



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ROOPE RANTANEN
OPTISEN LÄHETTIMEN TUOTANTOVIRITYKSEN
AUTOMATISOINTI

Diplomityö

Tarkastaja:
professori Karri Palovuori
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
1.3.2017

TIIVISTELMÄ

ROOPE RANTANEN: Optisen lähettimen tuotantovirityksen automatisointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 57 sivua, 2 liitesivua

Elokuu 2017

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Elektroniikka

Tarkastaja: professori Karri Palovuori

Avainsanat: optinen lähetin, tuotantoviritys, kaapelitelevisioverkko

Nykyiset kaapelitelevisioverkot ovat hybridi kuitu-koaksiaaliverkkoja. Verkon nimi on peräisin siinä käytettävistä kaapeleista: optisesta kuidusta sekä koaksiaalikaapelista. Verkon runkoverkko koostuu usein optisesta kuidusta ja jakeluverkko lähellä asiakkaita koaksiaalikaapelista. Runkoverkon ja jakeluverkon välissä sijaitsee verkon paikallinen solmukohta, jota kutsutaan nodeksi. Erityyppisistä kaapeleista johtuen verkkoon tarvitaan jokin komponentti tai laite, jolla voidaan muuntaa signaali koaksiaalikaapelissa käytettävästä sähköisestä muodosta kuidun optiseen muotoon. Kuvailtuun suuntaan muunnoksen suorittavaa laitetta kutsutaan optiseksi lähettimeksi. Verkossa kulkee lisäksi signaaleja kahteen suuntaan: operaattorilta asiakkaalle ja asiakkaalta operaattorille. Asiakkaalta operaattorille kulkevaa suuntaa kutsutaan paluusuunnaksi. Tässä työssä käsitelty lähetin oli eräs Teleste Oyj:n valmistama paluusuunnan optinen lähetin.

Lähettimen valmistusprosessissa hyödynnettiin tuotantoviritystä. Virityksen avulla voitiin kompensoida komponenttien yksilöiden välisistä vaihteluista johtuneet epätarkkuudet tietyissä laitteen ulostuloissa. Laitteen viritys suoritettiin käsin säädettyjen potentiometriä avulla, jolloin viritys muodostui aikaavieväksi osaksi valmistusprosessia. Täten käsivirityksestä haluttiin päästä eroon toteuttamalla viritys automaattisesti. Tämän työn tavoitteena oli valmistella lähettimen komponentit automaattiviritystä varten. Suunnitellun lähettimen tuli lisäksi sopia samaan spesifikaatioon sekä piirilevykokoon kuin aiempi lähetin.

Lähettimellä oli kaksi käsin viritettävää ominaisuutta. Ensimmäisenä levyllä tuotetun pilottisignaalin amplitudin suuruus haluttiin virittää kohdalleen säädettävän vaimentimen avulla. Toisena virityskohteena oli laserdiodin toimintapisteen asetus kohdalleen, joka tapahtui ohjaamalla laserdiodille muodostettua säätösilmukkaa.

Automaattiviritykseen vaadittu sähköinen ohjaus virityksiin toteutettiin työssä digitaalisten potentiometriä avulla. Muu kytkentä suunniteltiin digitaalisen potentiometriä avulla ohjattavaksi kummallekin viritykselle omanlaisekseen.

Lähettimestä tehtiin prototyyppiirilevyt testausta varten, ja laitetta mitattiin sen viritettävyyden kannalta sekä sen käytännön soveltuvuuden kannalta. Viritettävyyttä tutkittiin viritysikkunoiden sekä viritystarkkuuksien avulla. Kummassakin tapauksessa viritysikkunat saatiin sopiviksi, ja tarkkuus pilottisignaalin virityksessä riittäväksi. Laserdiodin toimintapisteen virityksen tarkkuus todettiin olevan aivan vaaditun tarkkuuden rajoilla, joten se todettiin todennäköisesti riittäväksi. Käytännön soveltuvuuden varmistamiseksi suoritettujen mittausten myötä laite todettiin soveltuvaksi edelleen sekä verkkoon että nodeen kaikissa lämpötilaolosuhteissa.

ABSTRACT

ROOPE RANTANEN: Tuning automatization of an optical transmitter in the manufacturing process

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 57 pages, 2 Appendix pages

August 2017

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Electronics

Examiner: professor Karri Palovuori

Keywords: optical transmitter, manufacturing automatization, cable television network

Modern cable television networks are called hybrid fibre-coaxial networks. The network utilizes optical fibre as well as coaxial cable for signal transportation. Trunk portion of the network often consists of optical fibre, and distribution part is made of coaxial cable. A local hub, or a node, of the network is located at the interface of the trunk and distribution parts. The node requires a device to transform the signal from electrical form of the coaxial cables to optical form for the fibres. The device is called an optical transmitter. Communication in the network is bidirectional, and the direction from the customer to the network operator is called the return path. The optical transmitter discussed in this thesis is a return path optical transmitter manufactured by Teleste Corporation.

Certain outputs of the transmitter were tuned in its manufacturing process to compensate for component tolerances. The tuning was done by hand, which had caused it to become a rather time consuming part of the manufacturing process. Automatization of the tuning process was desired for this reason, and it was investigated in this thesis. The target of this thesis was to re-design the tuning hardware of the transmitter, and still fulfill the specification and printed circuit board size constraints of the original transmitter.

The transmitter had two hand-tuned outputs: pilot signal amplitude and laser diode biaspoint. The pilot signal was tuned with an attenuator, and the laser diode was tuned by adjusting the diode control loop. The ability to drive the tuning components electrically was implemented with digital potentiometers in both cases. Both tuning circuits required new designs so that they could be implemented with the digital potentiometers.

Prototype boards were designed for testing purposes in this thesis, and the device was measured to ensure the tuning was sufficient and to confirm the device's practicality. In both cases the tuning windows were large enough, and in the pilot signal's case also the accuracy was sufficient. The laser diode bias tuning accuracy was borderline acceptable, and it was deemed probably sufficient. The practicality measurements confirmed, that the device should function as a part of the network and a part of the node in all the required temperature circumstances.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teleste Oyj:lle Kaarinassa. Haluan kiittää Telesteä mahdollisuudesta työn tekemiseen, ja yleisesti kaikkia telesteläisiä avuliaisuudesta. Erityisesti haluan kiittää Toni Rumpusta diplomityöni aiheesta ja ohjauksesta työn aikana. Kiitokset kuuluvat koko Telesten tuotekehitystiimin lisäksi erityisesti Niko Suo-Heikille ja Miika Bergille avusta ja kärsivällisyydestä työnteon aikana.

Haluan kiittää myös työni tarkastajaa Karri Palovuorta neuvoista ja palautteesta työtehtävän ja työn kirjoittamisen yhteydessä.

Lopulta haluan kiittää myös perhettäni tuesta työn ja opiskelujen aikana.

Tampereella 23.7.2017,

Roope Rantanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TEORIA	9
2.1	Optinen kuitu.....	9
2.2	Laserdiodi ja sen käyttö optisessa lähettimessä	13
2.3	Optinen modulaatioindeksi	15
2.4	Potentiometri ja digitaalinen potentiometri.....	18
2.5	Vaimentimet.....	20
2.6	Lämpötilakompensointi.....	23
2.7	Impedanssisovitus	25
3.	HFC-VERKON PALUUSUUNNAN OPTINEN LÄHETIN.....	28
3.1	Lähettimen rakenne	28
3.1.1	Lähetin lohkokaa viotasolla	28
3.1.2	Lähettimen viritettävät osat.....	30
3.2	Lähettimen viritys tuotannossa ja virityksen automatisointi.....	35
3.2.1	Alkuperäinen käsin suoritettu viritys	35
3.2.2	Virityksen automatisoinnin suunnittelu	35
3.2.3	Lähettimen uuden piirikaavion suunnittelu.....	36
4.	MITTAUSTULOKSET	42
4.1	Pilottisignaalin amplitudin viritys	42
4.2	Laserdiodin toimintapisteen viritys.....	45
4.3	Käytännön soveltuvuuden mittaukset	47
5.	YHTEENVETO	53
	LÄHTEET.....	55

LIITE A: Alkuperäisen lähettimen laserdiodin biasointivirran ohjauskytkennän piirikaavio

LIITE B: Suunnitellun lähettimen laserdiodin biasointivirran ohjauskytkennän piirikaavio

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1:</i>	<i>Ensimmäisten kaapelitelevisioverkkojen rakennekuva.....</i>	<i>2</i>
<i>Kuva 2:</i>	<i>Koaksiaalikaapeleilla toteutetun kaapelitelevisioverkon rakennekuva. Muokattu lähteestä [2].....</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 3:</i>	<i>Kaapelitelevisioverkon rakenne optisen kuidun lisäämisen jälkeen. Muokattu lähteestä [2].....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 4:</i>	<i>Nykyaikainen kaapelitelevisioverkko metropolialueella. Muokattu lähteestä [5].....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 5:</i>	<i>Esimerkki kaapelitelevisioverkon taajuuskaistan jaosta meno- ja paluusuuntaan. Muokattu lähteestä [2].....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 6:</i>	<i>Valonsäteen heijastuminen ja taittuminen kahden aineen rajapinnassa.....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 7:</i>	<i>(a) Yksimuotokuidun rakenne, (b) Monimuotokuidun rakenne. Muokattu lähteestä [10].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 8:</i>	<i>Valon eteneminen monimuotokuidussa. Muokattu lähteestä [9].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 9:</i>	<i>Mitattu lasista valmistetun optisen kuidun vaimennus aallonpituuden funktiona. Muokattu lähteestä [9].....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 10:</i>	<i>Havainnollistukset Fabry-Perot -laserin ja DFB-laserin spektreistä. Muokattu lähteestä [12].....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 11:</i>	<i>Laserdiodin valoteho sen läpi kulkevan virran funktiona. Muokattu lähteestä [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 12:</i>	<i>Havainnollistus potentiometreistä. Vasemmalla rakennekuva sekä piirikaaviosymboli, keskellä ruuvimeisselillä säädettävä potentiometri ja oikealla käsin tai ruuvimeisselillä säädettävä potentiometri. Muokattu lähteestä [27].....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 13:</i>	<i>ISL95311 digitaalisen potentiometrin lohkokaaavioesitys. [17].....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 14:</i>	<i>T-vaimennin ja π-vaimennin.....</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 15:</i>	<i>RFSA2033 analogisen vaimentimen vaimennuksen riippuvuus ohjausjännitteestä. [21].....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 16:</i>	<i>Peregrine PE4314 porrasvaimentimen lohkokaaaviokuva. [23].....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 17:</i>	<i>Lämpökompensoitu vaimenninkytkentä.....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 18:</i>	<i>Esimerkkikäyrät lämpötilakompensoidusta kytkennästä. Kompensoitavan kytkennän ulostuloteho sinisellä, kompensoivan vaimentimen vaimennus punaisella ja lopullinen ulostuloteho mustalla lämpötilan funktiona.....</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 19:</i>	<i>Impedanssisovitus lohkokaaaviotasolla.....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 20:</i>	<i>Impedanssisovitus L-topologian avulla.....</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 21:</i>	<i>Lähettimeen lohkokaaavioesitys.....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 22:</i>	<i>Lohkokaaavio pilottisignaalin reitistä oskillaattorista signaalilinjaan.....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 23:</i>	<i>Colpitts-oskillaattorin piirikaavio. [24].....</i>	<i>31</i>

<i>Kuva 24:</i>	<i>Oskillaattorin harmonisten taajuuksien suotimen taajuusvaste.....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 25:</i>	<i>Suuntakytkimen piirikaavioesitys. [31]</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 26:</i>	<i>Simuloinnin tuloksena saatu lämpötilakompensoivan vaimentimen vaimennuskäyrästä.</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 27:</i>	<i>Valokuva prototyypipiirilevystä laserdiodilla.</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 28:</i>	<i>Valokuva prototyypipiirilevystä.....</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 29:</i>	<i>Lähttimen häiriöiden mittausjärjestely.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 30:</i>	<i>Suunnittelun lähttimen taajuusvaste RF-sisäänmenosta laserdiodille 65 MHz alipäästösuotimella.....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 31:</i>	<i>Suunnittelun lähttimen taajuusvaste RF-sisäänmenosta laserdiodille 85 MHz alipäästösuotimella.....</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 32:</i>	<i>Suunnittelun lähttimen taajuusvaste RF-sisäänmenosta laserdiodille 200 MHz alipäästösuotimella.....</i>	<i>51</i>

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1: DOCSIS 3.0 standardin määrittämät paluusuunnan taajuuskaistat. [4]</i>	<i>7</i>
<i>Taulukko 2: DOCSIS 3.1 standardin määrittämät paluusuunnan taajuuskaistat. [7]</i>	<i>8</i>
<i>Taulukko 3: RFSA2033 vaimentimen lämpötilakäytös kahdella eri ohjausjännitteellä.</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 4: Pilottisignaalin mitatut jännitteen amplitudin tehollisarvot digitaalisen potentiometrin asennon muuttuessa.</i>	<i>43</i>
<i>Taulukko 5: Alkuperäisen lähettimen pilottisignaalin lämpötilavaihtelu.</i>	<i>44</i>
<i>Taulukko 6: Suunnitellun lähettimen pilottisignaalin lämpötilavaihtelu.</i>	<i>44</i>
<i>Taulukko 7: Suunnitellun lähettimen valotehon ja biasvirran vaihtelu digitaalisen potentiometrin asennon muuttuessa.</i>	<i>46</i>
<i>Taulukko 8: Alkuperäisen lähettimen valotehon vaihtelu lämpötilan muuttuessa.</i>	<i>47</i>
<i>Taulukko 9: Suunnitellun lähettimen valotehon vaihtelu lämpötilan muuttuessa.</i>	<i>47</i>
<i>Taulukko 10: Häiriömittauksissa löydetty häiriötaajuudet ja häiriöpiikkien tehollisarvot lähettimen ollessa kiinni ACE8 nodessa.</i>	<i>49</i>
<i>Taulukko 11: Häiriömittauksissa löydetty häiriötaajuudet ja häiriöpiikkien tehollisarvot lähettimen ollessa kiinni AC9100 nodessa.</i>	<i>49</i>

