



TEKNIikka JA LIIKENNE

Tietotekniikka

Tietoliikennetekniikka

OPINNÄYTETYÖ

UUDEN SUKUPOLVEN OPTISET SIIRTOVERKOT

**Työn tekijä: Jukka Samonen
Työn ohjaaja: Timo Kasurinen
Työn ohjaaja: Timo Kasurinen**

Työ hyväksytty: __. __. 2009

**Etunimi Sukunimi
lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun tietoliikennetekniikan laitokselle Helsingissä 2009.

Kiitän työn aiheesta, ohjauksesta ja kärsivällisyydestä lehtori Timo Kasurista.

Lisäksi kiitän perhettäni tuesta tätä työtä tehdessäni sekä ystäviäni kannustuksesta ja yleisestä huolenpidosta työn valmistumisen suhteen.

Helsingissä 15.4.2009

Jukka Samonen

OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Jukka Samonen	
Työn nimi: Uuden sukupolven optiset siirtoverkot	
Päivämäärä: 15.4.2009	Sivumäärä: 37 s. + 1 liite
Koulutusohjelma: Tietotekniikka	Ammatillinen suuntautuminen: Tietoliikennetekniikka
Työn ohjaaja: lehtori Timo Kasurinen	
Työn ohjaaja: lehtori Timo Kasurinen	
<p>Tässä insinöörityössä tutkittiin optisen tiedonsiirron tarjoamia mahdollisuuksia lähitulevaisuudessa. Työssä esitellään optinen tiedonsiirto standardi OTN nykyisellään ja sen mahdollista tulevaa rakennetta. Työssä käydään läpi optisessa tiedonsiirrossa käytettäviä kuitutyyppejä, aallonpituusmultipleksointitekniikoita ja tietoliikennelaitteita sekä niiden uusimpia innovaatioita.</p> <p>Standardointi koskien uutta 100GbE oli tätä työtä tehtäessä vielä kesken. Tässä insinöörityössä esitelläänkin HSSG-tutkimusryhmän asettamia tavoitteita tulevaisuuden verkkoratkaisujen osalta sekä heidän ja muutamien muiden tahojen tämän hetken vaihtoehtoisia ratkaisuita, kuinka saavuttaa 100 Gbit/s tiedonsiirtonopeus.</p> <p>Tulevaisuuden runko- ja liityntäverkkoratkaisut tulevat perustumaan yksinomaan valokaa-peliin ja sen tarjoaman suuren siirtokapasiteettiin. Tiedonsiirtonopeuksien kasvaessa verkkojen hallinta ja läpinäkyvyys tulevat entistä tärkeimmiksi tekijöiksi. Uuden sukupolven optinen tiedonsiirto standardi (NG-OTN) tulee tarjoamaan edellä mainittujen seikkojen lisäksi luotettavan alustan nopeille laajakaistaisille verkoille.</p>	
Avainsanat: OTN, WDM, 40GbE, 100GbE, Optiset komponentit	

ABSTRACT

Name: Jukka Samonen	
Title: Next-generation optical transport network	
Date: 15.4.2009	Number of pages: 37 + 1 attachment
Department: Information Technology	Study Programme: Telecommunications
Instructor: Timo Kasurinen, Senior lecturer	
Supervisor: Timo Kasurinen, Senior lecturer	
<p>This graduated study examines optical transport technology possibilities in near future. This thesis presents optical transport network standard OTN in its present and some contingent future forms. This thesis introduces optical transport fiber types, wavelength division multiplexing technologies and optical telecommunication equipments and also latest innovations for all of these.</p> <p>When making this graduated study the standardization deployment for new 100GbE was still unfinished. This thesis present high speed study group (HSSG) objects for future networks and also shows some alternative solutions to how to achieve 100 Gbit/s data stream.</p> <p>The future trunk and access network solutions are going to be found on fiber cables because it has so enormous transmission capacity. When data transmission rapidity are growing, its getting even more important to control networks. Next-generation optical transport network standard (NG-OTN) is going to serve this and much more.</p>	
Keywords: OTN, WDM, 40GbE, 100GbE, Optical Components	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET JA KÄSITTEET

1	JOHDANTO	1
2	OPTISET KUIDUT	2
2.1	Optisten verkkojen standardointi ja tutkimus	2
2.2	Optisen kuidun hyötynäkökohdat	4
2.3	Optisten kuitujen rakenne ja perustyytit	5
2.4	Kuitujen optiset ominaisuudet	6
2.5	Tärkeimmät kuitutyypit NG-OTN:n kannalta	8
2.5.1	<i>Yksimuotokuidut</i>	9
2.5.2	<i>Monimuotokuidut</i>	10
3	WDM-TEKNIIKAN ESITTELY JA OPTISET KOMPONENTIT	11
3.1	WDM:n toiminnan periaate	12
3.2	Keskeisimmät WDM-tekniikat	13
3.3	Optiset lähettimet	15
3.4	Optiset vahvistimet	16
3.5	OADM / ROADM	17
3.6	Optiset moduulit	18
4	OTN:N OMINAISUUKSIEN ESITTELY	21
4.1	OTN:n verkkokerrokset ja niiden toiminta	21
4.2	OTN:n kehysrakenne	24
4.3	Linjanopeudet	25
4.4	FEC	27
4.5	Linjakoodaus	29
4.6	Modulointi	30
5	MAHDOLLISIA NGN VERKKORAKENTEITA	31
6	YHTEENVETO	34
	VIITELUETTELO	36

LYHENTEET JA KÄSITTEET

3R	<i>Reamplification, Reshaping and Retiming.</i> Regenerointi valopulssin muodolle.
BER	<i>Bit Error Rate.</i> Bittivirhesuhde.
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing.</i> Karkea aallonpituuskaistanjako.
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing.</i> Tiheä aallonpituuskaistanjako.
DP-QPSK	<i>Dual-Polarization-Quadrature Phase Shift Keying.</i> Modulointi tapa.
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier.</i> Erbium-seostettuihin kuituihin perustuva optinen vahvistin.
FEC	<i>Forward Error Correction.</i> Virheenkorjaus etukäteen laskettujen bittien perusteella.
FWM	<i>Four Wave Mixing.</i> Neliaaltosekoitus.
GMPLS	Generalized multiprotocol label switching. Reititystekniikka.
HDTV	<i>High Definition TV.</i> Teräväpiirtotelevisio.
HSSG	<i>High Speed Study Group.</i> Tutkimusryhmä.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i> Standardointiorganisaatio.
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector.</i> Standardointiorganisaatio.
LAN	<i>Local Area Network.</i> Lähiverkko.
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.</i>
LED	<i>Light Emitting Diode.</i> Loistediodi.
MAC	<i>Media Access Control.</i> OSI-mallin kerros.
OADM	<i>Optical Add/Drop Multiplexer.</i> Optinen lisää/poista kanavointilaite.
OADM&P	<i>Operation, Administration, Maintenance and Provisioning.</i> Verkon laitteen käyttöä, hallintaa, ylläpitoa ja hankinta.
OCh	<i>Optical Channel.</i> Optinen kanava.
ODU	<i>Optical Data Unit.</i> Optinen tieto yksikkö.
OIF	<i>Optical Internetworkin Forum.</i> Tietoliikennejärjestö.
OMS	<i>Optical Multiplexing Section.</i> Optinen kanavointi osuus.

OPU	<i>Optical Payload Unit.</i> Optinen hyötykuorma yksikkö.
OSNR	<i>Optical Signal Noise Ratio.</i> optinen signaali-kohinasuhde.
OTN	<i>Optical Transport Network.</i>
OTS	<i>Optical Transmission Section.</i> Optinen lähetys osuus.
OTU	<i>Optical Transport Unit.</i> Optinen siirtoverkon yksikkö.
PLS	<i>Physical Layer Signaling.</i> Fyysisenkerroksen signalointi.
naOH	<i>non-associated overhead.</i> Ei-yhteenkuuluva tunnisteosa.
NGN	<i>Next Generation Network.</i> Seuraavan sukupolven tietoverkko.
RS	<i>Reed-Salomon.</i> Koodausmenetelmä.
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer.</i> Uudelleen konfiguroitava optinen lisää/poista kanavointilaite.
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy.</i> Tietoliikennestandardi.
SONET	<i>Synchronous Optical Network.</i> Am.tietoliikennestandardi.
SPM	<i>Self-Phase Modulation.</i> Modulointimenetelmä.
TCM	<i>Tandem Connection Monitoring.</i> Kaksoisyhteysvalvonta.
TDM	<i>Time Division Multiplexing.</i> Aikajakoinen kanavointi.
UWDM	<i>Ultra dense Wavelength Division Multiplexing.</i> Ultratiheä aallonpituuskanavointi.
VCSEL	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser.</i> Laser-tyyppi.
VoD	<i>Video-on-Demand.</i> Tilausvideo.
WAN	<i>Wide Area Network.</i> Laajaverkko.
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing.</i> Aallonpituuskanavointi.

1 JOHDANTO

Tietoliikenneverkkojen siirtokapasiteetin tarve kasvaa yhä kiihtyvällä vauhdilla yltäen jo yli sadan prosentin vuosittaisen datamäärän lisääntymiseen. Suuntaus johtuu teknologian kehityksestä ja suurempaa siirtokapasiteettia tarvitsevien palveluiden kasvusta. Näitä palveluita ovat mm. VoD (Video-on-Demand), HDTV (High Definition TV) ja videopelien siirtyminen verkkoon.

Tiedonsiirrossa piirikytkentäiset verkot alkavat olla historiaa, kun pakettikytkentäiset IP-verkot ovat levinneet vallitsevaksi teknologiaksi. Seuraava merkittävä muutos tulee olemaan valokaapeleiden yleistyminen muuallekin kuin vain runkoverkkojen siirtoteinä. Tämä suuntaus on voimakkaasti nähtävissä mm. Japanissa, Ruotsissa ja myös Suomen uudisrakennuskohteissa. Kuidun tullessa lähemmäs loppukäyttäjää kuparisen parikaapelin asettamat siirtokapasiteetti ongelmat tulevat poistumaan. Suomessa valtioneuvos on tehnyt periaatepäätöksen, joka takaa 100 Mbit/s laajakaistayhteyden kaikkialla vuonna 2015. Tämä tulee edellyttämään nopeampien kuituyhteyksien vetämistä myös haja-asutusalueille.

Jo vuonna 1998 alkunsa saaneen OTN-standardin tavoitteena oli yhdistää SDH/SONET-tekniikoiden etuja WDM:n (Wavelength Division Multiplexing) mahdollistamaan suureen kapasiteettiin. Tässä työssä käsitellään uuden sukupolven optisen tiedonsiirtoverkon (NG-OTN) tarvittavia ominaisuuksia ja haasteita. WDM-tekniikka yhdistettynä täysin optisesti toimiviin kanavointilaitteisiin mahdollistaa usean eri aallonpituuden siirtämisen samassa kuidussa ilman sähköisiä häiriöitä. OTN-standardi G.709 tukee jo tällä hetkellä 40 Gbit/s nopeuksia, siten markkinoilta löytyy useita valmistajia jotka pystyvät toimittamaan kyseiseen siirtonopeuteen pystyviä laitteita. Tulevaisuuden haasteet tulevat siirtymään suunnitteilla olevalle 100 Gbit/s yhteydelle, kun nykyinen OTN-standardi ja laitteistot eivät vielä tue tämän suuruisia siirtonopeuksia. Nopeuden kasvaessa kuituverkkojen hallintojärjestelmien ja toimintojen reaaliaikainen seuranta tulee yhä tärkeämmäksi. OTN on nykypäivän sekä tulevaisuuden ratkaisu nopeaan ja luotettavaan tiedonsiirtoon.

2 OPTISET KUIDUT

2.1 Optisten verkkojen standardointi ja tutkimus

Standardointi on erityisen tärkeää tietoliikennetekniikassa, sillä globaalien verkkojen toimivuus edellyttää yhteisiä kansainvälisiä suosituksia. Tässä työssä tärkeimmät OTN:ää koskevat suositukset tulevat ITU-T:ltä (International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector). ITU-T:n suositusten tunnisteen ovat muodoltaan x.nnn, missä x on iso kirjain ja nnn on tunnisteen numerosarja. /1, s.3-4./

Jo vuonna 2001 vahvistettiin ITU-T toimesta mm. seuraavat OTN:ää koskevat standardit:

- G.709, G.7041 rakenne ja kanavointi
- G.872, G.8080 arkkitehtuuri
- G.874 OTN:n hallinnan elementit
- G.798, G.806 laitteiden toiminta
- G.873.1 OAM

Uuden sukupolven OTN-järjestelmiä tutkivat ITU-T:n tutkimusryhmät SG11, SG13 ja SG15. IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.3ba tutkimusryhmä aloitti vuonna 2007 projektin, jossa keskitytään standardien kehittämiseen 40 Gbit/s ja 100 Gbit/s yhteyksille. 802.3ba tunnetaan myös nimellä HSSG (High Speed Study Group). Tämän tutkimusryhmän tavoitteena ovat /5, s.7-10./

- tukea kahden laitteen välistä samanaikaista interaktiivisuutta.
- tukea BER (Bit Error Rate), joka on 10⁻¹² tai parempi MAC/PLS palveluiden rajapinnassa.
- tarjota tarkoituksenmukainen tuki OTN:lle.
- tukea 40 Gbit/s MAC datanopeutta.
- tarjota fyysisentason ominaisuuksia, jotka tukevat 40 Gbit/s operaatioita seuraavilla etäisyyksillä:

- ainakin 10 km yksimuotokuidulla
 - ainakin 100 m OM3 monimuotokuidulla
 - ainakin 10 m kuparijohtoa käyttäen
- tukea 100 Gbit/s MAC datanopeutta.
 - tarjota fyysisentason ominaisuuksia, jotka tukevat 100 Gbit/s operaatioita seuraaville etäisyyksille:
 - ainakin 40 km yksimuotokuidulla
 - ainakin 100 m OM3 monimuotokuidulla
 - ainakin 10 m kuparijohtoa käyttäen.

