike, medtem ko omogoča LCAS dinamično dodeljevanje pasovne širine. Naprave, ki temeljijo na SDH platformi in podpirajo omenjene tri protokole (VCAT, GFP in LCAS), se imenujejo SDH naprave nove generacije. SDH napravo nove generacije, ki podpira tudi WDM tehnologijo, smo imenovali univerzalna vozlišča. Optično omrežje, zgrajeno z univerzalnimi vozlišči, imenujemo optično omrežje nove generacije.

Optična omrežja nove generacije so tudi optična transportna omrežja OTN. Optična transportna omrežja so tista, ki podpirajo optično transportno hierarhijo. Le ta je bila standardizirana pred nekaj leti. Optična transportna hierarhija OTH je trenutno namenjena prenosu optičnih signalov visokih bitnih hitrosti na zelo dolge razdalje. Zelo dolge razdalje pogojuje dejstvo, da OTN podpira prenos signalov preko več valovnih dolžin, od katerih omogoča vsaka do 40 Gbit/s hitrosti. Bistvena razlika med standardno WDM tehnologijo ter OTH hierarhijo je v tem, da so optični signali v OTH opremljeni z več glavami, ki omogočajo boljši nadzor ter upravljanje telekomunikacijskega prometa.

Optična omrežja prihodnosti bodo zgrajena z napravami, ki bodo procesiranje signalov opravljale na optičnem in ne več na električnem nivoju. S tem se bodo povečale bitne hitrosti enega signala preko 100 Gbit/s. Takšna optična omrežja se imenujejo fotonska paketno orientirana omrežja in trenutno delujejo le v laboratorijih.

Za pravilno odločitev, katero tehnologijo implementirati v zmogljivem optičnem omrežju, je potrebno poleg vprašanja izkoriščenosti pasovne širine posvetiti pozornost še nekaterim pomembnim vprašanjem, kot so topologije omrežja, zaščitne sheme, načini multipleksiranja, podprti vmesniki in določene splošne ter dodatne funkcionalnosti, ki jih določena tehnologija podpira. V tem delu je opravljena primerjava med tremi različnimi napravami, ki podpirajo različne tehnologije. To so čiste DWDM naprave, namenske agregatne naprave ter univerzalna vozlišča. Telekomunikacijske naprave OTH hierarhije

zaradi svojih dimenzij, ki trenutno presegajo celo evropske dimenzije, v primerjavi niso upoštevane. Z naraščanjem podatkovnega prometa pa se pričakuje ta bo ta tehnologija v relativno kratkem času zanimiva tudi za nacionalna zmogljivejša optična omrežja. Prav tako niso upoštevane telekomunikacijske naprave, ki so še v fazi razvoja.

Primerjava omenjenih treh tipov telekomunikacijskih naprav pove, da imajo najširši spekter tehničnih lastnosti univerzalna vozlišča. S stališča podpore različnih tehničnih lastnosti sledijo namenske agregatne naprave ter na zadnjem mestu čiste DWDM naprave.

V primeru, ko telekomunikacijski operater gradi popolnoma novo zmogljivo optično omrežje, v katerem bo potekal prenos govora in podatkov, je priporočljiva izbira univerzalnih vozlišč. Univerzalna vozlišča namreč omogočajo najširši spekter pritočnih vmesnikov, topologij omrežja, zaščitnih shem ter sodobnih protokolov, ki omogočajo optimalno izkoriščenost pasovne širine ter lažje upravljanje naprav in omrežja. V primeru, da bo namen zmogljivega optičnega omrežja prenos podatkov, medtem ko za prenos govora že obstaja dovolj zmogljivo optično omrežje so primerne namenske agregatne naprave. Namenske agregatne naprave se namestijo za vzporedno delovanje. Namenske agregatne naprave so zelo primerne tudi za podjetja, kot so na primer banke, ki gradijo svoja lastna podatkovna omrežja, medtem ko uporabljajo za prenos govora storitve, ki jih nudi telekomunikacijski operater. Uporaba čistih DWDM naprav je smotrna pri prenosu velikih količin podatkov na dolge razdalje. DWDM tehnologija omogoča tak prenos z zelo majhnim številom vmesnih optičnih ojačevalnikov. Ta tehnologija je primerna tudi tedaj, ko operater nima težav z agregacijo telekomunikacijskega prometa, temveč ima težave z razpoložljivimi optičnimi vlakni.

7 Literatura

1. Burris Anne M. Service provider strategy. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 313 str.
2. Carr Houston H.: The management of telecommunications. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 2003. 810 str.
3. Clayton Jade: McGraw-Hill illustrated Telecom dictionary. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 750 str.
4. Couch Leon W.: Digital and analog communication systems. 6th ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2000, 2001. 742 str.
5. Drajić Dušan: Uvod u statističku teoriju telekomunikacija. Beograd: Akademska misao, 2003. 502 str.
6. Dutta, Achyut K.: WDM technologies. Amsterdam: Academic Press, cop., 2002. 680 str.
7. El Mahdy Galal: Managing telecommunications and networking technologies in the 21st century: issues and trends. Hershey: Idea Group, 2001. 268 str.
8. Fenexrol Michel: Telecommunication in the 21st century. London: Springer, 1998. 222 str.
9. Galis Alex: Multi-domain communications management systems. Boca Raton: CRC Press, 2000. 330 str.
10. Gradišar Miro, Resinovič Gortan: Informatika v poslovnem okolju. 3. dopol. in razširjen natis. Ljubljana: Ekonomska fakulteta, 2001. 508 str.
11. Grant Gerald: Managing telecommunications and networking technologies in the 21st century. Hershey: Idea Group, 2001. 268 str.