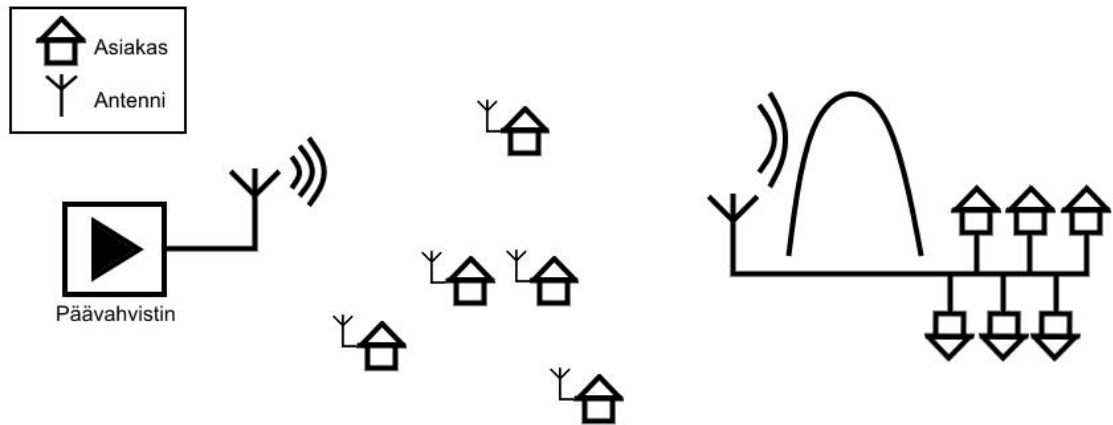
LYHENTEET JA MERKINNÄT

CATV	engl. community antenna television, yhteisantennijärjestelmä
DOCSIS	engl. Data Over Cable Service Interface Specification, kaapelitelevisioverkon kommunikaation standardi
DFB-laser	engl. distributed feedback laser, hajautetusti takaisinkytketty laser
EEPROM	engl. Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory, haihtumaton puolijohdemuistityyppi
FET	engl. field-effect transistor, kanavatransistori
FN	engl. fibre node, kaapelitelevisioverkon paikallinen solmukohta tai node
FP-laser	Fabry-Perot-laser
HFC	engl. hybrid fibre-coaxial, hybridi kuitu-koaksiaaliverkko
I2C-väylä	engl. Inter-Integrated Circuit, mikropiirien väliseen tiedonsiirtoon käytettävä sarjaväylä
MAC-kerros	engl. medium access control, OSI-mallin protokollapinon siirtoyhteyskerros
MOSFET	engl. metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, metallioksidi-puolijohdekanavatransistori
NTC	engl. negative temperature coefficient, negatiivinen lämpötilakerroin
OFDM	engl. orthogonal frequency division multiplexing, taajuusjakoinen kanavointitekniikka
OMI	engl. optical modulation index, optinen modulaatioindeksi
OSI-malli	engl. Open Systems Interconnection, tiedonsiirron protokollia kuvaava kerrosmalli
PH	engl. primary hub, kaapelitelevisioverkon primaarisolmupiste
PHY-kerros	engl. physical, OSI-mallin protokollapinon fyysinen kerros
PTC	engl. positive temperature coefficient, positiivinen lämpötilakerroin
QAM	engl. quadrature amplitude modulation, amplitudi- ja vaihemodulaatioita yhdistelevä modulointitekniikka
RFoG	engl. radio frequency over glass, enimmäkseen optisesta kuidusta koostuva kaapelitelevisioverkon rakenne
RIN	engl. relative intensity noise, suhteellinen intensiteettikohina
SH	engl. secondary hub, kaapelitelevisioverkon sekundaarisolmupiste
c	valon nopeus tyhjiössä
I	virta
n	taitekerroin
P	teho
v	valon nopeus väliaineessa
Z	impedanssi
θ_b	taittumiskulma
θ_i	saapumiskulma
θ_r	heijastuskulma

1. JOHDANTO

Tässä työssä etsittiin päivitysmahdollisuuksia kaapelitelevisioverkossa hyödynnettävän hybridi kuitu-koaksiaaliverkon paluusuunnan optisen lähettimen tuotantoviritykseen Teleste Oyj:n tuotekehityksessä. Aikaisempi viritys tapahtui laitteen tuotantovaiheessa käsin trimmerien avulla ja nyt etsittiin ratkaisua suorittaa viritys automaattisesti. Automatisoinnin tavoitteena oli saavuttaa säästöjä valmistuskustannuksissa. Työn tarkoituksena oli suunnitella lähettimen komponentit sopiviksi automatisointia varten, mutta virityksen suorittavaa ohjelmistoa ei tässä työssä käsitelty. Sopiva vaihtoehto virityksen automatisoimiseksi löydettiin ja sitä testattiin myös käytännössä. Lähettimen rakenteesta, toiminnasta, automatisaation suunnittelusta ja mittaustuloksista kerrotaan lisää luvuissa kolme ja neljä. Luvussa kaksi käsitellään taustateoriaa suunnitteluvaiheen tueksi. Johdannoksi tälle työlle on lisäksi seuraavassa esitelty kaapelitelevisioverkon historiaa ja nykyistä rakennetta.

Kaapelitelevisioverkko syntyi alun perin tarpeesta tuoda televisiolähetykset syrjäisemmille seuduille, joille taajamissa käytetty antennitelevisiojärjestelmän signaali ei kulkenut lainkaan tai se kulki heikosti. Erityisen huonossa asemassa antennisignaalin vastaanottamisen kannalta olivat kaukana lähetyksantenneista sekä laaksoissa sijainneet vastaanottajat. Kaapeliverkkojen alkuvaiheessa signaali vastaanotettiin antennilla lähempänä lähetyksasemaa ja signaali tuotiin sen jälkeen kaapeleilla asiakkaiden koteihin. Havainnollistus kyseisestä verkon rakenteesta on esitetty Kuvassa 1. Rakenteesta kaapelitelevisioverkko sai ensimmäisen nimensä yhteisantennijärjestelmä (engl. community antenna television, CATV). Verkossa käytettiin jo sen alkutaipaleilla kaapeleina koaksiaalikaapeleita, ja verkot sisälsivät lisäksi vahvistimia, jakajia sekä liittimiä. Ensimmäiset kaapelitelevisioverkot rakennettiin Yhdysvalloissa 1940- ja 1950-luvuilla. [1]



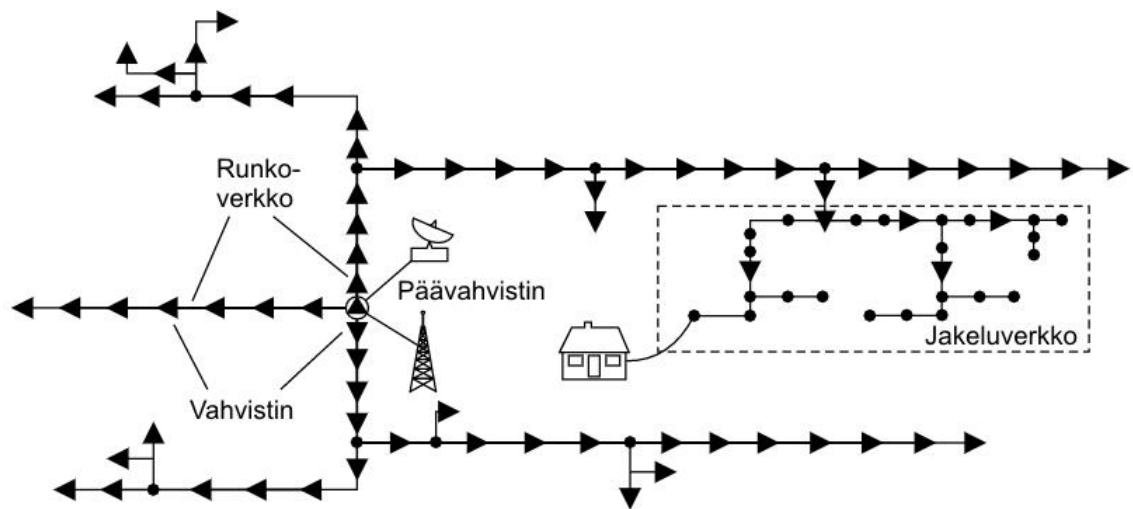
Kuva 1: Ensimmäisten kaapelitelevisioverkkojen rakennekuva.

Televisioverkoissa televisiokanavat lähetettiin, ja lähetetään soveltuvilta osin edelleen, omilla taajuuksillaan sekä antenni-, että kaapeliverkossa. Verkoissa käytettiin siten taajuusjakoista multipleksointia. Televisioverkoissa käytetyt lähetysväylät eli antenniverkoissa ilma ja kaapeliverkoissa koaksiaalikaapeli mahdollistivat laajahkon taajuusalueen käytön. Useampia kantataajuuksisia kanavia on mahdollista lähettää vaihtelevilla taajuuksilla moduloimalla ne suurempitaajuuksisiin kantaaltoihiin. Televisiokanavien kuvasignaalien tapauksessa käytössä on ollut eräs amplitudimodulaatiotapa, jossa kanavan informaatio sidotaan kantaallon amplitudin vaihteluihin. Televisioverkoissa on käytetty perinteisen amplitudimodulaation sijaan tyнкäsivukaistamodulaatiota, jonka avulla kanavien kaistanleveydet on saatu pysymään pienempinä. Äänisignaalit on lähetetty omilla taajuuskaistan osuuksillaan, lähellä saman kanavan videosignaalia, taajuusmodulaation avulla. [2]

Kaapelitelevisioverkoissa niiden alkuaikoina käytetyn koaksiaalikaapelin ominaisuuksiin kuului voimakas signaalin vaimentuminen signaalin kulkiessa kaapelin läpi ja lisäksi vaimennuksen kasvaminen signaalin taajuuden kasvaessa. Siten verkkoihin sisältyi vahvistimia tietyin välimatkoin, jotta signaalin teho säilyi tarpeeksi suurena televisiolähetyksen muodostamiselle vastaanottimissa. Pidemmällä matkoilla käytettiin vahvistimien sarja- eli kaskadikytkentöjä. Signaalin kulku yhden vahvistimen läpi ei ainoastaan vahvista sitä, vaan signaaliin summautuu lisäksi kohinaa ja signaali säröytyy. Suurimpien taajuuksien signaalien vaimentuessa eniten, hukkuvat korkeataajuiset signaalit ensimmäisinä lisääntyvän kohinan alle tunnistamattomiin. Yhtä vahvistinta kohden mainitut epäideaalisuudet eivät olleet kovin suuria, mutta signaalin kuljettua tarpeeksi monen peräkkäisen vahvistimen läpi sen käyttökelpoisuus heikkeni. Tällöin myös verkon suuruudelle tai pituudelle muodostui rajoituksia taajuuskaistarajoitteiden lisäksi. Yksinkertaistaen signaalin laatu heikkeni sen edettyä pidemmälle verkossa ja kun laatu heikkeni tarpeeksi, ei televisiovastaanottimessa enää ollut mahdollista muodostaa riittävän hyvälaatuista kuvaa ja ääntä vastaanottajalle. [2]

Signaalien lähteenä toimivaa lähetyssasemaa kutsutaan kaapelitelevisioverkossa päävahvistimeksi (engl. headend). Sen tehtävänä on koota lähetettävä signaali antennitelevisioverkkojen signaaleista, satelliittisignaaleista ja muista mahdollisista lähteistä kuten paikalliskanavilta. Lähteistä päävahvistimella muodostetaan moduloidut televisiosignaalit, ja ne lähetetään verkkoon kohti asiakkaita. [2]

Jo 1950-luvulta lähtien verkoille aloitettiin muodostamaan järjestelmällistä rakennetta sen suorituskyvyn parantamiseksi. Rakenteessa verkko jaettiin selkeästi runkoverkkoon sekä jakeluverkkoihin. Runkoverkon tehtävänä oli kuljettaa signaalia pidempiä matkoja ja tuoda signaali lähemmäs suurempia asiakaskeskittymiä. Jakeluverkko puolestaan kuljetti signaalia runkoverkon risteymistä vastaanottajien tiloihin. Kyseistä verkon rakennetta on havainnollistettu Kuvassa 2. Runkoverkko pystyttiin rakentamaan vähemmän häviöllisestä kaapelista ja se saatiin sisältämään vähemmän liittimiä sekä jakajia, jolloin signaalia saatiin kuljetettua parempilaatuisena pidempiä matkoja. Koko verkon elinajan myös sen yksittäisiä komponentteja, kuten kaapeleita ja vahvistimia, on kehitetty. Kaiken kehitystyön ansiosta koaksiaaliverkkojen lähetyksen taajuuskaistaa on saatu laajennettua vuosien saatossa sadan megahertsin ympäristöstä parhaimmillaan yhteen gigahertsiin. [2]



Kuva 2: Koaksiaalikaapeleilla toteutetun kaapelitelevisioverkon rakennekuva. Muokattu lähteestä [2].