HSSG:n tavoite on saada projekti päätökseen vuoden 2010 alussa. Tulen selvittämään työssäni tarkemmin tavoitteiden sisältöä. Taulukossa 1 näkyvät HSSG:n ehdottamat uudet Ethernet-luokat eri siirtomedioille.

Taulukko 1. Ethernetin fyysisen kerroksen tulevat luokat /15/

Kantama ja kaapeli	40 GbE	100 GbE
1 m häntäkaapeli	40GBASE-KR4	-
10 m kupari	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10
100 m MMF	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10
10 km SMF	40GBASE-LR4	100GBASE-LR10
40 km SMF	-	100GBASE-ER10

Standardointijärjestöjen ulkopuolelta 100 Gbit/s yhteyden kehityksestä ovat kiinnostuneet ainakin Optical Internetworking Forum (OIF), Ethernet Alliance, Road to 100G Alliance ja Optoelectronics Industry Development Association (OIDA). Mainitut järjestöt pyrkivät auttamaan löytämään omalla tutki-

muksellaan kaupallisesti toimivia ratkaisuja tulevaisuuden nopeille tietoverkoille. Suomessa mm. Nokia Siemens Networks on mukana 100GET-nimisessä Euroopan laajuisessa projektissa, joka tutkii teknillisiä ja kaupallisia ratkaisuita 100 Gbit/s hyödyntämiseksi.

2.2 Optisen kuidun hyötynäkökohdat

Optisessa tiedonsiirrossa signaali siirretään valopulssien avulla lähettimestä vastaanottimeen. Yhteyden tehobudjetin kannalta oleellisia asioita ovat lähettimen tehotaso, vastaanottimen herkkyys sekä yhteyden kokonaisvaimennus, joka riippuu käytettävän kuidun ominaisuuksista, jatkosvaimennuksista ja liitosvaimennuksista. Optisen kuidun vaimennus tarkoittaa kuidussa etenevän valotehon pienenemistä matkan funktiona ja sen yksikkönä käytetään dB/km. Yhteyden kaistanleveys ilmoittaa puolestaan suurimman yhteydellä siirrettävän taajuuden, joka määrää siirtonopeuden digitaalisessa tietojen siirrossa. Valokuidun suuri kaistanleveys sopii hyvin nykyaikaiseen, nopeaan ja suuria määriä sisältävään datansiirtoon. Muita optisen kuidun hyötynäkökohtia ovat mm. seuraavat asiat: /2, s.11–13/

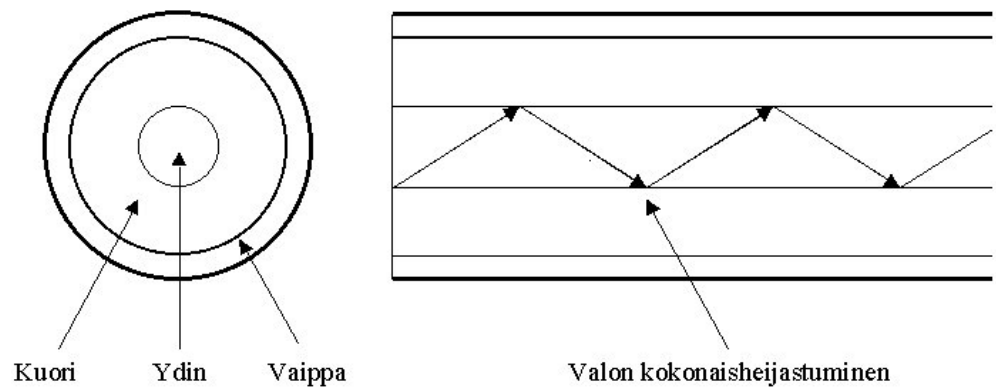
- ei ongelmia sähköisten potentiaalien eikä sähkömagneettisen säteilyn kanssa.
- pitkät siirtomatkat vähäisen vaimennuksen ansiosta.
- optinen kuitu soveltuu tietoliikenneverkkojen kaikille tasoille.
- optinen kuitu tukee hyvin uusia tekniikoita ja palveluja.
- optinen kuitu mukautuu hyvin kasvavan kapasiteettitarpeen mukaan.
- optisella kuidulla voidaan rakentaa luotettavia yhteyksiä ja verkkoja.

Haittapuolena kuituratkaisuissa voidaan pitää varsin korkeita asennuskustannuksia. Ratkaisuna korkeisiin alkukustannuksiin voi olla ns. musta kuitu. Mustalla kuidulla tarkoitetaan fyysistä valokuituparia jonka läpi asiakas voi liikennöidä parhaaksi katsomillaan laiteratkaisuilla. Kuitu vuokrataan yleensä tiettyjen pisteiden välille, mutta mahdollista on myös vuokrata kuituparista vain tietty aallonpituus osa-alue. Mustaa kuitua vuokrattaessa asiakkaalla on mahdollisuus rakentaa haluamansa ratkaisu omilla laitteillaan ilman, että asiakkaan tarvitsee sitoutua mittaviin kuidun rakennusinvestointeihin. Mus-

tan kuidun vuokrauksen hinnoitteluperiaatteet muodostuvat kyseessä olevan välin rakentamiskustannuksista, huolto- ja ylläpitokustannuksista sekä vuokrausajan pituudesta. Halutessaan asiakas voi ostaa vuokrakuidun itselleen.

2.3 Optisten kuitujen rakenne ja perustyyppit

Optinen kuitu koostuu ytimestä, kuoresta ja muovisesta vaipasta. Televerkoissa yleisesti käytetyt kuidut on pääasiassa valmistettu kvartsilasista, joiden siirto-ominaisuus perustuu valon kokonaisheijastukseen kuidun ytimen ja kuorikerroksen välisessä rajapinnassa. Tämä saadaan aikaan, kun valonsäde siirtyy optisesti tiheämmästä aineesta optisesti harvempaan aineeseen. Optisen kuidun uloimpien kerrosten tehtävänä on suojata kaapelia.



Kuva 1. Optisen kuidun rakenne ja valon eteneminen kuidussa

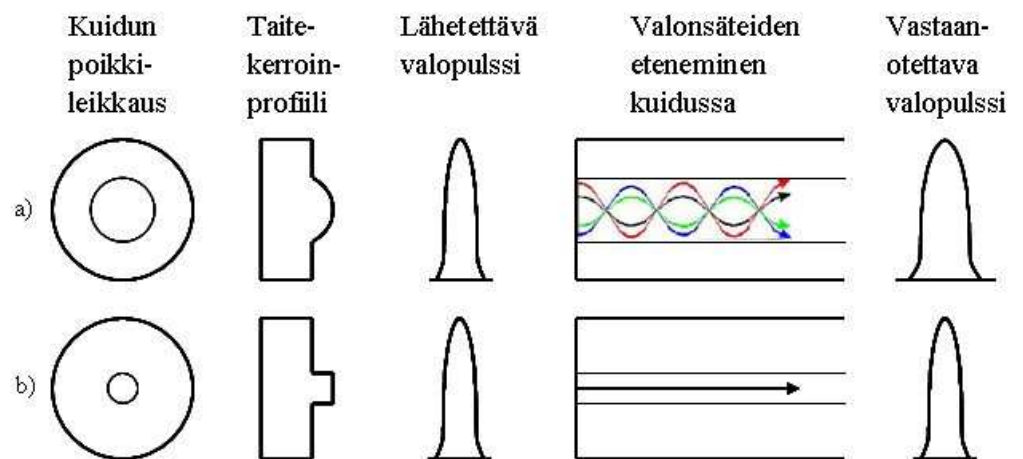
Kuidut jaotellaan eri tyyppeihin taitekerroinprofiilinsa ja sen mukaan, miten valo kuidussa etenee. Kuitujen kaksi pääluokkaa ovat yksimuotokuidut ja monimuotokuidut, jotka jakautuvat useisiin eri tyyppeihin. Tärkeimmät tyypit käytännön kannalta ovat asteittaistaitekertoiminen monimuotokuitu eli asteittaiskuitu ja yksimuotokuitu. Askeltaitekertoiminen monimuotokuitu eli askelkuitu on jäänyt käytöstä lähes kokonaan pois, joten sitä ei esitellä tässä työssä ollenkaan.

Asteittaiskuidussa taitekerroin muuttuu asteittain kuidun ytimen keskustasta kuorta kohti. Näin valonsäteet eivät taitu jyrkästi kuoren ja ytimen rajapinnassa vaan vähitellen ytimessä edetessään. Asteittaiskuidussa valopulssilla on useita eri muotoja. /2, s.23–25./

Tietoliikenteessä käytetään yleensä yksimuotokuitua. Yksimuotokuidussa valo kulkee ytimessä, jonka halkaisija on 8 – 10 μm . Pieni ytimen halkaisija

pakottaa optisen signaalin kulkemaan yksimuotoisena. Yksimuotokuitu mahdollistaa suuremman bittinopeuden ja karkeasti ottaen 50 kertaa pidemmät siirtovälit kuin monimuotokuitu, koska yksimuotokuidulla ei ole muotodispersiota, vaan ongelmia aiheuttaa kromaattinen dispersio, joka voidaan hoitaa kompensatiolaitteilla. Yksimuotokuidun vaimennus on huomattavasti pienempi kuin monimuotokuidun. Haittapuolena voidaan pitää korkeampaa hintaa monimuotokuituun verrattuna. Monimuotokuitua käytetään lyhyillä siirtoilla esim. rakennusten nousukaapeleina ja jakamoiden väliseen tiedonsiirtoon.

Tärkeimmät käytössä olevat kuitutyypit ovat monimuotokuidussa (MM, Multi Mode) 50/125 μm , 62,5/125 μm ja 100/140 μm , joista ensimmäinen on huomattavasti yleisin muiden poistuttua käytöstä uusissa kohteissa. Yksimuotokuiduista (SM, Single Mode) käytetyimpiä ovat 9/125 μm , dispersiosiiirretty yksimuotokuitu 8/125 μm ja alhaisen dispersion yksimuotokuidut. /6/



Kuva 2. Kuitujen toiminnan pääperiaatteet: asteittaiskuidun a, yksimuotokuidun b.

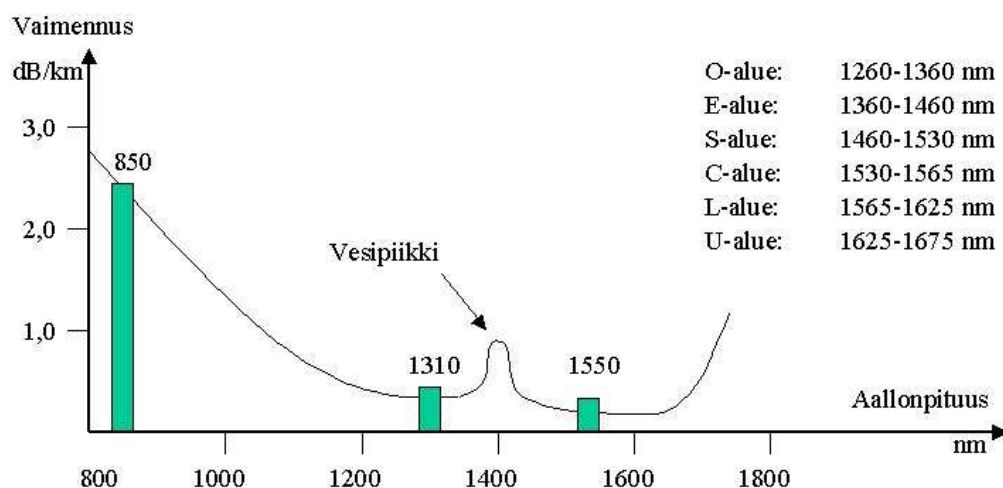
2.4 Kuitujen optiset ominaisuudet

Optisten kuitujen tärkeimmät optiset ominaisuudet ovat:

- vaimennus
- kaistanleveys (monimuoto)
- numeerinen aukko (monimuoto)

- dispersio (yksimuoto)
- raja-aallonpituus (yksimuoto)
- epälineaariset ilmiöt.

Optisen kuidun vaimennus tarkoittaa kuidussa etenevän valotehon pienemistä matkan funktiona ja sen yksikkönä käytetään dB/km. Vaimennus pienenee aallonpituuden kasvaessa aina 1550 μm :iin asti. Kuvassa näkyvä vaimennuspiikki on ns. vesipiikki, joka pystytään lähes eliminoimaan G.652.D-standardin mukaisilla yksimuotokuiduilla. /2, s.28./



Kuva 3. Vaimennus kvartsilasissa aallonpituuden suhteen

Käytetyimmät aallonpituudet optisessa tiedonsiirrossa ovat 850 nm, 1310 nm ja 1550 nm. Yhteyden kaistanleveys ilmoittaa puolestaan suurimman yhteydellä siirrettävän taajuuden, joka määrää siirtonopeuden digitaalisessa tietojen siirrossa. Kaistanleveyden yksikkönä käytetään yleensä MHz_{km}. Rajallinen kaistanleveys on seuraus muotodispersiosta.

Monimuotokuitujen numeerinen aukko puolestaan tarkoittaa suurimman sallitun tulokulman siniä. Mikäli valosignaali tulee suuremmassa kulmassa kuin suurin sallittu, ei se enää heijastukaan takaisin kohti kuidun keskustaa, vaan jatkaa etenemistä kuoriosaan. Numeerisella aukolla on merkitystä valon kytketyymisessä kuituun ja ytimeltään erikokoisten kuitujen jatkamisessa toisiinsa.

Yksimuotokuiduissa ilmenevä kromaattinen dispersio tarkoittaa ilmiötä, missä lähellä toisiaan olevat aallonpituudet kulkevat hiukan eri nopeuksilla kuidussa. Kromaattisen dispersio yksikkönä käytetään ps/(nm · km). Standardiyksimuotokuidun minimidispersio on aallonpituudella 1310 nm ja dispersiosiiirretyn yksimuotokuidun (DS, Dispersion Shifted) minimidispersio aallonpituudella 1550 nm. Dispersio merkitys korostuu pitkällä yhteyksillä ja suurilla tiedonsiirtonopeuksilla, kun käytetään tiheää aallonpituuskanavoitinta. Polarisatiomuotodispersio (PMD, Polarization Mode Dispersion) tulee ottaa huomioon yli 10 Gbit/s ja esim. 40 Gbit/s nopeudella dispersio kokonaisarvo tulisi olla alle 2,5 ps. Tätä alhaisemmissa bittinopeuksilla PMD tulee kompensoida, kun 400 km:n etäisyys ylittyy.