12. Gumaste Ashwin: DWDM Network Design and Engineering Solutions. Indianapolis: Cisco Press, 2003. 346 str.
13. Held Gilbert: High Speed digital transmission networking: covering T/E carrier multiplexing, SONET and SDH. 2nd ed. Chichester: J. Wiley & Sons, 1999. 260 str.
14. Hioki Warren: Telecommunications. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 664 str.
15. Huub van Helvoort: Next Generation SDH/SONET. Chichester: John Wily & Sons, 2005. 240 str.
16. Kartalopoulos Stamatios V.: Fault detectability in DWDM: toward highre signal quality & system reability. New York: IEEE Press, 2001. 156 str.
17. Kartalopoulos Stamatios V.: Next generation SDH/SONET: voice and data. Piscataway: Wiley-Interscience, 2004. 198 str.
18. Krauss Ottmar: DWDM and optical networks. Erlangen: Publicis Corporate Publishing cop.: 2000. 196 str.
19. Loomis David G.: The future of the telecommunications industry. Boston: Kluwer Academic, 1999. 269 str.
20. Lukatela Georgije: Statistička teorija telekomunikacija i teorija informacija. Beograd: Građevinska knjiga, 1981. 784 str.
21. Madden Gary: Emerging telecommunications networks. Cheltenham: Edward Elgar, 2003. 257 str.
22. Marsden Christopher T.: Regulating the global information society. London: Routledge, 2000. 364 str.
23. Olsson Anders: Undersztanding changing telecommunications. Chichester: John Wiley & Suns, 2003. 512 str.
24. Ramaswami Rajiv: Optical networks: a practical perspective. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufman, 2002. 831 str.
25. Ronayne John: Integrated services digital networks from concept of aplication. 2nd ed. London: UCL Press, 1996. 274 str.
26. Russell Travis: Telecommunications protocols. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 427 str.
27. Russel Travis: Telecommunications pocket reference. New York: McGraw-Hill, 2000. 367 str.
28. Shaw James K.: Strategic management in telecommunications. Boston: Artech House, 2000. 394 str.
29. Štular Mitja et al. : Tehnologija dostopovnih omrežij v informacijsko povezani družbi. Ljubljana: Elektrotehniška zveza Slovenije, 2000. 108 str.
30. Vidmar Tone: Informacijsko-komunikacijski sistemi. Ljubljana: Pasadena, 2002. 841 str.
31. Van Grembergen Wim: Information technology evaluation methods and management. Hershey: Idea Group, 2001. 279 str.
32. Young Brian: Digital signal integrity. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 535str.
33. Zerdick Axel: E-economics: Strategies for the digital marketplace. Berlin: Springer, 2000. 330 str.

8 Viri

1. Aste Maurizio et al.: Performance of Optical Packet Switching Nodes in IP Transport Networks. B.k.: Computer Society, 2004. 8 str.

2. Cisco ONS 15454 SDH Reference Manual.
[URL:http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps2006/products_technical_reference_book09186a00801ebb77.html], 30.03.2005
3. Leveraging Transport for Data Services with Virtual Concatenation (VCAT) and Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS).
[URL:http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns341/ns396/ns114/ns99/networking_solutions_white_paper09186a00801e121e.shtml], 15.12.2003
4. Disperzija v optičnem vlaknu. [URL:<http://www.antena.fe.uni-lj.si/~lso/gradivo/OOK/7p-OOK.pdf>]
5. Optical Networking Market Returning to Double-Digit Growth.
[URL:<http://www.kmiresearch.com>], 10.12.2004
6. SAN Extension for Business Continuance.
[URL:http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns378/c649/cdcco nt_0900aecd800ea921.pdf], 27.03.2004