Kaapelitelevisioverkon alkuperäisestä tarkoituksesta siirtää analogista videosignaalia vastaanottajille johtuen verkon rakenne muovautui käyttämään puutopologiaa. Puutopologiaa on havainnollistettu Kuvassa 2, jossa puun latvasta eli päävahvistimelta jaetaan signaalia laajenevia oksia pitkin jakeluverkkojen avulla asiakkaille. [2]

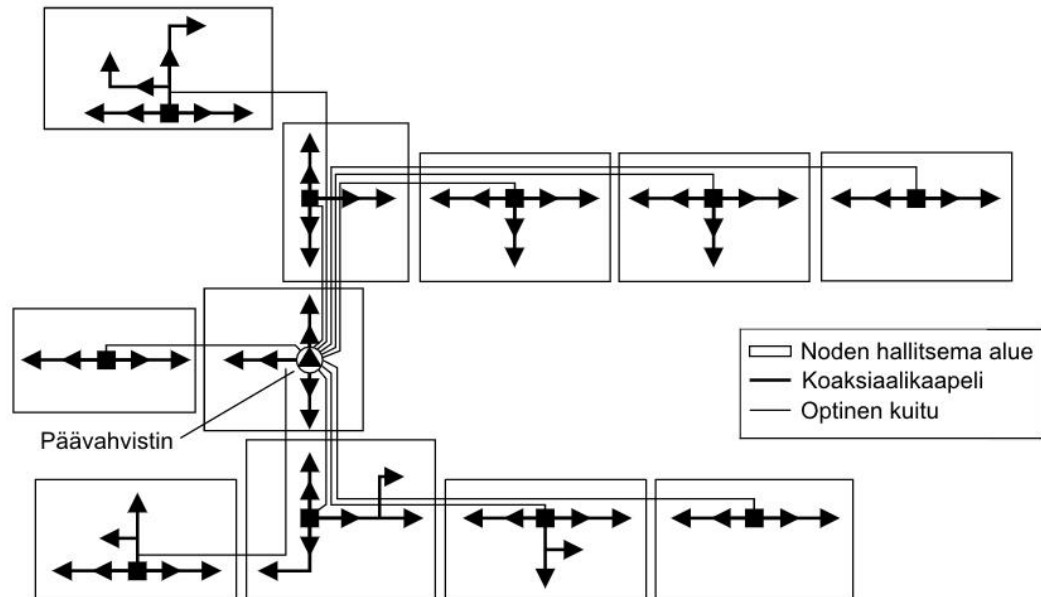
Satelliittitelevisiolähetysten myötä kaapelitelevisioverkoista alkoi muodostua muutakin kuin antenniverkon jatkeita 1970-luvulla. Satelliittilähetykset tarjosivat kaapelitelevisioverkko-operaattoreille mahdollisuuden tarjota uusia kanavia, jolloin

operaattorit pystyivät kilpailemaan paremmin muiden televisio-operaattoreiden kanssa asiakkaita. [2]

Ensimmäiset askeleet myös paluusuunnan kommunikaatiolle kaapelitelevisioverkoissa otettiin 1970-luvulla. Paluusuunnalla tarkoitetaan asiakkaan laitteille mahdollisuutta lähettää signaaleja päävahvistimelle, ja menosuunnalla puolestaan signaalisuuntaa päävahvistimelta asiakkaalle. Paluusuunnan kommunikaatio vaati asiakkaalta digisovittimen ja kommunikaatio mahdollisti operaattoreille erilaisten maksullisten lisäkanavien tai lisäpalveluiden tarjoamisen. Meno- ja paluusuunnan signaalit jaettiin taajuustasossa siten, että paluusuunnan signaalit kulkivat taajuuskaistan alkupäässä ja menosuunnan signaalit taajuuskaistan loppupäässä. Paluusuuntaa oli kuitenkin hankalaa toteuttaa olemassaolleeseen koaksiaalikaapeliverkkoon erityisesti vahvistimien kaskadeista johtuneiden korkeiden kohinatasojen vuoksi. [2]

Ajan kuluessa yhä laajempaa taajuuskaistaa haluttiin hyödyntää menosuunnalla, ja paluusuunnan toteutukselle alkoi löytyä enemmän kysyntää. Rajoittavana tekijänä verkoissa olleen koaksiaalikaapelin tilalle löydettiin 1990-luvulla optinen kuitu. Optisen kuidun suurimpia hyötyjä ovat sen vaimennuksen suurempi taajuusriippumattomuus ja huomattavasti pienempi vaimennuksen suuruus verrattuna koaksiaalikaapeliin. Suuruusluokaltaan kuidun vaimennus on vain noin prosentin luokkaa verrattuna koaksiaalikaapelin vaimennukseen, mikä mahdollisti verkon monien ominaisuuksien kehittämisen. Optisen kuidun pienemmän vaimennuksen ansiosta useiden vahvistimien ketjukytkennöistä oli mahdollista luopua, mistä johtuen koaksiaaliverkkojen kohinatasot laskivat. Siten paluusuunnan kommunikaatio muodostui helpommin toteutettavaksi. Myös menosuunnan käytettävissä olleita taajuuksia saatiin nostettua optisen kuidun avulla. Muita kuidun tuomia hyötyjä olivat verkon luotettavuuden parantuminen optisessa muodossa kulkevan signaalin ollessa immuuni sähkömagneettisille häiriöille, ja verkon ylläpitokustannusten pieneneminen. [2]

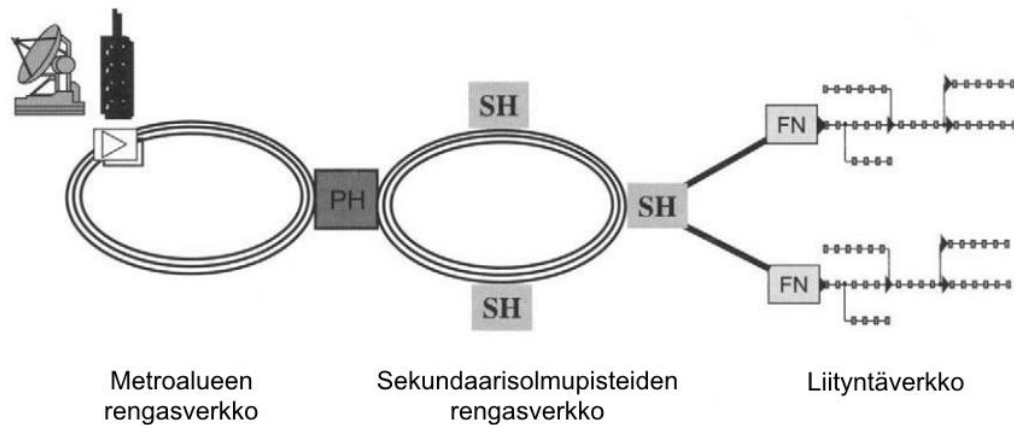
Optinen kuitu korvasi aluksi kaapelitelevisioverkossa runkoverkon koaksiaalikaapeleita, jolloin verkosta aloitettiin käyttämään termiä hybridi kuitu-koaksiaaliverkko (engl. hybrid fibre coaxial network, HFC network). Runkoverkon rakenne muuttui siten, että päävahvistimelta lähetettävä signaali kulki uusien paikallisten päävahvistimien kautta koaksiaaliverkkoon. Signaali saapui optisessa muodossa paikalliselle päävahvistimelle, jossa se muunnettiin sähköiseen muotoon. Ensimmäisten HFC-verkkojen rakennetta on havainnollistettu Kuvassa 3. Paikallisten päävahvistinten hallinnoimaa asiakaskuntaa voidaan kutsua soluksi tai nodeksi. Myös paikallista päävahvistinta kutsutaan usein nodeksi. Verkon jakaminen pienempiin soluihin mahdollisti lähetettävien signaalien muokkaamisen jokaiselle solulle yksilölliseksi. Kuten mainittua kuidun myötä paluusuunnan kommunikoinnista tuli käytännöllisempää koaksiaalikaapeliosuuksille. Paluusuunnalle käytettiin kuituosuuksilla omaa optista kuitua menosuunnan kuidun rinnalla. Tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseksi voitiin myös useampaa kuitua käyttää rinnakkain. [2]



Kuva 3: Kaapelitelevisioverkon rakenne optisen kuidun lisäämisen jälkeen. Muokattu lähteestä [2].

Paluusuunnan kommunikaatio mahdollisti monien uusien palvelujen tarjoamisen asiakkaille. Uusia palvelumahdollisuuksia olivat mm. internetyhteys, maksulliset lisätelevisiokanavat ja videoiden suoratoistomahdollisuudet [3]. Verkon sisältäessä useita asiakkaiden kaapelimodeemeja tai digisovittimia jaetaan paluusuunnan taajuuskaistalle jokaiselle kaapelimodeemille oma aikansa lähettää informaatiossa verkon operaattorin toimesta. [4]

Moderni kaapelitelevisioverkko on kehittynyt kustannustehokkaasti tukemaan lisääntyntä kaksisuuntaista kommunikaatiota rakenteensa avulla. Yleistä kaapeliverkon rakennetta on havainnollistettu Kuvassa 4. Siinä metropolialueella verkko on rengastopologiaa vastaava, mistä verkko haarautuu primaarisolmupisteiden (PH) kautta toisiin rengasverkkoihin. Toisesta rengasverkosta puolestaan haaraututaan sekundaarisolmupisteiden (SH) avulla pienempiin asukaskeskittymiin, joissa signaali jaetaan lopulta aiemmin esiteltyjen nodejen (FN) avulla asiakkaille. Rengasverkkojen avulla verkosta on saatu mahdollisimman kustannustehokas kuitujen määrän osalta. [5]



**Kuva 4: Nykyaikainen kaapelitelevisioverkko metropolialueella.
Muokattu lähteestä [5].**

Verkon seuraava kehitysaskel on ollut korvata yhä suurempi osa koaksiaalikaapeleista kuidulla. Tällöin verkkoa voidaan kutsua RFoG-verkoksi, (Radio frequency over glass), jossa kuitu vie asiakkaan tiloihin asti. Signaali muunnetaan optisesta muodosta sähköiseen muotoon vasta asiakkaan tiloissa mikrosolmulaitteen avulla. Hyötynä rakenteessa on edelleen suurempi käytössä oleva paluusuunnan taajuuskaista, kun usean asiakkaan kesken jaettu koaksiaaliverkko poistuu kokonaan tai sen koko pienenee huomattavasti. Kuidun vieminen asiakkaan tiloihin asti takaa myös paremman käytettävyyden todennäköisissä tulevaisuuden verkkoratkaisuissa. [5]

HFC-verkossa suuria muutoksia verkon komponenteissa ei ole tapahtunut kuidun lisäämisen jälkeen, vaan verkkoa on saatu kehitettyä parantamalla olemassaolevia komponentteja ja kommunikaation protokollia. Kuidulla on pyritty korvaamaan yhä suurempi osa koaksiaalikaapelista, ja useampia optisia aallonpituuksia yhdessä kuidussa on otettu käyttöön. Yhteen kuituun voidaan lähettää useampaa oman informaationsa sisältävää optista aallonpituutta, jolloin tiedonsiirron nopeutta saadaan kasvatettua entisestään.

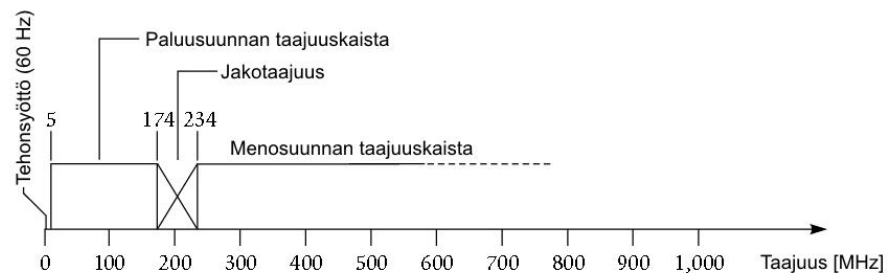
Eräs tuleva muutos verkon arkkitehtuurissa on todennäköisesti sen hajauttaminen, mikä tarkoittaa joidenkin verkon OSI-mallin protokollapinon alempien kerrosten toiminnallisuuden siirtämistä päävahvistimelta nodeille. OSI-mallin fyysisen kerroksen (PHY) ja siirtoyhteyserroksen (MAC) siirtäminen nodejen vastuulle on todettu mahdolliseksi sekä järkeväksi, ja siksi useat verkko-operaattorit toteuttavatkin verkon muutosta kyseiseen suuntaan. Tällöin nodet saisivat päävahvistimelta informaation digitaalisessa muodossa, ja ne muodostaisivat moduloidut signaalit verkon seuraaville osille. [2],[6]

Nykyään suurin osa verkkojen signaaleista ovat sisällöltään digitaalisia signaaleja sekä televisiosignaalien, että muiden palvelujen osalta. Vaihtelua on kuitenkin vielä maakohtaisesti, ja analogiset televisiolähetysketketkin ovat vielä käytössä joissakin osissa

maailmaa. Muuntamalla televisiolähetykset digitaaliseen muotoon saadaan säästettyä taajuuskaistaa analogiseen lähetykseen verrattuna. Paluusuunnan kommunikaatio on luonnollisesti ainoastaan digitaalista sen sisällön vuoksi. [2]

Kaapelitelevisioalan standardointiorganisaatio CableLabs on kehittänyt datasiirrolle kaapelitelevisioverkossa standardin, joka on nimeltään Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS). Standardista on julkaistu jo useampi versio, joista uusin versio on DOCSIS 3.1 ja monin paikoin käytössä on vielä edellinen versio DOCSIS 3.0. Standardit ovat yhteensopivia edellisten versioiden kanssa, jolloin niitä voidaan käyttää yhtä aikaa samassa verkossa. Uusin standardi on yhtenevä maailmanlaajuisesti, mutta aikaisemmista versioista on olemassa omat versionsa esimerkiksi Yhdysvaltoihin ja Eurooppaan.

Menosuunnan taajuuskaista on DOCSIS 3.0 standardissa määritelty alkamaan 54 tai 102 MHz:stä ja päätymään sovelluskohtaisesti tyypillisesti välillä 300 MHz – 1002 MHz. DOCSIS 3.1 mahdollistaa menosuunnan kaistan alkamisen lisäksi 87.5 MHz:stä tai 258 MHz:stä ja tulevaisuudessa menosuunnan taajuuskaistan odotetaan jatkuvan jopa kahteen gigahertsiin asti. Kuvassa 5 on havainnollistettu esimerkin avulla taajuuskaistan jakoa meno- ja paluusuuntiin noin kahdensadan megahertsin kohdalla. [4], [7]



Kuva 5: Esimerkki kaapelitelevisoverkon taajuuskaistan jaosta meno- ja paluusuuntaan. Muokattu lähteestä [2].