Raja-aallonpituus määrittelee yksimuotokuiduissa pienimmän käytettävän aallonpituuden, jolla valo etenee yksimuotoisesti. Rajan alittuessa valo jakautuu eri eteneviin muotoihin, jolloin kuitu alkaa käyttäytyä monimuotokuidun tavoin.

Epälineaarit ilmiöt alkavat vaikuttaa optisessa siirrossa etäisyyksien ja tehotason kasvaessa. Ne johtuvat fotonien ja lasin välisestä vuorovaikutuksesta atomitasolla. Epälineaarista ilmiöistä merkittävimpiä ovat Raman-sironta, Brillouin-sironta, neljän aallon sekoitus (FWM, Four Wave Mixing) ja itseisvaihemodulaatio (SPM, Self-Phase Modulation). Ilmiöillä on merkitystä hyvin pitkällä yhteyksillä, tiheässä aallonpituuskanavoinnissa ja yli 10 Gbit/s siirtonopeuksilla. /2, s.27-34; 7./

2.5 Tärkeimmät kuitutyypit NG-OTN:n kannalta

Eri kuitutyypin kapasiteettia voidaan mitata maksimibittinopeuden ja käytävissä olevien aallonpituuskanavien lukumäärän avulla. ITU-T määrittelee eri kuitutyypin ominaisuuksia standardeissa G.651-G.657. Siirtonopeuksien kasvaessa kuitutyypin optisten ominaisuuksien huomioon ottaminen korostuu. Oikean kuitutyypin valinnassa tulee huomioida mm. käytettävän kuidun vaimennus, dispersio, epälineaarit tekijät ja kustannukset. Valintaa vaikeuttaa dispersio pitäminen pienenä suurilla siirtonopeuksilla koko aallonpituusalueella. Dispersio ei kuitenkaan saa olla nolla tai liian pieni neli-aaltosekoituksen ja muiden epälineaaristen ilmiöiden vuoksi, sillä tämä aiheuttaa ongelmia DWDM-sovelluksissa. Tämän takia nolladisersion kuituja G.653 ja G.654 ei käytetä DWDM-sovelluksissa. /6./

Valokuitutekniikan nopeasta kehityksestä huolimatta tämän päivän teknologiassa ei ole vielä mahdollista siirtää 100 Gbit/s yhdellä kuitulinjalla optisten ominaisuuksien tullessa vastaan. Tulevaisuuden ratkaisuksi onkin ehdotettu usean kuituparin käyttämistä samanaikaisesti tai hyödyntämällä aallonpituuskanavointia yhdelle kuituparille. Ensimmäisessä tapauksessa 100 Gbit/s saavutettaisiin esimerkiksi käyttämällä 12 kuituparia 10 Gbit/s nopeudella, jolloin enkoodauksen ja virheenkorjauksen jälkeen bittinopeus olisi haluttu. Jälkimmäisessä tapauksessa voitaisiin käyttää esimerkiksi 10 Gbase-LX4 lähetintä, jolloin päästäisiin 100 Gbit/s nopeuteen, kun yhdessä kuidussa siirtyisi 4 x 25 Gbit/s. /7./

2.5.1 Yksimuotokuidut

Alhaisen vesipiikin kuitu G.652.D soveltuu hyvin pitkille etäisyyksille ja suurille bittinopeuksille. Ilman dispersion kompensointia G.652.D-kuidun maksimipituus on noin 80 km 10 Gbit/s nopeudella. Siirryttäessä yli 10 Gbit/s nopeuksille tämä kuitutyyppi tarvitsee kuitenkin ulkoisen dispersion kompensatiolaitteen. Uusien S- ja L-kaistojen käyttöönotto tulee lisäämään yksimuotokuidun siirtokapasiteettia. /6./

Alhaisen dispersion kuidut G.655 ja G.656 soveltuvat hyvin pitkille etäisyyksille, suurille nopeuksille ja DWDM-tekniikan käyttöön. Näissä kuitutyypeissä epälineaariset ilmiöt on minimoitu. Näin päästään 700 km:n maksimipituuteen 10 Gbit/s nopeudella ilman dispersion kompensatiolaitteita. G.655- ja G.656 ei voi liittää yhteen G.652-kuitujen kanssa, koska niiden dispersio-ominaisuudet ja kuidun geometriset mitat ovat erilaiset. /3, s.93-98; 6./

Taulukko 2. Yksimuotokuitujen ominaisuuksia /2, s. 28; 5/

Kuitutyyppi → Ominaisuus ↓	Alhaisen vesipiikin kuitu (LWP) G.652.D	Alhaisen dispersion kuitu (NZDS) G.655	Alhaisen dispersion kuitu (NZDS) G.656
Vaimennus, dB/km			
1310 nm	≤ 0,40	ei määritelty	ei määritelty
1310...1625 nm	≤ 0,40	ei määritelty	≤ 0,40
1550 nm	≤ 0,25	≤ 0,28	≤ 0,40
Kromaattinen dis- persio, ps(nm x km)			
1285...1330 nm	≤ 3,5	ei määritelty	1460...1625 nm ↓
1530...1565 nm	≤ 18	≤ 1...10	≤ 2...14
Polarisaatiomuoto- dispersio (PMD)	≤ 0,2 ps/√km	≤ 0,2 ps/√km	≤ 0,2 ps/√km
Raja-aallonpituus, nm	≤ 1260	≤ 1470	≤ 1550

2.5.2 Monimuotokuidut

Monimuotokuituja käytetään 850 nm:n ja 1310 nm:n alueilla. Monimuotokuituja voidaan parhaiten käyttää lyhyillä etäisyyksillä, kuten talojen välillä sekä kiinteistöjen sisäkaapeloinnissa. HSSG:n tavoitteena 40 Gbit/s ja 100 Gbit/s datanopeuksien suhteen on päästä ainakin 100 m:n pituuteen kategorian OM3 kuidulla. Tämän hetken monimuoto kuituratkaisut ovatkin keskittyneet kategorian OM3-kuituihin. OM3-ominaisuuksia on parannettu OM1- ja OM2-kuiduista, jotta se soveltuisi paremmin Gigabit Ethernet ja 10 Gbit/s järjestelmiin. Helmikuussa 2008 esiteltiin uusi monimuotokuitu OM4, joka tulee tuplaamaan kaistanleveyden OM3:een nähden. Tämän kuitutyyppin standardisointi on vielä kesken, vaikka sitä on jo saatavilla useilta valmistajilta. /7./

Taulukko 3. Monimuotokuitujen ominaisuuksia /2, s. 28/

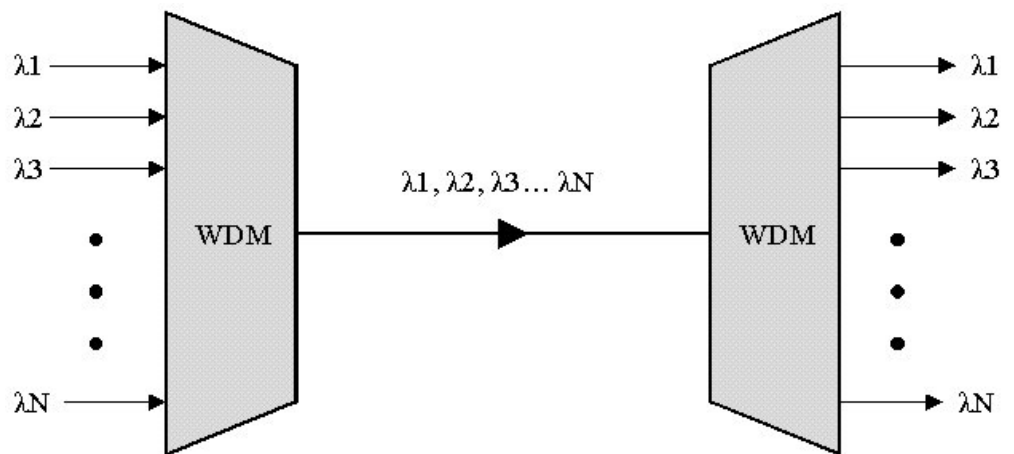
Kuitutyyppi → Ominaisuus ↓	OM1	OM2	OM3	OM4
	62,5/125 μm	50/125 μm	50/125 μm	50/125 μm
Vaimennus, dB/km				
850 nm				
1310 nm	≤ 3,5 ≤ 1,5	≤ 3,5 ≤ 1,5	≤ 3,5 ≤ 1,5	≤ 3,5 ≤ 1,0
Kaistanleveys, MHz x km				
850 nm (LED)	≤ 200	≤ 500	≤ 1500	-
850 nm (Laser)	ei määritelty	ei määritelty	≤ 2000	≤ 4500
1300 nm (LED)	≤ 500	≤ 500	≤ 500	≤ 500
Numeerinen aukko	0,28	0,20	0,20	-

3 WDM-TEKNIIKAN ESITTELY JA OPTISET KOMPONENTIT

Tiedonsiirtotarpeiden kasvu on tuonut mukanaan kasvavia vaatimuksia runkoverkkojen kapasiteetille. Yhtenä ratkaisuna ongelmaan on ehdotettu aallonpituusjakoista multipleksointia eli WDM:ää (Wavelength Division Multiplexing). WDM-tekniikassa yhdessä optisessa kuidussa kulkee useampi yhtäaikainen optinen signaali eri aallonpituuksilla niiden häiritsemättä toisiaan. Tällöin jo olemassa olevan optisen verkon kapasiteetti saadaan paremmin hyödynnetyksi, sillä uusien optisten kuitujen vetäminen on kallista etenkin merenalaisilla yhteyksillä. WDM-tekniikka nostaa yhden kuituparin siirtokapasiteetin muutamasta gigabitistä aina terabitteihin sekunnissa. WDM-tekniikalla yhteyksiä voidaan kytkeä optisesti, jolloin ei ole tarvetta muuttaa signaalia välillä sähköiseksi.

3.1 WDM:n toiminnan periaate

Ilman aallonpituuskanavointia valokuidussa siirtyy tietoa vain yhdellä aallonpituudella, jolloin tekniikkana käytetään aikajakoista multipleksointia eli TDM:ää (Time Division Multiplexing). Tällöin eri käyttäjille annetaan yksi aallonpituus vuorotellen käyttöön. WDM-tekniikassa valokuituparia voi hyödyntää usea eri käyttäjä samanaikaisesti, kun jokaiselle annetaan oma aallonpituus. Ensimmäinen WDM-järjestelmä mahdollisti vain kahden aallonpituuden käytön samanaikaisesti. Tämän päivän laitteet mahdollistavat jopa 160 datakanavan siirtämisen yhdellä valokuituparilla. Tämä mahdollistaa teoreettisesti 10 Gbit/s nopeudella siirtokapasiteetin kasvattamisen aina 1,6 Tbit/s asti yhdellä kuituparilla. Kuitukaapeleissa voi parhaimmillaan olla 4000 yksimuotoa, mikä siis merkitsee tuhansien terabittien kokonaiskapasiteettia. /1, s.105/



Kuva 4. WDM-kanavoinnin kaaviokuva

Kaupallisesti saatavissa olevilla WDM-laitteilla pystytään lomittamaan 2 aina 80 kanavaan. Näin WDM-tekniikka parantaa olemassa olevaa siirtokapasiteettia huomattavasti ilman, että tarvitsee vetää uusia valokuitu linjoja.

Kuvassa 4 on pelkistetty WDM-kanavoinnin toiminta. Yksinkertaistetusti lähetin päässä käytetään multiplekseriä lähetettävien signaalien yhdistämiseksi toisiinsa ja vastaanotopäässä demultiplekseriä erottamaan signaalit toisistaan. Kullekin aallonpituudelle on oma lähetinvastaanottopari. Lähettimien valonsäteet lomitetaan yhteen optiseen kaapeliin ja hajotetaan vastaanottimilla kuidun toisessa päässä. Passiivisissa järjestelmissä aallonpituuskanavat ovat täysin läpinäkyviä ja jokaiselle kanavalle voidaan käyttää omaa

koodausta riippumatta muista kanavista. WDM-järjestelmä voi olla myös kaksisuuntainen, jolloin yhdessä kuidussa siirtyy tietoa samanaikaisesti kumpaankin suuntaan. Tämän päivän WDM-laitteet mukautuvat kanavien lukumäärän ja kantaman suhteen eli järjestelmiin voidaan lisätä yksi tai useampia kanavia ilman, että se aiheuttaisi katkoksia liikenteessä.

3.2 Keskeisimmät WDM-tekniikat

Keskeisimmät WDM-tekniikat ovat WWDM (Wide), CWDM (Coarse) ja DWDM (Dense). Tarvittavan WDM-tekniikan valinta riippuu mm. käytössä olevasta kuitutyypistä, siirtokapasiteetin suuruuden tarpeesta ja taloudellisista resursseista.

