

Jukka Tammimetsä

DWDM-jänteen toiminta ja käyttöönottomittaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

26.9.2014

Tekijä(t) Otsikko	Jukka Tammimetsä DWDM-jänteen toiminta ja käyttöönottomittaus
Sivumäärä Aika	40 sivua + 13 liitettä 26.9.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja	opettaja Sami Sainio
<p>Insinööriyön tavoitteena on perehtyä valokuidun ominaisuuksiin ja kuidussa siirrettävän signaalin vaimennukseen vaikuttaviin tekijöihin sekä siihen, miten vaikutukset näkyvät DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing) -jänteen mittauksissa ja käyttöönotossa. Insinööriyössä käsitellään mitä eri vaihtoehtoja on DWDM-tekniikkaa valittaessa. Lisäksi tutkitaan mitä on hyvä ottaa huomioon DWDM-jännettä rakennettaessa dokumentoinnin kannalta ja tulevaisuutta varten, kun nopeuksia ja kanavamääriä mahdollisesti nostetaan.</p> <p>Työn teoriaosuudessa tarkastellaan valon käyttäytymistä valokuidussa, CWDM- (Coarse Wavelength-Division Multiplexing) ja DWDM-järjestelmien nykytilaa, sekä tulevaisuuden näkymiä. Toteutusosiossa käydään läpi, miten DWDM-jänteen rakentaminen on toteutettu ja mittaus on suoritettu tarkalla mittalaitteella. Työssä käytetyt laitteet ovat ECI Telecomin DWDM-tuoteperheestä.</p> <p>Työn lopputuloksena asennettiin DWDM-laitteisto ja kytkettiin jänneväli joka toimii 44:lla kanavalla ja mahdollistaa 10 Gb:n tiedonsiirtonopeuden. Jänneväli mitattiin mittalaitteilla toimivuuden todentamiseksi ja dokumentoitiin viankorjauksen helpottamiseksi tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat	DWDM, jänteen toiminta, käyttöönottomittaus

Author(s) Title Number of Pages Date	Jukka Tammimetsä Installation and measurement of a DWDM link 40 pages + 13 appendices 26 September 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	
Instructor	Sami Sainio, Lecturer
<p>The primary objective of this bachelor's thesis is to familiarize the reader with factors that influence the features and attenuation of optical fiber and how these factors can influence the measurements and commissioning of a Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM) link. This thesis also explains what type of options exist when choosing the DWDM technology. Additionally the thesis examines what should be taken into consideration when building a DWDM link for documentation and for future when speed and the amount of channels will possibly be increased.</p> <p>The focus of the theory part is on the behaviour of light in optical fiber as well as on the present state and future outlooks of the Coarse Wavelength-Division Multiplexing (CWDM) and DWDM systems. The part focusing on implementation describes how a DWDM link is built and how the measuring was done in this thesis project with a precise analyzer. The hardware used in the project is part of ECI Telecom's DWDM product family.</p> <p>In conclusion, a DWDM system was installed with a link that enables the use of 44 channels and 10Gb data transfer speed per channel. The link was measured with measuring instruments to verify the functionality and to ease troubleshooting in the future.</p>	
Keywords	DWDM, link installation, measurement

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Siirtoverkon suunnittelu	2
3	Valokuitu	4
4	Valokuidun ominaisuudet	9
5	WDM-järjestelmiä	15
5.1	DWDM-järjestelmä	17
5.2	ROADM-menetelmiä	23
6	Mittaus	27
7	Asennusympäristö	32
8	Tulevaisuuden näkymät	34
9	Yhteenveto	36
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1.	Kanavajakotaulukko
Liite 2.	Mittapisteet A
Liite 3.	Mittapisteet B
Liite 4.	Mittaustulokset 1
Liite 5.	Mittaustulokset 2
Liite 6.	Mittaustulokset 3
Liite 7.	Mittaustulokset 4
Liite 8.	Mittaustulokset 5
Liite 9.	Mittaustulokset 6
Liite 10.	Mittaustulokset 7
Liite 11.	Mittaustulokset 8
Liite 12.	Mittaustulokset 9
Liite 13.	Mittaustulokset 10

Lyhenteet

APC	Angled Physical Contact. Kulmaan hiottu liitin.
AWG	Arrayed Waveguide Filter Grating. Peileillä toteutettu aallonpituuksien suodatus.
BWDM	Bi-Directional Wavelength-Division Multiplexing. Kaksisuuntainen aallonpituuskanavointi.
CD&C	Colorless, Directionless & Contentioless. Väri vapaa, suuntavapaa & sisältö vapaa.
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing. Karkea aallonpituuskanavointi.
DCF	Dispersion-compensating Fiber. Dispersion kompensointiin käytetty kuituyksikkö.
DP-QPSK	Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying. Kehittyneempi Modulointi tekniikka.
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing. Tiheä aallonpituuskanavointi.
E2000	Fiber Optic Connector. Valokuituliitin suuritehoisille lähettimille.
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier. Pumppulaseri vahvistin.
ESD	Electrostatic discharge. Sähköstaattinen purkaus.
FEC	Forward Error Correction. Virheenkorjaus, etukäteen lasketun korjaustiedon.
ITU-T	International Telecommunication Union -Telecommunication Standardization Sector. Kansainvälinen televiestintäliiton standardisointijärjestö.
LC	Little Connector. Pienikokoinen liitin.

LX	Fiber Optic Connector. Valokuituliitin jossa metallinen suoja liittimen kärjessä.
MUX	A device that multiplexing signals. Laite, joka kokoaa signaalit yhteen.
NRZ	Non-Return-to-zero. Dispersion siirtoon käytettävä kuitu.
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer. Optisille yhteyksille tarkoitettu lisäys- ja poistomultiplekseri.
OFA	Optical fiber amplifier. Optisen kuidun vahvistin.
OSA	Optical Spectrum Analyzer. valon spektrin mittaamiseen käytetty mittalaitte.
OSNR	(Optical Signal-to-Noise Ratio). Optisen signaalin signaalikohinasuhde kanavan reunalta mitattuna.
I-OSNR	(In-band Optical Signal-to-Noise Ratio). Optisen signaalin signaalikohinasuhde kanavan keskeltä mitattuna.
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer. Valokuidun mittaukseen käytettävä mittaussuunnitelma.
PMD	Polarization Mode Dispersion. Polarisaatiomuoto dispersio.
QPSK	Quadrature Phase-Shift-Keying. Modulointi tekniikka.
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer. Uudelleenmuokattava optisille yhteyksille oleva syöttö- ja pudotusmultiplekseri.
SC	Standard Connector. Tavallinen liitin.
SDH	Synchronous Digital Hierarchy. Synkroninen digitaalinen hierarkia on optista siirtoa käyttävä joustavasti määriteltävä kanavointijärjestelmä.
SFP	Small Form Pluggable. Pienikokoinen lähetinvastaanotin.

SFS	Suomen Standardisoimisliitto.
SLA	Service-level agreement. Palvelun laadun mittaus.
STM	Synchronous Transport Module. Optisen kuituverkon tiedonsiirtostandardi.
WDM	Wavelength-Division Multiplexing. Aallonpituuskanavointi.
WSS	Wavelength Selective Switches. Aallonpituuden valitsija kytkin.
xDSL	Digital Subscriber Line. Kupariparia käyttävä DSL-tekniikka jonka nopeus on kiinteä molempiin suuntiin.

1 Johdanto

Insinööriyön aiheeksi valitsin DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing) -jätteen käyttöönoton vaatiman suunnittelun ja jätteen mittaukset. Työssäni toteutetaan DWDM-jänne. Työssä selvitetään seikkaperäisesti, mitä tulee tehdä, jotta jänne toimisi halutulla kanavamäärällä ja nopeudella. Päättötyön tarkoituksena on tuoda esille, mitä asioita tulee huomioida DWDM-jännettä suunnitellessa ja mittauksia suorittaessa. Työssä esitetään, kuinka olennainen kromaattinen dispersio on jätteen toiminnan kannalta, sekä dispersion kompensointi. Insinööriyötä tehdessäni pääsin suorittamaan jännevälin OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) -mittauksen, laiteasennukset ja tarvittavat laitteen sisäiset kuitukaapeloinnit DWDM-järjestelmän korttien välille, lisäksi asettamaan vahvistimille OSA (Optical Spectrum Analyzer) -mittaustuloksiin perustuvat asetukset. Suoritetuilla mittauksilla pystyttiin tämän jälkeen osoittamaan, että jätteen yli voidaan kytkeä 44 kanavaa, joiden nopeus on 10 Gb:ä. Työ tehtiin asiakkaan tilauksesta kahden eri toimipisteen välille tiedonsiirtokapasiteetin kasvattamiseksi.

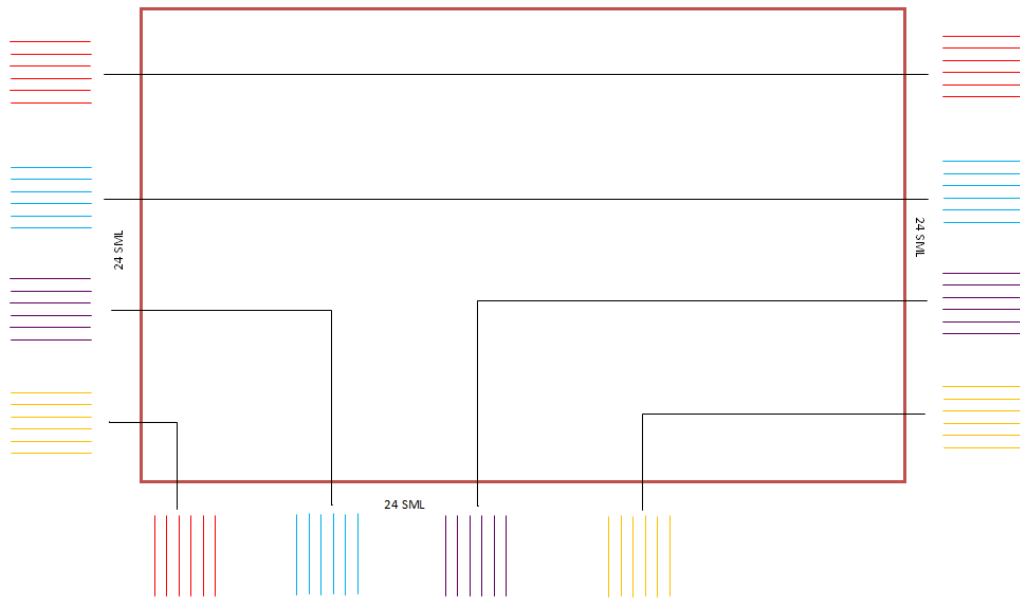
Nykypäivän tiedonsiirtotarpeet kehittyvät yhä vaativampaan suuntaan. Vuosien.1990–2010 aikana runkoverkon nopeus on kasvanut 2 megabitistä 10 gigabittiin. Lisääntyvä tietoliikenne vaatii yhä lisää kaistaa. Datan, puheen, musiikin ja kuvien siirtotarve kasvaa nopeasti. Palvelujen ja verkkojen muutokset lisäävät siirtoverkon kapasiteettitarvetta. Optinen verkko on ratkaisu moneen kapasiteetti pulmaan, koska kuparijohtimiin perustuvassa xDSL (Digital Subscriber Line) -verkossa ei pysty siirtämään suurta määrää dataa. Kytöntaajien lyhentyessä kasvaa myös verkon nopeus. Optinen tekniikka kehittyy jatkuvasti, kuitutekniikka, CWDM (Coarse Wavelength-Division Multiplexing), DWDM, 40 Gb:ä ja 100 Gb:ä laajentavat optisen verkon sovellusmahdollisuuksia samalla kun lisäävät verkon ominaisuuksia.

Tiedonsiirtonopeuksien kasvaessa käytössä olevat 1 Gb:n runkonopeudet muodostuvat pullonkauloiksi toimipisteiden sekä palvelinhotellien ja toimipisteiden välisiin tietoliikenne tarpeisiin. Tästä syntyy ongelmia, jotka ovat kuitumäärän riittämättömyys ja hinta kilometriä kohti. Ei siis ole järkevää siirtää yhtä kuituparia kohden vain yhtä aallonpituutta vaan kannattaa käyttää useita aallonpituuksia, minkä mahdollistavat BWDM- (Bi-Directional Wavelength-Division Multiplexing), CWDM- ja DWDM-järjestelmät. Näillä päästään kustannustehokkuuteen ja kuitujen järkevään käyttökapasiteettiin; yhteen kuitupariin saadaan mahtumaan jopa satoja eri aallonpituuksia, joiden käytöllä voidaan saavuttaa 100 Gb:n tiedonsiirtonopeus.

2 Siirtoverkon suunnittelu

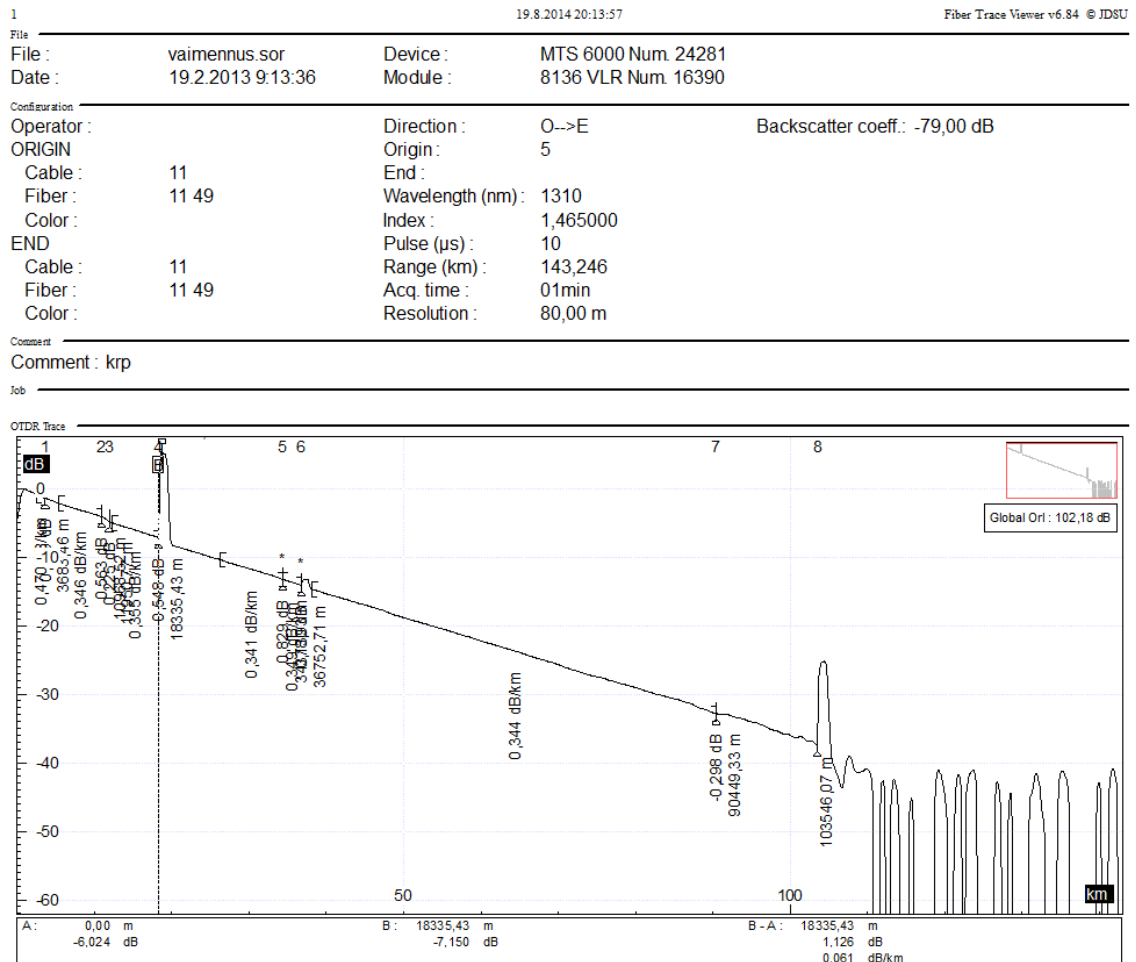
Siirtoverkon suunnittelussa tulee ensin selvittää, kuinka suurta joukkoa asiakkaita on tarkoitus palvella ja mikä on heidän kapasiteetin tarve nyt ja tulevaisuudessa sekä seurata tietotekniikan yleistä kehitystä ja suuntaa laitekannassa. Laitteita ei kannata hankkia jo poistuvasta laitekannasta, vaan katsoa mahdollisuuksien mukaan tulevaisuuteen ja yhteensopivuuteen jo olemassa olevaan laitteistoon. Kun halutaan yhdistää kaksi toimipistettä keskenään, se voidaan toteuttaa valokuidun ja siirtojärjestelmien avulla. Valokuidun tai kuituparin voi hankkia toimipisteiden välille joko vuokraamalla tai ostamalla operaattorilta. Valokuitu-kapasiteetin tarvittavien sijaintien välille voi myös ostaa urakoitsijalta avaimet käteen palveluna.

Kun omistaa oman valokaapelin, siitä voi yrittää myydä tai vuokrata jatkossa esimerkiksi tele- tai internetoperaattoreille kuituosuuksia ja näin saada kustannuksia pienemmiksi. Päädyttäessä oman kaapelin asentamiseen on syytä tutkia tarkasti eri kaapelivaihtoehdot ja se, mitä järjestelmiä on suunnitellut käytettäväksi kyseiselle yhteysväylle. Suunniteltaessa oman kaapelin asennusreittiä on selvitettävä etukäteen maanomistussuhteet ja muut tarvittavat lupa-asiat. Kaapelin asennusvaiheessa on erittäin tärkeää kaapelireitin dokumentointiin liittyvät asiat. Dokumentoinnin laiminlyöminen suunnittelu- ja asennusvaiheessa vaikeuttaa kaapelin löytämistä maastosta sekä johtaa ongelmiin mahdollisissa kaapelikatkotapauksissa. Lisäksi kaapelin omistajan vastuulla on mahdolliset kuidun siirtovelvoitteet. Esimerkiksi tiealueen muuttuessa on omistajan vastuulla kaapelien siirrot ja niistä aiheutuvat kustannukset. Kuituyhteyden huolellinen hitsaus suunnitelma ja hitsaus ovat tärkeitä. Hitsaus suunnitelmalla mahdollistetaan haaroituksen tekeminen tulevaisuudessa. Kuvassa 1 nähdään hitsaus suunnitelma, josta ilmenee kuitulohkojen jakautuminen eri suuntiin.



Kuva 1. Kolmesta suunnasta tulevat kuidut hitsataan suunnitelman mukaan.

Kuituyhteyden laatu voidaan varmistaa OTDR-mittauksella. Mittauksessa huomataan mahdolliset rakennusvaiheessa syntyneet kaapelivauriot ja hitsauksissa syntyneet epä-jatkuvuuskohdat eli mikro- ja makrotaipumat sekä takaisinheijastumat. KytKentäkuituja käytettäessä muodostuu liittimissä takaisinheijastuma ilmaaraosta johtuen. Kuidun pituuteen ja vaimennukseen liittyviä asioita tulee tarkastella, jotta osataan hankkia oikeat laitteet ja lähettimet kyseiselle kuituvälille. Näin ollen tulee laatia linkkibudjetti, jossa lasketaan vaimennukset eri aallonpituuksille ja kohinasuhteet yhteysvälille. Kuvassa 2 on esitetty kuitututkan mittaustulos yleisellä tasolla.



Kuva 2. Mittaus suoritettu 1310 nm:n aallonpituudella.

3 Valokuitu

Valon eteneminen valokuidussa

Valon nopeudelle saatiin ensimmäistä kertaa muu kuin ääretön arvo vuonna 1676, kun Jupiterin kuun kiertoaikaa mitattiin ja huomattiin, että se myöhästyi edelliseen kierrokseen verrattuna. Tämä johtui siitä, että maapallo oli eri kohdassa edelliseen mittaukseen verrattuna ja näin pystyttiin laskemaan valonnopeus, joka tosin ei ole sama kuin nykyaikaisilla välineillä saavutettu 299.792.458 m/s. Tämä on tyhjiössä mitattu nopeus, joka on lähes sama kuin valon kulku aika ilmassa. Valonnopeus voidaan laskea, kun tiedetään taitekerroin lasille tai muulle väliaineelle. Lasin taitekerroin on noin 1,5, näin saadaan lasissa kulkevalle valolle nopeudeksi 199.861.638 m/s. [1.] Kaavassa 1 on esitetty väliaineen nopeuden laskukaava.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

$$v = \frac{299792458}{1,5} = 199861638$$

c on valonnopeus tyhjiössä.