DOCSIS 3.0 määrittää paluusuunnan taajuuskaistat Taulukon 1 mukaisesti. Yhden kanavan leveydeksi on määritelty 6 MHz Yhdysvalloissa ja 8 MHz Euroopassa. Kanavien kaistanleveydet ovat peräisin aikaisemmin vallalla olleiden analogisten televisiolähetysten modulaatiotapojen vaatimista kaistoista. Digitaaliset signaalit moduloidaan erisuuruuksilla QAM-modulaatioilla (engl. quadrature amplitude modulation), ja analogisten signaalien video moduloidaan usein amplitudimodulaatiolla ja audio taajuusmodulaatiolla. [4]

Taulukko 1: DOCSIS 3.0 standardin määrittämät paluusuunnan taajuuskaistavaihtoehdot. [4]

Paluusuunnan taajuuskaistat	5 – 30 MHz	5 – 42 MHz	5 – 85 MHz
-----------------------------	------------	------------	------------

DOCSIS 3.1 puolestaan mahdollistaa OFDM (engl. orthogonal frequency division multiplexing) modulaation käytön aikaisempien modulaatiotapojen lisäksi, ja laajentaa kummankin suunnan taajuuskaistoja. OFDM-lohkokot on määritelty 192 MHz levyisiksi menosuunnalla ja 96 MHz levyisiksi paluusuunnalla. Lohkot koostuvat useista QAM-moduloiduista alikantoaaltoista. Lohkoja on myös mahdollista katkoa ja täyttää muilla kanavilla tai jättää siihen tyhjiä kaistoja. Paluusuunnan taajuuskaistamahdollisuudet on esitelty Taulukossa 2. Erona aiempaan standardiin paluusuunnan taajuuskaistoja on laajennettu, mikä mahdollistaa suuremmat tiedonsiirtonopeudet. [7]

Taulukko 2: DOCSIS 3.1 standardin määrittämät paluusuunnan taajuuskaistat. [7]

Paluusuunnan taajuuskaistat	5 – 42 MHz	5 – 65 MHz	5 – 85 MHz	5 – 117 MHz	5 – 204 MHz
-----------------------------	------------	------------	------------	-------------	-------------

Tässä työssä käsiteltävän optisen lähettimen sijainti HFC-verkossa on noden optisena paluusuunnan lähettimenä. Lähettimeen tuodaan signaali sähköisessä muodossa, jonka lähetin muuntaa optiseen muotoon ja lähettää sen kuituun kohti päävahvistinta. Päivitettävä lähetin AC67XX kuuluu Teleste Oyj:n ACcess tuoteperheeseen. Tuoteperheeseen kuuluu nodeja, vahvistimia ja niihin liittyviä lisäosia ja komponentteja. Tuoteperheen nodet ovat modulaarisia lähettimien osalta eli niihin voidaan kiinnittää ja irrottaa halutut lähettimet. AC67XX lähettimestä on tarjolla useita konfiguraatioita, joissa ulostulona saatavan valotehon suuruus ja aallonpituus vaihtelevat. Lähetin toimii edellä esitellyillä paluusuunnan taajuuskaistoilla eli suurimmillaan signaalit ovat taajuudeltaan 200 MHz:n luokkaa.

2. TEORIA

Sekä aiemmin kuvatun kaapelitelevisionverkon historian, että tulevan suunnittelutyön tueksi on tässä luvussa käsitelty joitakin niihin liittyviä asioita syvällisemmin. Ensimmäiset alaluvut käsittelevät optista tiedonsiirtoa sekä optisen ja sähköisen signaalin rajapintaa. Viimeiset alaluvut esittelevät elektroniikan osalta työssä käytettyjä monimutkaisempia integroituja piirejä ja suunnittelutekniikoita.

2.1 Optinen kuitu

Optisen kuidun käyttö tiedonsiirrossa perustuu sopivasti suunniteltuun valon taittumiseen. Kuituun ohjataan optisesta lähettimestä, esimerkiksi laserdiodin avulla, valosignaali, joka etenee kuidun toiseen päähän vastaanottimelle. Valo ohjataan kuituun siten, että sen osuessa kuidun seinämiin, se heijastuu haluttuun suuntaan kohti vastaanotinta. Geometrisen optiikan avulla voidaan selittää valon käyttäytymistä aineiden rajapinnoissa, minkä avulla puolestaan voidaan selvittää valon etenemistä kuidussa. Tässä alaluvussa käsitelläänkin valoa yleisesti, sen taittumissääntöjä geometrisen optiikan avulla sekä optisen kuidun rakennetta ja ominaisuuksia.

Valo voidaan määritellä sähkömagneettiseksi säteilyksi tai fotoneiksi eli eräänlaisiksi hiukkasiksi, sillä valon on todettu totelevan sekä sähkömagneettisen teorian, että hiukkasteorian lainalaisuuksia. Valon etenemisnopeus tyhjiössä on noin $2.98 \cdot 10^8$ m/s ja sitä kuvataan usein kirjaimella c . Kulkiessaan jossakin muussa väliaineessa kuin tyhjiössä valon nopeus muuttuu, jolloin valon nopeuden suhdetta tyhjiössä ja vaihtoehdoisessa väliaineessa kutsutaan taitekertoimeksi n . Taitekertoimen yhtälö on määritelty seuraavasti:

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

Kaavassa jo esiteltyjen suureiden lisäksi suure v kuvaa valon nopeutta väliaineessa. [8]

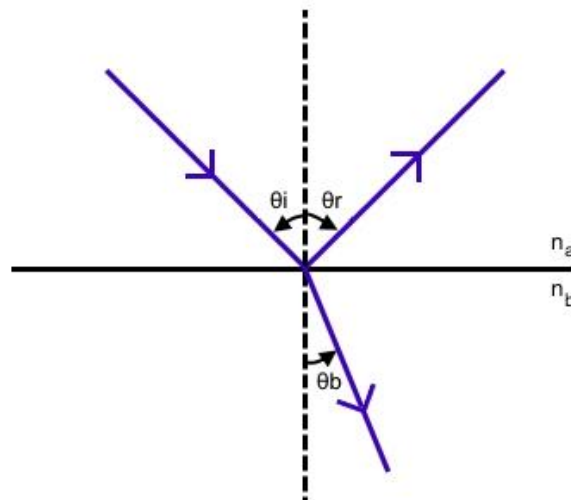
Valon etenemistä voidaan hahmottaa helpoiten geometrisen optiikan avulla, jossa valon ajatellaan etenevän säderintamina. Valon eteneminen ja sen käyttäytyminen rajapinnoissa yksinkertaistetaan usein yksittäisten valonsäteiden tarkasteluun säderintaman sijaan. Yksinkertaistus pitää hyvin paikkansa rajapinnan ollessa sileä, jolloin rintaman säteet käyttäytyvät yhdenmukaisesti. Epätasaisessa rajapinnassa rintaman säteet heijastuvat tai taittuvat eri suuntiin, jolloin niitä tulisi käsitellä yksitellen.

Valonsäteen käyttäytymiselle rajapinnoissa on löydetty joitakin sääntöjä. Ensimmäisenä, saapuvan valonsäteen heijastuskulma θ_r on todettu olevan aina yhtä suuri kuin sen

tulokulma θ_i . Taittuvan säteen suuntaan puolestaan vaikuttavat rajapinnan materiaalien taitekertoimet. Taittuvalle säteelle on voimassa Snellin laki, joka kuuluu seuraavasti:

$$n_a \sin \theta_i = n_b \sin \theta_b \quad (2)$$

Yhtälössä n_a on saapuvan säteen väliaineen taitekerroin, θ_i saapuvan säteen tulokulma rajapinnan normaaliin nähden, n_b rajapinnan toisen aineen taitekerroin ja θ_b taittuvan säteen kulma rajapinnan normaaliin nähden. Valonsäteen saapumista kahden aineen rajapintaan ja Snellin lain suureita on havainnollistettu Kuvassa 6. [8]

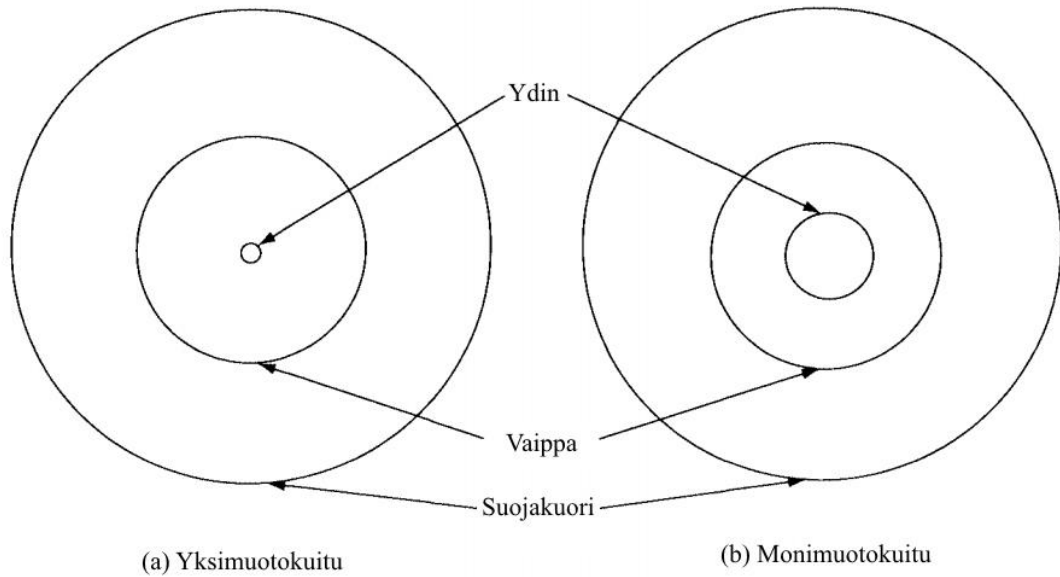


Kuva 6: Valonsäteen heijastuminen ja taittuminen kahden aineen rajapinnassa.

Tulokulmalle θ_i on lisäksi löydettävissä arvo, jolla säde ei enää taitu toiseen väliaineeseen, vaan se kokee täydellisen heijastuksen rajapinnassa. Tulokulmaa, jolla ilmiö tapahtuu, kutsutaan kriittiseksi kulmaksi. Yhtälöstä (2) voidaan myös nähdä, että täydellinen heijastuminen voi tapahtua ainoastaan, kun saapuvan säteen väliaineen taitekerroin on suurempi kuin rajapinnan toisen aineen. Kun kyseinen ehto täyttyy, täydellinen heijastuminen tapahtuu kaikille säteille, jotka saapuvat rajapintaan suuremmalla kuin kriittisellä tulokulmalla. Täydellistä heijastumista hyödynnetään optisessa kuidussa, jossa se saavutetaan sopivasti suunnitellun rakenteen avulla. [8]

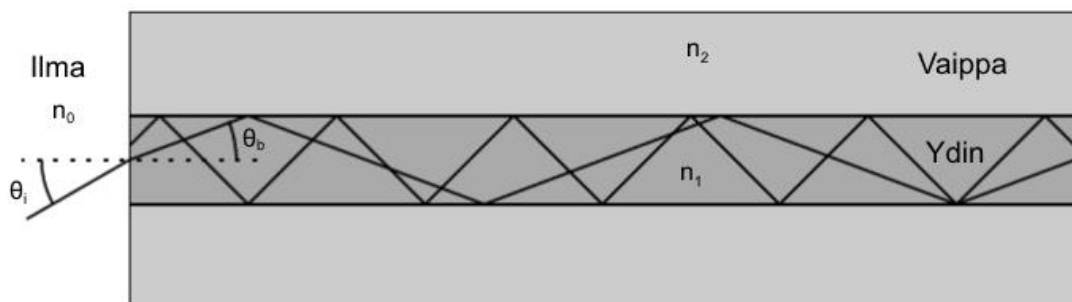
Optinen kuitu koostuu ytimestä, vaipasta ja suojakuoresta, joita on havainnollistettu Kuvassa 7. Ydin ja vaippa ovat usein valmistettu lasista, mutta myös muovista valmistettuja vaihtoehtoja on olemassa. Suojakuori on useimmiten valmistettu muovista. Valon eteneminen kuidussa on tehty mahdolliseksi ytimen ja vaipan sopivan suunnittelun avulla. Tyypillisesti kummankin lasista valmistetun osan taitekerroin on noin 1.45, mutta taitekertoimia on muokattu hieman siten, että ytimen taitekerroin on hiukan suurempi kuin vaipan. Taitekertoimet suunnitellaan hiukan erisuuriksi, jotta valolle saadaan aikaan täydellinen heijastuminen sen osuessa ytimen ja vaipan rajapintaan Snellin lain

mukaisesti. Tällöin valo jatkaa etenemistään kuidussa myös sen osuessa ytimen ja vaipan rajapintoihin. [9]



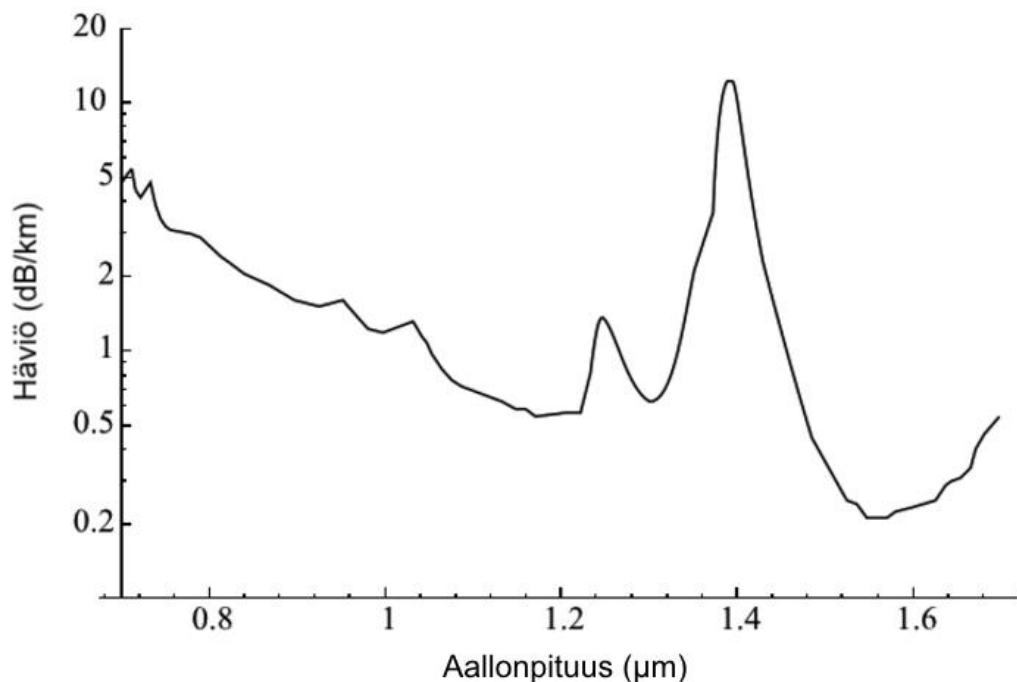
Kuva 7: (a) Yksimuotokuidun rakenne, (b) Monimuotokuidun rakenne. Muokattu lähteestä [10].