WWDM

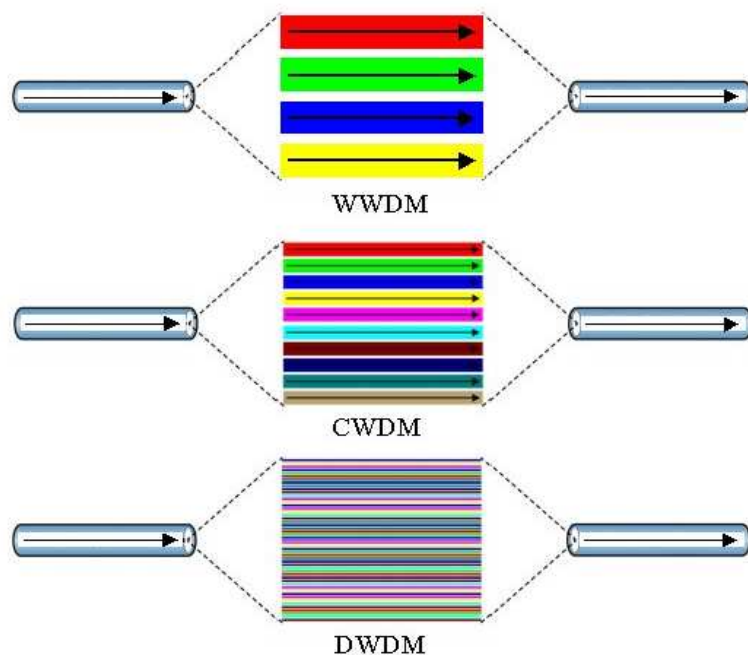
Yksinkertaisimmassa WWDM:ssä on käytössä vain kahdesta neljään aallonpituusalueetta. WWDM-tekniikkaa käytetään mm. PON-verkoissa (Passive Optical Network), kun halutaan kaksisuuntainen liikenne yhdellä kuidulla. Tällöin myötäsuunnassa käytetään 1550 nm:n aluetta ja paluusuunnassa 1310 nm:n aluetta. WWDM on ratkaisuna edullinen, sillä se ei tarvitse jäädytettyä optiikkatekniikkaa.

CWDM

CWDM:ssä on käytössä yleensä maksimissaan 16 kanavaa alueella 1270-1610 nm, jolloin aallonpituudet ovat 20 nm:n välein. Sen tarjoama kapasiteetti on suurempi kuin WWDM:ssä mutta pienempi kuin DWDM:ssä. CWDM-tekniikkaa käytetään pääasiassa alue- ja liityntäverkoissa. Se onkin usein optimiratkaisu metroverkkojen kapasiteetin kasvattamiseksi, sillä etäisyydet voivat olla 10 Gbit/s bittinopeudella jopa 120 km ilman, että järjestelmä tarvitsee EDFA-vahvistinta (Erbium Doped Fiber Amplifier). Kuitutyypinä CWDM-tekniikassa käytetään G.652.D:tä. CWDM-tekniikan varmuuden ja edullisen hinnan takia sitä on ehdotettu kehitteillä olevien 100 Gbit/s verkkojen aallonpituuskanavointiratkaisuksi.

DWDM

DWDM-tekniikalla saavutetaan suurin siirtokapasiteetti ja pisimmät siirtoetäisyydet ilman vahvistimia. ITU-standardin G.694.1 mukaan C-kaistan (1530 - 1565 nm) alueella on käytössä 45 kappaletta aallonpituuskanavia, kun suojavyöhykkeiden väli on 100 GHz. Tällöin kanavat ovat 0,8 nm:n välein. Tulevaisuudessa aallonpituusalueen suunnitellaan laajentuvan alueelle 1260 - 1660 nm, jolloin tähän 400 nm:n ikkunaan mahtuisi 50 GHz:n jaolla 1024 aallonpituuskanavaa. DWDM-tekniikkaa käytetään runkoverkkoratkaisuissa juuri sen suuren kapasiteetin vuoksi. DWDM-laserlähettimen hinta on korkeampi kuin vastaavan CWDM-lähettimen. Halvempien VCSEL-laserien kehityksessä on mahdollista, että myös niitä voidaan käyttää DWDM-tekniikkaan. Näin DWDM-sovellukset tulevat yleistymään myös alue- ja paikallisverkoissa.



Kuva 5. Keskeisimpien WDM-tekniikoiden kanavajako

Avoin ja määrittelemätön UWDM (Ultra Dense) saattaa tuoda vielä lisää siirtokapasiteettia, kun käytettäisiin kanavajakoa 25 GHz (0.4 nm). Varmaa kuitenkin on, että nykypäivän sekä tulevaisuuden OTN ratkaisut tulevat perustumaan aallonpituuskanavointiin tai TDM-kanavoinnin yhdistelmään, jolloin ongelmat solmukohdissa poistuisivat.

3.3 Optiset lähettimet

Optisen verkon lähetinkomponenttina käytetään LEDiä (Light Emitting Diode), VCSELiä (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) tai laseria (Light amplification by stimulated emission of radiation).

Näistä LEDiä käytetään lähettimenä ainoastaan alle 1 Gbit/s siirtonopeuksilla, yhteyksillä, jotka perustuvat monimuotokuituun. LEDin siirtonopeutta ja etäisyyttä rajoittaa sen pieni lähtöteho, leveä spektri ja suuri nousuaika.

VCSEL-lähetintä käytetään monimuotokuituun perustuvissa lähiverkoissa, joissa nopeus rajoittuu 10 Gbit/s ja etäisyys 300 m saakka. VCSEL-lähettimiä on saatavilla 850 nm:n, 1310 nm:n ja 1550 nm:n aallonpituusalueilla. VCSEL-lähetimet ovat huomattavasti edullisempia kuin varsinaiset laserit, mutta niiden leveämpi valokeila ei sovellu yksimuotokuituihin.

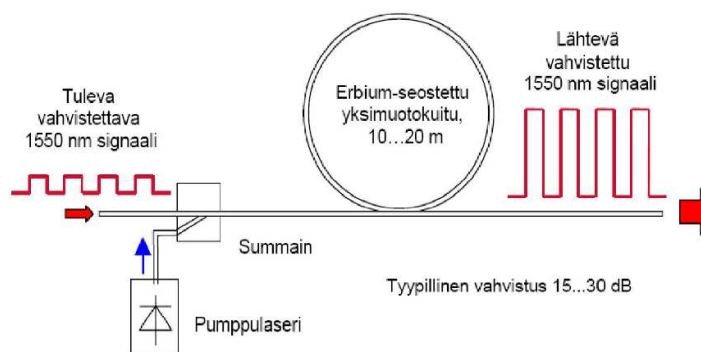
Yksimuotokuitujen lähettimenä käytetään aina lasereita, koska niillä saadaan useita kiinteitä aallonpituuksia ja aallonpituuskaistat ovat hyvin kapeita. Näin ollen laserit soveltuvat hyvin DWDM-sovelluksiin, joissa aallonpituuskanavat ovat lähellä toisiaan. Fabry-Perot-laserin valokeila sisältää joukon toisiaan lähellä olevia aallonpituuksia, ja se kuuluukin MLM-lasereiden (Multi-Longitudinal Mode) ryhmään. DFB-laserlähetin (Distributed Feedback) kuuluu SLM-laserit (Single-Longitudinal Mode)-ryhmään, joiden valokeila sisältää vain yhden kapean spektriviivan. DFB-lähetin soveltuu hyvin pitkän kantaman yhteyksille, suurille tiedonsiirtonopeuksille ja DWDM-tekniikkaan. /3, s.165-168; 2, s.100-102./

Optonext ja Hitachi ovat julkistaneet helmikuussa 2008 uuden EA-DFB -laserin (electro-absorption modulator with integrated distributed feedback), joka toimii 1290 - 1350 nm:n aallonpituudella 25 Gbit/s nopeudella ja hieman erilaisella tekniikalla aallonpituudella 1550 nm aina 40 Gbit/s nopeuteen saakka. EA-DFB-laseri toimii laajalla lämpötila alueella, eikä se tarvitse jäähdytystä. Tämän vuoksi siitä ennustetaan edulliseksi ratkaisuksi 100 Gbit/s Ethernet-verkkoihin. /12./

3.4 Optiset vahvistimet

Valokuidussa kulkeva signaali vaimentuu, joten signaalin siirtäminen pitkien välimatkojen päähän edellyttää signaalin vahvistamista. Ilman vahvistimia ei voida saavuttaa paljoa yli 100 km:n siirtomatkoja. Optisia vahvistimia kutsutaan usein myös toistimiksi. Toistimia on kahta tyyppiä: opto-elektronisia ja täysin optisia. Ensimmäiseksi mainittu tekniikka tarkoittaa optisen signaalin vastaanottamista, muuntamista sähköiseen muotoon ja uudelleenlähettämistä eteenpäin uudella laserilla. Tämä vanhentunut tekniikka ei sovellu WDM-sovelluksiin, sillä näin pystytään vahvistamaan vain yhtä signaalia kerrallaan. Täysin optiset vahvistimet pystyvät vahvistamaan samanaikaisesti useita eri aallonpituuksia.

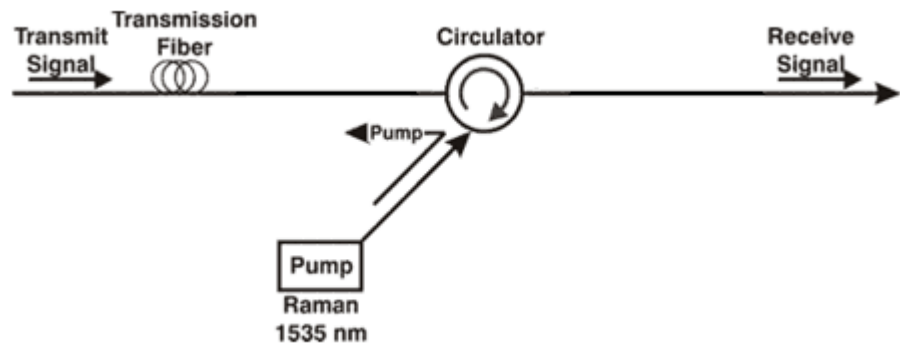
Kuituvahvistin koostuu yhdestä tai useammasta puolijohdelaserista sekä kuituun lisättävästä seosaineesta. Kun laser kohdistetaan kuituun, seosaineena käytetyn erbiumin elektronit virittyvät alemmalta energiatasolta korkeammalle. Elektronit palaavat alempaan energiatilaan emittoimalla fotonin, joka vastaa energiatilojen erotusta. Kun energiatilat on määritelty sopivasti, erbium-ionin emittoimat fotonit ovat täsmälleen samalla aallonpituudella kuin vahvistamista tarvitseva valosignaali. Pumppulaserilla, josta käytetään myös nimitystä EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), lähtevä valosignaali on voimakkaampi kuin siihen saapunut. Saavutettu vahvistus on maksimissaan noin 1000-kertainen (30 dB).



Kuva 6. EDFA:n toimintaperiaate /2/

Optisessa tiedonsiirrossa käytetään EDFA:n lisäksi raman-vahvistinta. Signaalin raman-vahvistuminen tapahtuu siirtokuidussa ja vahvistaa kaikkia aallonpituuskanavia noin 125 nm pumppulaserin aallonpituuden yläpuolella. Raman-vahvistus syntyy, kun pumppulaserin lähettämä fotoni luovuttaa energiansa ja luo uuden fotonin signaalin aallonpituusalueella. Raman-

vahvistin vaikuttaa kuidussa useiden kilometrien alueella eli esim. kuituyhteyden ollessa 100 km vaikuttaa vahvistin 40 km loppupään matkalle. Näin erillistä pistemäistä vahvistinta ei tarvita, joten paikalliset tehotasot eivät nouse liian korkeiksi ja epälineaaristen häiriöiden vaikutus jää vähäiseksi. Pitkillä siirtoetäisyyksillä raman-vahvistimen etuja ovat seuraavat asiat: signaalien lähettimien tehotasoa voidaan alentaa, kuitupituuksia voidaan kasvattaa EDFA-vahvistimien välillä, EDFA-vahvistimien määrää voidaan vähentää, DWDM-kanavien määrää voidaan kasvattaa ja informaation siirtonopeutta kasvattaa. Nopeudella 10 Gbit/s on kaupallisesti toteutettu 4000 km:n ja nopeudella 40 Gbit/s 1000 km regenerointiväli. Testiolosuhteissa on päästy 100 Gbit/s nopeudella 1000 km:n etäisyyteen lähettimen ja vastaanottimen välille. /6; 8./



Kuva 7. Raman-vahvistimen toimintaperiaate /8/

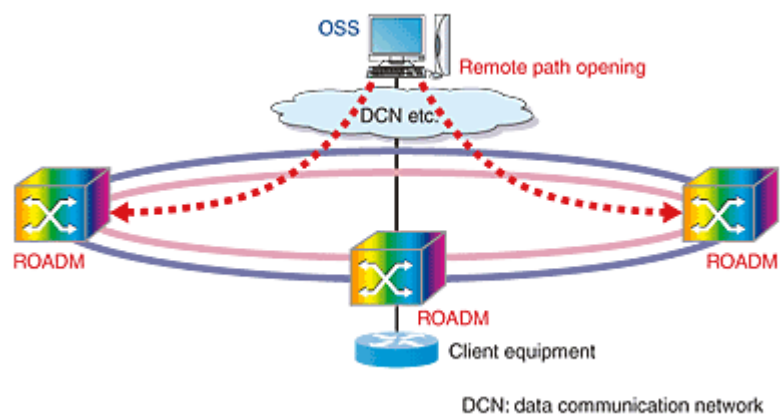
3.5 OADM / ROADM

Aallonpituuskanavien lisääminen ja poistaminen on oleellista tietoliikenteen solmukohdissa. Kanavien signaalien reitittäminen ulos kuidusta tai syöttäminen kuituun tapahtuu käyttäen OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) tai ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer).