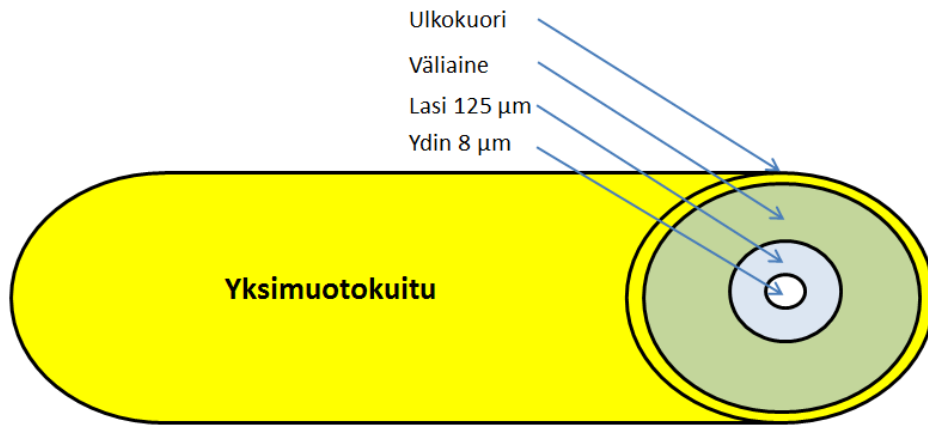
v on valonnopeus lasissa.

n on taitekerroin.

Moni- ja yksimuotokuidut

Vuonna 1973 otettiin Yhdysvalloissa käyttöön ensimmäinen kuituyhteys ja Suomessa käyttöönottoon päästiin vuonna 1979. Ensimmäiset valokuituyhteydet oli toteutettu monimuotokuidulla, jonka vaimennus on noin 18 dB/km. Ensimmäisissä valokuituyhteyksissä havaittu vahva vaimentuma johtui pääasiassa heikoista lähettimistä ja vastaanottimista. Tästä syystä yhteysvälit olivat hyvin lyhyitä. Monimuotokuidut on nimetty luokitain niiden teknisten ominaisuuksien mukaan standardissa (ISO/IEC 11801) [31.] Silloisten kuitujen tyyppi oli OM1 ja ytimen halkaisija oli 62,5 µm ja lasi ytimen ympärillä 125 µm. Monimuotokuidun ytimen halkaisija on pienentynyt nykypäivään tultaessa hieman, ja näin siirrettävä signaalin matka on kasvanut. Nykypäivän standardin mukaan monimuotokuidun täytyy olla tyypiltään OM3, jossa ytimen halkaisija on 50 µm ja lasi ytimen ympärillä 125 µm. Monimuotokuitu soveltuu nykypäivänä kiinteistön sisällä tehtäviin kaapelointeihin, joissa pituudet ovat alle 2000 m. [3.]

Yksimuotokuidun rakenne on hieman pienempi. Kuvassa 3 sen ytimen halkaisija on 8 µm ja lasi sen ympärillä 125 µm. Lasia suojaamassa on vielä väliaine ja ulkokuori kuten myös monimuotokuidussa.



Kuva 3. Yksimuotokuidun läpileikkaus. [36.]

Yksimuotokuiduissa on useita vaihtoehtoja, joihin kannattaa perehtyä huolellisesti ennen kaapelin hankintaa, jotta saadaan käyttötarkoitukseen soveltuva kaapeli. Taulukosta 1 voidaan tarkastella ITU-T:n (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) määrittämiä kuitustandardeja. [32;33;34;35.]

Taulukko 1. Kuituvaihtoehdot ja niiden vaimennus- sekä dispersioarvot.

	Yksimuotokuitu ITU-T G.652	Dispersio siirretty ITU-T G.653	Raja-aallonpituus siirretty ITU-T G.654	Alhaisen disper- sion kuitu ITU-T G.655
Vaimennus				
1285–1330 nm	≤ 0,5 dB/km	-	-	-
1530–1565 nm	≤ 0,28 dB/km	≤ 0,28 dB/km	≤ 0,18 dB/km	≤ 0,27 dB/km
1565–1625 nm	≤ 0,35 dB/km	-	-	≤ 0,35 dB/km
Kromaattinen dispersio				
1285–1330 nm	≤ 3,5 ps/(nm*km)	-	-	-
1530–1565 nm	≤ 18 ps/(nm*km)	≤ 0 ps/(nm*km)	≤ 20 ps/(nm*km)	≤ 2-5 ps/(nm*km)
Raja-aallonpituus				
	≤ 1260 nm	≤ 1270 nm	≤ 1530 nm	≤ 1450 nm

Valokuitu voi olla esimerkiksi tavallista ITU-T:n G.652-standardin mukaista kaapelia, jonka dispersioarvot täyttävät vaatimukset niin 1310 nm:n kuin 1550 nm:n aallonpituuksilla, kun käytössä on STM1-, STM4- tai 1 Gb:n -lähetin. [4.] ITU-T:n G.652D-standardin mukainen kuitu on vesipiikitöntä. Vesipiikittömällä kuidulla tarkoitetaan kuitua, josta on poistettu vesimolekyylit. 1400 nm:n alueella sijaitseva vesimolekyylit absorboi ja aiheuttaa huomattavan vaimennuksen ja estää näin alueen käytön. ITU-T:n

G.653-standardin mukainen kuitu on dispersiosirrettyä. Tätä käytetään tavallisesti rakennettaessa DWDM-jänteitä, joissa on tärkeää saada mahdollisimman alhainen vaimennus kilometriä kohden laajalla aallonpituuskaistalla. Alhaisen dispersion kuitu G.655 soveltuu hyvin ominaisuuksiltaan kromaattisen dispersion poistamiseen. Kanava-alueet on jaettu nippuihin, joilla niitä kuvataan. Taulukossa 2 on esitetty kanava-alueet.

Taulukko 2. Kanavajakotaulukossa on havainnollistettu käytetyt aallonpituudet alueittain. [38.]

Alueen nimi	Aallonpituus	Kuvaus
O-alue	1260–1360 nm	Peruskanava PON-lähetyskaista
E-alue	1360–1460 nm	Vesipiikki alue
S-alue	1460–1530 nm	PON- vastaanottoaista
C-alue	1530–1565 nm	Alhaisen vaimennuksen alue. Perus-DWDM-kanavat
L-alue	1565–1625 nm	Alhaisen vaimennuksen alue, Laajennettu DWDM-alue.
U-alue	1625–1675 nm	Todellapitkät aallonpituudet.

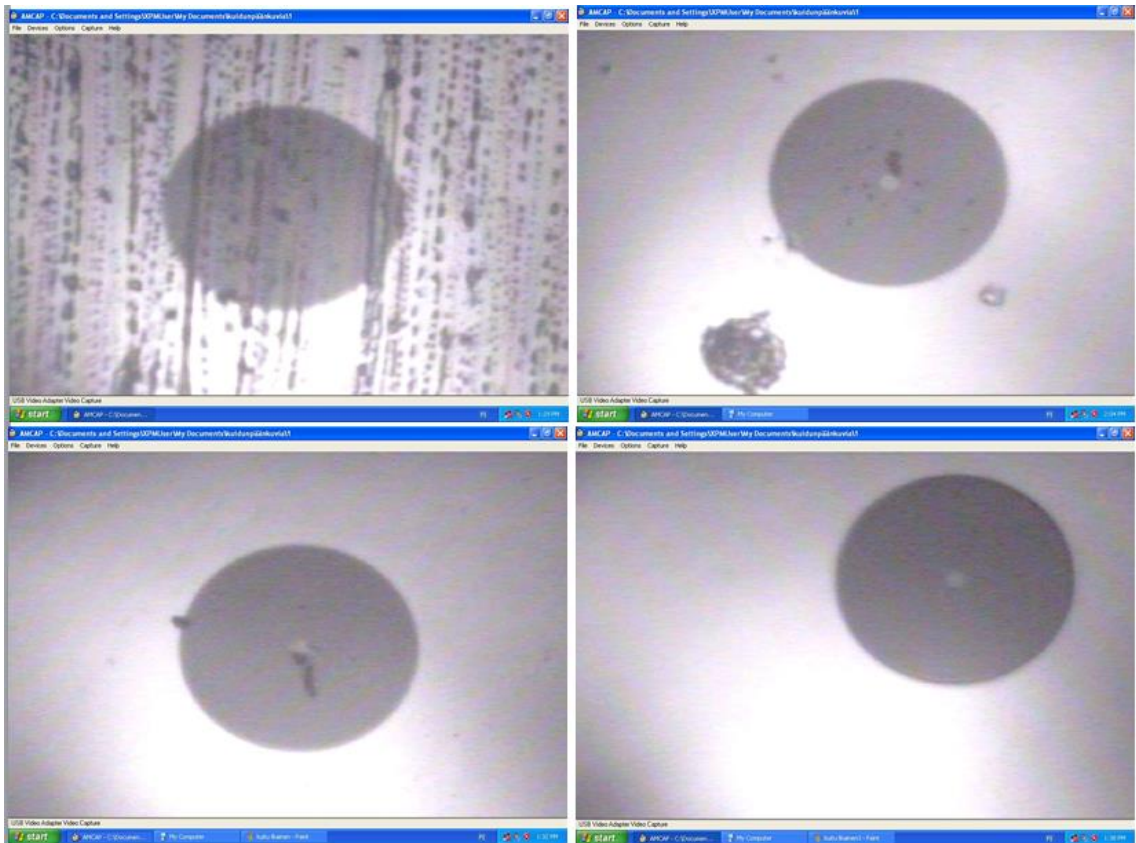
Valokuidun vaimennus

Pieni liitosvaimennus tarkoittaa, että hitsaamalla tehdyssä liitoskohdassa etenevästä optisesta tehosta häviää mahdollisimman vähän. Yksimuotokuidulle voi laskea karkeasti vaimennusta 0,2 dB/km. Tässä pitää kuitenkin ottaa huomioon jatkokset, joita tulee pidemmällä matkoilla useita. Tämä johtuu kaapelivalmistajien kaapelikelojen koosta, eli kuinka paljon kuitua mahtuu kelalle. Kelalla voi olla kuitua 3–6 km kelan koosta riippuen. Jatkos lisää vaimennusta noin 0,2 dB/km. Liitinkenttien vaimennus on suurempi kuin jatkosten. Liittimien väliin syntyy ilmarako, jonka vaimennus on noin 0,4 dB/km. Edellä mainitut arvot ovat suuntaa antavia yleisarvoja. Oikeat arvot voidaan selvittää ainoastaan mittaamalla kuitureitti kuitututkalla.

Liittimiä kytkettäessä on syytä kiinnittää huomiota puhtauteen. Silmämääräisesti katsottuna likaa ei huomaa, mutta kuidun liittimien tarkastamiseen on olemassa valokuitumikroskooppeja [5.], joiden avulla pystyy tarkastamaan liittimien puhtauden luotettavamin. Kuvassa 4 vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas katsottuna näkee ensin rasvaisen

liittimen pinnan, joka on syntynyt liittimen pintaa pelkästään sormella pyyhkäistäessä. Seuraavissa kuvissa on käytetty liittimen puhdistamiseen tarkoitettua puhdistuskasettia. Puhdistuskasetti ei välttämättä irrota pinttynyttä likaa, joten liitin on tarkistettava jokaisen pyyhkäisyn jälkeen uudestaan, jotta voidaan varmistua, onko liitin puhdistunut.

Kuvassa näkyy musta ympyrä vaalealla pohjalla. Tämä vaalea alue on väliainetta, jonka sisällä kulkee 125 μm :n lasi, joka näkyy kuvassa mustana ympyränä. Mustan ympyrän keskellä näkyy himmeä vaalea piste, joka on kuidun 8 μm :n ydin. Lian ollessa suoraan tämän ytimen edessä näkyy kuitututkalla mitattaessa voimakas vaimennus. Lika on poistettava liittimestä kokonaan ennen kytkemistä, koska toleranssit ovat hyvin pienet ja lika voi liikkua muutaman mikrometrin ja näin kulkeutua ydinalueelle. Jos kuidunpuhdistuskasetti ei irrota pinttynyttä likaa, voidaan käyttää esimerkiksi puhdasta alkoholia, ETAX A:ta. Jos alkoholiin on lisätty denaturointiaainetta, se synnyttää puhdistettavan pinnan päälle kalvon, ja tämän takia denaturoitu alkoholi ei sovellu liottamalla puhdistamiseen. [6.]

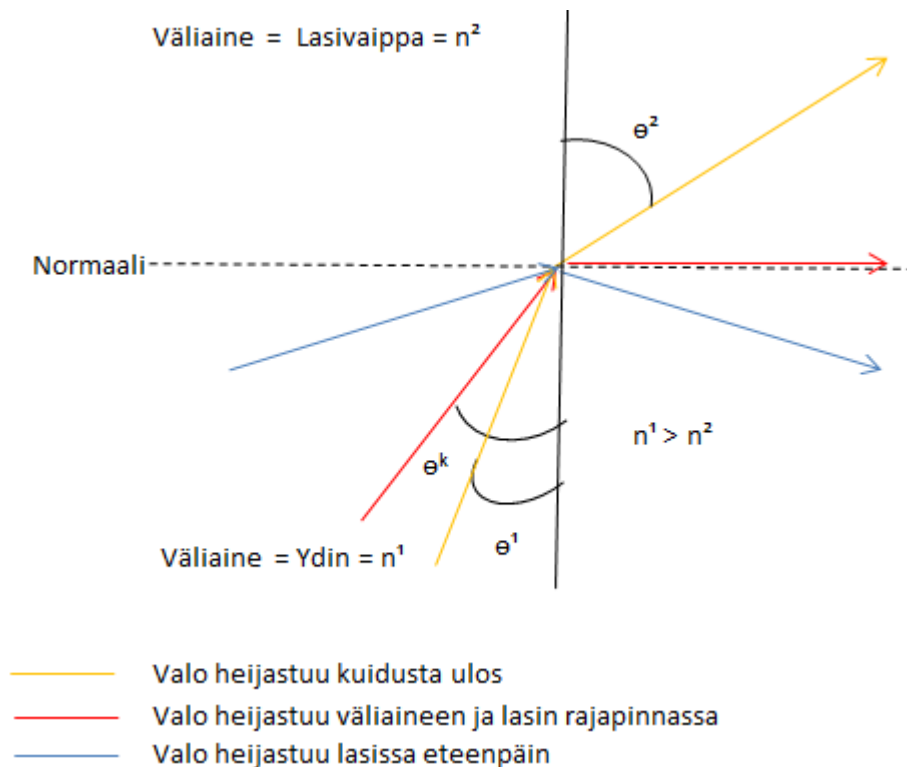


Kuva 4. Liitin kuvattu valokuitumikroskoopilla. Liitin puhdistettu putsauskasetilla kuvien välissä.

4 Valokuidun ominaisuudet

Snellin laki

Snellin lain mukaan optisesti tiheämpään aineeseen tuleva valo taittuu kohti normaalia, eli tulokulma on ollut suurempi kuin kuidun sisällä tapahtuva taittuminen. Optisesti harvempaan aineeseen siirtyvä valonsäde taas taittuu normaalista poispäin, jolloin tulokulmaan verrattuna taitekulma on suurentunut edelleen. Tulokulman kasvaessa riittävän suureksi tulee taitekulmasta 90° . Tällöin valonsäde taittuu kuidun sivusta ulos, tätä ilmiötä kutsutaan kriittiseksi tulokulmaksi. Taitekulman ollessa yli 90° valo heijastuu takaisin tulosuuntaan ja tätä kutsutaan takaisinheijastukseksi. On myös muistettava, että osa valotehosta heijastuu takaisin johtuen liittimen pinnan epätasaisuudesta. Valon tulokulman kuituun ollessa kohtisuora ei valo taitu kuidussa laisinkaan. [2.] Kuvassa 5 esitetään Snellin lain mukainen taittuminen. Kuvassa 6 on esitetty kuidun poikkileikkauksen avulla valon taittuminen valokuidussa.



Kuva 5. Valon taittuminen Snellin lain mukaisesti, kriittinen kulma.

$$Taittumislaki = \frac{(n^1 \cdot \sin \theta^1)}{(n^2 \cdot \sin \theta^2)} \quad (2)$$

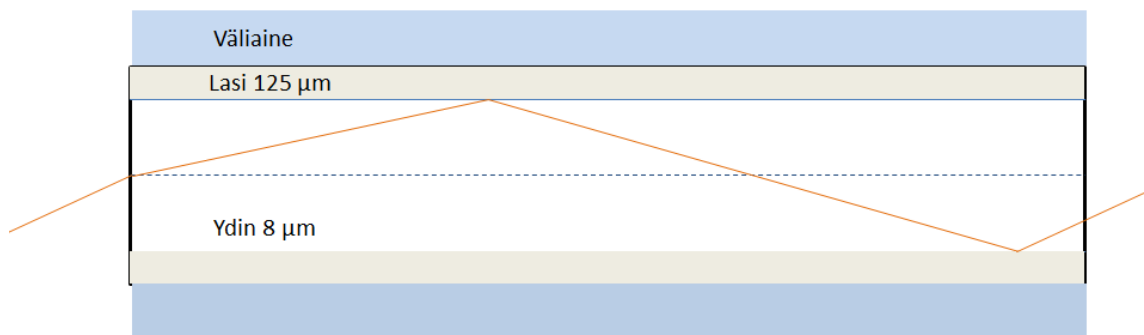
$$Kriittinen\ kulma = \sin^{-1}\left(\frac{n^2}{n^1}\right) \quad (3)$$

n^1, n^2 on väliaineiden taitekertoimet

θ^1 on valon tulokulma

θ^2 on taittuneen valon lähtökulma

θ^k on kriittinen kulma



Kuva 6. Valon taittuminen yksimuotoisessa valokuidussa.

Epälineaariset ilmiöt

Lähettimien lähetystehojen kasvaessa optisissa kuiduissa on havaittu epälineaarisia ilmiöitä. Näitä ei-toivottuja ilmiöitä syntyy pitkillä kuituväleillä, joissa välimatkat ovat useita satoja kilometrejä, sekä suuritehoisissa lähettimissä. Epälineaarisia ilmiöitä voidaan rajoittaa erilaisilla teknisillä ratkaisuilla. DWDM-tekniikassa lähettimen modulointia muuttamalla tai kanavavälejä kasvattamalla vältetään kanavien sekoittumiselta. Raman-sironnassa suuret taajuudet siirtyvät pienempien taajuuksien päälle eli aallonpituuksista pienempi vie tilaa suuremman aallonpituudelta. Näin tapahtuu kanavien ylikuulumista, joka aiheuttaa kohinavaimennuksen kasvua ja kokonaiskohinasuhteen pienenemisen. [7.]

Muita epälineaarisia ilmiöitä ovat neljän aallon sekoitus ja Brillouin-sironta. Neljän aallon sekoituksella tarkoitetaan, että kuituun lähetetään kahta tai useampaa eri aallonpituutta ja näiden kerrannaistaajuuksille ilmestyy tehoa, joka on ylikuulumista heikentäen

näin mahdollista hyötysignaalia. DWDM-yhteyksillä neljän aallon sekoitus on erityisen huono, koska se aiheuttaa taustakohinaa heikentäen kohinasuhdetta yksittäisissä kanavissa.

Takaisinheijastuma

Valokuidussa tapahtuu takaisinheijastumaa, kun epäjatkuo ilmenee liitinkentässä tai jatkoksessa. Takaisinheijastuma voi rikkoa lähettävän vahvistimen, jos takaisinheijastuva signaali on liian suuritehoinen. Raman-vahvistimen lähetysteho on yli 700 mW. Lähetys- ja takaisinsiroutuva teho lähettimen välittömässä läheisyydessä on niin suuri, että se voi sulattaa kuidun ytimen. Suuri heijastusvaimennus tarkoittaa, että liitoksessa takaisinheijastuva valoteho on mahdollisimman pieni. Tästä johtuen liitinkentät tulisi poistaa hitsaamalla kuidut suoriksi. Heijastusvaimennuksen tulisi olla vähintään 40 dB. Joidenkin suuritehoisten vahvistimien liittimet ovat APC (Angled Physical Contact) hiottuja, jolloin mahdollinen takaisinheijastus voidaan välttää Snellin lain mukaan. [8.] Tämä tarkoittaa, että naarasliittimen pinta ei ole täysin suora, vaan se on kallistettu 8^o:n kulmaan. Siihen kytkettävä urosliitin on hiottu vastaavaan kulmaan. Näin siroutuva valoteho ei heijastu takaisin vaan kohti kuidun ulkoreunaa. Liittimen tunnistaa yleensä vihreästä väristä, silmällä hionnan kulmaa ei huomaa.