Kuidut voidaan jakaa kahteen ryhmään valon etenemistavan mukaan niiden sisällä. Jaottelu tehdään yksimuotokuituihin ja monimuotokuituihin. Monimuotokuidussa ytimen leveys on suurempi kuin syötettävän valon aallonpituus, jolloin valolla on monta mahdollista etenemistietä kuidun läpi. Ilmiötä voidaan havainnollistaa geometrisen optiikan avulla kuten Kuvassa 8. Valonsäteet kulkevat tässä tapauksessa kuidun läpi erisuuren matkan, jolloin kuitu aiheuttaa dispersiota. Dispersiosta johtuen kuidun läpi kulkevat signaalit kokevat vääristymiä. Yksimuotokuidussa ydin on kooltaan noin yhden valon aallonpituuden luokkaa, jolloin valolla on vain yksi reitti kuidun läpi. Tällöin dispersiota ei havaita, joten yksimuotokuitu on käytetympi kuitutyyppi tiedonsiirrossa varsinkin pidemmällä matkoilla. [2], [10]



Kuva 8: Valon eteneminen monimuotokuidussa. Muokattu lähteestä [9].

Suurin osa kuidun häviöistä johtuu sen valmistusmateriaalin absorptiosta ja Rayleigh sironnasta. Materiaalin absorptiosta johtuvat häviöt ovat enimmäkseen seurausta lasin epäpuhtauksista, joita on lisätty lasiin taitekertoimien asettamiseksi sopiviin arvoihin. Absorption yhteydessä osa valoenergiasta häviää lämmöksi. Absorptiohäviöitä on saatu vähennettyä historian saatossa huomattavasti, ja suurin osa häviöistä johtuu nykyisin Rayleigh sironnasta. Rayleigh sironna aiheutuu lasin valmistuksessa aiheutuvista mikroskooppisen pienistä tiheyden vaihteluista, jotka saavat aikaan hyvin pieniä vaihteluita materiaalin taitekertoimessa. Sironnasta johtuen osa fotoneista ohjautuu väärään suuntaan, jolloin valon energiaa häviää. Kuidun kokonaishäviöitä eri valon aallonpituuksilla on tutkittu mittaamalla, jolloin tuloksena on saatu optimaaliset lähetysaallonpituudet. Kuvassa 9 on kuvattu mittaustuloksena saatu lasikuidun vaimennuskäyrä, josta nähdään pienimpien vaimennusten saavutettavan 1300 nm ja 1500 nm ympäristöissä. Suurin osa optisesta tiedonsiirrosta tapahtuukin kyseisten aallonpituuksien ympäristössä. [2],[9]



Kuva 9: Mitattu lasista valmistetun optisen kuidun vaimennus aallonpituuden funktiona. Muokattu lähteestä [9].

Optisessa kuidussa voidaan käyttää aallonpituusjakoista multipleksointia, jolloin yhdessä kuidussa lähetetään useampia signaaleja eri aallonpituuksilla. Aallonpituusjakoinen multipleksointi voidaan jakaa kahteen ryhmään: karkeaan ja tiheään multipleksointiin. Karkeassa aallonpituusjakoisessa multipleksoinnissa signaalit kulkevat 20 nm:n välein, kun tiheässä ne kulkevat noin 0.8 nm:n välein. [2]

HFC-verkon näkökulmasta kuidun hyötyinä perinteiseen koaksiaalikaapeliin verrattuna ovat huomattavasti pienempi vaimennus ja vaimennuksen suurempi riippumattomuus

taajuudesta. Kuvasta 9 voidaan nähdä, että parhaimmillaan vaimennus on luokkaa 0.25 dB/km, kun koaksiaalikaapelin vaimennus on luokkaa 3.5 dB/100m kahdellasadalla megahertsillä ja 8.3 dB/100m yhdellä gigahertsillä [11]. Pienemmän vaimennuksen ansiosta signaalia voidaan kuljettaa pidempiä matkoja ilman vahvistusta, mikä pitää signaalin laadun verkossa parempana pidempiä matkoja. Vaimennuksen riippumattomuus taajuudesta puolestaan mahdollistaa suuremman taajuuskaistan hyödyntämisen, jolloin suuremmat tiedonsiirtonopeudet mahdollistuvat. Kuten edellä mainittiin, koaksiaalikaapeleiden tapauksessa korkeammat taajuudet vaimenevat enemmän, jolloin niiden hyödyntäminen on vaikeampaa. Lisäksi koaksiaalikaapelissa signaali kulkee sähköisessä muodossa, joten se on altis ulkoisille häiriöille. Kuidun tapauksessa signaali on optisessa muodossa, mikä saa sen immuuniksi ulkoisille sähköisille häiriöille. Kun kuituverkon tapauksessa vahvistimia tarvitaan huomattavasti vähemmän, myös verkon ylläpitokustannukset pienenevät. Optisen kuidun signaaleja voidaan myös tarvittaessa vahvistaa optisilla vahvistimilla. [2]

2.2 Laseriodi ja sen käyttö optisessa lähettimessä

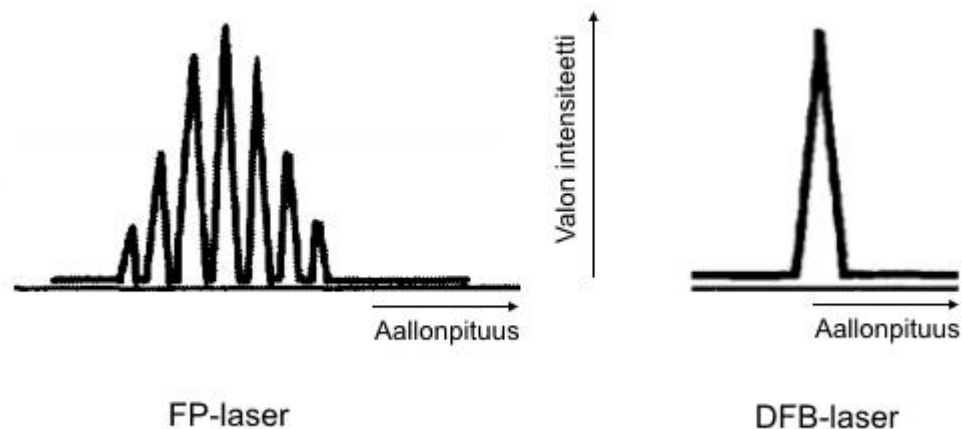
Laser on valonlähde, josta säteilevä valo on koherenttia ja monokromaattista [8]. Eli laserin säteilemä valo on hyvin tarkasti yksitaajuista ja siten myös yksiväristä. Laservalo keskittyy myös hyvin pienelle alueelle, mikä antaa sille käyttömahdollisuuksia esimerkiksi tiedonsiirtosovelluksissa. [12] Tässä alaluvussa esitellään laserin toimintaperiaatetta yleisesti, erilaisia puolijohdelasereita sekä niiden ominaisuuksia.

Yksinkertaistettuna laserin toiminta perustuu atomin energiatason muutokseen ja sen myötä tapahtuvaan fotonin vapautumiseen. Laserin tapauksessa energiatason vaihtumista vauhditetaan stimuloimalla atomeja. Stimuloidussa emissiossa korkeamman energiatason atomeja pommitetaan fotoneilla, jolloin atomit saadaan vaihtamaan tasoaan alemmalle energiatasolle. Tällöin atomit emittoivat fotonin, joka on samalla taajuudella ja samassa vaiheessa kuin stimuloiva fotoni. Väliaineessa emittoidut fotonit kohtaavat lisää korkeamman tason atomeja, jolloin saadaan aikaan yhä enemmän fotoneja. Tällöin samantaajuisten ja -vaiheisten fotonien määrä lisääntyy ja ne muodostavat yhdessä koherenttia valoa. Stimuloitavia atomeja on kuitenkin nostettava korkeammalle tasolle ulkoisesti, jotta fotonien määrä saataisiin kasvamaan. Laserissa tätä toimintoa suorittavaa osaa kutsutaan pumpuksi. [8],[12]

Laserissa käytetään lisäksi peilejä luomaan resonaattorirakenne. Väliaine, jossa stimuloitua emissiota tapahtuu, asetetaan rakenteessa peilien väliin. Tällöin fotonin saavuttaessa peilin se heijastuu takaisin väliaineeseen, jolloin heijastunut fotoni saa aikaan lisää fotoneja rakenteessa. Toisen päädyn peilistä tehdään hieman laservaloa lävitseen päästävä, jolloin rakenteeseen saadaan laservalon ulostulo. Ulostulevan laserin aallonpituus riippuu rakenteen materiaaleista ja koosta. [9], [12]

Laserdiodissa valoa tuotetaan pn-liitoksessa elektronien ja reikien uudelleenjärjestäytyessä. Kun elektroni ja reikä muodostavat liitoksessa parin, emittoituu prosessissa fotoni. Diodin ollessa biasoituna myötäsuntaan sen läpi kulkee virta, jolloin pn-liitokseen tuodaan jatkuvasti uusia elektroneja ja reikiä. Biasvirta toimii laserdiodin tapauksessa pumppuna, joka mahdollistaa fotonien jatkuvan tuotannon. Kuten tavallisella diodilla, myös laserdiodilla on jokin kynnysjännite, jonka jälkeen sen virta alkaa kasvaa huomattavasti ja laservalon intensiteetti kasvaa. [12]

Yleisimmät optisessa tiedonsiirrossa käytettävät laserdiodityypit ovat Fabry-Perot (FP) laser sekä hajautetusti takaisinkytketty (engl. distributed feedback, DFB) laser, koska niiden ulostuloteho on riittävän suuri ja muuntosuhde sisäänmenovirrasta valotehoksi tarpeeksi lineaarinen. [2] Kyseisten laserien toiminta perustuu edellä kuvattuun, mutta niiden välisenä erona on se, että DFB-laserissa fotonien takaisinkytkentä on taajuusselektiivisempää kuin FP-lasereissa. Täten DFB-laserin spektri on keskittynyt hyvin pienelle aallonpituusalueelle, kun FP-laserin spektri on leveämpi eli sen valoteho leviää suuremmalle aallonpituusalueelle. Laserien spektrien eroa on havainnollistettu Kuvassa 10. Aallonpituusjakoisessa multipleksoinnissa voidaan käyttää ainoastaan DFB lasereita, sillä FP-laserin spektri leviäisi viereisten kanavien alueelle. [2] FP-laserin etuna on sen halvempi hinta.



Kuva 10: Havainnollistukset Fabry-Perot -laserin ja DFB-laserin spektreistä. Muokattu lähteestä [12].

Laserdiodin säteilemää valoa voidaan moduloida, mikä mahdollistaa informaation lähettämisen diodin avulla. Käytetyt modulaatiovaihtoehdot ovat suora ja epäsuora modulaatio. Suorassa modulaatiossa laserdiodin läpi kulkevaan virtaan summataan lähetettävä signaali, jolloin signaali saadaan sidottua valon intensiteetin vaihteluun.

Yksinkertaisimmillaan modulaatio olisi digitaalisen signaalin tapauksessa, kun laseria moduloivana signaalina on vain kaksi numeroa: nolla ja yksi. Tällöin laserdiodia voitaisiin vain kytkeä päälle ja pois päältä. Myös analogista signaalia on mahdollista moduloida valon intensiteetin vaihteluun, mutta silloin järjestelmän epäideaalisuuksiin tulee kiinnittää tarkempaa huomiota. Ulkoisessa modulaatiossa valoa moduloidaan ulkoisen laitteen avulla. Tällöin valo tulee modulaatiolaitteeseen vakiona pysyvällä intensiteetillä, ja laitteen sisällä valon intensiteettiä muokataan lähetettävän signaalin mukaisesti. Suoran modulaatiotavan etuna on toteutuksen halvempi kustannus, ja ulkoisen modulaation etuna on pienempi alttius laserdiodin epäideaalisuuksille. [2]

Kuten aiemmin lyhyesti mainittiin, laserdiodin käytöksessä on myös joitakin epäideaalisuuksia, joista merkittävimpiä on esitelty seuraavassa. Ensimmäisenä, laserdiodin valoteho vaihtelee satunnaisesti hiukan kohinan johdosta, jolloin pientä valotehon vaihtelua kutsutaan suhteelliseksi intensiteetikohinaksi (engl. relative intensity noise, RIN). Kohina ilmoitetaan kohinantehon suhteen keskimääräiseen optiseen tehoon yhden hertsin kaistanleveydellä, ja tyypillisesti arvot ovat luokkaa -160 dB/Hz. Toinen laserdiodin epäideaalisuus johtuu suorasta modulaatiotavasta ja siitä aiheutuvasta diodin emittoiman valon muuttuvasta intensiteetistä, mikä saa aikaan hetkellisiä valon aallonpituuden muutoksia. Ilmiötä kutsutaan viserrykseksi (engl. chirp). Kolmantena haasteena saattaa olla laseriin kuituverkon suunnalta heijastuva valo. Heijastuvan valon ollessa hiukan taajuussiirtynyttä, laser pyrkii saamaan lähettämänsä valon taajuuden heijastuvan valon taajuudelle. Heijastukset saavat aikaan kohinaisen ulostulon laserin ulostulotaajuuden vaihtelun vuoksi. [2]

Myös lämpötilalla on vaikutusta laserdiodin toimintaan. Kuvassa 11 on kuvattu katkoviivalla diodin siirtofunktiota sähkövirrasta valotehoksi suuremmassa lämpötilassa kuin yhtenäisen viivan tapauksessa. Kuvasta nähdään, että lineaarisen alueen kulmakerroin muuttuu, jolloin diodin valoteho riippuu sähköisestä sisääntulosta eri tavalla. Esimerkiksi edelliselle lämpötilalle säädetty toimintapiste ei välttämättä enää olekaan lineaarisen alueen keskellä, joka saattaa aiheuttaa signaalin säröytymistä. Lisäksi samalla sähköisellä teholla ei enää saadakaan aikaiseksi yhtä suurta valotehoa, mikä saattaa vaikuttaa signaalin tunnistamiseen kohinasta jossakin tiedonsiirtolinkin myöhemmässä vaiheessa. [2]

Elektroniikassa käytettävät laserdiodit sisältävät usein valodiodin samassa pakkauksessa laserdiodin kanssa. Valodiodin läpi kulkeva vastasuuntainen virta kasvaa, kun sen vastaanottama valoteho kasvaa. Tällöin laserdiodin säteilemää valoa voidaan monitoroida valodiodin avulla ja laserdiodille voidaan rakentaa takaisinkytkettyjä säätösilmukoita.