Käytännössä aallonpituusreitittimeen saapuvat esim. DWDM-aallonpituuskanavat ohjataan ensin optiseen EDFA-vahvistimeen, jonka jälkeen optinen demultiplekseri erottelee aallonpituuskanavat ja ohjaa ne optiseen reitittimeen. Halutessa osa aallonpituuskanavista ohjataan ulos runkolinjasta esim. liityntäverkkoon ja osa jatkaa eteenpäin toiseen reitittimeen. Kanavia voidaan myös lisätä ilman, että se häiritsee muuta liikennet-

tä kunhan käytetään vapaata aallonpituutta. Aallonpituusreitittimet pitävät yleensä sisällään vahvistimia, optisia kytkimiä, vastaanottimia ja lähettämiä. /6./

Uudelleen konfiguroitavat aallonpituusreitittimet eli ROADM tekevät fyysisen siirtokerroksen hallinnan joustavammaksi ja helpommaksi. ROADM-tekniikkaa hyödynnettäessä kaistan aallonpituussuunnittelu helpottuu, kun ei tarvitse ennalta päättää kanavia vaan konfigurointia voidaan tehdä tarvittaessa myös etäpäätteeltä. ROADM-laitteet jakautuvat WB-(Wavelength Blocker) ja WSS (Wavelength Selective Switch)-tekniikoihin. Näistä jälkimmäinen edustaa uudensukupolven laitetta, joka tarjoaa enemmän mahdollisuuksia, sillä se toimii täysin optisesti. Uusimmat ROADM-reitittimet tukevat 10 sekä 40 Gbit/s nopeuksia ja ne pystyvät käsittelemään 128 aallonpituuskanavaa samanaikaisesti. Aallonpituusreitittimiin on saatavilla myös WDM -komponentteja. /9; 10, s. 49-50./



Kuva 8. Tyypillinen ROADM-järjestelmän konfiguraatio

Selvää on, että NG-OTN verkot tulevat tarvitsemaan kehittyneitä kytkimiä ja reitittämiä alati kasvavan verkkoliikenteen hallinnan helpottamiseksi. Verkko-
ratkaisuihin riippuen mahdollisia tekniikoita tulevat olemaan OXC (Optical Cross Connects), WXC (Wavelength Cross Connects) ja ROADM.). /9./

3.6 Optiset moduulit

Optisten moduulien avulla voidaan multipleksereihin liittää helposti muita laitteita. Moduulit toimivat lähtin-vastaanottimena (transceiver) laitteiden välillä eli rajapintana fyysisen kerroksen ja datalinkkerroksen välillä. Moduulit muuttavat elektronisen signaalin optiseksi signaaliksi tai toisinpäin. Moduulit

leiden hyötynäkökohtia ovat mm. helppo liitettävyys ja protokollariippumattomuus. Optisia moduuleita ei ole virallisesti standardoitu vaan niiden ominaisuudet on määritelty eri valmistajien kesken MSA-sopimuksella (Multi-Source Agreement). Käytetyimpiä optisia moduuleita ovat

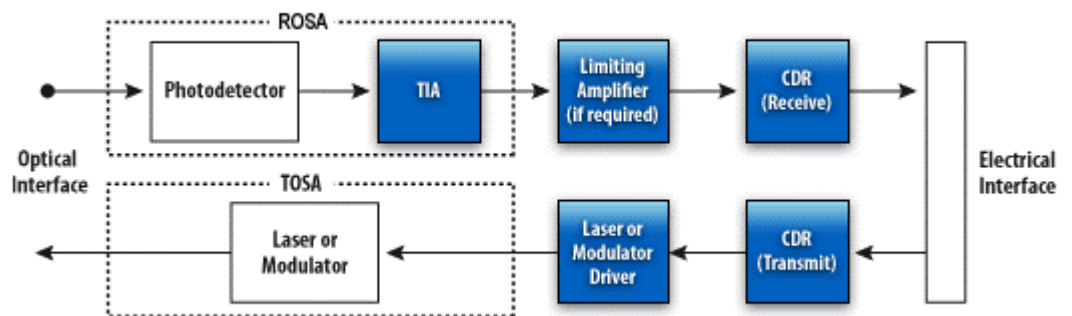
- GBIC (Gigabit Interface Converter)
- SFP (Small Form-factor Pluggable)
- XFP (10 Gigabit Small Form-factor Pluggable)
- XENPAK
- X2
- 300-pin.

SFP ja GBIC on suunniteltu tukemaan SDH/SONET:a, Gigabitti Ethernetiä, Fibre Channelia ja muita telekommunikaatio standardeja. Uudempi SFP+-versio tukee myös 10 Gbit/s yhteyksiä ja on hinnaltaan sekä virran kulutukseltaan edullisempi kuin aikaisemmin kehitetyt vastaavat lähetin-vastaanottimet. XFP on fyysisesti pienikokoinen, ja se tukee täysin OTN:n OTU-2 nopeutta (10,7 Gbit/s). XFP X2, ja XENPAK tukevat 850 nm, 1310 nm, 1550 nm sekä DWDM-tekniikassa käytettäviä aallonpituuksia. MSA on määritellyt uudistuneen 300-pin-moduulin, joka toimii myös 40 Gbit/s data-nopeuksilla eli sitä voidaan käyttää suoraan SDH:n STM-256 yhteyksille. 300-pin-moduuli tarvitsee erillisen sovittimen toimiakseen. /10, s. 55-72; 11./

Taulukko 4. 10 Gbit:n moduuleiden ominaisuuksia 1550 nm:n aallonpituudella /11/

	300-pin	X2	XFP	XENPAK	SFP+
Koko (PxLxK mm)	76x56x14	91x36x13.4	71x18x8.5	121x36x18	57x13x8.5
Tehonkulutus (W)	6-12	4	3.5	3-11	1
Etäisyys (km)	0.6-120	0.3-80	0.3-80	0.3-80	0.1-40
Herkkyys (dBm)	4	8	16	8	48
Liittymistyyppi (pin)	300	70	30	70	48
Optinen liittintyyppi	SC/LC	SC/LC	LC	SC	LC

Kuvassa 9 on esitelty moduulin toiminta ja sen alla on esitelty kaavion laitekomponenttien tarkoitus.



Kuva 9. Optisten moduuleiden toiminta /12/

ROSA (receive optical sub assembly) muuntaa optisesta kuidusta tulevan valon sähköiseksi signaaliksi valodiodin sekä siirtoimpedanssin vahvistinpiiriin avulla.

TIA (transimpedance amplifier) vahvistaa valoilmäisimessä syntyvän pienen virran riittävän suureksi, jotta sähköinen signaali voidaan välittää eteenpäin. TIA muuttaa tulevan signaalin virranvaihtelut jännitetasoiksi.

Limiting Amplifier (rajoitin vahvistin) vahvistaa tarvittaessa ROSA:lta tulevan signaalin, jotta se voidaan välittää luotettavasti eteenpäin. Vahvistin myös suojelee komponentteja mahdollisilta virtapiikeiltä ja muuttaa tulevat analogiset jännitetasot digitaalisiksi tasoiksi.

CDR (clock and data recovery) generoi uudelleen tulevasta sähköisestä signaalista tahdistuksen. Tällöin myös huomioidaan mahdollinen siirtotiessä tapahtunut viive.

Laser/Modulator Driver (laser/modulaattori ajuri) vahvistaa lähtevän sähköisen signaalin tarvittavan suuruiseksi. Optosähköinen muunnos tehdään laserilla tai modulaattorilla.

TOSA (transmission optical sub assembly)-komponentit konvertoivat lähtevän sähköisen signaalin optiseksi, joka tapahtuu yleensä VCSEL-laseria käyttäen. /12./

4 OTN:N OMINAISUUKSIEN ESITTELY

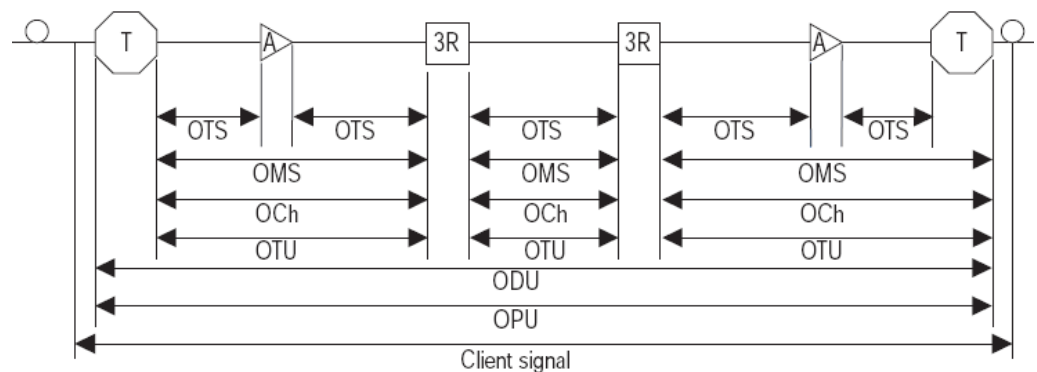
OTN on samankaltainen teknologia kuin SDH/SONET, mutta se on suunniteltu nykyisiä ja tulevaisuuden protokollia ja kaistanleveystarvetta ajatellen. ITU-T:n G.709 standardi määrittelee OTN:n hyötykuorman, kapseloinnin, OAM-ylikehyksen, FEC:in ja kanavoinnin hierarkian. OTN tekee WDM-verkoista helposti hallittavia ja mahdollistaa joustavan ja luotettavan datansiirron valokuituverkkojen yli. SDH/SONET:sta poiketen OTN:llä on kuljetuskerros, joka pystyy välittämään täydellä kaistanleveydellä 10 GbE LAN PHY:n sekä suuremmat nopeudet. Tämän ja muiden edellä mainittujen syiden vuoksi kuljetuskerros tulee muokkautumaan nykyisestä SDH/ATM-perustaisesta WDM-perustaiseksi. OTN-tekniikka, jota myös kutsutaan ”digital wrapper”:ksi tai vain G.709:ksi, tuo läpinäkyvyyttä verkonhallintaan, kun se hallitsee ja tarkkailee järjestelmien kaikkia optisia kanavia.

4.1 OTN:n verkkokerrokset ja niiden toiminta

OTN koostuu useista verkkokerroksista ja niiden osasista jotka on lueteltu alla. Kuvassa 10 on esitetty tasojen päätepisteet. Symboli T tarkoittaa asiak-

kaan liityntäpistettä, A optista vahvistinta ja 3R regenerointipistettä digitaaliseen datalle.

- Client signal
- Optical channel Payload Unit (OPU)
- Optical channel Data Unit (ODU)
- Optical Transport Unit (OTU)
- Optical Channel (OCh)
- Optical Multiplex Section (OMS)
- Optical Transport Section (OTS).



Kuva 10. OTN:n tasorakenne eri optisten verkkokerroksien välillä /14/

OTS, OMS ja OCh:n päätepisteet ovat osa OTN:n optista tasoa. OTU, ODU ja OPU:sta kerrotaan tarkemmin OTN:n kehysrakenne -kappaleessa.

OTS

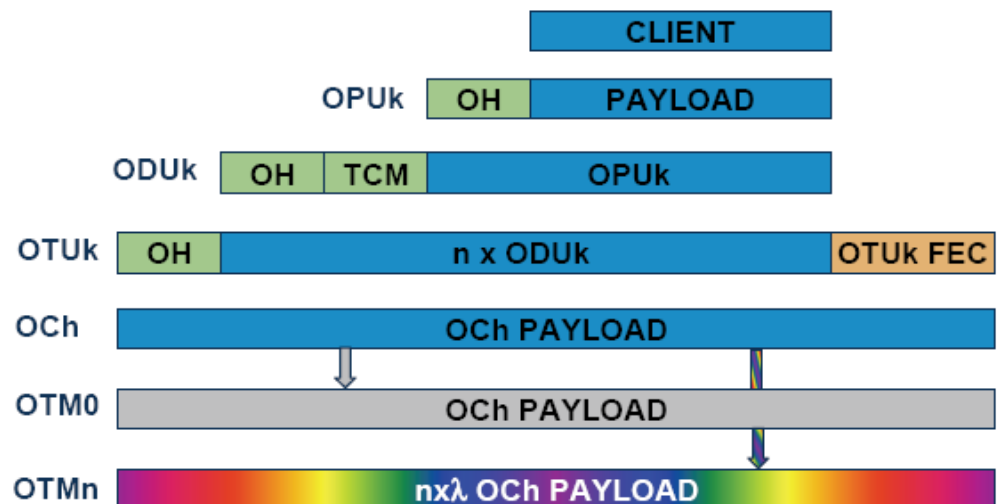
OTS (Optical transmission section) on alimmaisempana OTN-tasoista, ja se vastaa signaalin siirtämisestä yksittäisten kuituvälien yli. OTS kuljettaa hyötykuorman sekä OTS:n naOH -tunnisteen (non-associated Overhead). Tunnistetta käytetään varmentamaan OTS-tasolle tulleen datan oikeellisuus. Optinen siirtotaso määrittää fyysisen liitännän ominaisuudet. Näitä ovat mm. tehotaso, aallonpituus ja signaalikohinasuhde. OTS-tasolla sallitaan operaattorin suorittaa valvonta ja ylläpitotehtäviä läpi kulkevalle datalle.

OMS

OMS (Optical multiplex section) kuljettaa dataa regenerointipisteiden välillä. Optinen kanavointi-lohko sisältää hyötydatan lisäksi OH-tunnisteen OTS:n tapaan. Tunnisteosa auttaa yhteyden tarkkailussa ja vianetsinnässä. Hyötykuorma koostuu OMS:ssa useista optisista kanavista.

OCh

OCh (Optical Channel) kuljettaa OMS:n tapaan dataa regenerointipisteiden välillä. Jokainen optinen kanava sisältää myös OH-tunnisteosan, jotta eri aallonpituudet voidaan tunnistaa päästä-päähän verkoissa. OSC (Common Optical Supervisory Channel) huolehtii OCh:n ylikehyksen lähetyksestä sekä signaalin ylläpidosta.