Mikrotaipuma

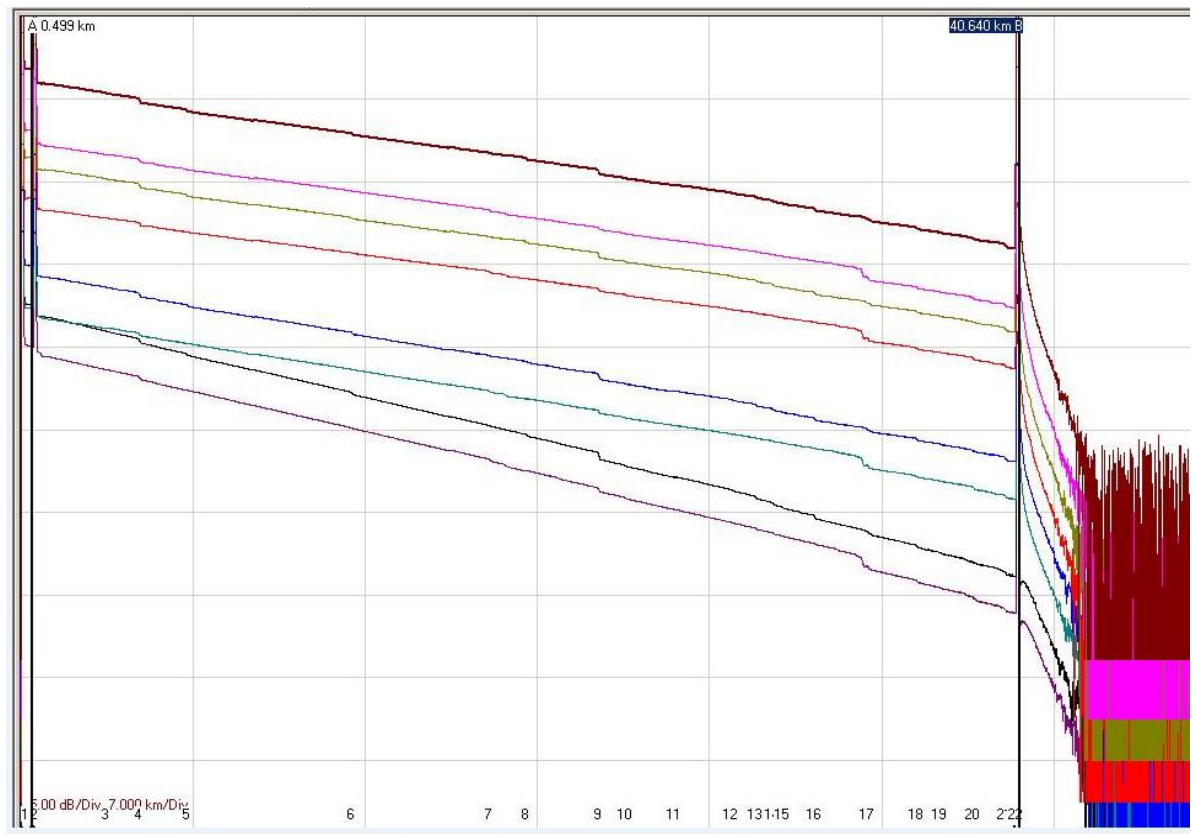
Kuidun toiminnan kannalta on tärkeää, ettei kuidut joudu puristuksiin eikä niihin tule liian tiukkoja mutkia mikrotaipumien välttämiseksi. Mikrotaipuma syntyy alle 1 mm:n taivutussäteellä. Tyypillisiä mikrotaipumien aiheuttajia ovat liian tiukka taivutussäde jatkoksissa tai nippusiteen kiinnittäminen liian tiukalle. Kaapeliarinalla kulkeva kuitukaapeli on myös voinut jäädä puristuksiin kulmaa vasten. Tällöin valo pyrkii puristuksessa kohdassa väliaineeseen ja näin syntyy tehohäviöitä. Vaikka puristus on vapautettu, on se jättänyt jälkensä kuidun muotoon ja näin muodostanut mikrotaipuman.

Makrotaipuma

Makrotaipuma syntyy, kun kuitua taivutetaan ja taivutussäde on suurempi kuin 1 mm. Valo pyrkii aina ulos valokuidusta kulkemalla suoraan. Mitä tiukempi mutka valokuituun tulee, sen suurempi on kuidusta ulospyrkivän valotehon määrä. Makrotaipuman löytäminen kuituväliltä onnistuu parhaiten tekemällä OTDR-mittaus (Optical Time Domain Reflectometry) kummastakin suunnasta, ja usealla eri aallonpituudella (1310 nm, 1470

nm, 1545 nm ja 1610 nm). Jos yhteysvälillä on makrotaipumia, ne erottuvat parhaiten 1625 nm:n alueella, kun taas 1310 nm:llä niitä tuskin huomaa. Pudotusväli voi olla 1625 nm:n alueella jopa 0,2–1,0 dB enemmän kuin 1310 nm:n alueella. On siis tärkeää vertailla kahta eri aallonpituudella tehtyä mittaustulosta yhtä aikaa, jotta huomataan, onko pudotus yhtä suuri kummallakin aallonpituudella. Vaikutus on olennaisen merkittävä DWDM-jänteessä, koska toimitaan juuri C- ja L-alueella. [9.]

Kuten kuvasta 7 voidaan havaita, tuloksissa ei ole suuria pudotuseroja aallonpituuksien välillä. Näin voidaan päätellä, ettei makrotaipumia ole yhteysvälillä. Kuiduissa on kuitenkin merkittäviä eroja tapahtumien 9 ja 17 kohdalla, jossa toisessa kuidussa tapahtuu suurempi pudotus kuin toisessa. Syy voi olla huonompi hitsaustulos tai liittimeen jäänyt lika ristikytkennässä. [10.] Erisuuruisten vaimennuksien jättäminen kuitupariin voi johtaa yhteyden toimimattomuuden toisella siirtosuunnalla. Tapahtumanumero 4:n kohdalla on tehonpudotus molemmissa kuidussa, ja tästä voisi päätellä kyseessä olevan liittin-kenttä.



Kuva 7. Neljällä aallonpituudella suoritettu OTDR-kuitumittaus (1610 nm, 1545 nm, 1470 nm ja 1310 nm). Mittaustulokset ylhäältä alaspäin kahdelle eri kuidulle.

Dispersio

Monimuotokuidussa ja yksimuotokuidussa esiintyy dispersiota siirrettäessä optista signaalia. Muotodispersiota ei esiinny yksimuotokuiduissa kuten monimuotokuiduissa, koska käytetään vain yhtä etenemismuotoa. Kyseiselle kuidulle annettua raja-aallonpituutta ei saa alittaa. Yksimuotokuidun raja-aallonpituus on aallonpituus, jota pienemmällä aallonpituudella valo ei kuidussa etene yksimuotoisesti, vaan syntyy useita muotoja. Raja-aallonpituus ilmoitetaan valmistajan toimesta eri kuitukaapeleille. Yksimuotokuiduissa esiintyy polarisaatiomuoto- ja kromaattista dispersiota. Dispersio voi olla joko negatiivista tai positiivista, ja se saadaan kaavasta 4. [12.]

$$\text{Dispersio} = \frac{ps}{(\text{nm} \cdot \text{km})} \quad (4)$$

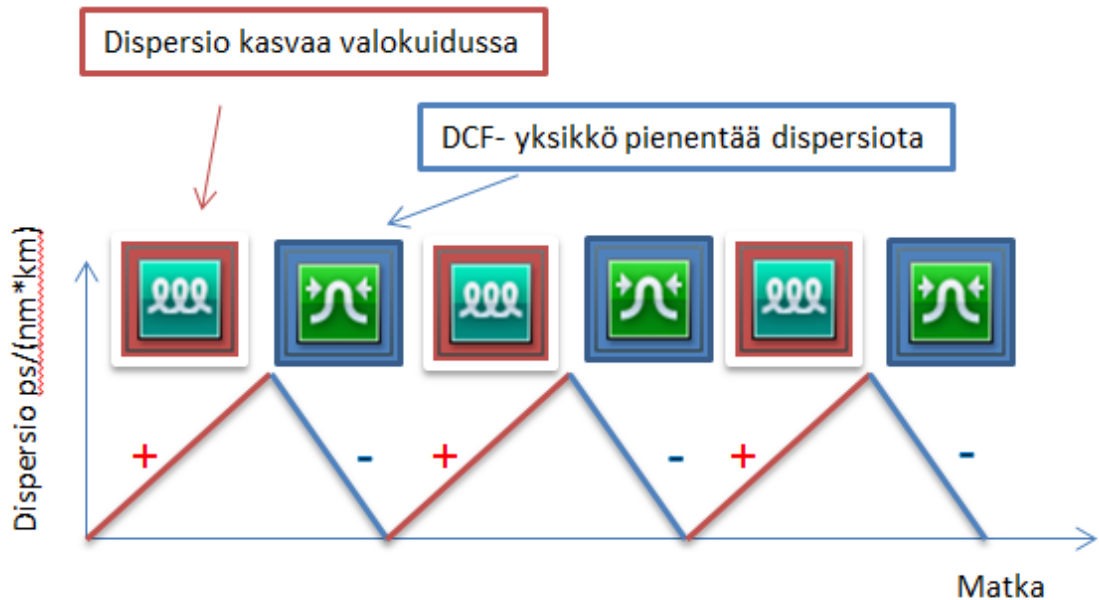
Yksimuotokuitujen merkittävin *kromaattinen dispersio* koostuu aaltojohdedispersiosta ja materiaalidispersiosta. Aaltojohdedispersiota syntyy siirrettävien signaalien aallonpituudesta johtuen. Suurimmat aallonpituudet eivät täysin mahdu kulkemaan ytimen sisällä, vaan ne taittavat vasta väliaineessa. Näin ne leviävät ja saavat suuremman taitekerroimen ja kulkevat nopeammin kuin pienet aallonpituudet ytimen sisällä, jossa taitekerroin on pienempi. Mitä kapeampi lähetettävä valopulssin spektri on, sitä paremmin valopulssi sietää dispersion vaikutusta. [13.] Valopulssin etureuna etenee aina nopeammin kuin takareuna, koska sillä on pienempi taajuus. Kromaattinen dispersio aiheuttaa bittinopeuden laskua, kun siirrettävää signaalia luetaan vastaanottimessa väärin.

Kahdessa eri polarisaatiomuodossa etenevä valo aiheuttaa *polarisaatiodispersiota*. X- ja Y-suunnissa etenevät pulssit saavat hieman erisuuruiset nopeudet. Tämä johtuu kuidun muodosta, koska kuitu joutuu erisuuruisiin jännitystiloihin asennusympäristöstä riippuen. PMD (Polarization Mode Dispersion) -arvo muuttuu tuulen heiluttaessa ilma-kaapelia, merikaapelin heiluessa mainingista johtuen tai maakaapelin joutuessa erisuuruisten massojen alle. Myös värinävaikutus muuttaa hetkellisesti PMD-arvoa junaradan ja maanteiden varsilla. Kuitu ei myöskään ole täysin pyöreä sen tekovaiheessa tulleista muodonmuutoksista johtuen. PMD-arvo eli PMD-kerroin ilmoitetaan kaavan 5 muodossa. [14.]

$$PMD = \frac{ps}{\sqrt{km}} \quad (5)$$

Dispersion korjaus

Dispersion korjaamiseen eli dispersion siirtoon voidaan käyttää muutamia eri menetelmiä. Dispersiosiiirretyllä ITU-T G.655-standardin kuidulla saadaan tuotua dispersion 0-kohtaa lähelle 1550 nm:n aallonpituusalueella. G.655-kuidun haittapuolena on suuri vaimennusarvo (noin 0.5–0.6 dB/km), koska joudutaan käyttämään välivahvistimia. Dispersiota saadaan myös korjattua käyttämällä erillistä DCF (Dispersion-compensating Fiber) -yksikköä, jossa on suuren negatiivisen dispersioarvon kuitua. Samalla vaimennus voi kasvaa liian suureksi ja joudutaan käyttämään välivahvistinta. Kyseiselle kuituvälille voidaan myös asentaa eri kuitutyyppisiä, jolloin ne kompensoivat dispersion vaikutuksia. [15.] Dispersion liiallinen korjaaminen negatiiviseksi johtaa ei lineaarisiin ongelmiin. Kuvassa 8 on esitetty dispersion siirtoon käytettävän DCF-yksikön toimintaperiaate.



Kuva 8. Dispersiosiiirretty kuituyksikkö kumoaa positiivisen dispersion.

5 WDM-järjestelmiä

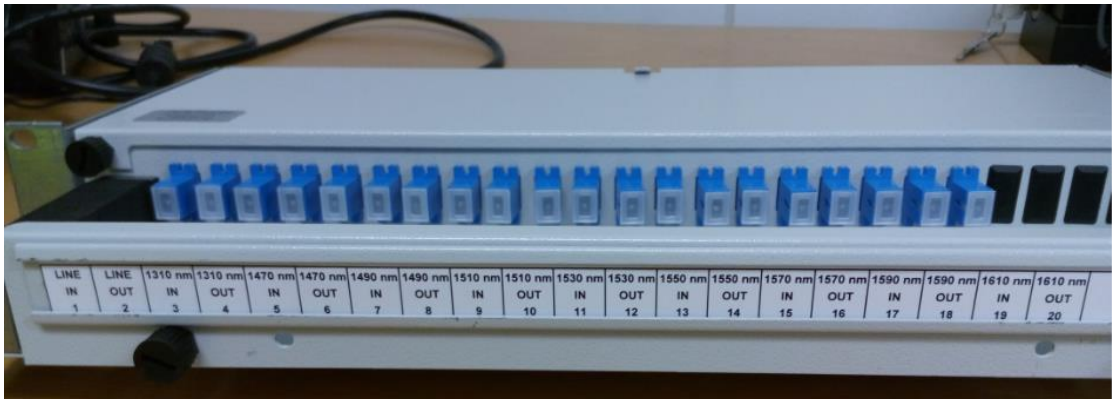
WDM-järjestelmällä tarkoitetaan usean aallonpituuden käytön yhdellä kuituparilla mahdollistava passiivi- tai aktiivilaite. WDM-järjestelmien eroja ovat käytettävien kanavien määrät, sekä kanavien etäisyys toisistaan.

Passiivinen aallonpituuden jako BWDM (Bi-Directional Wavelength-Division Multiplexing) on hyvä keino säästää kuitupareja ja kustannuksia toimipisteiden välillä. BWDM:n toimintavarmuus on hyvä, koska siinä ei ole elektronisia osia, jotka voivat vikaantua. BWDM:n hankintakustannukset ovat verrattain pienet CWDM- ja DWDM-järjestelmiin verrattuna. BWDM-laitteita on 2-, 4- ja 5-kanavaisina versioina eri laitetoimittajilla. Käytöhallintaa laitteistossa ei tarvita koska laitepari toimii kaksipiste parina (Point-to-Point). BWDM koostuu kummassakin päässä MUX- ja DEMUX-laitteista. [21.]

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) -laitteistossa on enemmän aallonpituuksia kuin BWDM:ssä, mutta vähemmän kuin DWDM-järjestelmässä. CWDM:n tarkoitus on niputtaa yhteen kuitupariin useampia aallonpituuksia erillisten SFP (Small Form Pluggable) -lähettimien avulla. Kuvassa 9 olevat passiiviset CWDM-laitteistot ovat kuidutettuina valmiiksi paneeliin. Paneeliin on merkitty selkeästi kyseiset aallonpituuudet, joilla haluttu kanava toimii. Ristikytkennät suoritetaan siten, että lähtevät tehot kytketään MUX-liittimille ja saapuvat tehot DEMUX-liittimiin (kuva 10). Kytettäessä tehoa halutulle aallonpituudelle CWDM erottelee väärät taajuudet prismojen avulla. Tämän vuoksi laajakaistaiset lähettimet eivät sovellu CWDM-laitteiston kanssa käytettäviksi. Kuvassa on 19":n laitekaappiin sopiva passiivinen CWDM-järjestelmä.



Kuva 9. Mux- ja Demux-passiivilaitteet kuidutettuna.



Kuva 10. CWDM-passiivijärjestelmä koteloituna edestä. Aallonpituudet ja kulkusuunnat merkittyinä paneeliin.

Käytetty aallonpituus vaimentuu optisessa haaroittimessa $-3,7\text{dB}$, joka on huomioitava linkkibudjettia laskettaessa. CWDM-kanavajako on 20 nm:n välein (kuva 11), kun DWDM-laitteissa päästään jopa $0,4\text{ nm:n}$ kanavajaolle. CWDM-laserit ovat halvempia kuin DWDM:ssä käytetyt lähettimet, koska ne ovat laajakaistaisempia. Lähetin voi huoju oletusarvostaan $\pm 3\text{ nm}$. CWDM-laitteistoja käytetään tyypillisesti kaupunkiverkkoa rakennettaessa, koska niiden etäisyys toisistaan voi olla noin 80 km . Tyypillisiä kanavia CWDM:ssä ovat 1610 nm:n , 1590 nm:n , 1570 nm:n , 1550 nm:n , 1530 nm:n , 1510 nm:n , 1490 nm:n , 1470 nm:n ja 1310 nm:n . Kanavat voivat lähteä 1270 nm:stä ylöspäin. Markkinoilla on myös aktiivilaitteita CWDM-järjestelmiksi. Niiden etuina on käytöhallinta ja valvonta. Aktiivisissa laitteissa samalle kanavalle voidaan syöttää kaksi $1,25\text{ Gbps:ssa}$ yhteyttä tai yksi 10 Gbps:ssa yhteys [22.] Kuvassa 11 on CWDM-passiivijärjestelmän OSA-mittaustulos. Kuvassa erottuu kanavat vihreinä pystypalkkeina. Myös kohinan pystyy erottamaan palkin alareunasta hartiamaisesta muodosta.



Kuva 11. Mittaustulos Demux:sta ja näkyvissä seitsemän aallonpituutta.

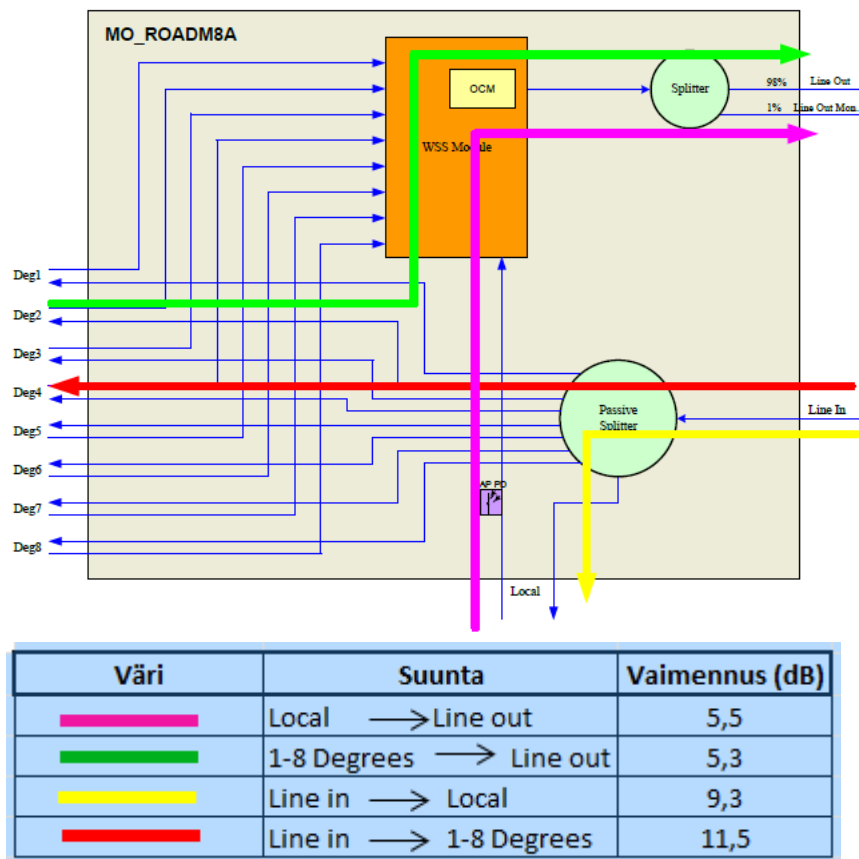
5.1 DWDM-järjestelmä

Komponentit

DWDM-jänteelle voidaan yhdelle kanavalle kytkeä erillisellä yhdistäjäkortilla 1,25 Gbps:n kokoisia kapasiteetteja kaksi kappaletta. Tällöin sen koko aallonpituus käyttää 2,5 Gbps:n kapasiteetin. Voidaan myös käyttää 10 Gbps:n SFP:tä (Small Form Pluggable), tällöin kaista käytetään kokonaan yhdelle yhteydelle kyseisellä aallonpituudella. Nostettaessa nopeutta 40 Gbps:n, tulee 50 Ghz:n alueella ongelmaksi kanavan rajat ja saattaa ilmetä ylikuulumista naapurikanavilla sekä signaalikohinasuhteen heikkenemistä.