9 Priloge

9.1 Seznam uporabljenih kratic

A	Availability	Razpoložljivost
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Nesimetrični digitalni naročniški vod
ADM	Add & Drop multiplexer	Multiplekser z možnostjo dodajanja in odvzemanja signalov
APS	Automatic Protection Switching	Avtomatski zaščitni mehanizem
ASK		Analiza stroškov in koristi
ATM	Asynchronous Transfer Mode	ATM
AU	Administrative Unit	Administrativna enota
BER	Bit Error Rate	Pogostost bitne napake
C	Container	Hranilnik
CPE	Customer premise equipment	Uporabniška oprema; oprema pri stranki
CRC	Cyclic Redundancy Checking	Parnostna kontrola
CRM	Customer Relationship Management	Upravljanje odnosov s stranko
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Grobo valovno dolžinsko multipleksiranje
DAS	Direct Area Storage	Direktno shranjevanje podatkov
DB	Data Base	Podatkovna baza
DCC	Data Communication Channel	Podatkovni komunikacijski kanal
DRC	Disaster Recovery Center	Center za zaščito podatkov
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Zgoščeno valovno dolžinsko multipleksiranje
ESCON	Enterprise System Connection	
ETH	Ethernet	Ethernet
ETR/CLO	External Timer Reference/Control Link Oscillator	Zunanja časovna referenca/kontrolni oscilator povezave
ETSI	European Telecommunication Standards Institute	Evropski telekomunikacijski institut
FC	Fibre Channel	Optični kanal
FCP	Fiber Channel Protocol	Protol za prenos po optičnem kanalu
FICON	Fibre CONnection	
FMX		Fleksibilni povezovalnik primarne stopnje
GbE	Gigabit Ethernet	
GFP	Generic Framing Procedure	Univerzalna procedura okvirjanja
GDPS	Geographically Dispersed Parallel Sysplex	Geografsko razpršeno omrežje za zaščito podatkov
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
I/O	Input/Output	Vhod/izhod
IP	Internet Protocol	Internetni protokol
IPS	Intelligent Protection Switching	Inteligentno zaščitno preklapljanje
ISC	Inter System Coupling	

ISDN	Integrated Services Digital Network	Digitalno omrežje z integriranimi storitvami
IT		Informacijska tehnologija
ITU	International Telecommunication Union	Mednarodna telekomunikacijska unija
LAN	Local Area Network	Lokalno računalniško omrežje
LCAS	Link Capacity Adjustment Scheme	Mehanizem za regulacijo kapacitete povezav
MAC	Media Access Control	
MPLS	Multiprotocol Label Switching	Večprotokolna komutacija z zamenjavo label
MM	Multimode	Mnogorodovno
MS	Multiplexer Section	Multipleksna sekcija
MSOH	Multiplex Section Overhead	Glava multipleksne sekcije
MS-Spring	Multiplex Section-Shared Protection Rings	Zanka z zaščito multipleksne sekcije
MSP	Multiplex Section Protection	Zaščita multipleksne sekcije
MSP	Multi Service Provisioning Platform	Več-storitvena platforma
MSTP	Multi Service Transport Platform	Več-storitvena transportna platforma
MTBF	Mean Time Between Failure	Povprečni interval med napakami / odpovedmi
MUX	Multiplexer	Multiplekser
OCh	Optical Channel	Optični kanal
OCC	Optical Channel Carrier	Nosilec optičnega kanala
OCG	Optical Channel Group	Skupina optičnih kanalov
ODU-k	Optical Channel Data Unit	Podatkovna enota optičnega kanala
OE		Omrežni element
OMU	Optical Transport Unit	Optični transportna enota
OPU-k	Optical Channel Payload	Koristna vsebina optičnega kanala
OTDM	Optical Time Division Multiplex	Optično časovno multiplksiranje
OTH	Optical Transport Hierachy	Optična transportna hierarhija
OTM	Optical Transport Modul	Optični transportni modul
OTN	Optical Transport Network	Optično transportno omrežje
OTU-k	Optical Channel Transport Unit	Transportna enota optičnega kanala
OS	Operating system	Operacijski sistem
OTDM	Optical Time Domain Multiplexing	Optično časovno razvrščanje
OXC	Optical Cross Connect	Optični prevezovalnik
PCM	Pulse Code Modulation	Pulzno kodna modulacija
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	Plesiohrona digitalna hierarhija
PE		Poslovna enota

POH	Path Overhead	Glava poti
PoS	Packet over Sonet/SDH	Paketni prenos preko SDH
RPR	Resilient Packet Ring	Elastično paketno omrežje
RSOH	Regenerator Section Overhead	Glava regeneratorske sekcije
SAN	Storage Area Network	Omrežno shranjevanje podatkov
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Sinhrona digitalna hierarhija
SDH-NG	Next generation SDH	SDH nove generacije
SM	Single Mode	Enorodovno
SNCP	Subnetwork Connection Protection	Zaščitni povezanih pod-omrežij
SNMP	Simple Network Management Protocol	Preprosti protokol za upravljanje omrežja
SOH	Section Overhead	Glava sekcije
SONET	Synchronous Optical Network	Sinhrono optično omrežje
SRP	Spatial Reuse Protocol	
STM	Synchronous Transfer Mode	Sinhroni način prenosa
STP	Spanning tree protokola	Zaščitni mehanizem z »drevesno« delitvijo
TDM	Time Division Multiplex	Časovno multipleksiranje
TMS	Telecommunication Management System	Telekomunikacijski nadzorno
TU	Tributary Unit	Tributarna enota
TUG	Tributary Unit Group	Skupina tributarnih enot
VC	Virtual Container	Virtualni hranilnik
VCAT	Virtual Concatenation	Virtualno lepljenje
VLAN	Virtual LAN	Virtualni LAN
VPN	Virtual Private Network	Navidezno zasebno omrežje
WAN	Wide Area Network	Prostrano omrežje
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Valovno dolžinsko multipleksiranje