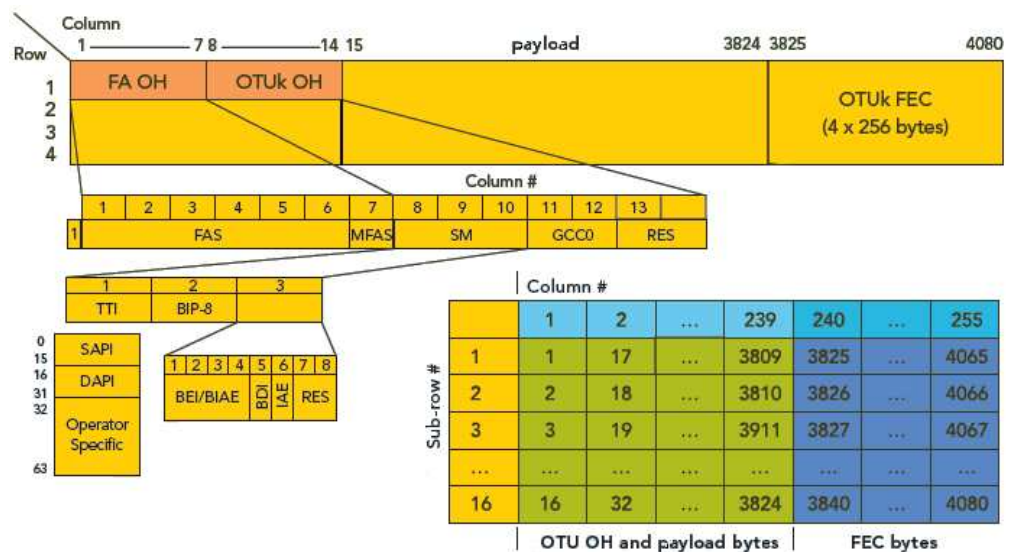
Kuva 11. OTN:n optiset hierarkiatasot ja niiden ylikehykset /14/

Kuvassa 11 näkyvät kaikki OTH:ssa (Optical Transport Hierarchy) määritellyt optiset kerrokset. Optinen siirtoyksikkö OTU huolehtii alimpien tasojen eli OTS-, OMS- ja OCh-tason kehystyksestä sekä lisää FEC:n (Forward Error Correction) -koodauksen. OTU-tason vastuulla on myös osuuden (section) monitorointi. ODU:n OH-tunniste varmistaa päästä-päähän -ohjauksen sekä suorittaa TCM:n (Tandem Connection Monitoring). ODU:n datanopeus on luonnollisesti suurempi kuin OTU:n, sillä dataan ei ole vielä lisätty mm. FEC-koodausta. UPU-taso huolehtii käyttäjädatan sovituksesta optisten kanavien yli. /14./

4.2 OTN:n kehysrakenne

SDH:sta poiketen OTN:n on määritelty vain yksi kehysrakenne, jonka siirtonopeutta muuttamalla pystytään tarjoamaan eri siirtonopeusstandardeja. OTN-kehys koostuu neljästä rivistä dataa, joka on jaettu kolmeen kuvassa 12 näkyvään osioon. Näistä otsakealue (OCh overhead) ja dataosio (OCh payload) ovat samankaltaisia SDH:n vastaavien kanssa, vaikka kehyksien koko onkin erisuuruinen. SDH:sta poiketen OTN:ssä on lisäksi FEC-osio, jossa siirretään pelkästään virheenkorjauksessa tarvittavia bittejä.

OTN kehys koostuu 4080 sarakkeesta ja 4 rivistä. Ensimmäisen rivin 1 – 14 tavut ovat ylikehyskiä, joiden tunnisteosat huolehtivat kehyksistä ja reitityksestä. OTU-kehysosa on jaettu kahteen osaan: FAS:iin (Frame Alignment Signal) ja MFAS:iin (Multiframe Alignment Signal). FAS on staattinen 6 tavua pitkä heksakoodi, joka huolehtii koko signaalin kehyksestä, eli se määrittää mistä kehukset alkavat ja mihin ne loppuvat. MFAS vaikuttaa nimensä mukaisesti usean kehuksen yli kattaen 64 tai 256 kehystä. Siten MFAS laajentaa käskemis- ja hallintatoiminteet koskemaan useita kehyskiä. OTU:n tunnisteosa jakautuu kolmeen osaan: SM:ään (Section Monitoring), GCC0:aan (General Communication Channel 0) ja RES:iin (Reserved bytes). SM sisältää mm. jäljitystunnisteeseen TTI (Trail Trace Identifier), joka ylettyy hajautettuna 64 tavuun. GCC0 on vapaa kanava, jota käytetään tiedonvälitykseen OTU:n päätepisteiden välillä. GCC0 voidaan hyödyntää mm. MPLS-tekniikassa (Multi-Protocol Label Switching). Varatut tavut (RES) ovat yhä määrittelemättä standardissa.



Kuva 12. OTN:n kehysrakenne /14/

ODU-osan rivit 2 - 3 pitävät sisällään OTN:n OAM&P-ominaisuuksia (Operation, Administration, Maintenance and Provisioning). Näillä tarkoitetaan verkon tai verkon laitteen käyttöä, hallintaa, ylläpitoa ja hankintaa. TCM (Tandem Connection Monitoring)-kentät 1-6 mahdollistavat käyttäjän valvoa dataliikennettä. Kaksoisyhteys valvonnan avulla voidaan paikallistaa ja korjata dataverkkojen liikenteessä esiintyvät ongelmat.

OTN:n hyötykuorma siirretään OPU-osassa. OPU:n tunnisteosassa on 256-tavuinen PSI (Payload Structure Identifier), jonka ensimmäinen tavu PT (Payload Type) tunnistaa minkälaista dataa ylikehyksen läpi siirretään. Loput 255 tavua on tällä hetkellä varattu mahdolliseen muuhun käyttöön. OPU:n muut kehyskentät ovat riippuvaisia datan ominaisuuksista. Asynkronisessa reitityksessä, jolloin käyttäjädatan ja OPU:n kello eivät ole tahdissa, lisätään OPU:n tunnisteosaan JC (Justification Control)-tavuja poistamaan mahdolliset aikaerot. Lähetysten ollessa synkronista JC-tavuja ei tarvita.

OTN:n OTU-osa sisältää virheenkorjauksen eli FEC:n. OTU:n tunnisteosa sisältää myös SM, GCC0 ja RES tavut kuten ODU -osa. FEC:stä on selitetty tarkemmin kohdassa 4.6.

4.3 Linjanopeudet

OTN tukee tällä hetkellä kolmea standardilinjanopeutta. Tulevaisuudessa standardiin tulee neljäs, joka tulee koskemaan suunnitteilla olevaa 100 Gbit/s linjanopeutta. Tämän hetkiset linjanopeudet on määritelty OTN:n verkkohierarkiassa eli OTH:ssa. OTM (Optical Transport Module) eli optinen siirtoyksikkö on osa OTH:n määritelmiä. OTM käsittelee eri kuljetuskapasiteetteja, sillä se yhdistää käytettävät aallonpituudet yhteen (max. 16). Kuljetuskapasiteetti ilmoitetaan muodossa OTM-n.m, missä n tarkoittaa aallonpituuksien määrää ja m bittinopeutta. Tämän hetkiset OTU-linjanopeudet ovat

OTU1 $(255/238 \cdot 2,488 \text{ Gbit/s} \approx 2,666 \text{ Gbit/s})$ n. **2,7 Gbit/s**

OTU2 $(255/237 \cdot 9,953 \text{ Gbit/s} \approx 10,709 \text{ Gbit/s})$ n. **10,7 Gbit/s**

OTU3 $(255/236 \cdot 39,813 \text{ Gbit/s} \approx 43,018 \text{ Gbit/s})$ n. **43 Gbit/s**

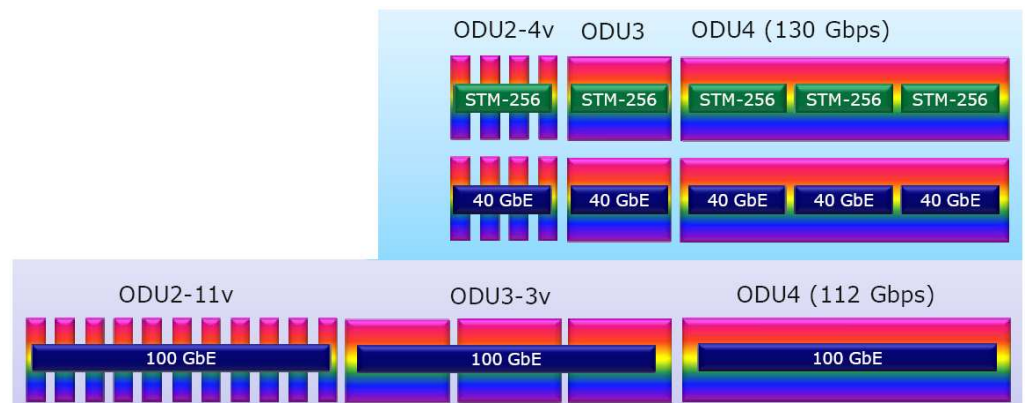
Käytettävä linjanopeus voi olla yhdistelmä yllä olevista nopeuksista. Esimerkiksi OTM-5.23 tarkoittaisi yhteyttä, joka pitäisi sisällään viisi (5) aallonpituut-

ta, jotka voisivat käyttää 10,7 Gbit/s(2) tai 43 Gbit/s(3) nopeutta. Taloudellisessa mielessä 40 Gbit/s tulee halvemmaksi kuin 4 kpl 10 Gbit/s laitetta.

Taulukko 5. OTN:n siirtonopeudet verrattuna SDH:n vastaaviin tasoihin

OTH-linjasignaali (G.709)	G.709-nopeus (Gbit/s)	Kehyksen kesto (μ s)	SDH-nopeus (Gbit/s)
OTU1	2,666	48,971	2,488 (STM-16)
OTU2	10,709	12.191	9,953 (STM-64)
OTU3	43,018	3,035	39,813 (STM-256)
OTU4	~103	~1	(~3xODU3)

FEC virheenkorjauksesta johtuen OTN:n nopeudet ovat noin 7 % korkeammat kuin vastaavat SONET/SDH-nopeudet. Taulukossa 4 esitettyä mahdollisesti tulevaa OTU4:n linjanopeutta ei ole vielä standardoitu.



Kuva 13. ITU:n SG15 esittämät mahdolliset ODU4 linjanopeudet /15/

Esimerkiksi ITU on esittänyt tulevaisuuden 100 GbE:n ratkaisuksi vaihtoehtoisesti 130 Gbit/s datanopeutta, joka koostuisi 3xODU3 (3x40 GbE) tai 112 Gbit/s datanopeutta (1x100 GbE). Tällöin linjanopeus asettuisi ~120 Gbit/s tai vaihtoehtoisesti ~103 Gbit/s. Jälkimmäinen tapa on vielä teknisesti haasteellista ja taloudellisesti kallista toteuttaa, joten usean aallonpituuden käyttö esim. 20 nm:n jaolla tulee toteutumaan ennen sitä. Vaihtoehtoisia tekniikoita

saavuttaa 100 Gbit/s siirtonopeus on esitetty runsaasti eri laitevalmistajien toimesta. Yhtäläistä eri valmistajien suunnitelmissa ovat olleet seuraavat tekijät runkoverkoille: /15./

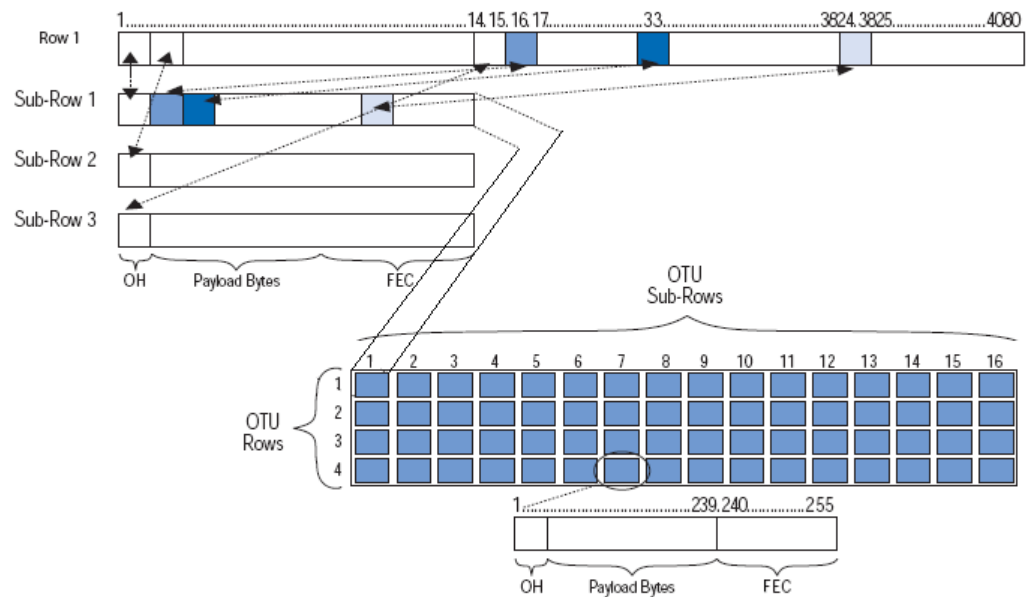
- kanavajako 50 GHz välein
- kanavat laajennetussa C-alueessa
- vähintään 1000 km siirtoetäisyys
- yhteensopiva 10G ja 40G kanssa.

4.4 FEC

G.709 -standardin yksi peruspilareista on FEC (Forward Error Correction), joka sijaitsee OTU-kehyksessä. FEC tarkoittaa nimensä mukaisesti virheenkorjausta etukäteen lisättyjen ja laskettujen bittien avulla. FEC:ä on aiemmin käytetty satelliitti- ja valtameriyhteyksien virheenkorjausmenetelmänä sen suuren tehokkuuden vuoksi. FEC mahdollistaa vastaanottajan huomata ja korjata virheet ilman, että tarvitaan datapakettien uudelleen lähetystä. Lisätyt bitit ovat tarkistusbittejä, joita verrataan vastaanottopäässä tulleisiin bitteihin. Virheellisesti saapuneita bittejä voidaan korjata tarkistuksen jälkeen ennalleen ja data näin palauttaa alkuperäiseen asuunsa. Virheellisiä bittejä syntyy optisessa siirrossa mm. dispersion, kohinan, vaimennuksen sekä epälineaaristen ilmiöiden vuoksi. FEC vähentää virhetapauksia sekä mahdollistaa n. 7 % suuremmat siirtonopeudet ja pidemmät kuituvälit optisten toistimien välillä.

FEC:in käyttämä tekniikka perustuu Reed-Solomon RS(255/239) koodaukseen. Tällä tarkoitetaan, että tarvitaan 239 tavua laskemaan 16-tavuinen tarkistus. Virheenkorjauskapasiteetti saadaan laskemalla kaavalla $(255-239)/2$. Näin FEC:in RS-koodauksella voidaan vastaanottopäässä korjata maksimissaan kahdeksan tavun virheet tai jäljittää 16 tavuvirhettä ilman korjausta. RS-koodaus siis kasvattaa datapaketin kokoa 16 tavulla. FEC käyttää 4x256 tavua per ODU-kehys.