Jänne sisältää aina muutamia vakiokortteja ja erilaisia vahvistimia riippuen jänteen pituudesta ja vaimennuksesta. Kuvassa 13 on esitetty kaksi erillistä suuntaa, pohjoinen ja itä, joissa kumpaankin on kytketty kuusi lähetin- ja vastaanotin-SFP:tä asiakasliitynäksi. Jokainen lähetin on merkitty kanavanumerolla, jonka aallonpituuden voi katsoa kanavataulukosta liitteestä 1. Jokaisen lähtetimen tuloteho voi olla erisuuruinen riippuen lähtetimien yksilöllisestä laadusta ja asiakkaan laitteen etäisyydestä. Artemis Mux

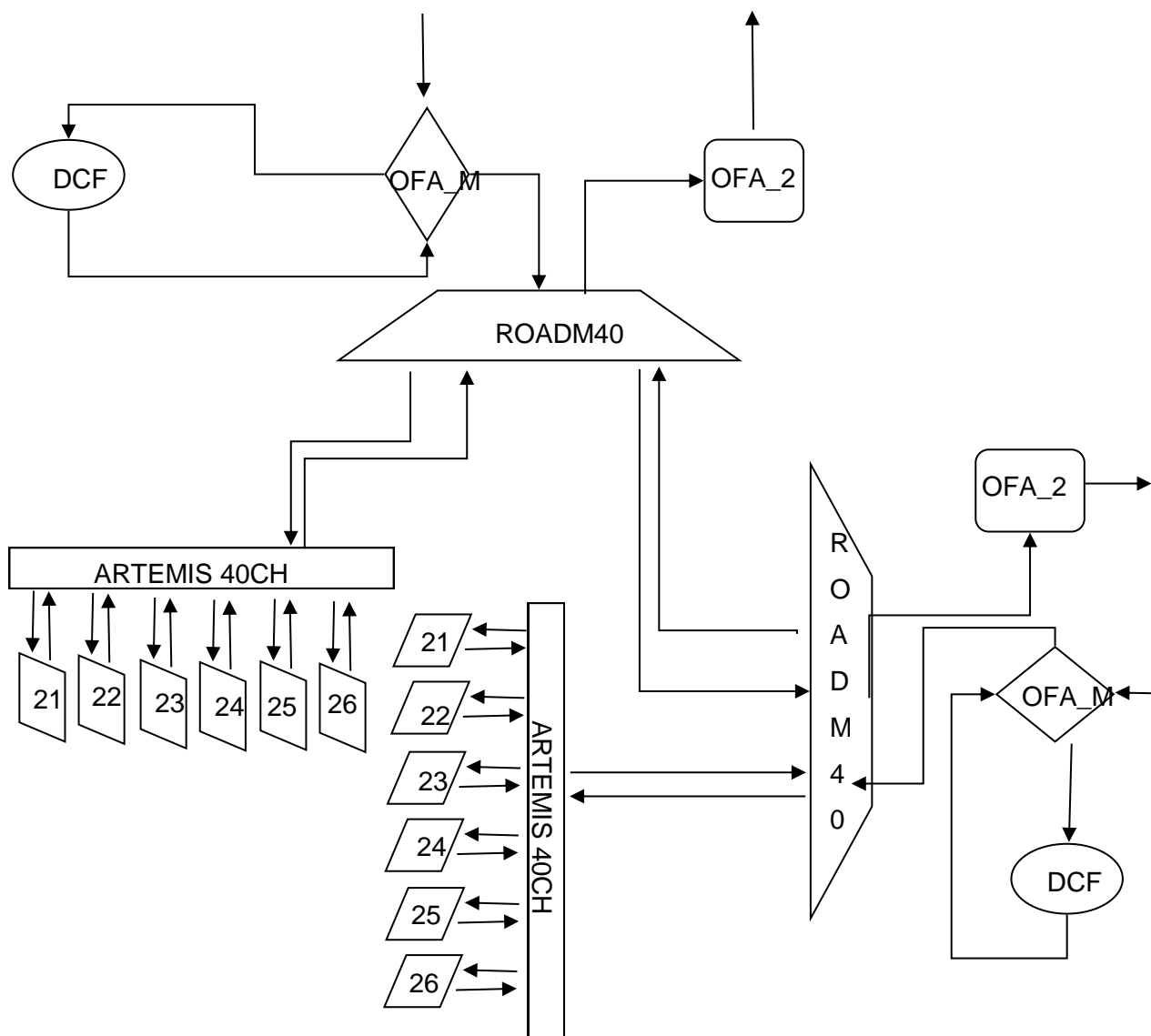
kerää kanavat yhteen ja tasoittaa voimakkaimmat kanavat ohjelmallisesti samalle lähtötasolle muiden kanssa. Tämä on tärkeää, jotta lähtötehot eivät olisi vielä liian korkeat eivätkä liian matalat, jotta yhteys pystytään tulkitsemaan ilman virheitä vastapäässä ja signaalikohinasuhde ei olisi liian suuri. Artemis Mux:n voidaan tuoda 40 eri kanavaa ja niputtaa ne lähtemään yhdellä kuituparilla eteenpäin. ROADM8 (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) -kortin tarkoitus on tässä kerätä paikallisesti lähtevät aallonpi-tuudet ja optisesti ristikytkä ne eteenpäin (kuva 12). Seuraavassa vaiheessa kokonaislähtötehot nostetaan vahvistin OFA_2 (Optical Fiber Amplifier) -kortilla maksimisaan joko +23 dB:n tai +29 dB:n tasoille riippuen siitä paljonko kyseinen yhteysväli läh-töpäässä vaatii tehoa, jotta sen tulkinta vastapäässä onnistuu. Seuraavassa kuva 12 esittää, mistä ROADM-kortin vaimennus muodostuu sekä sisäisen kytkennän.



Kuva 12. ROADM-kortin vaimennukset. [29.]

Paluusuunnassa tullaan vahvistin OFA_M-kortille, jolla vahvistetaan tulotasot, jotta niitä pystytään tulkitsemaan. Hyötysignaalien vahvistuessa myös kohina vahvistuu vahvistimessa. Jos kanavat lähtöpäässä olivat eri lähtötasoilla ja voimakkaimpia kanavia ei olisi vaimennettu, tässä kohtaa heikoimmille kanaville olisi ilmestynyt taustakohinaa muita enemmän ja signaalikohinasuhde olisi pienempi. Dispersion siirto tapahtuu

DCF:illä, jossa nopeimmin edenneet suuret aallonpituudet hidastuvat ja pienimmät saavuttavat ne korjaten kulkuajakaeron. DCF:ssä on 40 km:n dispersio kompensoitua kuitua kulkuajan siirtoa varten. Edellä mainitusta johtuen syntyy vaimennusta, joka seuraavassa vaiheessa vahvistetaan OFA_M-kortilla uudelleen. ROADM-kortille tultaessa voidaan päättää, otetaanko yhteydet paikallisesti ulos vai tehdäänkö optinen läpikytkeä toiselle jänneväliille ROADM:n kautta. Kytettäessä uudelle jänneväliille siellä odottaa taas uudet vahvistimet, jotka vahvistavat jälleen myös kohinaa. [19.] Jokainen kytkentä tuo lisävaimennuksen, jonka arvo on ilmoitettu kortin datalehdessä. Tämä tulee huomioida laskettaessa linkkibudjettia, jotta kaikki aallonpituudet pääsevät perille eikä kohina pääse liian suureksi. Kuvassa 13 on kytkentäkaavio kahdelle jännele eri toimipisteiden suuntaan.



Kuva 13. ROADM:n jännekuva.

Mux-, Demux-teknologia

Aallonpituuksien jako tapahtuu paikallisesti Mux-, Demux-laitteilla. Ensimmäiset Mux:t olivat Star Couplereita, joissa oli suuri vaimennus. Vaimennus johtui laitteen kuitujen hitsauksesta yhteen haaroittamalla jolloin jokainen haara lisäsi vaimennusta. Braggin hilaa ja ohutfilmi suodatusta käytettiin seuraavan sukupolven laitteissa, mutta ne olivat herkkiä lämpötilan muutoksille. Viimeisimpänä ja yleisesti käyttöön tullut AWG (Arrayed Waveguide Filter Grating) -teknologia on tällä hetkellä paras. AWG:n toiminta perustuu peileillä aallonpituuksien heijastamiseen eteenpäin jossa suodattimet päästävät vain halutun aallonpituuden lävitse. Loput aallonpituudet taittavat eteenpäin ja seuraavat suodattimet joko laskevat ne lävitse tai ohjaavat jälleen eteenpäin.

WSS-ristikytöntäyksikkö

ROADM-järjestelmän aallonpituuksia voidaan ohjata WSS (Wavelength Selective Switch) -yksiköllä, joka mahdollistaa 1 x 9 aallonpituuden lisäyksen ja poiston. Kahdeksan aallonpituutta voidaan laittaa kulkemaan useamman järjestelmävälän lävitse, ja yksi aallonpituus on tarkoitettu järjestelmän paikallisportiksi josta voidaan kytkeä toimipisteiden yhteydet. Hallintaväylä täytyy ottaa ulos jokaisessa päätepisteessä. Olemassa on myös 1 x 23 WSS-yksiköitä, jotka mahdollistavat useamman aallonpituuden kuljettamisen. WSS yhdistää ja säätää jokaisen aallonpituuden lähtötason yhtä suureksi vaimentamalla vahvempia kanavia.

PXC-ristikytöntäyksikkö

Nykyisin on myös PXC (Photonic Cross connection) -yksiköitä, joilla pystytään kuljettamaan yksi aallonpituus sisään ja haaroittamaan se niin moneen lähtevään porttiin kuin halutaan. Näin PXC on varmentamisen kannalta parempi kuin WSS, joka vaatii jokaiselle aallonpituudelle oman WSS-yksikön, jos sitä halutaan varmentaa. [23.]

ROADM

ROADM-yksikkö on saapuvien signaalien ristikytöntäyksikkö jolla ohjataan halutut aallonpituudet joko seuraavalle jännevälille tai pudotetaan paikallisesti ulos. Saapuvat signaalit haaroitetaan yksikössä jokaiseen porttiin kuten Star Couplerissa. Lähtevässä

suunnassa on WSS-yksikkö sisäänrakennettuna, jonka tarkoitus on laskea vain halutut aallonpituudet lävitse ja suodattaa muut pois. Samalla suodattuu myös kohina estetyiltä aallonpituuksilta ja OSNR-mittaaminen vaatii I-OSNR (In Band Optical Signal to Noise Ratio) -menetelmän.

DCF-korjain

DCF-korjainta käytetään pitkillä kuituväleillä ja yli 10 Gb:n yhteyksissä, joissa eri aallonpituuksien kulkuaika muuttuu. Aallonpituudet kimpoilevat kuidussa eri vaiheessa eri taajuuksilla, ja näin ollen ne saapuvat perille eri aikaan. Tätä kutsutaan ryhmäkulkuai-kaviiveeksi. Tällöin DCF-korjaimien lisääminen yhteyden välille korjaa vaihe-eroja eli tehdään niin sanottu dispersiosiiirto. Tällöin nopeimmin kulkeva aallonpituus hidastuu, hitain nopeutuu ja ne saapuvat perille yhtä aikaa. DCF:ää ei kuitenkaan tule kytkeä suoraan kuituyhteyden jatkoksi. Yhteys täytyy ensin vahvistaa, jotta yhteyden pituus ei tulisi liian pitkäksi vastaanottimen erottelukyvyn kannalta. Vahvistimia tulee käyttää pitkillä kuituväleillä, koska signaalin teho laskee alle vastaanottimen erottelukyvyn. Kuituyhteydellä ollessa yli 70 km:ä joudutaan yleensä lisäämään joko 40 km:n tai 80 km:n dispersiosiiirretty DCF-korjain. Seurauksena on vaimennuksen kasvaminen, eikä vastaanotin pysty erottamaan hyötysignaalia kohinan seasta. Dispersionsieto lähettimessä ja vastaanottimessa vaihtelee laitevalmistajasta riippuen sekä laitekohtaisesti. Myös kaapelin valmistaja ilmoittaa kaapelikohtaisen dispersion kilometriä kohti. Tämän pystyy myös toteamaan tekemällä mittauksen kuitututkalla.

Vahvistimet

Vahvistinta käytetään signaalin tehon nostamiseen riittävän korkealle, jotta sen kulkisi jänteen ylitse. Tavalliset vahvistimet mitä käytetään DWDM-jän-teillä on OFA_x:n tyyppisiä. +16 dB:n ulostulo tehotasolla. Mitä useampi vahvistin on yhteyden alku ja loppupisteen välillä, sitä enemmän signaaliin syntyy taustakohinaa, jonka voidaan havaita OSNR- ja I-OSNR-mittauksella. Signaalia vahvistettaessa myös kohina voimistuu, ja mitä pidemmälle mennään, sen voimakkaampi kohina on suhteessa hyötysignaaliin. Loputon signaalin vahvistus ei ole mahdollista vaan se pitää ottaa välillä ulos järjestelmästä sähköiseen muotoon ja muodostaa uudelleen optiseksi. Tämän on tehtävä, jotta signaali olisi taas regeneroitu uudelleen alkuperäiseen muotoon. Näin yhteydet voivat muodostua hyvinkin pitkiksi, koska koko signaali-kohinasuhde on taas käytettävissä.

Raman-vahvistin

Raman-vahvistimet ovat uuden sukupolven tehokkaita optisia vahvistimia. Niiden toiminta perustuu elektronien varautumiseen fotoneilla, ja energian vapautumiseen hallitusti. Raman-vahvistin on pumppulaseri, joka lähettää varauksettoman elektronikentän kuituun. Elektroni varautuu saapuvasta fotonista ja muodostaa energian, joka vapautuu eteenpäin kuidussa muodostaen lisää tehoa siirrettävälle hyötysignaalille. Tätä kutsutaan hallituksi emissioksi. Raman-vahvistin asennetaan yhteysvälin loppupäähän. Raman lähettää pulssin noin 40 km:n päähän kohti kuidun alkupäätä. Raman-vahvistimen lähettämä signaali luovuttaa oman tehonsa saapuvaan hyötysignaaliin, koska heikompi signaali luovuttaa tehonsa aina vahvemmalle signaalille. Vaikka yhteysvälillä ei olisi siirrettävää dataa, toimii pumppulaseri myös silloin. Ramanin lähettämän pulssin elektronit varautuvat kohinasta fotonien sijaan, tätä kutsutaan spontaaniksi emissioksi. Yhteysvälille muodostuu näin voimakasta kohinaa ja OSNR pienenee. Jos kuituvälillä olisi epäpuhtautta hitsauksissa, tai voimakas takaisheijastus vahvistimen lähellä, lähetettävä pulssi voisi rikkoa vahvistimen. Tehokkaiden vahvistimien kanssa toimittaessa on erityisen tärkeää liittimien ja hitsauksien puhtaus. Raman-vahvistinta ei kannata asentaa yhteyden lähtöpäähän. Signaali on valmiiksi nostettu esivahvistimilla korkealle lähtöteholle, ja signaalin liiallinen vahvistaminen ei ole kannattavaa epälineaaristen ongelmien takia. Tämän takia Raman-vahvistin tulee asentaa yhteyden loppupäähän, jolloin signaali on jo heikentynyt. Raman-vahvistimen toiminta alkaa vaikuttaa noin 40 km:n päässä jännevälin loppupäästä, jossa se muodostaa lisää tehoa siirrettävälle signaalille. [39;40.]

EDFA-vahvistin

Tehokkaiden vahvistimien sarjaan kuuluu myös EDFA (Erbium-doped Fiber Amplifiers) -vahvistin. Myös tämä vahvistin toimii pumppulaser-periaatteella. Erona on, että vahvistimen sisällä on erikoiskuitua, johon on lisätty erbium-alkuainetta. Signaalin vahvistus tapahtuu vahvistimen sisällä olevassa kuidussa, jossa erbiumhiukkaset vahvistavat hyötysignaalia. EDFA-vahvistimen kokonaisvahvistus on parempi kuin Raman-vahvistimilla, ja siksi käyttökohteet ovat erittäin pitkillä yhteysväleillä. EDFA:n ulostulo tehotaso on +40 dB:n ja Ramanilla se on noin +20 dB:n tasolla. Suojalasiin käyttö on tämän teholuokan laserien kanssa jo suositeltavaa, koska silmävauriot ovat mahdollisia. [39;40.]

5.2 ROADM-menetelmiä

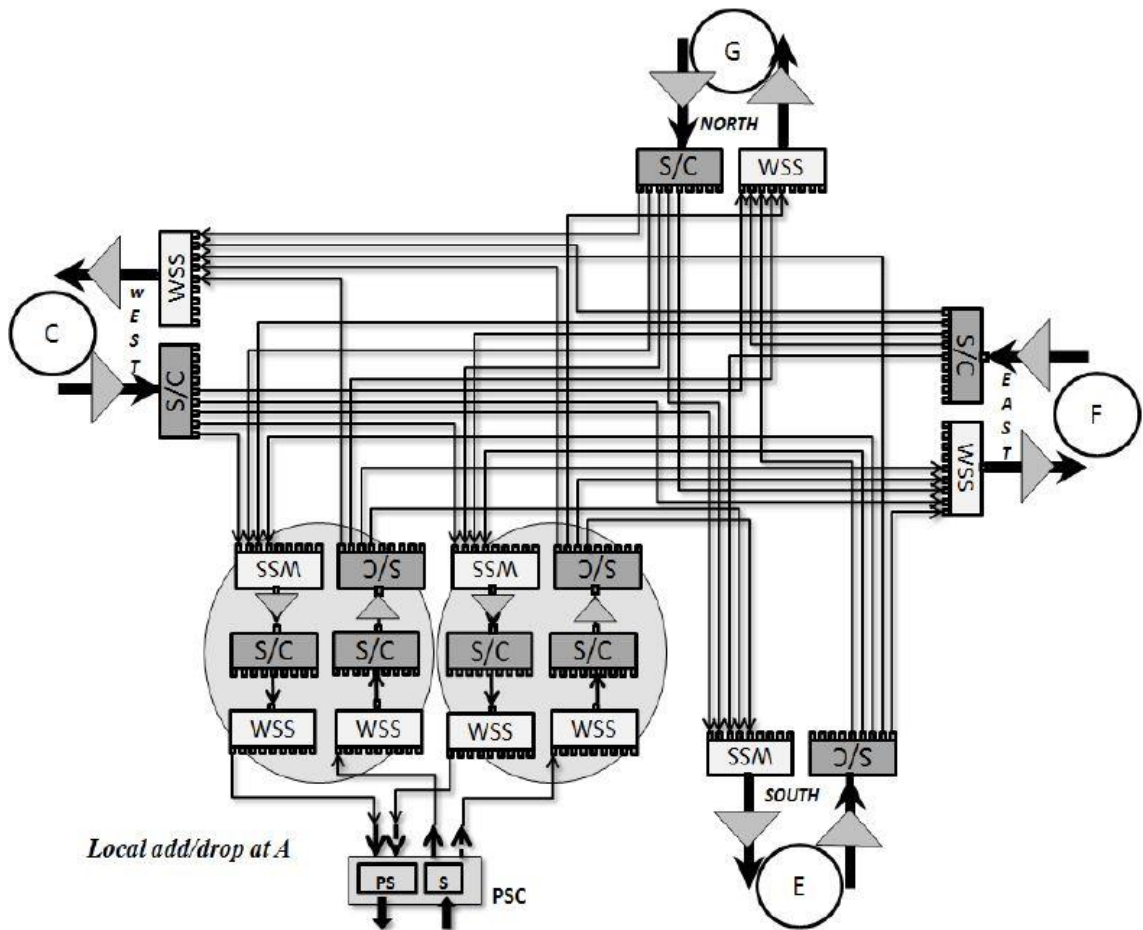
Nykyiset ROADM-järjestelmät rajoittavat käytettävyyttä, koska lähettimet ovat tietylle aallonpituudelle määritettyjä ja kytkennät on täytynyt tehdä sen mukaisesti Mux-yksikköön. Jos lähetin halutaan vaihtaa toiseen aallonpituuteen, joudutaan muuttamaan kuitukytkentä Mux:n päässä samalle aallonpituudelle. Tämä aiheuttaa viivettä vikatilanteissa varmistusten suhteen ja kustannuksia kun joudutaan lähettämään asentaja paikanpäälle. On olemassa muutamia menetelmiä joita voidaan käyttää, jotta verkon rakenteesta saadaan joustavampi. Näitä ovat CD&C (Colorless, Directionless ja Contentioless) -menetelmät. Näissä yhdistellään Mux-, WSS-, PXC- ja transponderiyksiköjä, jolloin halutut aallonpituudet saadaan kulkemaan joustavasti verkossa.

Colorless

Colorless-menetelmällä pystytään ohjelmallisesti ohjaamaan WSS-yksikköä ja valitsemaan haluttu aallonpituus. Kuituristikytkentää ei tarvitse enää vaihtaa MUX-yksiköstä. Säädetävällä transponderilla on aallonpituudesta riippumaton pääsy kaikkiin DWDM-verkon portteihin paikallisesti. [24;25.]