2.3 Optinen modulaatioindeksi

Optisella modulaatioindeksillä (OMI) kuvataan laserdiodin kuormitusta. Sen avulla voidaan määritellä laserdiodin käyttöympäristö, jolla saavutetaan signaalille suurin

mahdollinen signaali-kohinasuhde ja pienimmät säröt. OMI on määritelty laserin säteilemän kantoaallon amplitudin valotehon suhteena keskimääräiseen valotehon ja kynnystehon suhteeseen. OMI voidaan ilmoittaa kaavamuodossa seuraavasti:

$$OMI = \frac{P_{amplitudi}}{P_{avg} - P_{th}} \cdot 100\% \quad (3)$$

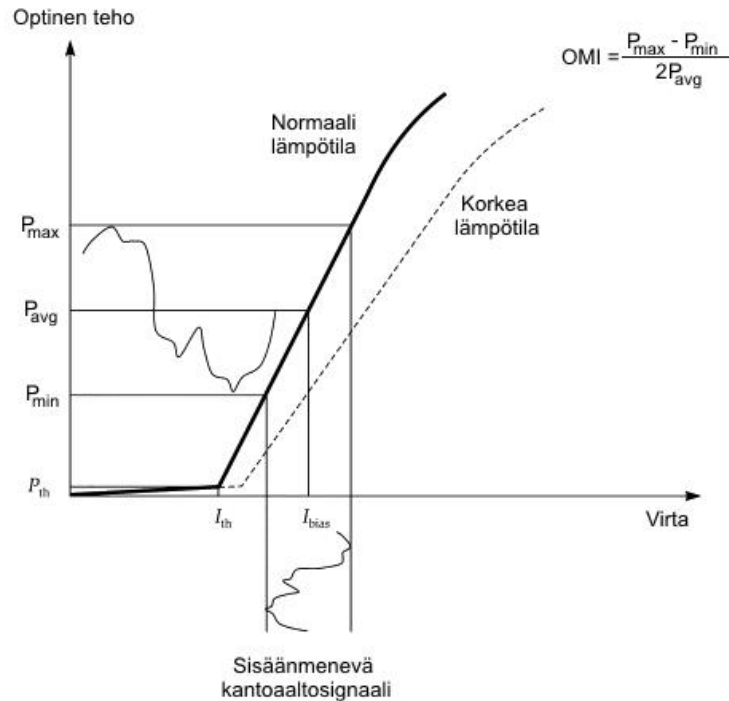
Kaavassa $P_{amplitudi}$ on moduloidun signaalin amplitudin suurin arvo, P_{avg} on laserin säteilemä keskimääräinen valoteho ja P_{th} on laserdiodin lineaarisen alueen valotehon minimiarvo. Diodin kynnystehon arvon ollessa usein hyvin matala, approksimoidaan OMI yleisesti seuraavaan muotoon:

$$OMI = \frac{P_{max} - P_{min}}{2 \cdot P_{avg}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Yhtälössä P_{max} on signaalin huippuarvo ja P_{min} sen minimiarvo. Tätä määritelmää on havainnollistettu myös Kuvassa 11. Optisissa lähettimissä käytettävät laseriodit ovat hyvin lineaarisia niiden käyttöalueella, joten OMI voidaan määritellä myös vastaavasti diodin sähkövirroille:

$$OMI = \frac{I_{amplitudi}}{I_{bias} - I_{th}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Kaavassa $I_{amplitudi}$ on moduloidun signaalin amplitudin suurin arvo, I_{bias} on laserdiodin biasvirta ja I_{th} on laserdiodin kynnysvirta. Kynnysvirta on suuruudeltaan niin merkittävä, että kaavaa ei voida approksimoida yksinkertaisempaan muotoon samoin kuin valotehon tapauksessa. [13]



Kuva 11: Laserdiodin valoteho sen läpi kulkevan virran funktiona. Muokattu lähteestä [2].

Yleisesti OMI:ä voitaisiin kuvata mittariksi siitä, miten paljon moduloiva signaali muuttaa laservalon intensiteettiä. Suurilla OMI:n arvoilla viestin sisältävä signaali säröytyisi helposti, jolloin viestin informaatiosta osa katoaisi. Toisaalta hyvin pienillä OMI:n arvoilla signaali hukkuisi matkan aikana nopeasti kohinaan. Siten OMI:n arvolle on mitoitettavissa kullekin lähettimelle jokin optimiarvo, jolla saavutetaan mahdollisimman suuri signaali-kohinataso ja toisaalta signaali ei vielä säröydy liikaa.

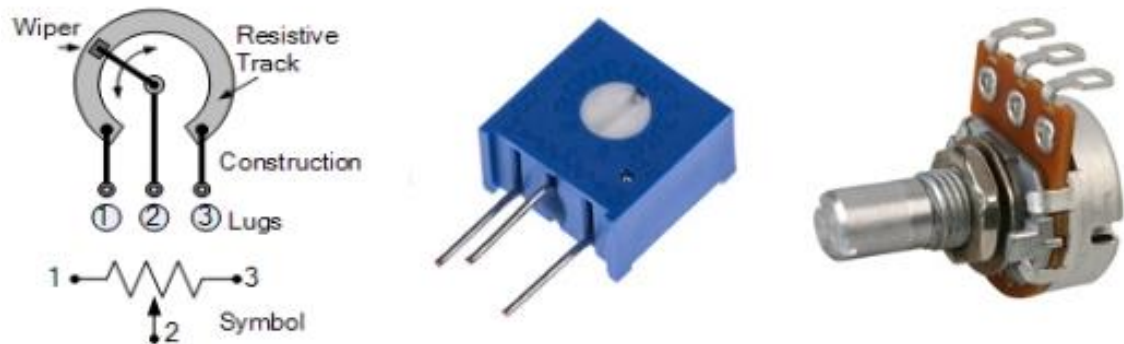
Kaapelitelevisioverkon tapauksessa lähetettävät signaalit ovat hyvin laajakaistaisia, ja verkossa kulkevien useiden samanaikaisten lähetysten, kuten televisiokanavien, vuoksi taajuuskaista on jaettu kanaviin. Kun laserdiodille on määritelty jokin optimaalinen OMI:n arvo, kuvaa se kaikkien kanavien yhteisvaikutuksesta summautuvaa OMI:ä. Kanavien yksittäisiä OMI-arvoja ei voida kuitenkaan summata suoraan yhteen, sillä useamman kanavan järjestelmässä signaalin huippuarvon ja keskiarvon suhde pienenee kanavien määrän kasvaessa. Siten kokonais-OMI tulee laskea yksittäisistä OMI-arvoista neliöllisenä keskiarvona:

$$OMI_{kokonais} = \sqrt{OMI_1^2 + OMI_2^2 + \dots + OMI_n^2} \quad (6)$$

Kaavassa $OMI_{kokonais}$ on kokonais-OMI, ja OMI_n ovat yksittäisten kanavien OMI-arvoja. Kaavan (6) avulla voidaan siten laskea kunkin kanavan lähetysteho kohdalleen, jotta laserdiodi ei satureituisi. Laserin saturaatiosta aiheutuvat häiriöt on todettu paluusuunnan kommunikaatiossa yleisesti koko tiedonsiirtolinkin tuhoavaksi ominaisuudeksi. [14]

2.4 Potentiometri ja digitaalinen potentiometri

Potentiometri on passiivinen komponentti, joka sisältää kolme napaa. Kaksi navoista sijaitsevat jonkin resistanssiarvon ääripäissä, kuten tavallisessa vastuksessa. Kolmannen navan sijainti on säädettävissä kahden ääripään välillä haluttuun arvoon. Komponentin rakennetta, piirikaaviosymbolia ja käytännön toteutuksia on havainnollistettu Kuvassa 12. Potentiometri on yksi nimi kuvatulle kolminapaiselle vastukselle, mikä on peräisin komponentin erästä käyttötarkoituksesta. Muita nimiä komponentille ovat säätövastus sekä trimmeri. Mekaanisen potentiometrin kolmannen navan sijaintia kahden ääriarvon välillä voidaan säätää perinteisesti ruuvimeisselillä pyörittämällä, kuten Kuvan 12 potentiometreissä, tai liukukytkimen avulla. [28]



Kuva 12: Havainnollistus potentiometreistä. Vasemmalla rakennekuva sekä piirikaaviosymboli, keskellä ruuvimeisselillä säädettävä potentiometri ja oikealla käsin tai ruuvimeisselillä säädettävä potentiometri. Muokattu lähteestä [27].

Säädettävän navan muutos voi olla lineaarinen tai logaritminen. Lineaarisen säädön tapauksessa navan asento säätyy koko matkalta aina saman määrän. Logaritmisessa tapauksessa resistanssi säätyy esimerkiksi alussa nopeasti, mutta korkeammilla resistansseilla hitaammin. [28]

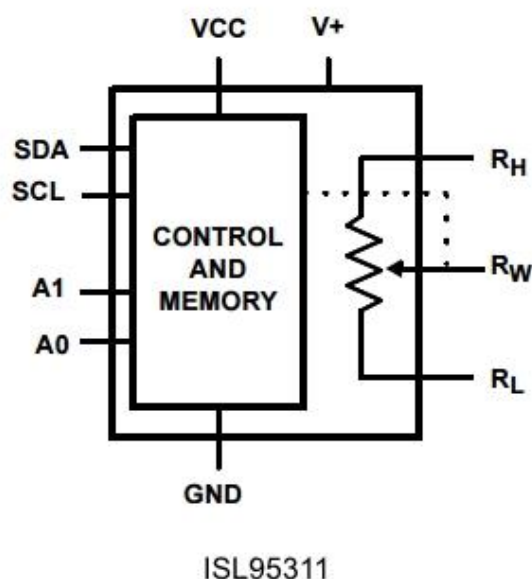
Komponentin nimi potentiometri kuvaa sen erästä käyttötarkoitusta, jossa referenssijännitteestä jaetaan komponentin avulla haluttu jännite. Kun referenssijännite kytketään ääripäiden välille, voidaan kolmannen navan ja alemman potentiaalin väliltä ottaa mikä tahansa positiivinen jännite referenssin potentiaalien väliltä. Jos jaettu jännite otetaan kolmannen navan ja ylemmän potentiaalin väliltä, saadaan ulostulona mikä tahansa jännite referenssin potentiaalien väliltä invertoituna. Kolmannen navan sijainti resistanssin ääripäiden välillä määrää jännitteenjaon suuruuden. Potentiometriä voidaan käyttää esimerkiksi vaimentimena tai ohjausjännitteen säädössä. [28]

Trimmereiksi kutsutaan potentiometrejä, joiden avulla on tarkoitus säätää jokin arvo kerralla sopivaksi ja jättää sen jälkeen komponentti koskemattomaksi. Trimmerit ovat usein pienempikokoisia potentiometreihin verrattuna. [28]

Säätövastus saadaan potentiometrillä kytkemällä säädettävä kolmas napa jompaankumpaan ääripäähän. Tällöin kahden pysyvän navan välinen resistanssi voidaan määrittää kolmannen säädettävän navan avulla. [29]

Mekaaniset potentiometrit ovat fyysiseltä kooltaan suurehkoja ja vaativat mekaanista työtä säätöä varten. Potentiometreistä on saatavilla myös digitaalisia versioita, joissa säädettävän navan asento voidaan asettaa sähköisesti. Digitaaliset potentiometrit ovat myös pienempikokoisia. Niissä potentiometri on toteutettu transistorikytkimien ja vastusverkon avulla, joten säädettävän navan asento on valittavissa askelmassa. Esimerkkejä askelmamääristä ovat 128 tai 256 askelmaa. Erilaisten kokonaisresistanssiarvojen lisäksi digitaalisten potentiometriin ominaisuuksiin kuuluvat haihtuva tai haihtumaton sisäinen muisti sekä erilaiset ohjaukkyttöliittymät, kaistanleveydet, käyttöjännitteet ja lämpötilankestot. [15],[16] Haihtumaton muisti tarkoittaa sellaista muistia, johon sen sisältö jää talteen, vaikka laite kytketään pois päältä. Haihtuva muisti puolestaan ”unohtaa” sisältönsä, kun laitteesta katkaistaan virta. Haihtumattoman muistin avulla digitaalisia potentiometrejä voidaan käyttää esimerkiksi trimmereinä niiden toteuttaessa saman toiminnallisuuden kuin mekaaniset trimmerit.

Esimerkkinä digitaalisesti potentiometrillä voidaan tutustua tässä työssä käytettyyn Intersilin ISL95311 komponenttiin. Komponentin datalehdessä [17] löytyy komponentista kaikki oleellinen tieto. Potentiometrillä on 128 säädettävän navan asentoa, ja sen kokonaisresistanssivaihtoehdot ovat 10 k Ω ja 50 k Ω . Säädettävän navan asennolle on komponentissa haihtuva ja haihtumaton muisti. Komponentin ohjaus tapahtuu Inter-Integrated Circuit-väylän (I2C-väylä) kautta, ja lisäksi komponentin I2C-osoite on käyttäjän asetettavissa. Käyttöjänniteitä täytyy potentiometrille tuoda kaksi: digitaalisen ohjauspiirin käyttöjännite sekä säädettävän navan asetukseen käytettävälle kytkintransistoreille tarvittava käyttöjännite. Lohkokaaviokuva, joka sisältää komponentin kaikki kymmenen piniä on esitelty Kuvassa 13.