Kuvassa 14 on nähtävissä OTU-kehysten rakenne. OTU-kehys jakautuu neljään riviin, jotka taas jakautuvat hajautetusti 16 alariviin. Hajautuksella pyritään estämään pitkien virhepurskeiden aiheuttamat ongelmat. Hajautettu alirivi sisältää ensimmäisen ylikehysten (OH) tavun, hyötykuorman ja FEC-tavun. /14./



Kuva 14. OTU-kehiksen jakautuminen aliriveihin /14/

Taulukossa 6 on esitetty bittivirhesuhteita 40 Gbit/s nopeudella ilman FEC:ä ja FEC:n kanssa. NG-OTN:n Standardoinnin yksi tavoitteista on saavuttaa 10^{-12} tai parempi bittivirhesuhde MAC(Media Access Control)/PLS(Physical Layer Signaling) palveluiden rajapinnassa. Tämä tarkoittaa, että yhdessä terabitissä lähetettyä dataa saa syntyä yksi tai vähemmän virheellisiä bittejä. OTN:n FEC vastaa maksimissaan 6 dB:n vahvistusta signaalille. ITU on myös määritellyt tehokkaamman EFEC (Enhanced FEC), joka käyttää RS(1023/1007)-koodausta. Tämä vastaa 8 dB:n vahvistusta signaalille. Selvä on, että myös tulevaisuuden optiset siirtoverkot tulevat tarvitsemaan tehokkaan virheentarkistusmenetelmän. Tuleeko se olemaan RS(255/239) vai joku muu tehokkaampi, tulee selviämään, kun uudet standardit optiselle siirtotielle julkaistaan.

Taulukko 6. Bittivirhesuhde ilman FEC:ä ja FEC:n kanssa

BER ilman FEC:ä	BER FEC:n kanssa
10^{-4}	$5,0 \times 10^{-15}$
10^{-5}	$6,3 \times 10^{-24}$
10^{-6}	$6,4 \times 10^{-33}$

4.5 Linjakoodaus

Tietoliikenteessä käytetään linjakoodausta, jotta saavutettaisiin tarvittavaa vaihtelua datavirtaan sekä aikaansaataisiin DC-tasapaino (*Disparity Control*). Vaihtelua lähetettäviin bitteihin tarvitaan, jotta vastaanottavapää saa synkronoitua datavirran ja se pystyy tasoittamaan kelloarvo poikkeamia. DC-tasaus pitää huolen, että lähetysssä datassa on suurin piirtein sama määrä 1:iä ja 0:ia. Yleisimmät koodaukset tiedonsiirrossa ovat 8b/10b ja 64b/66b.

8b/10b -koodaus

8b/10b -koodaus jakaa datan 8 bitin symboleihin, jotka koodataan 10 bitin symboleiksi ennen lähetystä, eli 8 bittiä on esitetty 10 bitin signaalintijoukkona. Tällä saavutetaan DC-tasapaino, jolloin 20 bitin datassa on 1:n ja 0:n määrän erotus maksimissaan kaksi. Tämän lisäksi peräkkäisiä 1:iä tai 0:ia ei ole maksimissaan kuin viisi, jolloin vastaanottoja saa luettua lähetysten virheettömästi ilman uudelleen lähetysten tarvetta ja tarvetta laskea lähetysnopeutta. 8b/10b -koodaus lisää linjanopeutta n. 20 %, mutta datanopeus pidetään samana, kun tunnisteosa OH kasvaa 25 %. 8b/10b tyypillisiä käyttökohteita ovat 1GE, Fibre Channel ja DVB. Koodaus suoritetaan yleensä verkkolaitteissa, ei ohjelmallisesti. /16, s.9./

64b/66b -koodaus

64b/66b-koodaus lähettää 8 tavua dataa 64 bitin paketissa, johon lisätään kaksi bittiä kertomaan, ovatko bitit ainoastaan dataa (01) vai datan ja ohjausosan yhdistelmää (10). Yhdistelmiä 00 tai 11 ei ole käytössä, ja ne aiheuttavat virhetilanteen tullessaan. 64b/66b-koodauksella pyritään samaan 8b/10b-koodauksella, mutta toimintamekanismi on erilainen. 64b/66b-koodauksessa 64 hyötykuormabittiä sekoitetaan itse-synkronoituvalla polynomikoodauskaavalla $x^{58}+x^{39}+1$. Lisättävät kaksi bittiä jätetään sekoittamatta, jotta varmistetaan, että lähetyksessä on edes yksi vaihtelu per 66 bittiä. 64b/66b-koodaus kasvattaa tunnisteosaa vain 3 %, joten hyötydatan osuus on huomattavasti suurempi kuin 8b/10b-koodauksessa. 64b/66b tyypillisiä käyttökohteita ovat 10GE ja Fibre Channel 10GFC. /16, s.10./

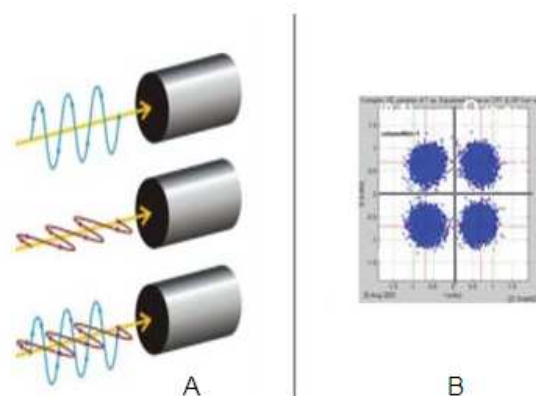
NG-OTN-runkoverkkoratkaisut tullaan todennäköisesti toteuttamaan 64b/66b-koodauksella. Lähiverkkoratkaisut ovat yhä mahdollista tehdä yksinkertaisemmalla 8b/10b-koodauksella.

4.6 Modulointi

Siirrettäessä digitaalista informaatiota optisessa kuidussa täytyy data muuntaa sopivaksi optiseksi signaaliksi. Optisessa tiedonsiirrossa käytetään päälle-pois -tyyppistä modulointia eli bittiä 1 vastaa valon kytkeminen päälle ja bittiä 0 vastaavasti valon kytkeminen pois päältä. Nopeassa tiedonsiirrossa pyritään siihen, että symbolinopeutta saadaan kasvatettua bittinopeuden sijaan, jolloin tiedonsiirtokaistaa säästyy. Digitaalisessa tietoliikenteessä käytetään pääsääntöisesti vaihemodulointia (PM, Phase Modulation), joka tehdään erillisellä valonlähteen eteen kytketyllä modulaattorilla. Vaihemodulaatiossa lähetetään yksi kanta-aallon pulssi kerrallaan siten, että pulssit ovat erivaiheisena toisiinsa nähden tietyissä jaksoissa

Vaiheavainnus eli PSK (Phase Shift Keying) vaihemodulointimenetelmien luokkaan, jossa hetkellinen vaihe kertoo sanoman arvon. PSK:ssa lähetin ja vastaanotin on synkronoitava toisiinsa nähden. Käytettyjä PSK:n tapoja ovat BPSK (Binary), QPSK (Quadrature) ja 8PSK. Näistä QPSK käyttää neljää kanta-aallon vaihetta. Näin vaihe-erot 0, +90, +180 ja +270 antavat bitit 00, 01, 10 ja 11.

Tietoliikennealan yritysten muodostama OIF-järjestö (Optical Internetworkin Forum) on ehdottanut 100 Gbit/s yhteyden moduloititavaksi DP-QPSK:ta (Dual-Polarization-QPSK). Kaksoispolarisaatio mahdollistaa useampien kanavien lähetyksen samassa kuidussa siten, että kaksi signaalia lähetetään 90° käännettynä toisiinsa nähden. Näin toinen signaaleista etenee vaakatasossa ja toinen pystytasossa. Signaalit eivät vuorovaikuta toisiinsa häiritsevästi. Teoriassa DP-QPSK mahdollistaa neljän bitin lähettämisen yhtä symbolia kohden yhdessä aikavälissä.



Kuva 15. A) DP:n periaate ja B) QPSK:n periaate /15/

DP-QPSK:n mahdollistaa koherentti vastaanotin, joka tunnistaa lähetetyn valosignaalin taajuuden sekä vaiheen ja osaa muodostaa niistä oikeat bitit. Koherentsuudella tarkoitetaan vastaanottimien yhteydessä sellaista laitetta, jossa lähetetyn signaalin vaihe ja intensiteetti säilyvät vastaanottopäässä. Vastaavasti ei koherentti vastaanotin tunnistaa ainoastaan lähetetyn signaalin intensiteetin. Koherentti vastaanotin myös kompensoi siirtotiellä syntyneitä kromaattista dispersiota ja siten poistaa tarpeen käyttää kalliita signaalinkorjaus laitteita. Siten DP-QPSK-modulointi aikaansaa paremman OSNR-arvon (Optical Signal Noise Ratio), mikä mahdollistaa pidemmät siirtotiet ilman vahvistusta. /15, s. 4./

Taulukko 7. Erilaisia modulointitapoja ja niillä saavutettuja symbolinopeuksia /17/

OOK	1 bit/symbol
DPSK	
ASK-DPSK	2 bit/symbol
DQPSK	
ASK-DQPSK	3 bit/symbol
OD8PSK	

Taulukossa 7 on esitetty muutamia modulointitapoja. Enemmän modulointitapoja ja niillä saavutettuja datanopeuksia on esitetty liitteessä 1.

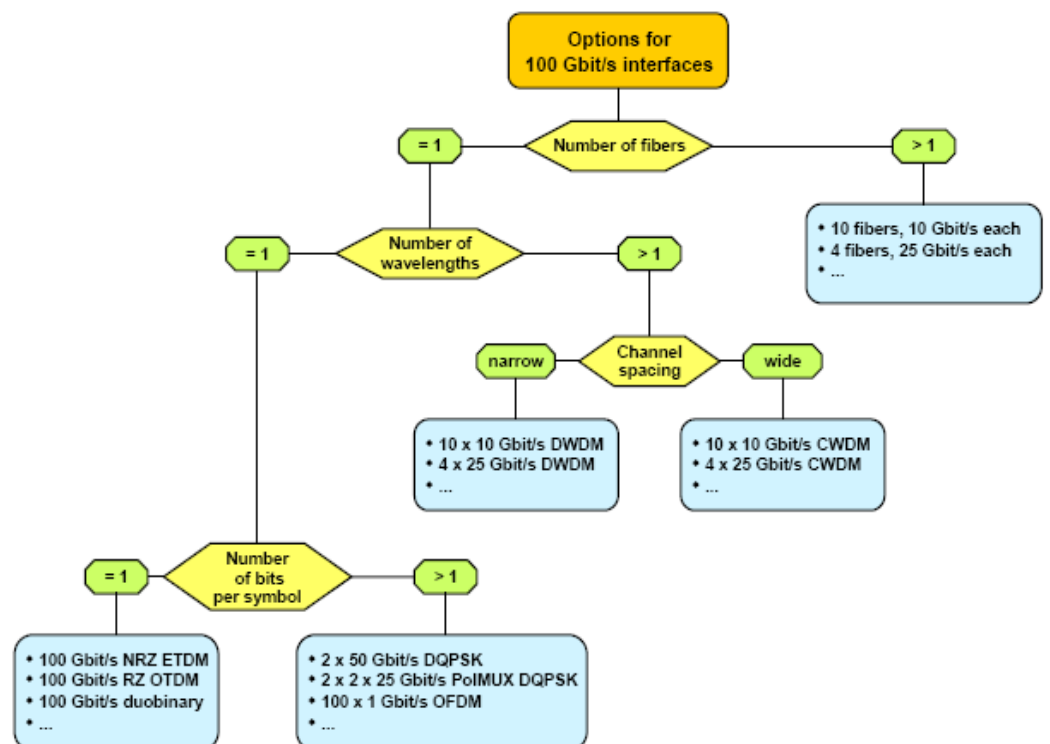
5 MAHDOLLISIA NGN-VERKKORAKENTEITA

Puhuttaessa uuden sukupolven verkkoratkaisuista voi vain arvailla mitä tapahtuu, sillä tekniikka kehittyy nopeasti. Mikä nyt vaikuttaa järkevältä ratkaisulta tulevaisuuden verkoista, voi vuoden päästä katsottuna olla auttamattomasti vanhentunut.

tomasti vanhentunut ja virheellinen ennustus. Esitän tässä kappaleessa muutamia alan asiantuntijoiden ennustuksia tulevaisuuden verkkojen kokoonpanosta, joilla mahdollistetaan 100 Gbit/s nopeus. Käytännön verkkorakenteet lähtevät tietenkin asiakkaan tarpeista, mikä ei tässä ole oleellista.