Directionless

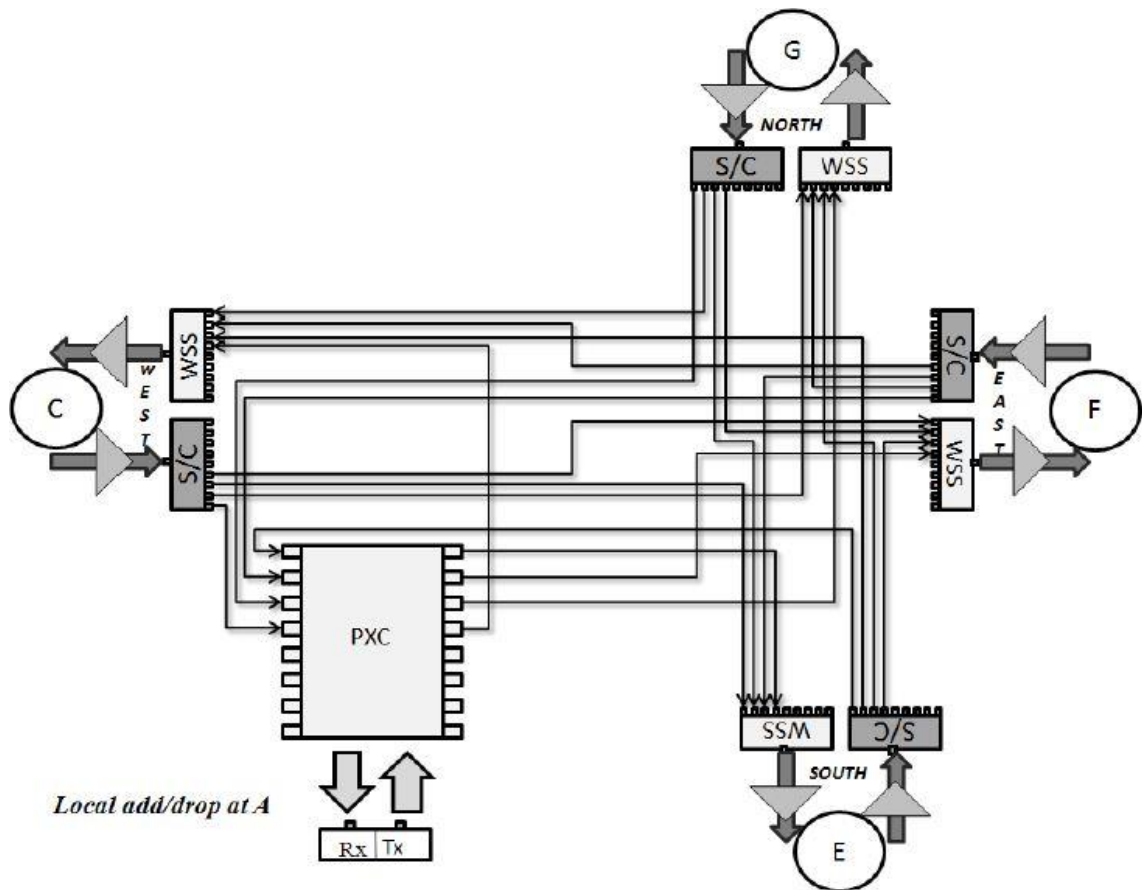
Todellista joustavuutta yhteyksiin saadaan yhdistämällä Colorless- ja Directionless-menetelmän käyttö. Näin pystytään varmentamaan useita suuntia (itä, länsi, pohjoinen, etelä) kytkemällä yksi aallonpituus yhdestä suunnasta sisään ja jakamaan se useasta portista eri ilmansuuntiin omana lähtönään. Samalla muutos- ja vikatilanteissa tehtävät kuitukaapeloinnin muutokset ovat turhia, koska kaikki tehdään ohjelmallisesti. Paikallisesti säädetävillä transpondereilla on esteetön pääsy kaikkiin DWDM-verkon portteihin. [24;25.]



Kuva 14. WSS, C&D periaatekuva. [23;25.]

Contentionless

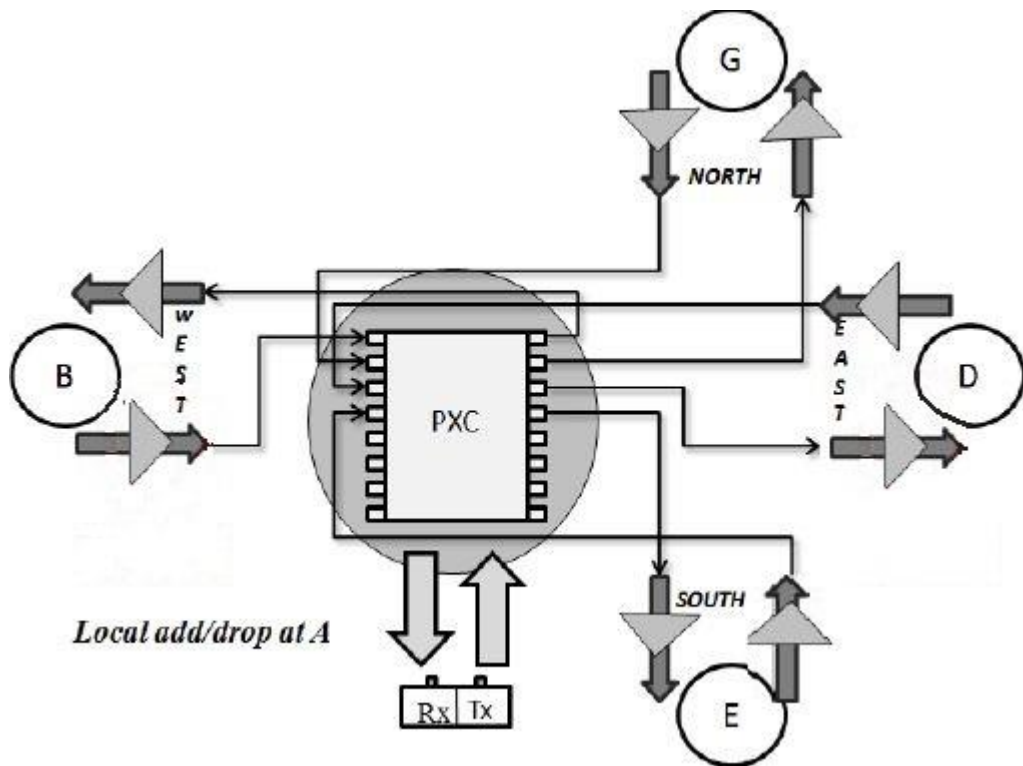
Asiakkaiden valitessa käytettävät aallonpituudet tulee useasti päällekkäisiä aallonpituuden varauksia. Tällöin voidaan käyttää Contentionless-menetelmää, jossa samalla aallonpituudella voi olla useita eri yhteyksiä. Niitä voidaan muokata Contentionless-menetelmällä eri aallonpituuksiksi järjestelmän sisällä ja yhteyden lopussa ne muutetaan takaisin asiakkaan valitsemaksi aallonpituudeksi. DEMUX-yksikkö (S/C-yksikkö kuvassa) jakaa tulevista kuitusuunnasta jokaiseen kanavaan koko valospektrin, josta suodatetaan WSS-yksiköllä vain haluttu kanava asiakkaalle. [24.]



Kuva 15. WSS + PXC CD&C periaatekuva. [23.]

CD&C-menetelmä

CD&C (Colorless, Directionless & Contentioless) hyötyinä voidaan pitää sen joustavuutta silmukoitua verkkoa (Mesh-verkkoa) rakennettaessa. Järjestelmän Contentionless-ominaisuuden ansiosta ei ole väliä mitä aallonpituutta käytetään liittyvällä laitteella, koska aallonpituus voidaan ohjata transponderilta kulkemaan haluttuun porttiin optisessa PXC-ristikytöntäyksikössä. CD hoitaa laitteen sisäisen ohjauksen eri suuntiin ilman erillisiä WSS-yksiköitä PXC:n avulla. PXC on MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) -yksikkö, jossa yhdistyy useita eri toiminnallisuuksia, esimerkiksi sähköisiä ja optisia muutoksia signaaliksi. [25.]



Kuva 16. PXC, C&D periaatekuva. [23.]

Pääsääntöisesti kustannukset muodostuvat DWDM-järjestelmässä WSS-yksiköistä ja käytettävien kanavien määrästä. 1 x 9:n WSS-yksikkö maksaa noin 10.000 euroa valmistajasta riippuen. Tämä on suurin yksittäinen kustannustekijä. PXC:n hinta määräytyy käytettävien aallonpituusporttien mukaan. Yhden PXC-portin kustannus on muutama sadan euron hintaluokkaa. Lisäksi Mux- ja Demux-yksikkö yhteyksien lisäksi ja ulosottoon muutaman tuhannen euron hintaan. PXC-arkkitehtuurin kustannukset ovat suuret, jos käytössä on vähän kanavia. WSS-arkkitehtuuri puolestaan kallistuu sitä enemmän, mitä enemmän kanavia käytetään. CD&C-menetelmä on kustannustehokas ratkaisu yhteyksien lisääntyessä paikallisesti. Hankittavalle laitteistolle kustannukset voi laskea porttien määrän perusteella Kaavalla 6. [23.]

$$\text{Porttien määrä} = (S * K * 2) + (AD * S * K * 2) \quad (6)$$

S on ilmansuuntien määrä

K on kanavien määrä kaikista ilmansuunnista

MD on Mux:n- ja Dmux:n määrä

6 Mittaus

Mittausmenetelmät

DWDM-jännettä rakennettaessa tulee järjestelmän piirikortit olla sähköistettynä ja kuitutettuna hyvissä ajoin ennen mittauksien aloitusta, jotta laserit ehtivät lämpenemään oikeaan arvoonsa. Tällöin huojunta tasoittuu, jolloin mittaustuloksista saadaan luotettavat arvot. Mitatessa jännettä on kaikkien käyttöön tulevien kanavien lähetystehot oltava päällä, jotta saadaan kokonaisteho ja todelliset arvot. Suoritetuissa mittauksissa käytettiin JDSU:n MTS8000-mittalaitetta. Se on markkinoilla olevista DWDM-jänteen mittaamiseen tarvittavista laitteistoista yleisesti hyväksytty. [16.] Lisäksi mittalaitteen modulaarisuus palveli hyvin eri työn vaiheissa tehdyissä OTDR-, OSA-mittauksissa. OSA-mittaus sisältää I-OSNR-mittauksen. RFC 2544-mittauksiin käytettiin Agilentin ethernet tester 1 Gb-mittalaitetta kahdenvälinen tiedonsiirto mittaus (point-to-point) menetelmällä. Mittaustuloksista tärkeimmät ovat kokonaisvaimennuksen dB:n ja I-OSNR-kohinasuhteet. Edellä mainittujen tulosten ollessa annetuissa rajoissa yhteyden tulisi toimia.

Valokuidun mittaus

Valokuitutukalla voidaan tehdä OTDR-mittaus, jolla pystytään mittaamaan valokuidun ominaisuuksia. Tutkalla voidaan havaita ja paikallistaa verkon vikoja ja puutteita signaalin kulussa. OTDR-mittaustapa perustuu Reyleight-sironnan mittaamiseen eli takaisinsirontaan. Suorassa kuidussa, jossa ei ole jatkoksia, liitinkytkentöjä tai makrotai-pumia eli taitekertoimen muutoksia, takaisinsirontaa on vain vähän lähetettyyn valote-hoon nähden ja näin OTDR-mittauksessa näkyy tasaisesti ja hitaasti laskeva viiva. Jos mittauksessa on edellä mainittuja takaisinsirontaan vaikuttavia tekijöitä, viiva laskee makrotai-pumassa askeltaen alaspäin ja pystypiikkinä ylöspäin jatkoksissa ja liitinkytkennöissä olevista ilmaraoista johtuen. Kaapelin pituus pystytään laskemaan tiedettä-essä lähetetyn pulssin ja vastaanotetun pulssin välinen aikaero sekä kuidun taiteker-roin. Mittausajan tulee olla riittävän pitkä, esimerkiksi yli minuutti. Tällöin mittalaitte suorittaa useita perättäisiä mittauksia siten, että yksi lähetetty pulssi tulee takaisin ja las-kee näistä tuloksista takaisin siroutuneen tehon keskiarvon. Tästä johtuen todennäköi-syys luotettavaan mittaustulokseen kasvaa mittauksen aikana. [11.] Takaisin siroutu-van tehon voi laskea kaavalla 7.

$$T_s = \left(\frac{1}{\frac{MFD}{2}} \right)^2 * P * L * K \quad (7)$$

T_s on takaisin siroutuva teho

MFD on muotokentän halkaisija

P on valopulssin teho

L on valopulssin leveys

K on sirontakerroin

OSNR-signaalikohinasuhde

DWDM-käyttöönottomittausta OSA-mittarilla tehtäessä signaalikohinasuhteella, OSNR (Optical Signal to Noise Ratio), on tärkeä merkitys. OSNR:n mittaustavalla on vaikutus mittaustulokseen. Mittauksen tapahtuessa aallon vasemmasta tai oikeasta reunasta (hartiasta), mittauksessa näkyy koko tehokäyrä ja tuloksessa on mukana tällöin myös taustakohina. Taustakohina ei ole itse hyötysignaalia vääristäen mitattua kokonaistehoa. OSNR-mittauksessa mittaus tehdään aallonharjan huippukohdan piikistä ja alareuna on asetettu kohinan ylärajan kohdalle. Näin saadaan todellinen hyötysignaali mitattua tarkasti ympäröivästä kohinasta ja muista hyötysignaaleista. [17.] ROADM-korttien prismat suodattavat ainoastaan hyötysignaalin kaistanleveyden niiden lävitse. Tästä johtuen kanavien välinen kohina ei näy perinteisessä OSNR-mittauksessa ja saadaan vääristynyt mittaustulos. I-OSNR-mittauksessa mitataan signaalikohinasuhde pulssin keskeltä vaihekkääntömenetelmällä. Jotta saadaan mitattua signaalikohinasuhde pulssin keskeltä, täytyy tehdä useita vaiheenkäntöjä, koska kohina sisältää kaikki mahdolliset vaiheet. Näin pystytään erottelamaan hyötysignaali ja kohina toisistaan. I-OSNR-mittausaika on ajallisesti paljon pidempi perinteiseen OSNR-mittaukseen verrattuna. [18.] OSNR:n pystyy laskemaan myös kaavalla 8.

$$OSNR_{current_stage} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{OSNR_{previous_stage}} \right\} + \left\{ \frac{NF h \nu \Delta f}{P_{i/p_current_stage(Watts)}} \right\}} \quad (8)$$

NF on vahvistimen vaimennusarvo

h on Planckin vakio = 6.634×10^{-34}

Δf on aallonpituus kuvaa NF = 0.5nm (62.08GHz)

ν on optinen taajuus = 193 THz

Kokonais- ja kanavakohtainen teho

Kanavien määrän kasvaessa täytyy ottaa huomioon kokonaistehon kasvu koko järjestelmän reitillä. Tämä vaikuttaa vahvistimille annettujen arvojen muuttumiseen ja näin vahvistimien tehonmuutokseen ja mahdolliseen kanavien ylikuulumiseen toiselle kanavalle. Yhteysvälille pitää jättää riittävä kasvuvara. Kun käyttöön otetun järjestelmän kanavien maksimikapasiteetti on 32 ja käyttöön on otettu ainoastaan 6 kanavaa, yhden kanavan lisäys nostaa tehon laskukaavan mukaan kokonaistehoa. Tästä johtuen on laskettava tilanne, jossa kaikki 32 kanavaa ovat käytössä. Lähetettävä teho on sovittava kunkin kanavan osalta tasaisesti ja mahdollisimman pieneksi. Vahvistimen ulostulon saturaatiotaso määrittää vahvistimen sisään kanavakohtaisesti laitettavan tehotaason. Mitä suuremman tehon vahvistimen ulostulo sallii, sitä pienempi teho voidaan kanavakohtaisesti vahvistimen sisäänmenoon laittaa. Vahvistimeen sisäänmenevän lähetystehon vaimentamiseen tulee käyttää erillisiä vaimentimia, jos kortti ei itsessään sisällä ohjelmallista vaimenninta. Kaavalla 9 pystyy laskemaan kanavakohtaisen tulotaason vahvistimeen. Mux:n kokonaistehon ulostulosta saa laskemalla kaavalla 10.

$$Ch_p = V_{sat} - 10 \log(\text{MaxCh}) \quad (9)$$

Ch_p on kanavakohtainen teho

V_{sat} on vahvistimen ulostulon saturaatiotaso

MaxCh on järjestelmän tukema maksimikanavamäärä

$$\text{kokonaisteho} = Ch_p + 10 \log(Ch) \quad (10)$$

Ch_p on kanavakohtainen teho

Ch on käytettävien kanavien määrä

Aallonpituus

Yksi kanava, taajuus tai aallonpituus; näitä samaa asiaa tarkoittavia nimiä käytetään, kun tarkoitetaan jonkin lähettimen käyttämää aallonpituusaluetta (1310 nm, 1550 nm). Mustaan kuituun voidaan siis lähettää joko yhtä aallonpituutta, tai CWDM-järjestelmällä

4, 8 tai 16 aallonpituutta kanavavälillä 20 nm. DWDM-järjestelmissä päästään paljon tiukempaan kanavaväliin 0,8 nm, kun käytössä on 100 Ghz ja 0,4 nm, kun käytössä on 50 Ghz. Nykyisillä järjestelmillä onnistuu 2,5 Gbps. Nopeudet ovat mahdollisia vaikka käytössä olisi kapea 50 Ghz:n järjestelmä, mutta ongelma tulee nopeutta nostettaessa. 100 Gbps:n nopeuksilla 50 Ghz:n kanava ei riitä hyötysignaalin siirtoon vaan se luisuu viereiselle kanavalle ja aiheuttaa kanavien sekoittumisen, eikä käytössä oleva modulaatio pysty pakkaamaan siirrettävää dataa sille varatulle kaistanleveydelle. Tulevaisuudessa kanavavälin voi kutistaa pienemmäksi modulointitekniikan kehittyessä. Kapeammalla kaistalla voidaan siirtää suurempia bittimääriä, mutta tällöin vaaditaan suurempaa signaali-kohinasuhdetta. Nykyisissä DWDM-järjestelmissä on käytössä C-alueelta olevat aallonpituudet, mutta uuden sukupolven laitteet käyttävät myös L- ja S-alueita hyväkseen. Liitteen 1 taulukosta näkyy C-alueen aallonpituudet ja S-alueen ylimmät taajuudet. Taulukosta pystyy katsomaan myös, miten eri kaistanleveydet sijoituvat aallonpituus jakaumaan, kun käytössä on 100 Ghz:n 32-kanavainen- tai 200 Ghz:n 16-kanavainen järjestelmä. Nämä ovat esimerkkejä yhden laitetoimittajan käyttämistä taajuuksista. [36.]

DWDM-jänteen mittaus

Järjestelmän korteille tehtävien sähköisten alkuasetuksien jälkeen täytyy koko järjestelmäväli mitata vaihe vaiheelta, jotta tiedetään tarkalleen kanavakohtaiset vaimennukset ja kohinasuhteet, kun jänne viritetään toimintaan. Kaikki kanavat on nyt kytkettävä päälle niillä lähetystehoilla, joilla niitä tullaan käyttämään järjestelmän käyttöönoton jälkeenkin. Mittaustuloksessa (liite 4) näkyy yksittäisen kanavan lähtöteho, jota ollaan kytkemässä Artemis Mux:n (multiplexing) sisäänmenopuolelle. Liitteen kuvassa sen lähtöteho on +2,12 dBm ja kohinasuhde noin 40 dBm:n luokkaa. Mitä lähemmäksi muilla kanavilla päästään tätä sen parempi. Artemis mux:n ulostulossa (liitteessä 5) näkyy kaikki siihen kytketyt kanavat ja niiden tehot, jotka ovat laskeneet hieman Artemiksen läpi tultaessa. ROADM-kortilla kaikkien kanavien tehotasot sovitetaan samoiksi, jotta vahvempien kanavien haittavaikutusta ei tulisi (liite 6). Mahdollinen kortilla tehtävä kanavakohtainen vaimennus on noin 10 dBm:n luokkaa. I-OSNR-kohinasuhde ei vielä tässä vaiheessa ole laskenut yhtään, koska signaaleja ei ole vielä vahvistettu. OFA_2-kortti (Optical Fiber Amplifier) on ensimmäinen vahvistin, jonka tehonnoston vaikutus näkyy hyvin spektrianalysaattorissa. Liitteestä 7 nähdään, että signaalien teho on noussut edelliseltä mittapisteeltä +16 dBm lähelle 0-tasoa, mutta samalla signaalikohinasuhde on laskenut 30 dBm:n tasolle. Tällä teholla ja signaali-kohinasuhteella on tarkoitus päästä koko yhteysvälin läpi.

Vastapäin asemalla tulevasta kuidusta on mitattu liitteen 8 mukainen tulos, joka osoittaa, että yhteys on vaimentunut matkalla melkein -19 dBm. Vahvistimeen OFA_M (liite 9) ensimmäisen tason jälkeen kanavia on jälleen vahvistettu noin 15 dBm ja kokonais-teho on -6 dBm:n tasolla. Signaalin kulkiessa DCF-korjaimen läpi vaimennus kasvaa -10 dBm ja teho laskee -16 dBm:n tasolle (liite 10). Kanavia on vahvistettava jälleen OFA_M-kortilla (liite 11), jotta ROADM-yksikön ja Artemiksen läpikytkentä ei laskisi kokonaisvaimennusta liian alas, jolloin vastaanottimen herkkyys ei riitä ymmärtämään signaalia. Kuten liitteistä 12–13 nähdään, yksittäisen kanavan teho on ulostulopisteessä vaimentunut jälleen -14 dBm:iin ja signaali-kohinasuhde on laskenut 28 dBm:iin. Jos kanava olisi jatkanut ROADM-kortin läpi kohti seuraavaa jänneväliä, olisi signaali-kohinasuhde jälleen huonontunut. Tästä syystä joudutaan joskus ottamaan kanava ulos DWDM-järjestelmästä ja muodostamaan signaali uudelleen.