Kuva 13: ISL95311 digitaalisen potentiometrin lohkokaavioesitys. [17]

Seuraavassa nopea yleiskatsaus komponentin pieneihin. VCC-pin on digitaalisen käyttöjännitteen pin, jonka arvo täytyy olla välillä 2.7 V – 5.5 V. V+-pin on puolestaan potentiometrin säätönavan ohjauksen biasjännitteen pin ja sen arvon tulisi olla välillä 8.0 V – 13.2 V. Pinit R_H ja R_L ovat potentiometrin resistanssin ääripäät, ja R_W on säädettävä napa. SDA-pin on I2C väylän datalinja ja SCL-pin I2C-väylän kellolinja. Pineillä A1 ja A0 voidaan asettaa komponentin I2C osoite halutuksi väliltä 0x50 – 0x56. Viimeinen pin on GND-pin, joka tulee kytkeä kytkennän maapotentiaaliin. [17]

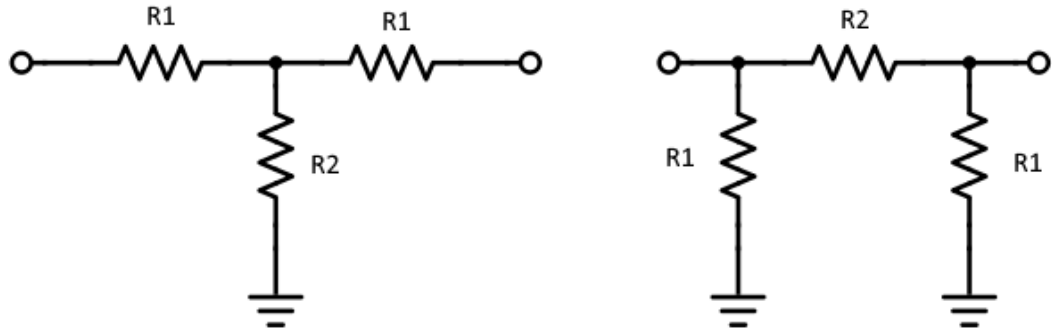
Haihtumaton muisti on toteutettu komponentissa EEPROM tekniikalla. ISL95311:n tapauksessa muisteihin voidaan kirjoittaa säädettävän navan asento I2C väylän kautta. Asennot on määritetty komponentissa siten, että heksadesimaaliarvolla 00h napa on pienimmän resistanssin päässä R_L -pinistä ja arvolla 7Fh napa on puolestaan lähimpänä R_H -piniä. I2C väylän kautta komponentin muistien arvoja voidaan myös lukea. [17]

2.5 Vaimentimet

Vaimentimen tehtävänä on nimensä mukaisesti vaimentaa signaalia. Vaimennusta tarvitaan yleisesti asettamaan signaalitasot halutuiksi. Vaimennin sisältää resistiivisiä elementtejä, jotta osa sille saapuvasta sähköisestä energiasta saadaan muunnettua lämmöksi. Erilaisia vaimentimia on saatavilla kiinteistä säädettäviin ja toteutustavat vaihtelevat diskreeteistä komponenteista mikropiiriratkaisuihin. Säädettäviä vaimentimia lisäksi tarjolla analogisella ja digitaalisella ohjauksella. [18],[19],[20]

Yksinkertaisimmillaan kiinteä vaimennin voidaan toteuttaa diskreeteillä vastuksilla ja yksinkertaisimman sovitetun vaimentimen rakentamiseen tarvitaan kolme vastusta. Korkeataajuussovelluksissa piirien sovitus on tärkeää, jotta vältetään heijastusilmiöitä.

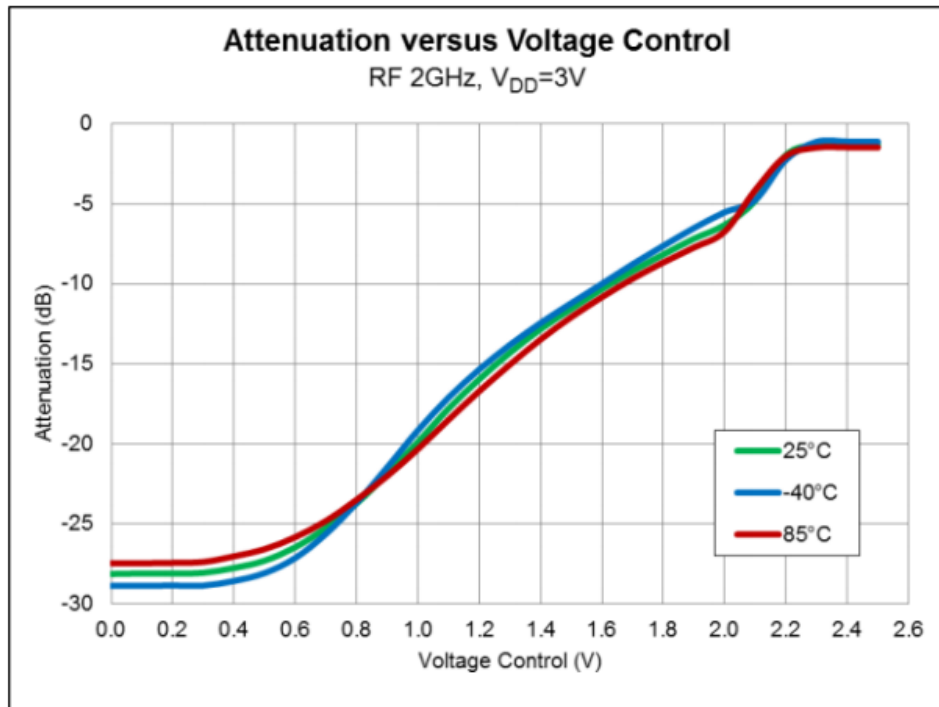
Perinteisimmät vaimenninkytkennät ovat π - ja t-vaimennin, joilla saadaan sovitus kumpaankin suuntaan, ja lisäksi vaimennus voidaan säätää halutuksi. Kuvassa 13 on esitelty kumpikin vaimenninkytkentä. [26] Kiinteitä vaimentimia on myös saatavilla mikropiiriratkaisuina. [18]



Kuva 14: T-vaimennin ja π -vaimennin.

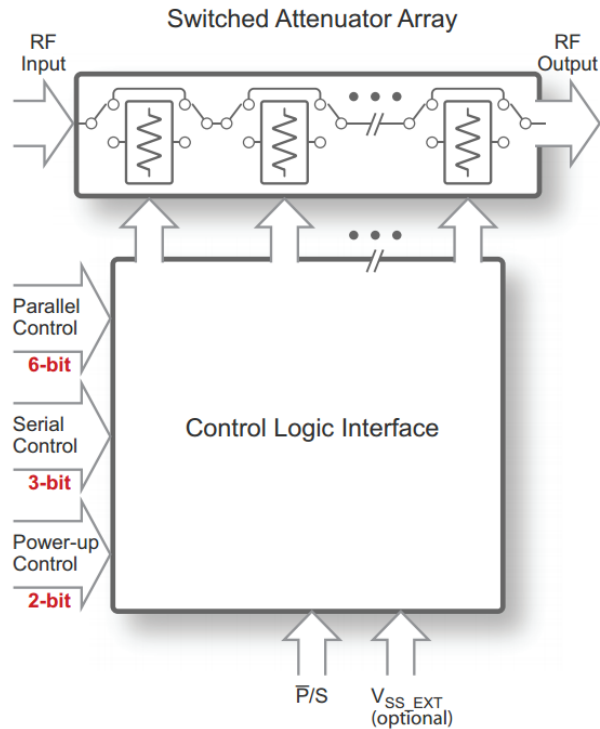
Analogisen ohjauksen vaimenninpiireissä voidaan ohjausjännitteen avulla säätää portaattomasti vaimennuksen suuruus. Vaimennus on piireissä usein toteutettu FET-transistorien avulla. Piireissä on vaimennettavalle signaalille sisäänmeno- ja ulostuloportit, ja vaimennuksen suuruutta ohjaavalle signaalille oma porttinsa. Vaimennuksen arvoja on tarjolla nolasta aina 50 desibeliin asti, ja piirien ohjausjännitteet vaihtelevat -5.5 voltista 17 volttiin. Käytettävissä olevat taajuusalueet vaihtelevat nollasta hertsistä 50 gigahertsiin piiristä ja valmistajasta riippuen. Vaimentimia on saatavilla ainakin 50 ohmiin ja 75 ohmiin sovitettuina. [18],[19].

Esimerkkinä analogisen ohjauksen omaavista vaimentimista Kuvassa 15 on esitelty RFSA2033 vaimenninpiirin vaimennus ohjausjännitteen funktiona taajuudella 2 GHz ja lisäksi kuvassa on esitetty lämpötilan vaikutus käyrään. Nollan voltin ohjausjännitteellä saadaan aikaan noin 28 desibelin vaimennus ja ohjausjännitteen kasvaessa vaimennus pienenee, kunnes se saturoituu n. 2.2 voltilla noin kahteen desibeliin. Piirissä on myös mahdollisuus vaihtaa käyrä käänteiseksi, jolloin pienillä ohjausjännitteillä saadaan aikaiseksi pieni vaimennus ja suurilla ohjausjännitteillä suuri vaimennus. [21]



Kuva 15: RFSA2033 analogisen vaimentimen vaimennuksen riippuvuus ohjausjännitteestä. [21]

Digitaalisesti ohjattavat vaimentimet toimivat porrastetusti joillakin kiinteillä vaimennuksen arvoilla. Kyseiset vaimentimet sisältävät ohjaukseen liittyvän ja kytkimillä varustetun vaimennusmatriisin. Vaimennusmatriisia on mahdollista ohjata sarja- tai rinnakkaisväylillä. Tyypillisiä porrastuksen arvoja ovat 0.5 dB ja 1 dB. Kokonaisvaimennuksen arvot vaihtelevat välillä 0 dB ja 31 dB. Taajuusalueet vaihtelevat välillä 0 – 8 GHz ja vaimentimia on saatavilla 50 ohmiin ja 75 ohmiin sovitettuina. [19],[22] Esimerkkinä lohkokaaviotason esitys Peregrinen PE4314 digitaalisesta vaimentimesta on esitelty Kuvassa 16.



Kuva 16: Peregrine PE4314 porrasmuuntimen lohkokaaviokuva. [23]

Ohjattavien vaimentimien välillä ei ole suuria eroja ja käytettävän vaimentimen valinta riippuukin usein kytkennän muiden komponenttien valinnoista. Eräänä erona tyyppien välillä on analogisen vaimentimen tarjoama tarkempi säätö vaimennuksen arvolle portaattomalla toiminnallaan. Joissakin sovelluksissa voidaankin soveltaa ainoastaan analogista vaimennusta, jotta vaimennus saadaan tarkalleen halutuksi esimerkiksi desibelin kymmenesosan tarkkuudella.

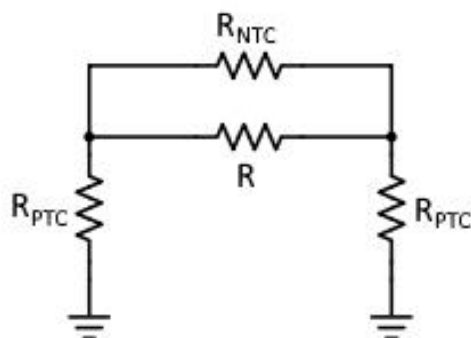
2.6 Lämpötilakompensointi

Joidenkin elektroniikassa käytettävien komponenttien ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Esimerkiksi ulkona käytettävien laitteiden ympäristön lämpötilan vaihtelu saattaa olla paristakymmenestä pakkasasteesta useaan kymmeneen lämpöasteeseen. Tällöin komponenttien ominaisuuksien vaihtelu saattaa olla merkittävää. Yksittäisen komponentin ominaisuuksien vaihdellessa myös kokonaisten piirien ominaisuudet saattavat muuttua, jos vaihtelua ei ole otettu suunnittelussa huomioon. Laitetasolla pahimmassa tapauksessa vaihtelu saattaa aiheuttaa sen ominaisuuksien muuttuvan laitteelle määriteltyjen rajojen ulkopuolelle tai jopa laitteen rikkoutumisen. Kun laitteita tiedetään käytettävän vaihtelevissa lämpötilaolosuhteissa, suunnitellaan niihin tarpeen vaatiessa erilaisia lämpötilakompensointirakenteita, joista seuraavassa on esitelty joitakin esimerkkejä.

Lämpötilakompensointiin on mahdollista tehdä monenlaisia ratkaisuja, jotka voivat olla analogisia tai digitaalisia. Analogiset ratkaisut voivat sisältää termistoreita eli positiivisen lämpötilakertoimen omaavia (engl. positive temperature coefficient, PTC) vastuksia tai negatiivisen lämpötilakertoimen omaavia (engl. negative temperature coefficient, NTC) vastuksia. PTC-vastuksen tapauksessa sen resistanssi kasvaa lämpötilan kasvaessa, ja NTC-vastuksen tapauksessa sen resistanssi laskee lämpötilan kasvaessa. Kyseisten vastusten avulla voidaan toteuttaa rakenteita, joilla piirien lämpötilakäyttäytymistä voidaan tasoittaa. Digitaalinen lämpötilakompensointi voidaan toteuttaa esimerkiksi prosessorin avulla, joka sisältää lämpötila-anturin, tai prosessoriin yhdistetyn erillisen lämpötila-anturipiirin kautta. Prosessorin ohjatessa jotakin lämpötilariippuvaa osaa, voidaan ohjausjännitteeseen tehdä lämpötilakompensointi. Kun ohjattavan osan lämpötilakäyttäytyminen on tiedossa, voidaan prosessorin mittaaman lämpötilan avulla ohjaus muuttaa anturilta aistitun lämpötilan muuttuessa.

Eräs esimerkki komponentista, jonka ominaisuudet muuttuvat lämpötilan vaihdellessa on bipolaaritransistori. Lämpötilan kasvaessa transistorin virtavahvistus kasvaa ja kantamitteri jännite pienenee. Tällöin esimerkiksi transistorilla toteutetun vahvistimen tai oskillaattorin ulostulo muuttuu lämpötilan vaihdellessa riippuen kytkennän konfiguraatiosta.