100 Gbit/s vaihtoehtoisia toteutustapoja ja käyttökohteita

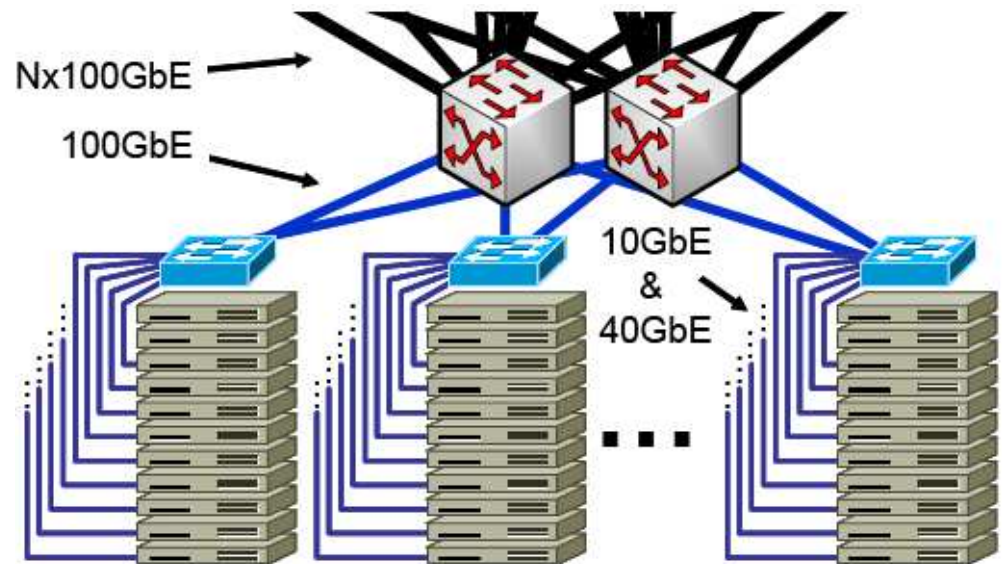
Uuden sukupolven verkon toteutus 100 Gbit/s siirtonopeuteen pääsemiseksi on monta vaihtoehtoa. Päätettävänä on mm. kuinka monta bittiä käytetään per symboli, aallonpituuksien lukumäärä kuidussa, kanavien aikaväli toisiinsa nähden ja käytettävä kuitumäärä. On ennustettu, että lähiverkkoratkaisuissa tullaan käyttämään edullisempaa CWDM-kanavointia. Metro- ja WAN-verkkoihin soveltuu DWDM-kanavointi, joka käyttää kuitujen resurssin paremmin hyödyksi. Tämänhetkisillä tekniikoilla toteutetut kokeilu asteella olevat 100 Gbit/s yhteydet tulevat yli kymmenen kertaa kalliimmaksi kuin 10 Gbit/s yhteys, mutta tulevaisuudessa ei ole järkevää toteuttaa 100 Gbit/s yhteyttä 10x10 Gbit/s laitteiden yhdistelmällä. Tämä olisi kuidun kaistaa ja energian tuhlausta.



Kuva 16. Vaihtoehtoja 100 Gbit/s toteuttamiseksi /17/

Huippunopeat verkot tulevat luultavimmin ensimmäiseksi käyttöön tutkimuslaitoksissa, joissa on käytössä HPC-tasoisia (High Performance Computing)

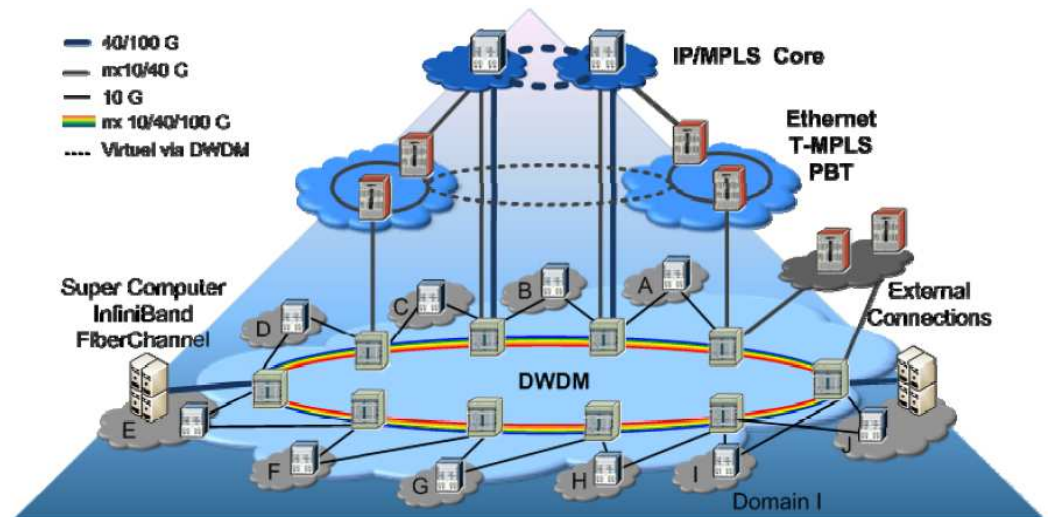
tietokoneita. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi hiukkaskiihdytinlaitokset, joissa syntyy valtavasti dataa yhdessä kokeessa, mikä jaetaan ympäri maailmaa oleville muille tutkijoille. Toinen sovellutus on datakeskuksien välinen liikennöinti. Runsaasti tietoa liikkuu mm. isojen yritysyryppäiden, sairaaloiden ja koulujen välillä.



Kuva 17. Datakeskuksen rakenne /15/

100 Gbit/s verkko WDM- ja GMPLS-tekniikkaa yhdistämällä

Yhtenä ratkaisuna on ennustettu yhdistää WDM- ja GMPLS-tekniikka. (Generalized multiprotocol label switching). Toisin kuin perinteinen MPLS GMPLS reitittää pakettien lisäksi perinteistä TDM-liikennettä, aallonpituuksia ja fyysisiä portteja. Järjestelmän pyramidirakenne on esitetty kuvassa 17. Pyramidin alimmaisella tasolla kuvassa on access-, metro- ja core-verkot, jotka yhdistyvät toisiinsa varmennetulla rengastopologialla. Toisella verkkotasolla on ensimmäisen kerroksen tapaan ROADM-reitittimet, jotka yhdistyvät toisiinsa myös virtuaalisesti. Ylimmällä tasolla on keskitetty IP-taso, joka yhteydessä myös alimmalle tasolle nopealla runkoverkolla. /15./



Kuva 18. Uuden sukupolven pyramidiverkon rakenne /15/

6 YHTEENVETO

Ennustukset tietoverkoissa siirrettävän datamäärän kasvusta vuosittain vaihtelevat 75 %:n ja 125 %:n välillä. Tämä tarkoittaa, ettei kehitystyö nopeampien verkkotekniikoiden löytämiseksi voi pysähtyä. Jo nyt ruuhkaisimpien solmukohtien 40 Gbit/s nopeudella toimivat laitteet lähestyvät kapasiteettiansa ääri rajoja. On oletettavaa, että tulevaisuudessa valokaapelin käyttö tulee entisestään lisääntymään kasvavan tiedonsiirtotarpeen myötä. On ennustettu, että kotikoneiden ohjelmistot kovalevy tarpeineen tulevat siirtymään datakeskuspalveluihin. Kuitu tulee lähestymään loppukäyttäjää, kun perinteisesti tiedonsiirrossa käytetty kupari ei pysty nykytekniikoin paljoo yli 10 Gbit/s siirtonopeuksien.

Valokuidun tulee kestää mahdollisesti vuosikymmeniä, vaikka tekniikka muuttuisikin sen päissä, sillä kaapeleiden asentaminen maahan tai mereen on hyvin kallista. Tämä asettaa laitevalmistajille haasteen; kuinka poistaa siirtotiellä aiheutuvat häiriöt niin, että lähetetty tieto on vielä luettavaa vastaanottopäässä ilman kalliita ja tehoa kuluttavia vahvistimia, toistimia ja dispersiokompensointilaitteita. Verkon rakenne tulisi olla yksinkertainen ja helposti hallittava, mutta samalla kapasiteetti tulisi käyttää tehokkaasti hyödyksi. Yhtenä ratkaisuna tähän on tiheä aallonpituuskanavointi DWDM, joka monikymmenkertaistaa kuituparin siirtokapasiteetin. Tämä tuo valtavasti uutta kaistaa, kun tiedetään, että runkokaapeleissa voi olla yli 4000 kuitua.

OTN tarjoaa alustan, minkä päällä siirtää nykyisiä 10 Gbit/s ja 40 Gbit/s nopeuksia. Tulevaisuudessa samaan standardiin tullaan sovittamaan 100 Gbit/s nopeus siten, että nykyiset laitteet ovat yhteensopivia tämän kanssa. Uuden sukupolven optinen siirtoverkko (NG-OTN) tulee olemaan luotettava ratkaisu, jonka päälle voi rakentaa verkkoarkkitehtuurin.

2010 tuleva uusi siirtonopeusstandardi, 100 Gbit/s, on vielä joiltakin osin auki, mutta jo nyt puhutaan, että vuonna 2016 tulee olemaan tarvetta yhden terabitin verkolle. Verkon ollessa jo nyt lähes täysin optinen päästä-päähän ilman sähköistä muuntamistarvetta, niin voi olla, että 2016 on saatavilla optisesti toimivia piirilevyjä tavallisten kuluttajien kotikoneissa.

VIITELUETTELO

- /1/ Granlund, Kaj, *Tietoliikenne*. Jyväskylä: WSOY. 2007. ISBN 978-951-0-32821-7.
- /2/ *Optiset liityntäverkot*. Teletekno Oy. 2006.
- /3/ Rawaswami, Rajiv - Sivarajan, Kumar N., *Optical Networks a Practical Perspective*. San Francisco: Morgan Kaufmann. 2002. ISBN 1-55860-655-6.
- /4/ Vacca, Jonh R., *Optical networking best practices handbook*. New Jersey: Jonh Wiley&Sons. 2007. ISBN 978-0-471-46052-7.
- /5/ ITU-T, *Optical Transport Networks & Technologies Standardization Work Plan*. [verkkodokumentti]. <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/com15/otn/index.html> (luettu 15.04.2008).
- /6/ Vierinen, Kari, *Optiset tietoverkot ja niiden komponentit*. [www-dokumentti]. <http://users.evtek.fi/~karisv/optiv2004/optverk3.htm> (luettu 10.04.2008).
- /7/ Oliviero, Andrew, *On the road to 100 Gbit/sec transmission*. [www-dokumentti]. http://cim.pennnet.com/display_article/301898/27/ARTCL/none/none/On-the-road-to-100-Gbits/sec-transmission/ (luettu 14.04.2008).
- /8/ Optical Amplifiers. [www-dokumentti]. <http://www.fiber-optics.info/articles/op-amp.htm> (luettu 22.04.2008).
- /9/ Kasahara, Hideki, *Network Core Technologies for a Next Generation Network*. [www-dokumentti]. <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200706sf2.html> (viitattu 23.04.2008).
- /10/ Vojtech, Josef ym., *Dark Fiber Lighting Technologies*. [verkkodokumentti]. <http://www.seefire.org/content/modules/downloads/SEEFIRE-WP2-Deliverable2.1-p-20051115x.pdf> (viitattu 23.04.2008).
- /11/ Kankipati, Raju, *opto vendors refine SFP+ module desing*. [verkkodokumentti]. <http://fibresystems.org/cws/article/magazine/32823> (viitattu 23.04.2008).
- /12/ Gennum corporation [verkkodokumentti] http://www.gennum.com/data/applications/optical_transceiver.php (viitattu 08.07.2008).
- /13/ Photonics. *EA-DFB Lasers Demo'd*. [verkkodokumentti]. <http://www.photonics.com/content/tradeshows/2008/March/10/90975.aspx> (viitattu 24.04.2008).
- /14/ Gendron, Robert - Gidaro, Arnato, *Optical Transport Network - An Overview*. [verkkodokumentti]. <http://documents.exfo.com/appnotes/anote153-ang.pdf> (viitattu 27.04.2008).

- /15/ Breach, Tony, *NORDUnet A/S*. [verkkodokumentti].
<https://portal.nordu.net/download/attachments/10355162/40G+and+100G+Overview+Report.pdf> (viitattu 27.04.2008).
- /16/ Seth-Smith, Nigel, *Optical Fibre Transport for Digital Video*. [verkkodokumentti]. http://www.gennum.com/video/pdf/Optical_For_Digital_Video.pdf (viitattu 10.04.2009).
- /17/ EIBONE Working Group, 100 Gbit/s Ethernet. [verkkodokumentti].
http://www.vde.com/de/fg/ITG/Arbeitsgebiete/Fachbereich%206/Documents/PosipPap_Transmission%20Technologies_Ak_EIBONE_Druckversion.pdf (viitattu 10.04.2009)

Table 4: Summary of recent experiments using systems and sub-systems at 100+ Gbit/s.

Conference	Author	Bit rate (Gbit/s)	Data Format	# of λ -channels (spacing / GHz)	Distance	Remarks
ECOC 05	Winzer et al. (Lucent) [65]	107	Duobinary	1 (----)	-	OTDM R _x
ECOC 05	Doerr et al. (Lucent) [105]	107	NRZ-OOK	1 (----)	-	OTDM R _x
OFC 06	Daikoku et al. (KDDI, NIST, Sumitomo) [106]	100	NRZ-DQPSK	1 (----)	50 km	fully ETDM
OFC 06	Raybon et al. (Lucent) [107]	107	NRZ-OOK	10 (144)	400 km	OTDM R _x , clock trans.
OFC 06	Derksen et al. (Siemens, HHI, Micram) [108]	100	RZ-OOK	1 (----)	480 km	OTDM T _x
ECOC 06	Sano et al. (NTT) [109]	111	CSRZ-DQPSK	70 (100)	160 km	fully ETDM
ECOC 06	Winzer et al. (Lucent, NIST, Sumitomo) [85]	107	RZ-DQPSK	10 (150)	2000 km	fully ETDM
ECOC 06	Schubert et al. (HHI, Siemens, Micram) [110]	107	RZ-OOK	1 (----)	480 km	OTDM T _x
ECOC 06	Winzer et al. (Lucent) [82]	107	NRZ-OOK	10 (143)	1000 km	OTDM R _x , clock trans.
ECOC 06	Schuh et al. (Alcatel) [78]	100	NRZ-OOK	1 (----)	-	fully ETDM,
OFC 07	Masuda et al. (NTT) [114]	111	CSRZ-DQPSK + polMUX	102 (100)	240 km	fully ETDM
OFC 07	Fludger et al. (CoreOptics, TUE, NSN) [115]	111	POLMUX-RZ-DQPSK	10 (50)	2375 km	coherent detection, off-line BER meas.
OFC 07	Schuh et al. (Alcatel-Lucent) [116]	107	NRZ-OOK	10 (200)	480 km	fully ETDM
OFC 07	Winzer et al. (Alcatel-Lucent) [117]	107	NRZ-DQPSK	10 (100)	1200 km	Fully ETDM
OFC 07	Sinsky et al. (Alcatel-Lucent) [102]	107	NRZ-OOK and CSRZ-OOK	1 (----)	-	co-packaged PD+Demux
OFC 07	Jansen et al. (TUE, NSN, HHI, Micram, IBM) [118]	107	VSB-NRZ-OOK	1 (----)	160 km	Fully ETDM, field installed fiber