FEC-virheenkorjaus

Signaali pienenemistä siirtotiellä kutsutaan vaimenemiseksi. Jos signaali vaimenee liikaa, sitä ei pystytä havaitsemaan vastaanottimessa. Signaalin muoto voi myös muuttua valokuidussa sen ollessa puristuksissa massojen alla tai siirtotiellä olevan epälineaarisen viiveen takia. Tällöin eri aallonpituudet saapuvat vastaanottimelle eri järjestyksessä, kuin missä ne lähetettiin, ja vastaanotettu sanoma vääristyy. Toistimissa voidaan käyttää virheenkorjausta eli FEC:ä (Forward Error Correction). Virheenkorjaus lisää signaali-kohinasuhdemarginaalia laskennallisesti. E-FEC lisää bittimäärää siirtotielle noin 7 % joten 2,5 Gbps kasvaa 2,65 Gbps:iin ja vastaavasti 10 Gbps kasvaa 10,7 Gbps:iin. Näiden ylimääräisten bittien avulla lasketaan virheelliset bitit ja korjataan ne. Korjaus tapahtuu kääntämällä bittiä vastaanottopäässä vastakkaiseksi. [20.] Signaali-kohinasuhteen laskiessa sallittujen raja-arvojen alle bittivirhe kasvaa siirtotiellä. E-FEC on yleisin käytössä oleva virheenkorjaustekniikka. Bittivirhemäärän pystyy selvittämään kaavalla 11.

$$\text{Bittivirhe} = \frac{\text{Virheelliset bitit}}{\text{Siirretyt bitit}} \quad (11)$$

Virheenkorjaukseen käytettyjä standardeja:

- G.709 lisää bittimäärää n.7%, OSNR:lle 5–6 dB lisää vaimennusvaraa.
- E-FEC lisää bittimäärää n.7%, OSNR:lle 8 dB lisää vaimennusvaraa.
- S-FEC lisää bittimäärää n.25%, OSNR:lle 9 dB lisää vaimennusvaraa.

7 Asennusympäristö

KytKentäkuidut

DWDM-laitteet sisältävät useita kuitukytKentäpisteitä eikä niiden kytKentä ole yhtä helppoa ja loogista kuin kytKettäessä kuituja kytKentäpaneelien välille. Yhdessä kortissa voi olla pelkästään yhteyden toisen suunnan kytKentöjä tai jopa yli 40 kytKentäpistettä. Tämänhetkiset laitteet käyttävät pääsääntöisesti LC (Little Connector) -liittimiä, mutta joidenkin korttien liittintyyppi on LX-5, E2000, tai SC (Standard Connector). Eräiden korttien kytKennät tehdään ainoastaan yhdensuuntaisina ja tällöin kaksikuitua yhdessä (duplex-kuidut) täytyy erottaa toisistaan, ettei toinen kuitu jäisi käyttämättömänä roikkumaan laitteen viereen aiheuttamaan epäselvyyksiä. KytKentäkuituja hankittaessa kannattaa huomioida liittimen rakenne. Joidenkin LC-liittimien rungot ovat yhdellä muoviosalla kiinni toisissaan, ja kun sen poistaa, jää LC-liittimen irrotuskynsi tähän erilliseen muovinpalaan. Tästä aiheutuu ongelmia irrotettaessa liittintä kortista, koska tilaa on vähän eikä sormella yllä painamaan pientä liittimen irrotukseen tarkoitettua kynttä. Tätä varten on olemassa LC-liittimelle tehty työkalu, jolla voidaan irrottaa kuitu ongelmitta.

Erimittaisia kuituja kannattaa hankkia, koska osa kytKennöistä tehdään korttien välillä samassa kehikossa. Jos kuitu on pitkä, ylimääräisen kuidun kieputtamien laitteen sivulle piiloon muodostuu haastavaksi. Kun kuitujen määrä kasvaa, tila loppuu kesken kehikon ja laitetelineen välissä. DWDM-suunnittelussa pitää myös ottaa huomioon kuitujen merkitseminen eli numerointi, jonka suunnitteluun kannattaa käyttää aikaa, jotta lopputuloksesta tulee looginen ja selkeä. Yksi tapa on käyttää runkokaapeleiden välisten kuitujen merkintään numeroita 1–10, numeroita 11–99 käytetään välivahvistimien ja vahvistimien sekä Mux:n ja Demux:n numerointiin. Yli 100:n numeroita voi käyttää asiakasyhteyksien merkitsemiseen loppukäyttäjien suuntaan, koska näitä tulee eniten kanavien määrän kasvaessa.

Dokumentointi

Kaapelireitin dokumentointi on tärkeää, ja se tulee tehdä huolellisesti, jotta kuitureitin siirtäminen dokumentointitietojärjestelmään onnistuu vaivattomasti. Ajantasaisen dokumentoinnin johdosta kaapelinäytöt onnistuvat hyvin ja vältetään kaapelien tahattomil-

ta katkeamisilta. Kaapelinäytöistä vastaavia henkilöitä helpottaa reitin hyvä dokumentaatio. DWDM-jäniteistä tulee tuottaa tarvittavat dokumentit, jolloin vikatapauksissa korttien vaihtaminen ja kuitujen löytäminen suuresta massasta onnistuu vaivattomasti. Dokumenteissa on oltava tarvittavat tiedot asiakkaiden yhteyksistä, jotta ne voidaan identifioida toisistaan. Dokumentoinnista ja sen tärkeydestä käydään keskusteluja työyhteisöissä säännöllisesti. Dokumentoinnin tärkeys on tiedostettu aina asentajatasolla asti, mutta kiireessä se tuntuu olevan asia, joka jätetään tekemättä. Myöhemmin tämä johtaa aikataulujen venymiseen, kun asioita joudutaan uudestaan selvittämään.

ESD-suojaus

Staattista sähköä vastaan tulee suojautua huolella, koska jo pienikin sähkövarauksen purkautuminen laitteisiin voi rikkoa kortteja ja aiheuttaa näin liikenteen katkeamisen ja palvelutason eli SLA:n (Service-level agreement) alenemisen. Laitteiden hinta on korkea eikä takuu yleensä korvaa staattisesta sähköstä aiheutuneita vikoja. Vaatteiden tulee olla ESD, (Electrostatic Discharge) -hyväksynnän mukaisia, jotta esimerkiksi takin pois ottaminen tai tuoliilta ylösouseminen ei kerryttäisi sähkövarausta. Jalkineiden on oltava myös ESD-hyväksytyt, jolloin varaus pääsee poistumaan lattian kautta. Kengän pohjien kuntoa tulee tarkkailla säännöllisesti. Lian kertyminen kengänpohjaan estää varauksen poistumisen. Laitetilan viereen on rakennettava tarkastuspiste, jossa voidaan tarkastaa kenkien johtavuus ESD-mittalaitteella.

ESD-rannekkeen käytön laiminlyöminen on yleisin syy piirikorttien vioittumiselle. Jokaisen järjestelmän luona tulisi olla kiinteästi asennettu rannekepiste, johon voidaan kytkeytyä ESD-rannekkeella järjestelmän asennus ja huoltotöiden ajaksi. [30.]

Reduntanttisuus ja varmentaminen

Runkoverkon rakentamisessa tulee käyttää redundanttisia laitteita, jotta palvelut voidaan tuottaa ilman katkoja. Sähkönjakelu tulee varmentaa 48 V:n akustolla, jossa ampeeritunnit riittävät Viestintäviraston ohjeen mukaisesti tarvittaville järjestelmille riittävän pitkään. Akkujen kuntoa on myös tarkkailtava, jottei akun kapasiteetti pääse laskemaan tai kennosto vioittumaan. Akusto ei saa myöskään olla liian vanha, koska sen varauskapasiteetti laskee iän myötä. Siirtojärjestelmät on myös järkevää varustaa kahdella sähkönsyötöllä eri tehonsyöttöyksiköihin. Tämä takaa redundanttisuuden myös siirtojärjestelmän sähköistyksen. Kuitureittien kytkemisessä on hyvä muistaa, että pelkästään kahden kuituyhteyden rakentaminen ei vielä pelasta kaapelikatkolta. Kuitujen tulee

kulkea fyysisesti eri reittejä pitkin eri kaapelivaipoissa. Rakennukseen tulevat kaapelit on myös kahdennettava eri puolilta, jotta mahdolliset kaivutyöt eivät katkaise kaikkia kaapeleita.

STM-moduulit, joita käytetään SDH (Synchronous Digital Hierarchy) –tekniikassa, ovat yleensä erillisiä yksiköitä, joiden varmentaminen on tärkeää ehkäistessä laitevikoja. Asentamalla kaksi emokorttia ja niihin kumpaankin lähettimet saadaan yhdessä varmennetun kuitureitin kanssa tarvittavaa varmistusta runkoverkkoon. Varavoimakoneen asentaminen joko kiinteästi tai pelkän ulkoisen syöttömahdollisuuden tekeminen muuttaa viestintäviraston akustolle asettamia vaatimuksia ampeerituntimääriä koskien pienemmiksi. [26.]

Jäähdytys

Laitetilan lämpötilaa tulee mitata ja valvoa jatkuvasti. Lämpötila ei saa nousta liian korkeaksi laitteiden lisäyksen johdosta, eikä laskea liian alhaiseksi talvella. Laitetoimittaja on antanut laitteen käyttöohjeessa toivotun käyttölämpötilan, jota noudattamalla laitteen käyttöikä säilyy odotettuna. Jos laitetila käy liian kuumana ja laitteet imevät jäähdytyskanaviinsa jatkuvasti kuumaa ilmaa, laskee laitteen käyttöikä ja johtaa pahimmassa tapauksessa laiterikkoon. Ylikuumentumisen johdosta laite voi turvallisuussyistä ajaa itsensä sammuksiin, jolloin yhteydet katkeavat. Lämpötilan saa selville laskemalla laitetilan koon ja laitteiden tuottaman lämpökuorman. Laitetilaa tulee jäähdyttää asentamalla jäähdytyskone laitetilaan. [26.]

8 Tulevaisuuden näkymät

Jatkuvasti lisääntyvä tietoliikenne vaatii tulevaisuudessa datansiirtoon kaistaa yhä enemmän olemassa olevien kanavien käytön tehostamiseksi. CD&C-menetelmien yleistyessä yhteyksien rakentaminen nopeutuu ja vikatilanteista toipuminen helpottuu, kun uudelleenreititys voidaan toteuttaa ohjelmallisesti.

Tulevaisuudessa voi olla mahdollista käyttää joustavaa kanavaväliä. 50 Ghz:n sijasta voitaisiin käyttää 25 Ghz:n tai jopa 12,5 Ghz:n aluetta, jolloin lähetin täytyisi pystyä virittämään 6,25 Ghz:n alueelle. Näin kaikki signaalit voitaisiin keskittää spektrin kes-

kelle. Tätä kutsutaan Gridless-menetelmäksi, jolla tarkoitetaan kanavavälin joustavaa käyttöä. Joustavan kanavavälin ajattelumalliin on tultu, koska muutamassa vuodessa ovat nopeudet kasvaneet räjähdysmäisesti 2,5 Gbps:sta 100 Gbps:iin. Myös QPSK (quadrature phase shift keying) -modulointi on pitänyt ottaa käyttöön, koska 100 Gbps:n sovittaminen 50 Ghz:n alueelle on muuten mahdotonta. QPSK toimii neljässä kanta-aallon vaiheessa. Vaihe-erot ovat 0° , $+90^\circ$, $+180^\circ$ ja $+270^\circ$, joilla saadaan aikaiseksi bitit 00, 01, 10 ja 11. Toinen vaihtoehto on DPQPSK (Dual-polarization quadrature phase shift keying) -modulointi, jolloin voidaan käyttää kaksoispolarisaatiota ja näin kuljettaa samassa kuidussa useampia aallonpituuksia 90° toisiinsa nähden. Vielä haastavampaa on saada 400 Gbps:n yhteys sovitettua 50 Ghz:n alueelle. Vaihtoehtoisesti 400 Gb:n yhteys voidaan purkaa neljäksi 100 Gb:n yhteydeksi, mutta tämä vaatii neljä lähetintä ja vie neljä erillistä aallonpituutta.

400 Gbps:n lähettäminen vaatii kehittyneemmän moduloinnin ja suuremman signaalikohinasuhteen kuin 100 Gbps. Jos jänne on viritetty toimimaan 40 Gbps:n tai 100 Gbps:n yhteyksillä, se ei välttämättä ole paras mahdollinen 400 Gbps:n alueelle. Nykyiset järjestelmät eivät välttämättä ole yhteensopivia tulevaisuuden 400 Gbps ja 1 Tbps kanssa, koska modulointi voi kehittyä paremmaksi sekä symbolinopeus kasvaa, kun optoelektroniset laitteet kehittyvät. Tulevaisuuden nopeassa tiedonsiirrossa pyritään bittinopeuden kasvattamisen sijaan symbolinopeuden kasvuun, jolloin tiedonsiirtoa säästyy. Verkon kapasiteettia voidaan myös lisäämällä asemien välisiä kuitupareja ROADM-käyttöön ja näin kaksinkertaistaa yhden suunnan kapasiteetti. [27;28.]

9 Yhteenveto

Jatkuva datamäärän kasvu tiedonsiirtoverkoissa luo paineita DWDM-järjestelmien asentamiselle. Rakennettu kuituverkko ei sellaisenaan tule riittämään ilman runkokaasiteetin kasvattamista. Käytössä olevat 1 Gb:n yhteydet eivät tule riittämään pitkään, vaan 10 Gb:n yhteydet ovat jo nyt varteenotettava vaihtoehto. Suurin haaste nopeuden nostoon pitkällä kuituväleillä on kuitenkin kuidun ominaisuudet, jotka dispersiosta johtuen eivät enää riitä. Tämän takia joudutaan lisäämään esivahvistimia ja dispersiokorjaimia, jotka nostavat kustannuksia entisestään. Valokuitu on yleistynyt viime vuosina jo sille tasolle, että sitä rakennetaan jo yksityisasuntoihin ja kerrostalohuoneistoihin. Kotien verkkopäätteet sekä kodin viihde-elektronikan verkkokortit toimivat jo 1 Gb:n nopeudella. On siis luonnollista nostaa runkoverkon nopeutta ja näin välttää pullonkaulojen syntyemiseltä.

Seuraava nopeusluokka on 40 Gb:n, jonka vaatimukset ovat liian kovat, jotta nykyiset vahvistimet ja korjaimet olisivat riittävät yhteyksien rakentamiseen. Näin kustannukset tulevat jälleen nousemaan. Lisäksi 40 Gb:n lähettimet ovat vielä liian kalliita kustannustehokkuuden säilyttämiseksi. Nähtäväksi jää, mikä on tulevaisuudessa suurimman suosion saavuttava nopeusluokka: 100 Gb:n, 400 Gb:n vai 1 Tb:n. Näiden tuleminen vaatii kuitenkin vielä modulaation ja symbolinopeuksien kehittymistä. Huonoin vaihtoehto voisi olla, että jokainen valmistaja kehittेलisi omaa modulointia, ja näin yhteensopivuus toisten laitevalmistajien laitteiden kanssa ei tulisi koskaan toimimaan.

Insinööriyössä käsitelty DWDM-jänne otettiin tuotantokäyttöön sen jälkeen, kun RFC 2544-testi oli suoritettu ja tulos todettu hyväksytyksi. Tällä hetkellä käytössä on useita 1 Gb:n yhteyksiä sekä muutamia 10 Gb:n yhteyksiä, jotka toimivat moitteettomasti kyseisellä välillä ja ROADM:n läpi kytkettynä. Mittausvaiheesta, joka oli tämän työn haastavin osuus, pitää todeta, että huolellisuus liittimien puhtaudessa, suunnitelmallisuus kuitujen merkitsemisessä ja pitkäjänteisyys mittausprosessin järjestelmällisen läpikäyntiin vaatii todella paljon kärsivällisyyttä. Lisäksi dokumentoinnin tekeminen on tärkeää, jotta mahdollinen kanavien lisäys ja viankorjaus olisi mahdollista. Ilman oikeaa dokumenttia väärän kuidun irrottamisen mahdollisuus kasvaa olennaisesti.

Lähteet

- 1 Speed of light in vacuum. 2014. Verkkodokumentti. Nist.gov
<<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>>. Luotu 2014. Luettu 18.5.2014.
- 2 Taittumislaki. 2014. Verkkodokumentti. Teho-opetus.net <<http://www.teho-opetus.net/kaavat/kaavat2.pdf>>. Luotu 2014. Sivu 6. Luettu 6.9.2014.
- 3 Valokuitukaapeli. 2014. Verkkodokumentti. Oulun ammattikorkeakoulu.
<<http://www.ratol.fi/opensource/lahiverkot/fin/kaapelointi/valokuitu.htm>>. Luotu 2014. Luettu 12.05.2014.
- 4 Kaapelityypin ominaisuuksia. 2014. Verkkodokumentti. Nestor cables Oy
<<http://www.nestorcables.fi/valokaapeli/maakaapelit/fzovdmu-sd-0>>. Luotu 2014. Luettu 18.8.2014.
- 5 Valokuitumikroskooppi FTE-5100. 2014. Verkkodokumentti Orbis Oy
<<http://www.orbis.fi/valokuitumikroskooppi-fte-5100>>. Luotu 2014. Luettu 18.8.2014.
- 6 Etax A. 2014. Verkkodokumentti. Altia Oyj
<<http://www.altiacorporation.fi/connect/b9a707a3-fae1-48aa-9f2b-4ad0748ebb89/altia+tuotekansio+14.pdf?MOD=AJPERES>>. Luotu 2012. sivu 12. Luettu 15.8.2014.
- 7 Stimulated Brillouin and Stimulated Raman Scattering. 2007. Verkkodokumentti. National Physical Laboratory of United Kingdom.
<<http://www.npl.co.uk/optical-radiation-photonics/optical-comms-and-data/products-and-services/stimulated-brillouin-and-stimulated-raman-scattering>>. Luotu 2007. Päivitetty. 25.3.2010 Luettu 15.6.2014.
- 8 Soveltaminen: asuinkiinteistöjen optiset kaapelit ja niiden liittämistarvikkeet. 2013. Verkkodokumentti. Viestintävirasto.
<https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/M_65_MPS.pdf>. Sivu 56. Luotu 2013. Luettu 17.8.2014.
- 9 An Overview of Macrobending and Microbending of Optical Fibers. 12/2007. Verkkodokumentti. Corning Inc.
<<http://www.corning.com/assets/0/433/573/637/639/1bea48ac-d675-44c7-aa18-11a3a1a0adbd.pdf>>. Sivut 1-21. Luotu 12/2007. Luettu 20.8.2014.
- 10 Macrobend Detection Using an OTDR. 2014. Verkkodokumentti. JDS Uniphase Corporation. <<http://www.jdsu.com/productliterature/macdet.wp.fop.tm.ae.pdf>>. Luotu 2014. Luettu 16.6.2014.
- 11 Understanding OTDRs. 2003. Verkkodokumentti. Jim Hayes.
<http://www.jimhayes.com/OTDR/otdrs_c.htm>. Luotu 2003. Luettu 24.7.2014.

- 12 Single-Mode Dispersion Measurement Method. 2001. Verkkodokumentti. Corning Inc. <<http://www.corning.com/assets/0/433/573/635/7374612B-A179-4E6B-B46A-4C1C1067F9E6.pdf>>. Luotu 2001. Luettu 20.8.2014.
- 13 Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion. 21.4.2003. Verkkodokumentti. The Optical Society. <<http://www.opticsinfobase.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-11-8-843&id=71986>>. Luotu 2003. Luettu 20.8.2014.
- 14 Polarization Mode Dispersion. 2014. Verkkodokumentti. Laurin Publishing Company, Inc. <<http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25153>>. Luotu 2014. Luettu 20.8.2014.
- 15 New functionalities for advanced optical interfaces (Dispersion compensation). 2014. Verkkodokumentti. International Telecommunication Union. <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/workshop/optical/s4am-p02_pp7.ppt>. Luotu 2014. Luettu 23.8.2014.
- 16 MTS-8000 Scalable Multitest Platform. 2012 Verkkodokumentti. JDS Uniphase Corporation. <http://www.jdsu.com/en-us/Test-and-Measurement/Products/a-z-product-list/Pages/mts-8000.aspx?rcode=mts-8000#.U_jirKPzy80>. Luotu 2012. Luettu 23.08.2014.
- 17 Making OSNR measurements in a modulated DWDM signal environment. 2014. Verkkodokumentti. Keysight Technologies. <http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/SLDPRE_2_OSNR_Measure.pdf?&cc=FI&lc=fin>. Sivut 1-19,25 Luotu 2014. Luettu 28.7.2014.
- 18 In-band OSNR for ROADMs: A case study. 2008. Verkkodokumentti. Pennwell Corporation. <<http://www.lightwaveonline.com/articles/lwe/print/volume-5/issue-1/in-band-osnr-for-roadms-a-case-study-54843627.html>>. Luotu 2008. Luettu 23.8.2014.
- 19 RECONFIGURABLE OPTICAL ADD-DROP MULTIPLEXER AND OPTICAL NETWORK ELEMENT. 2014. Verkkodokumentti. US Patent. <<https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20140056584.pdf>>. Luotu 27.2.2014 Luettu 17.7.2014.
- 20 Forward Error Correction (FEC) techniques for optical communications. 1999. Verkkodokumentti. IEEE Standards Association <http://grouper.ieee.org/groups/802/3/10G_study/public/july99/azadet_1_0799.pdf>. Luotu 1999/7. Luettu 11.8.2014.
- 21 BI-DIRECTIONAL WAVE DIVISION MULTIPLEXING (BWDM).2014. Verkkodokumentti. Transition Networks. <<http://www.transition.com/TransitionNetworks/Uploads/Literature/CWDMBrochure.pdf>>. Luotu 2014. Luettu 11.18.2014.

- 22 XDM®-200 Compact CWDM Platform for Metro-Access Networks. 2004. Verkkodokumentti. ECI Telecom. <http://www.datacom.cz/files_datacom/DL-XDM-200_0.pdf> Luotu 2004. Luettu 22.8.2014.
- 23 Advantages & Concerns of PXC based architecture. 2014. Verkkodokumentti. <<http://www.cedt.iisc.ernet.in/people/kuri/comsnets/presentations/Colorless-Devarajan.pdf>>. Luotu 2014. Luettu 22.8.2014.
- 24 Colorless ROADM. 2010. Verkkodokumentti. JDS Uniphase Corporation. <http://www.jdsu.com/productliterature/NG_ROADM_WP_Final2.pdf>. Luotu 9/2010. Luettu 22.8.2014.
- 25 Versatility of a colorless and directionless WSS based ROADM architecture. 2014. Verkkodokumentti. Researchgate. <http://www.researchgate.net/publication/224398508_Versatility_of_a_colorless_and_directionless_WSS_based_ROADM_architecture>. Luotu 2014. Luettu 17.7.2014.
- 26 Tehonsyöttö ja tehonsyötön varmistaminen. 2012. Verkkodokumentti. Viestintävirasto. <<https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Viestintavirasto54A2012M.pdf>>. Luotu 3.5.2012. Luettu 16.4.2014.
- 27 ROADM options in optical networks: flexible grid or not?. 2014. Verkkodokumentti. AT&T labs inc. <http://www.research.att.com/techdocs/TD_101010.pdf>. Luotu 2014. Luettu 13.8.2014.
- 28 40G QPSK and DQPSK Modulation. 2014. Verkkodokumentti. Inphi Corporation. <<http://www.inphi.com/technology-overview/40G-QPSK-and-DQPSK-Modulation.pdf>>. Luotu 2014. Luettu 28.8.2014.
- 29 XDM WDM Calibration Training Course Material. Attenuation Diagram. 2014. Luentomoniste. ECI Training Services. Sivu 89. Luotu 12.8.2014 Luettu 15.9.2014.
- 30 The Prevention and Control of Electrostatic Discharge (ESD). 2003. Verkkodokumentti. Mini-Circuits. <www.minicircuits.com/app/AN40-005.pdf>. Luotu 20.8.2003. Luettu 15.9.2014.
- 31 UNDERSTANDING OM1, OM2, OM3, OS1, OS2 and more!. 2008. Verkkodokumentti. Cisco systems, Inc. <<https://learningnetwork.cisco.com/servlet/JiveServlet/previewBody/3791-102-1-10509/Understanding%20OM1,OM2,OM3,%20OS1,OS2%20Fiber.pdf>>. Luotu 28.2.2008. Luettu 24.9.2014.

- 32 G.652 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. 2009. Verkkodokumentti. International Telecommunication Union. <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200911-l/en>>. Luotu 11/.2009. Luettu 24.9.2014.
- 33 G.653 : Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable. 2010. Verkkodokumentti. International Telecommunication Union. <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.653-201007-l/en>>. Luotu 7/2010. Luettu 24.9.2014.
- 34 G.654 : Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable. 2012. Verkkodokumentti. International Telecommunication Union. <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.654-201210-l/en>>. Luotu 10/2012. Luettu 24.9.2014.
- 35 G.655 : Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. 2009. Verkkodokumentti. International Telecommunication Union. <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-l/en>>. Luotu 11/2009. Luettu 24.9.2014.
- 36 CHANNEL FREQUENCIES AND WAVELENGTHS (ITU GRID). 2006. Verkkodokumentti. Enablence Technologies, Inc. <<http://www.enablence.com/media/mediamanager/pdf/15-enablence-datasheet-ocsd-awg-standard-88channel-50ghz.pdf>>. Luotu 6.5.2006. Luettu 24.9.2014.
- 37 Optical Fiber. 2014. Verkkodokumentti. The Fiber Optic Association, Inc. <<http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>>. Luotu 2014. Luettu 24.9.2014.
- 38 DWDM Band Wavelength Range. 2014. Verkkodokumentti. The Fiber Optic Association, Inc. <<http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/SMbands.html>>. Luotu 2014. Luettu 24.9.2014.
- 39 XDM WDM Calibration Training Course Material. Amplifier. 2014. Luentomoniste ECI Training Services. Päivitetty 12.08.2014. Luettu 20.9.2014.
- 40 32-Channel DWDM System Design and Simulation by Using EDFA with DCF and Raman Amplifiers. 2012. Verkkodokumentti. International Association of Computer Science and Information Technology. <<http://www.ipcsit.com/vol27/42-ICICN2012-N20014.pdf>>. Luotu 2012. Luettu 26.9.2014.

Kanavien taajuusvälit

Lkm	Kanava	S-alue	Aallonpituus nm	50GHz	100GHz	200GHz	400GHz	600GHz	1000GHz
		C-alue							
		Taajuus THz							
1	62	196,20	1527,99	x	x				
2		196,15	1528,38	x					
3	61	196,10	1528,77	x	x	x		x	
4		196,05	1529,16	x					
5	60	196,00	1529,55	x	x				
6		195,95	1529,94	x					
7	59	195,90	1530,33	x	x	x	x		
8		195,85	1530,72	x					
9	58	195,80	1531,12	x	x				
10		195,75	1531,51	x					
11	57	195,70	1531,9	x	x	x			
12		195,65	1532,29	x					
13	56	195,60	1532,68	x	x				
14		195,55	1533,07	x					
15	55	195,50	1533,47	x	x	x	x	x	x
16		195,45	1533,86	x					
17	54	195,40	1534,25	x	x				
18		195,35	1534,64	x					
19	53	195,30	1535,04	x	x	x			
20		195,25	1535,43	x					
21	52	195,20	1535,82	x	x				
22		195,15	1536,22	x					
23	51	195,10	1536,61	x	x	x	x		
24		195,05	1537,00	x					
25	50	195,00	1537,40	x	x				
26		194,95	1537,79	x					
27	49	194,90	1538,19	x	x	x		x	
28		194,85	1538,58	x					
29	48	194,80	1538,98	x	x				
30		194,75	1539,37	x					
31	47	194,70	1539,77	x	x	x	x		
32		194,65	1540,16	x					
33	46	194,60	1540,56	x	x				
34		194,55	1540,95	x					

35	45	194,50	1541,35	x	x	x			x
36		194,45	1541,75	x					
37	44	194,40	1542,14	x	x				
38		194,35	1542,54	x					
39	43	194,30	1542,94	x	x	x	x	x	
40		194,25	1543,33	x					
41	42	194,20	1543,73	x	x				
42		194,15	1544,13	x					
43	41	194,10	1544,53	x	x	x			
44		194,05	1544,92	x					
45	40	194,00	1545,32	x	x				
46		193,95	1545,72	x					
47	39	193,90	1546,12	x	x	x	x		
48		193,85	1546,52	x					
49	38	193,80	1546,92	x	x				
50		193,75	1547,32	x					
51	37	193,70	1547,72	x	x	x		x	
52		193,65	1548,11	x					
53	36	193,60	1548,51	x	x				
54		193,55	1548,91	x					
55	35	193,50	1549,32	x	x	x	x		x
56		193,45	1549,72	x					
57	34	193,40	1550,12	x	x				
58		193,35	1550,52	x					
59	33	193,30	1550,92	x	x	x			
60		193,25	1551,32	x					
61	32	193,20	1551,72	x	x				
62		193,15	1552,12	x					
63	31	193,10	1552,52	x	x	x	x	x	
64		193,05	1552,93	x					
65	30	193,00	1553,33	x	x				
66		192,95	1553,73	x					
67	29	192,90	1554,13	x	x	x			
68		192,85	1554,54	x					
69	28	192,80	1554,94	x	x				
70		192,75	1555,34	x					
71	27	192,70	1555,75	x	x	x	x		
72		192,65	1556,15	x					
73	26	192,60	1556,55	x	x				
74		192,55	1556,96	x					
75	25	192,50	1557,36	x	x	x		x	x
76		192,45	1557,77	x					
77	24	192,40	1558,17	x	x				
78		192,35	1558,58	x					
79	23	192,30	1558,98	x	x	x	x		

80		192,25	1559,39	x					
81	22	192,20	1559,79	x	x				
82		192,15	1560,20	x					
83	21	192,10	1560,61	x	x	x			
84		192,05	1561,01	x					
85	20	192,00	1561,42	x	x				
86		191,95	1561,83	x					
87	19	191,90	1562,23	x	x	x	x	x	
88		191,85	1562,64	x					
89	18	191,80	1563,05	x	x				
90		191,75	1563,45	x					
91	17	191,70	1563,86	x	x	x			
92		191,65	1564,27	x					
93	16	191,60	1564,68	x	x				
94		191,55	1565,09	x					
95	15	191,50	1565,50	x	x	x	x		x
96		191,45	1565,90	x					
97	14	191,40	1566,31	x	x				
98		191,35	1566,72	x					
99	13	191,30	1567,13	x	x	x		x	
100		191,25	1567,54	x					
101	12	191,20	1567,95	x	x				
102		191,15	1568,36	x					
103	11	191,10	1568,77	x	x	x	x		
104		191,05	1569,18	x					
105	10	191,00	1569,59	x	x				

Site A			
Mittapisteen numero	Kuitunumero	Kortti	Monitorointipiste
1	3	Tuleva kuitu	
2		MO_OFA_M stg_1	X
3	57	MO_OFA_M stg_1 out	
4	58	DCF40#1	
5		MO_OFA_M stg_2	X
6	64	MO_OFA_M stg_2 out	
7	60	MO_ROADM8A local	
8		D_MD_40 Artemis line in	X
9	268	D_MD_40 Artemis K21	
10	260	D_MD_40 Artemis K25	
11	258	D_MD_40 Artemis K26	
12	252	D_MD_40 Artemis K29	
13	250	D_MD_40 Artemis K30	
14	248	D_MD_40 Artemis K31	
15	238	D_MD_40 Artemis K36	
16	267	M_MD_40 Artemis K21	
17	259	M_MD_40 Artemis K25	
18	257	M_MD_40 Artemis K26	
19	251	M_MD_40 Artemis K29	
20	249	M_MD_40 Artemis K30	
21	247	M_MD_40 Artemis K31	
22	237	M_MD_40 Artemis K36	
23		MO_ROADM8A Line out	X
24	59	D_MD_40 Artemis line out	
25		D_MD_40 Artemis line out	X
26	63	MO_ROADM8A Line out	
27		OFA2 IL23 out	X
28	4	OFA2 IL23 out	

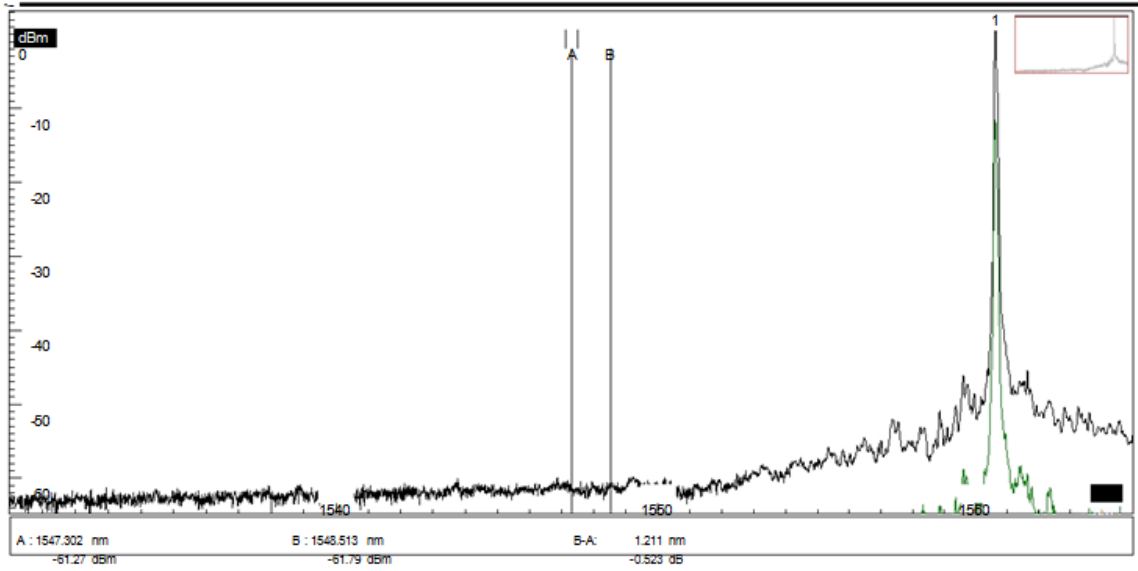
Site B			
Mittapisteen numero	Kuitunumero	Kortti	Monitorointipiste
1	2	Tuleva kuitu	
2	41	MO_OFA_M stg_1 out	
3		MO_OFA_M stg_1	X
4	42	DCF40#1	
5		MO_OFA_M stg_2	X
6	22	MO_OFA_M stg_2 out	
7	29	MO_ROADM40 exp out	
8	220	D_MD_ROADM40 K21	
9	212	D_MD_ROADM40 K25	
10	204	D_MD_ROADM40 K29	
11	202	D_MD_ROADM40 K30	
12	200	D_MD_ROADM40 K31	
13	219	M_MD_ROADM40 K21	
14	211	M_MD_ROADM40 K25	
15	203	M_MD_ROADM40 K29	
16	201	M_MD_ROADM40 K30	
17	199	M_MD_ROADM40 K31	
18	30	MO_ROADM40 exp in	
19		MO_ROADM40 line out	X
20	23	MO_ROADM40 line out	
21		OFA2 IL23 out	X
22	1	OFA2 IL23 out	

1 5/6/2014 3:35:01 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site a16.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 4:55:48 PM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point: Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 ORIGIN: # of acquisition: 0
 Cable: Fiber: 16 High sensitivity: No
 Colour: Averaging: None
 END: SNR Method: Left + Right
 Cable: S<->N Distance: 50 GHz
 Fiber: 16 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Colour: Coupler compensation: None
 Origin: Resolution: Max
 End:

Comment:



1 5/6/2014 3:35:02 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site a16.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 4:55:48 PM Module: 83OSA500R Number P-0019

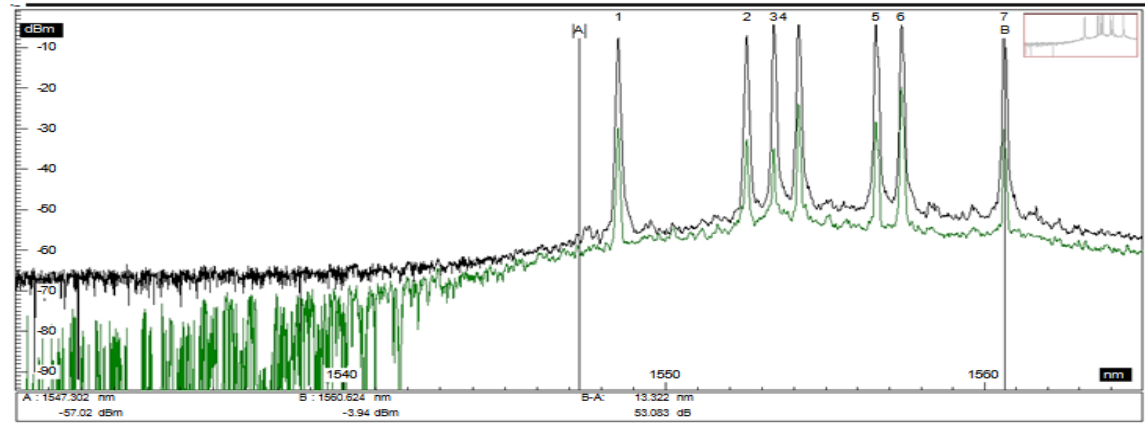
Channel (1)	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	P/Pcomp (%)
1	1560.624	- - -	2.12	-44.62	46.75	100.00

1
3/6/2014 3:43:14 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site a24.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/18/2013 10:51:27 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point: 1250.000 - 1650.000 nm
 ORIGIN: Wavelength: 0
 Cable: # of acquisition: No
 Fiber: 24 High sensitivity: None
 Colour: Averaging: Left + Right
 END: SNR Method: S-to-N Distance: 0.10 nm
 Cable: 24 Noise acquisition BW: Coupler compensation: None
 Fiber: Resolution: Max
 Colour: Origin:
 End:

Comment:



1
3/6/2014 3:43:15 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site a24.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/18/2013 10:51:27 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

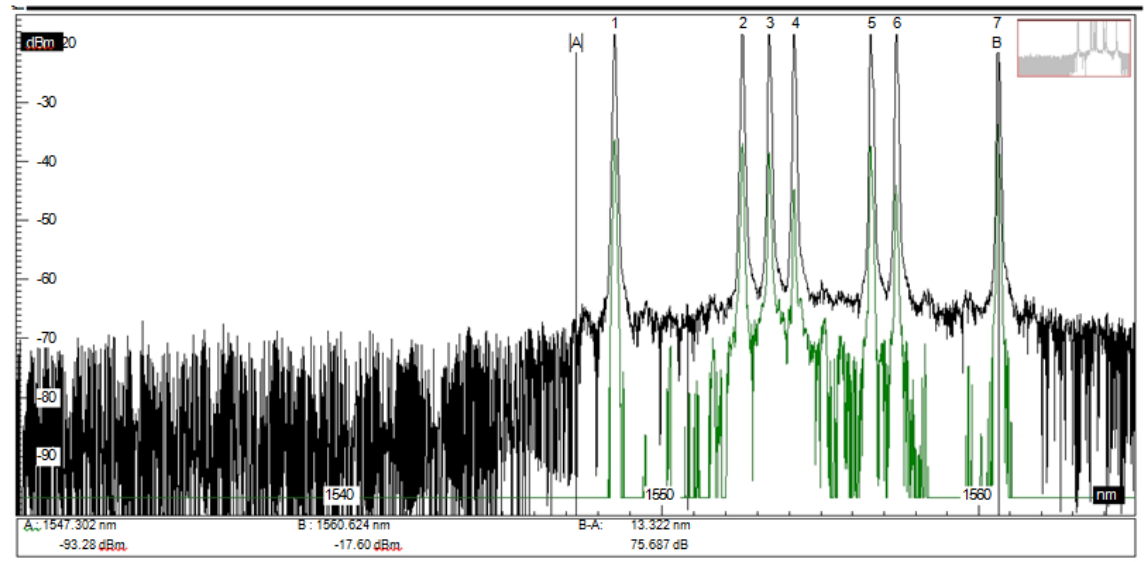
Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	P/Comp (dB)
1	1548.512	--	-6.31	-51.87	45.56	6.78
2	1552.520	4.009	-5.71	-46.66	40.96	7.803
	1553.374	0.854	-2.24	-45.28	43.04	17.334
	1554.150	0.776	-1.63	-46.82	45.20	19.965
	1556.578	2.428	-2.66	-47.97	45.32	15.766
	1557.384	0.806	-2.55	-47.18	44.63	16.137
	1560.621	3.236	-2.50	-50.36	47.86	16.31

1
5/6/2014 3:41:40 PM
Fiber Trace Viewer v654 © JDSU

File: site a26.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/18/2013 11:03:27 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point:
 ORIGIN Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 Cable: # of acquisition: 0
 Fiber: 26 High sensitivity: No
 Colour: Averaging: None
 END SNR Method: Left + Right
 Cable: S-<->N Distance: 50 GHz
 Fiber: 26 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Colour: Coupler compensation: None
 Origin: Resolution: Max
 End:

Comment:



1
5/6/2014 3:41:40 PM
Fiber Trace Viewer v654 © JDSU

File: site a26.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/18/2013 11:03:27 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

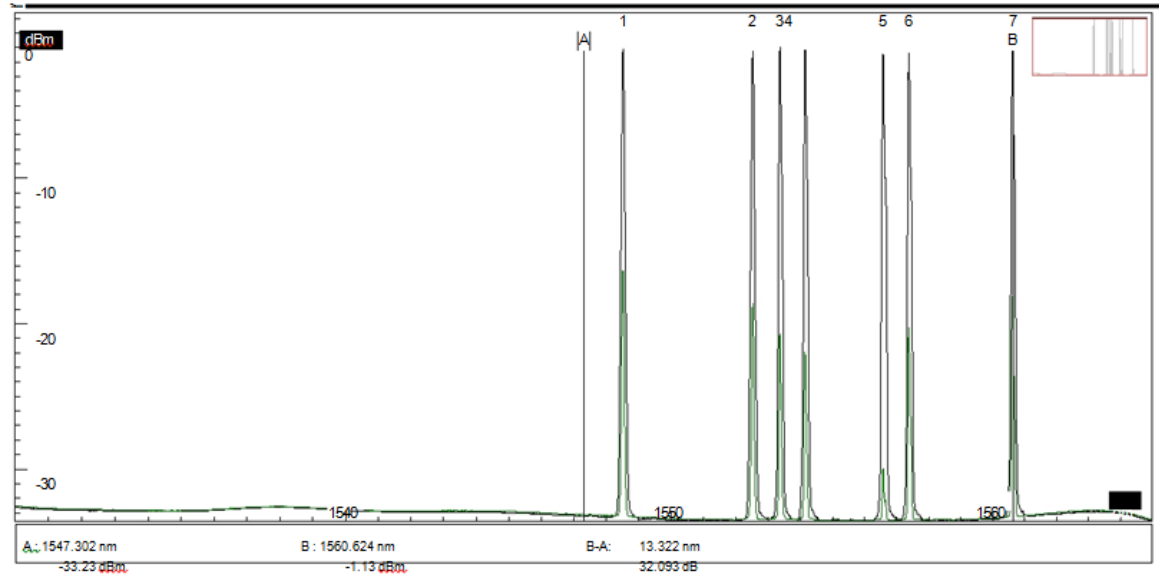
Channel (1)	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	IOSNR (dB)	P/E Comp (%)
1	1548.510	---	-16.20	-67.83	51.63	14.64
2	1552.526	4.016	-16.25	-61.56	45.31	14.45 3
	1553.375	0.849	-16.16	-68.37	42.21	14.78 4
	1554.157	0.783	-16.25	-64.05	47.80	14.46 5
	1556.584	2.426	-16.32	-65.42	49.11	14.24 6
	1557.388	0.804	-16.56	-66.44	49.88	13.46 7
	1560.623	3.236	-16.40	-67.93	51.53	13.96

1
5/6/2014 3:42:13 PM Fiber Trace Viewer v654 © JDSU

File: site a28.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/18/2013 11:18:12 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point:
 ORIGIN Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 Cable: # of acquisition: 0
 Fiber: 28 High sensitivity: No
 Colour: Averaging: None
 END SNR Method: Left + Right
 Cable: S<->N Distance: 50 GHz
 Fiber: 28 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Colour: Coupler compensation: None
 Origin: Resolution: Max
 End:

Comment:



1
5/6/2014 3:42:13 PM Fiber Trace Viewer v654 © JDSU

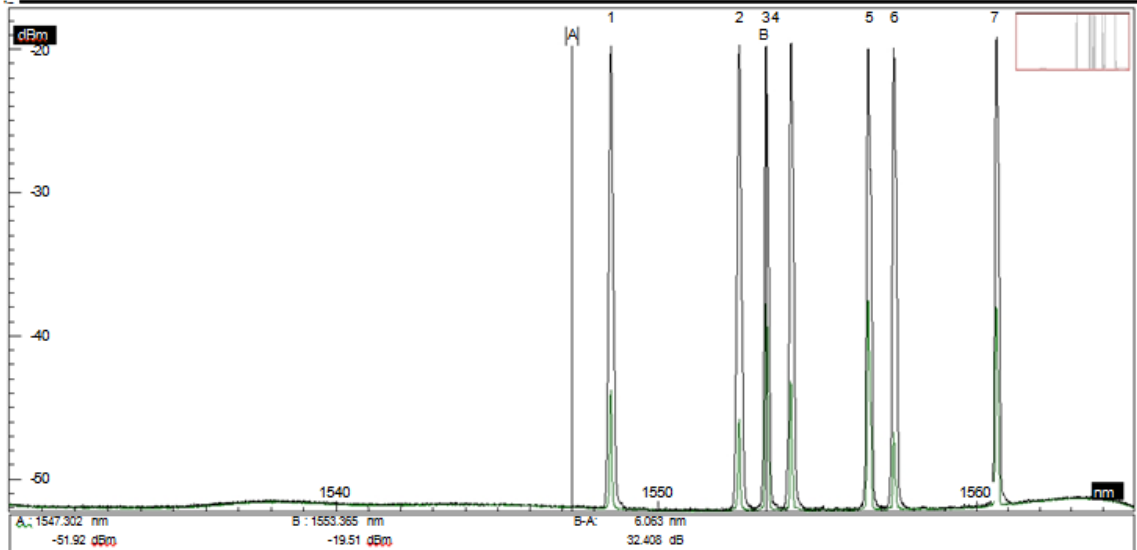
File: site a28.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/18/2013 11:18:12 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	P/R Comp (dB)
1	1548.512	---	0.23	-29.90	30.11	15.15
2	1552.621	4.010	-0.06	-30.02	29.94	14.173
	1553.371	0.849	0.11	-30.02	30.11	14.734
	1554.154	0.784	-0.15	-30.23	30.07	13.895
	1556.582	2.428	-0.19	-30.41	30.20	13.766
	1557.383	0.801	-0.43	-30.34	29.90	13.027
	1560.621	3.238	0.29	-30.11	30.38	15.36

5/6/2014 3:47:21 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site b1.osa Date: 1/16/2013 4:44:49 PM Device: MTS 8000 Number 10947 Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point: Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 ORIGIN: # of acquisition: 0
 Cable: 1 High sensitivity: No
 Fiber: Averaging: None
 Color: SNR Method: Left + Right
 END: S<->N Distance: 50 GHz
 Cable: Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Fiber: Coupler compensation: None
 Color: Resolution: Max
 Origin:
 End:
 Comment:



5/6/2014 3:47:21 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

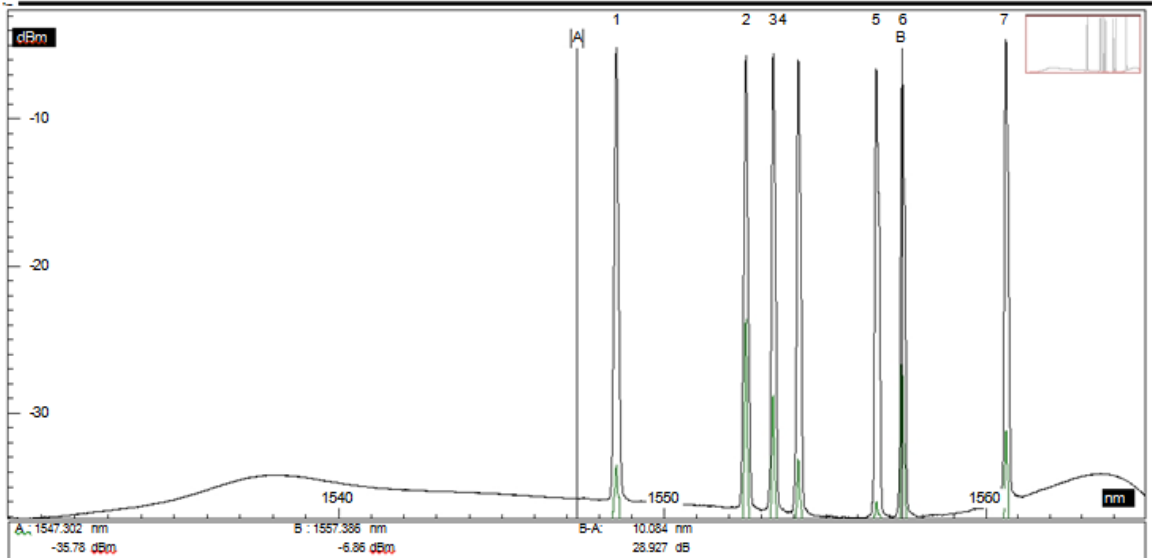
Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	FOSNR (dB)	PlsComp (dB)
1	1548.516	---	-18.53	-48.83	30.29	14.11
2	1552.524	4.007	-18.39	-48.98	30.52	14.563
	1553.372	0.849	-18.46	-48.73	30.25	14.354
	1554.154	0.782	-18.36	-48.90	30.54	14.695
	1556.583	2.429	-18.68	-48.88	30.18	13.646
	1557.389	0.806	-18.76	-48.99	30.16	13.397
	1560.627	3.238	-18.18	-48.75	30.56	15.30

5/6/2014 3:47:41 PM Fiber Test Viewer v6.84 © JDSU

File: site b2.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/16/2013 4:57:23 PM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point:
 ORIGIN Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 Cable: # of acquisition: 0
 Fiber: 2 High sensitivity: No
 Colout: Averaging: None
 END SNR Method: Left + Right
 Cable: S<->N Distance: 50 GHz
 Fiber: 2 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Colout: Coupler compensation: None
 Origin: Resolution: Max
 End:

Comment:



5/6/2014 3:47:41 PM Fiber Test Viewer v6.84 © JDSU

File: site b2.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/16/2013 4:57:23 PM Module: 83OSA500R Number P-0019

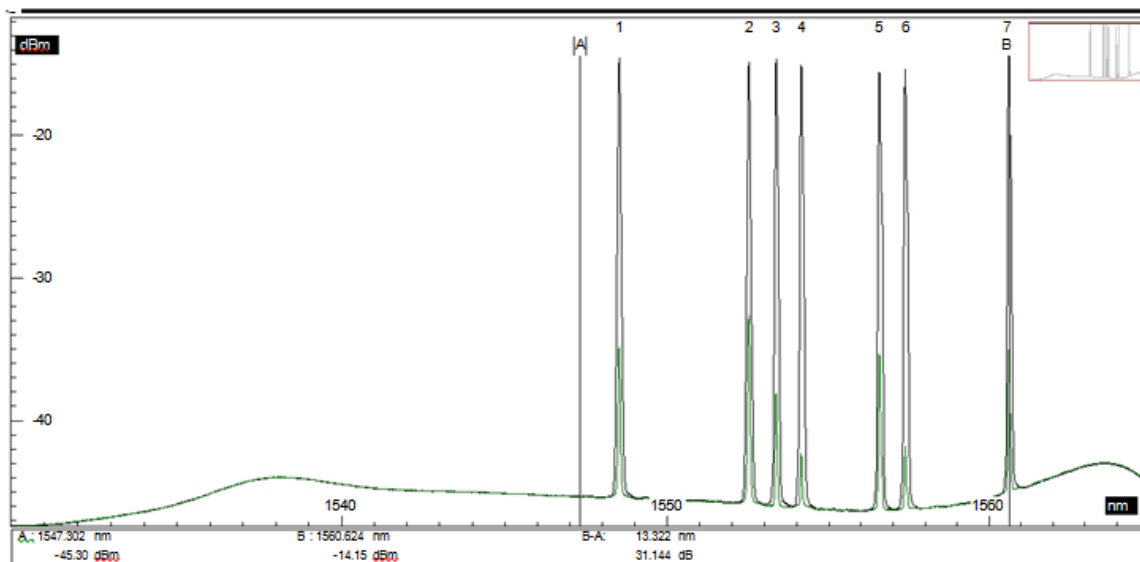
Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	P/Rcomp (dB)
1	1548.515	---	-3.86	-37.68	33.82	16.62
2	1552.520	4.005	-4.48	-36.40	31.91	14.42 3
	1553.371	0.851	-4.47	-37.93	33.45	14.43 4
	1554.152	0.781	-4.90	-36.81	31.90	13.08 5
	1555.581	2.429	-5.29	-39.08	33.78	11.95 6
	1557.385	0.805	-5.25	-38.82	33.57	12.07 7
	1560.624	3.239	-3.64	-39.45	35.80	17.46

5/6/2014 3:48:21 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site_b4.osa Date: 1/17/2013 10:44:48 AM Device: MTS 8000 Number 10947 Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point: Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 ORIGIN: # of acquisition: 0
 Cable: High sensitivity: No
 Fiber: 4 Averaging: None
 Colout: SNR Method: Left + Right
 END: S<->N Distance: 50 GHz
 Cable: Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Fiber: 4 Coupler compensation: None
 Colout: Resolution: Max
 Origin:
 End:

Comment:



5/6/2014 3:48:21 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

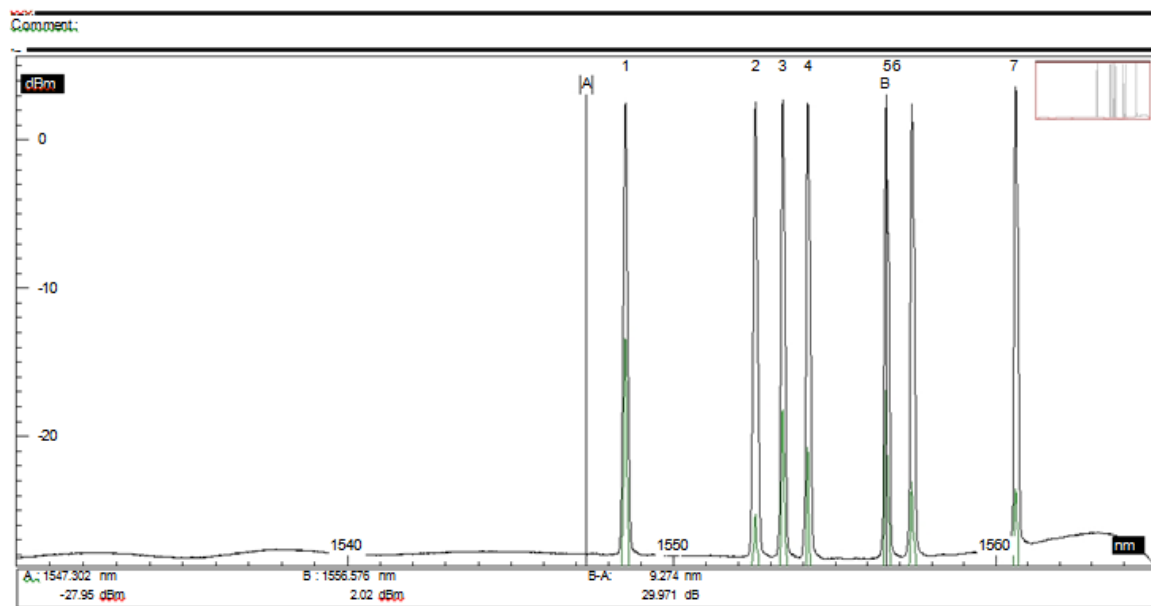
File: site_b4.osa Date: 1/17/2013 10:44:48 AM Device: MTS 8000 Number 10947 Module: 83OSA500R Number P-0019

Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	PIRcomp (dB)
1	1548.513	---	-13.22	-41.96	28.71	15.79
2	1552.520	4.006	-13.59	-42.48	28.87	14.51 3
	1553.370	0.850	-13.59	-42.84	29.23	14.49 4
	1554.151	0.781	-13.96	-42.77	28.79	13.31 5
	1556.581	2.430	-14.19	-43.11	28.89	12.62 6
	1557.383	0.802	-14.31	-43.11	28.77	12.28 7
	1560.622	3.240	-12.89	-41.97	29.06	17.03

1
5/6/2014 3:45:47 PM Fiber Trace Viewer v6.34 © JDSU

File: site b6.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 11:01:32 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point:
 ORIGIN Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 Cable: # of acquisition: 0
 Fiber: 6 High sensitivity: No
 Color: Averaging: None
 END SNR Method: Left + Right
 Cable: S<->N Distance: 50 GHz
 Fiber: 6 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Color: Coupler compensation: None
 Origin: Resolution: Max
 End:



1
5/6/2014 3:45:47 PM Fiber Trace Viewer v6.34 © JDSU

File: site b6.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 11:01:32 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

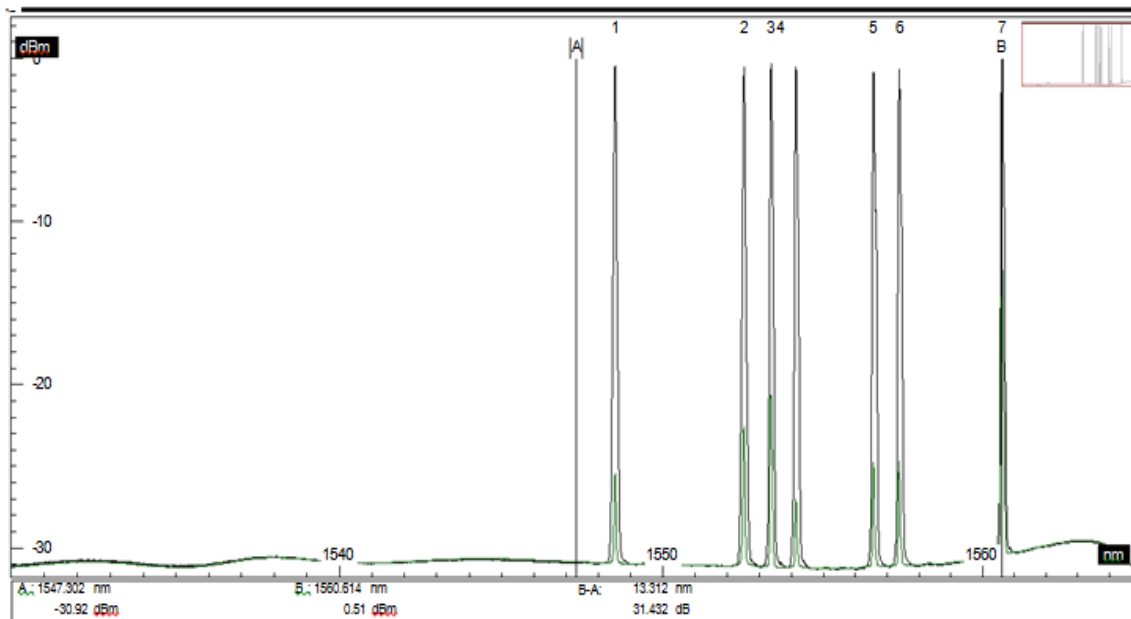
Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	PIBcomp (dB)
1	1548.511	---	3.83	-26.72	30.54	14.49
2	1552.521	4.010	3.73	-26.99	30.71	14.15 3
	1553.370	0.849	3.81	-26.84	30.64	14.41 4
	1554.150	0.780	3.58	-28.84	32.41	13.67 5
	1556.581	2.431	3.47	-27.44	30.90	13.34 6
	1557.385	0.804	3.45	-27.13	30.56	13.25 7
	1560.622	3.236	4.45	-28.52	32.97	16.72

5/6 2014 3 46:09 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site b7.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 11:07:44 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point:
 ORIGIN Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 Cable: # of acquisition: 0
 Fiber: 7 High sensitivity: No
 Colour: Averaging: None
 END SNR Method: Left + Right
 Cable: S<->N Distance: 50 GHz
 Fiber: 7 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Colour: Coupler compensation: None
 Origin: Resolution: Max
 End:

Comment:



5/6 2014 3 46:10 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site b7.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 11:07:44 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

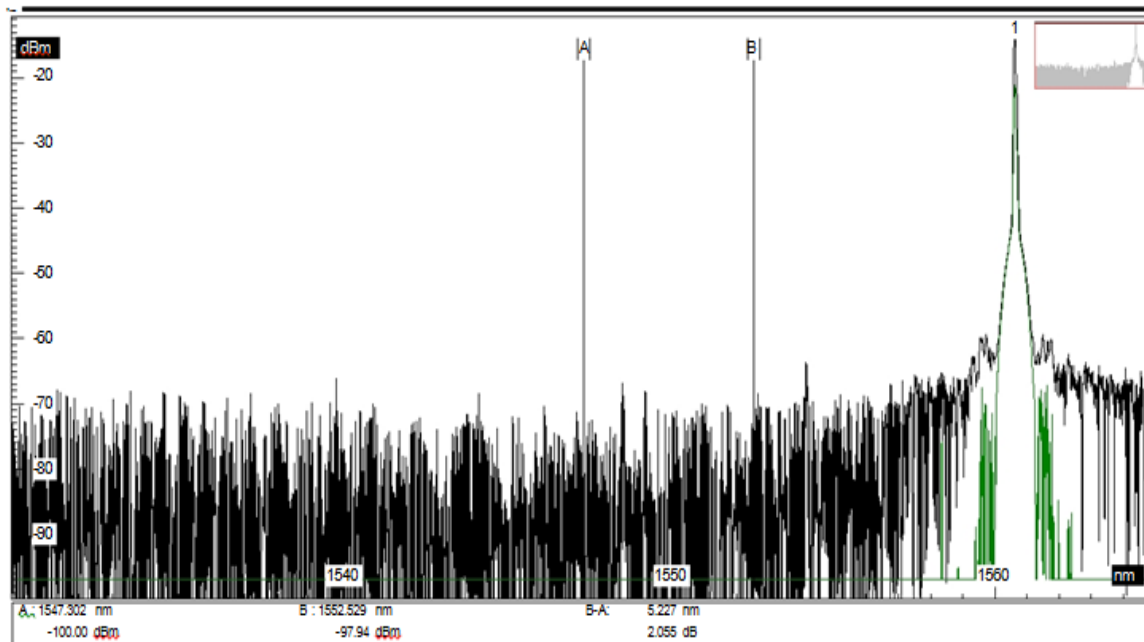
Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	I-OSNR (dB)	P/Bcomp (dB)
1	1548.508	---	0.89	-27.75	28.61	14.87
2	1552.521	4.013	0.62	-27.84	28.44	13.98 3
	1553.371	0.850	0.71	-27.92	28.60	14.25 4
	1554.151	0.780	0.47	-27.96	28.40	13.48 5
	1556.582	2.431	0.34	-28.03	28.34	13.09 6
	1557.386	0.804	0.34	-27.97	28.28	13.10 7
	1560.618	3.232	1.54	-27.16	28.68	17.25

5/6/2014 3:46:17 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

File: site b8.osa Device: MTS 8000 Number 10947
 Date: 1/17/2013 11:23:07 AM Module: 83OSA500R Number P-0019

Operator: Test point: Wavelength: 1250.000 - 1650.000 nm
 ORIGIN # of acquisition: 0
 Cable: 8 High sensitivity: No
 Fiber: 8 Averaging: None
 Color: 8 SNR Method: Left + Right
 END S<->N Distance: 50 GHz
 Cable: 8 Noise acquisition BW: 0.10 nm
 Fiber: 8 Coupler compensation: None
 Color: 8 Resolution: Max
 Origin:
 End:

Comment:



5/6/2014 3:46:17 PM Fiber Trace Viewer v6.84 © JDSU

Channel	Wavelength (nm)	Spacing (nm)	Power (dBm)	Noise (dBm)	FSR (dB)	Passband (dB)
1	1560.618	--	-11.55	-40.54	28.96	100.00