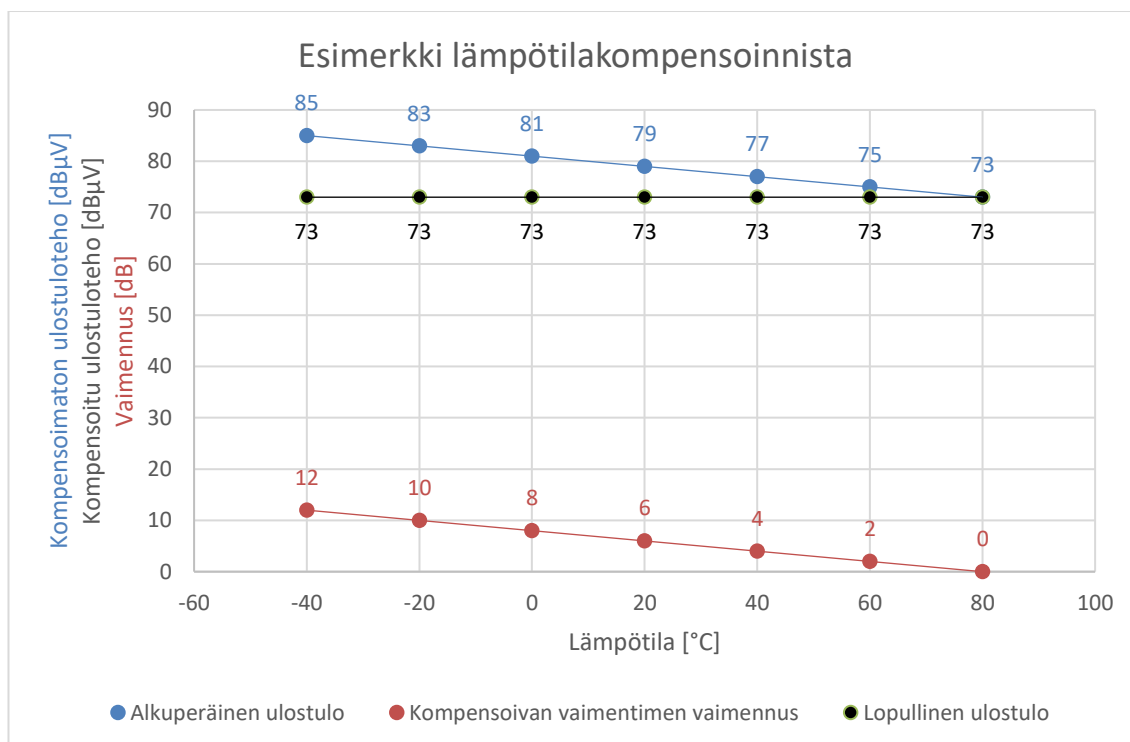
Käsitellään seuraavaksi esimerkkinä oskillaattoria tai vahvistinta, jonka ulostuloteho pienenee lämpötilan kasvaessa. Ulostuloteho voidaan tasoittaa lämpötilasta riippumattomaksi sopivalla vaimentimella oskillaattorin ulostulossa. Kun vaimentimessa hyödynnetään PTC- ja NTC-vastuksia, voidaan vaimennuksesta tehdä lämpötilan suhteen vastakkainen oskillaattorin ulostulotehon käytökseen verrattuna. Havainnollistus eräästä vaimenninkytkennästä on esitelty Kuvassa 17. Kuvassa vastukset R_{PTC} ovat PTC-vastuksia, vastus R_{NTC} on NTC-vastus ja vastus R on lämpötilakertoimeton vastus.



Kuva 17: Lämpökompensoiva vaimenninkytkentä.

Kuvassa 18 on kuvattu esimerkivaimenninkytkennän vaimennuksen käytöstä lämpötilan muuttuessa punaisella käyrällä, kompensoitavan piirin ulostulotehoa sinisellä ja piirin kompensoitua ulostulotehoa mustalla. Kaikki esimerkin arvot ovat keksittyjä

havainnollistusta varten. Kuten edellä mainittiin, kompensoinnin tavoitteena on tasoittaa piirin ulostulo yhtä suureksi kaikissa lämpötiloissa. Sinisellä kuvattuun alkuperäiseen ulostulotehoon on siten mitoitettu sopiva vaimenninkytkentä (punaisella), jolla lämpötilavaihtelu saadaan tasoitettua. Lopputuloksena saatava kytkennän ulostuloteho on mustan käyrän mukaisesti yhtä suuri kaikissa lämpötilaolosuhteissa.



Kuva 18: Esimerkkikäyrät lämpötilakompensoidusta kytkennästä. Kompensoitavan kytkennän ulostuloteho sinisellä, kompensoivan vaimentimen vaimennus punaisella ja lopullinen ulostuloteho mustalla lämpötilan funktiona.

Valitsemalla vaimenninkytkennän vastusarvot ja lämpötilakertoimet sopivasti, voidaan piirin nähdä suorittavan käänteisen toiminnan alkuperäisen kytkennän lämpötilakäyttäytymiseen verrattuna. Lisäksi sopivilla vastusten arvoilla voidaan vaimennin tehdä sovitetuksi haluttuun impedanssiin tulo- ja lähtösuuntiin. Käsitellyssä esimerkissä alhaisilla lämpötiloilla vaimennus oli suurimmillaan ja korkeilla lämpötiloilla pienimmillään. Lopputulemana signaalin ulostuloteho saatiin vakioitua kaikissa lämpötiloissa. Tavallisella vastuksella R voidaan kytkennässä säätää vaimennusten suhteet eri lämpötiloissa tarkemmin kohdalleen, jos lämpötilariippuvia vastuksia ei ole saatavilla sopivan suuruisina.

2.7 Impedanssisovitus

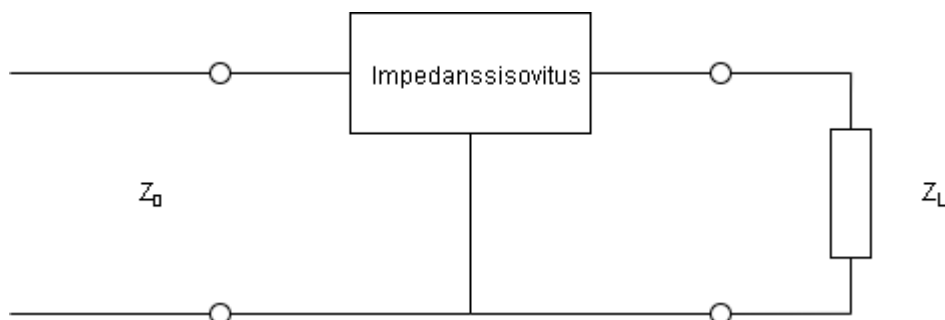
Impedanssisovitus on tarpeellista ensisijaisesti tehonsiirron maksimoimiseksi ja heijastusten eliminoimiseksi, mutta se auttaa myös esimerkiksi signaali-kohina suhteen nostamisessa vastaanotinsovelluksissa ja tehonsyöttöpiireissä amplitudi- ja

vaihevirheiden minimoinnissa. [24],[25] Korkeammilla taajuuksilla tehonsiirron merkitys korostuu, sillä piirilevyjen ja komponenttien parasiittiset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi signaalin kulkuun. Esimerkiksi koaksiaalikaapelissa korkeataajuisemmat signaalit vaimenevat enemmän kuin matalataajuiset signaalit, jolloin korkeataajuisien signaalien siirtäminen on vaikeampaa. Siten korkeataajuuksissa sovelluksissa tehoa on harvoin hukattavaksi asti, ja järjestelmän osien välinen tehonsiirto tulisi olla mahdollisimman optimoitu.

Kahden piirin välinen tehonsiirto voidaan osoittaa maksimoituvan, kun vastaanottavan piirin kuormaimpedanssi on lähettävän piirin lähtöimpedanssin kompleksikonjugaatti. [25] Kompleksikonjugaatti tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että kompleksisten impedanssien reaalisosat ja imaginääriosat ovat yhtä suuret ja imaginääriosat ovat vastakkaismerkkiset. Kaavamuodossa impedanssien tehonsiirron optimiyhteyttä voidaan kuvata vielä seuraavasti:

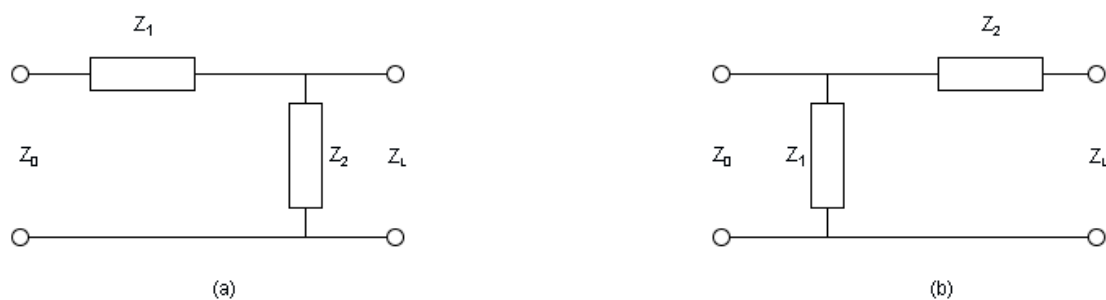
$$Z_L = Z_0^*$$

Kaavassa Z_L kuvaa kuormaimpedanssia ja Z_0 tuloimpedanssia. Impedansseja on havainnollistettu Kuvassa 19, jossa on lisäksi esitetty impedanssisovitus mustana laatikkona impedanssien välissä.



Kuva 19: Impedanssisovitus lohkokaaviotasolla.

Sovitus voidaan tehdä passiivikomponenttien avulla ja häviöttömästi reaktiivisten komponenttien avulla. Yleisimmät topologiat sovitukseen toteuttamiselle ovat ns. L-topologioita, jonka kahta vaihtoehtoa on havainnollistettu Kuvassa 20. Kuvassa komponentit Z_1 ja Z_2 voivat olla reaktiivisten komponenttien tapauksessa keloja tai kondensaattoreita. Riippuen sovitettavista impedansseista, voidaan komponentit asettaa kahdeksaan erilaiseen konfiguraatioon. Komponenttien reaktanssien suuruudet voidaan etsiä analyttisesti tai graafisesti Smithin kartan avulla. Sovitus passiivikomponenttien avulla on käytännöllistä noin yhteen gigahertsiin asti, jonka jälkeen sovituksia voidaan tehdä erilaisilla siirtolinjaratkaisuilla.



Kuva 20: Impedanssisovitus L-topologian avulla.

Siirtolinjasovitus on käytännöllistä toteuttaa ainakin mikroliuskajohtimilla tai liuskajohdoilla. Sovitusjohtimista voidaan tehdä sarjassa tai rinnan signaalijohtimen kanssa eripituisia ja eri tavalla päätettyjä johtimia. Erilaisilla sovitusjohtimien pituuksilla suhteessa johtimessa kulkevan signaalin aallonpituuteen sekä vaihtoehtoisesti päättämällä johdin avoimena tai oikosuljettuna, voidaan impedanssisovitus tehdä vastaavasti kuten passiivikomponenteilla. [24]

3. HFC-VERKON PALUUSUUNNAN OPTINEN LÄHETIN

Hybridi kuitu-koaksiaaliverkossa paluusuunnalla tarkoitetaan yhteyttä verkon asiakkaalta verkon operaattorille. Paluusuunnan signaali lähtee asiakkaan kaapelimodeemista samaa koaksiaalikaapelia pitkin, jota menosuunnan signaali kulkee asiakkaalle. Signaalit voivat kulkea samassa kaapelissa, koska niille on jaettu omat kaistansa taajuustasossa. Paluusuunnan signaalit kulkevat tällä hetkellä hiukan verkosta riippuen viidestä megahertsistä alkaen maksimissaan 204 megahertsiiin yltävällä taajuuskaistalla. Signaalien sisältö on käytännössä digitaalisessa muodossa olevaa dataa, joten signaalien modulaatiotapa on käytetty toistaiseksi QAM-modulaatiota, mutta uusimman standardin (DOCSIS 3.1) myötä myös OFDM modulointia voidaan hyödyntää.

Signaalin saavuttua koaksiaalikaapelia pitkin nodelle, muunnetaan se optiseen muotoon noden optisessa lähettimessä. Optinen lähetin sisältää laserdiodin, jonka biasvirtaa moduloidaan asiakkaan kaapelimodeemista peräisin olevalla signaalilla. Diodin virran vaihdellessa sen säteilemän valon intensiteetti vaihtelee, mikä voidaan kuidun toisessa päässä muuntaa takaisin sähköiseksi signaaliksi valodiodin avulla. Optisessa muodossa paluusuunnan ja menosuunnan signaalit kulkevat omissa kuiduissaan, ja suuremman paluusuunnan tiedonsiirtokapasiteetin luomiseksi voidaan kummankin suunnan signaaleita kuljettaa useammassakin kuidussa.

Tässä luvussa käsitellään Teleste Oyj:n paluusuunnan lähetintä AC67, joka on osa ACcess tuoteperhettä. Lähettimiä on saatavilla monilla eri aallonpituisilla laserulostuloilla sekä +3 dBm tai +6 dBm optisilla ulostulotehoilla. Lähettimen rakenne käydään läpi tässä luvussa lohkokaaaviotasolla ja tarkemmin tuotantoviritystä vaatineiden osien kohdilta. Lisäksi lähettimen virituskohteita ja -ratkaisuja esitellään, menetelmien automatisointimahdollisuuksia pohditaan ja valittuja suunnitteluratkaisuja referoidaan luvun loppupuolella.

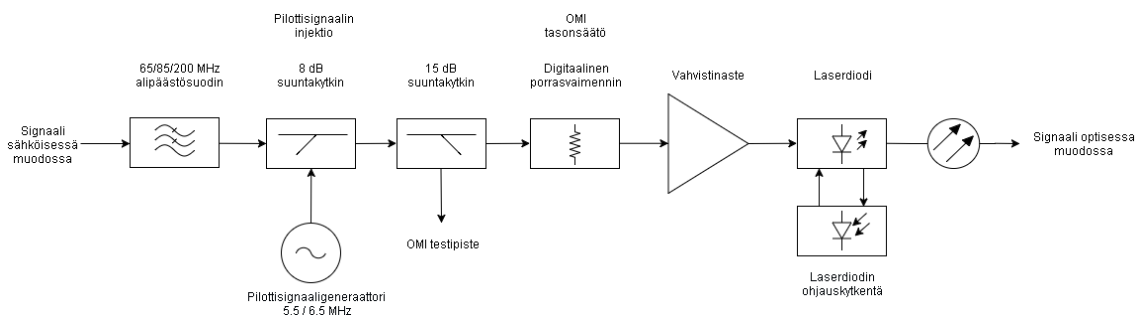
3.1 Lähettimen rakenne

Tässä alaluvussa esitellään työssä käsiteltyä lähetintä aluksi lohkokaaaviotasolla ja lisäksi luvussa kuvaillaan tarkemmin sen viritettäviä osia. Viritettäviä osia tarkastellaan tarkemmin, jotta seuraavan alaluvun suunnitteluratkaisut olisivat ymmärrettävämpiä.

3.1.1 Lähetin lohkokaaaviotasolla

Lähettimen toimintaa on esitelty lohkokaaavion avulla Kuvassa 21. Kaavion vasemmassa reunassa signaali saapuu lähettimeen sähköisessä muodossa ja kaavion oikeassa reunassa

se poistuu lähettimestä optisessa muodossa. Signaali vaihtuu muodosta toiseen kaavion viimeisessä komponentissa: laserdiodissa. Ennen signaalin muunnosta sille kuitenkin suoritetaan erilaisia toimenpiteitä, joista lisää seuraavaksi.



Kuva 21: Lähettimen lohkokaavioesitys.

Ensimmäisenä lähettimessä on valittava alipäästösuoitin, jonka rajataajuusvaihtoehdot ovat 65 MHz, 85 MHz ja 200 MHz. Kyseiset vaihtoehdot ovat kaikki yleisiä paluusuunnan taajuuskaistan ylärajataajuuksia HFC-verkoissa. Alipäästösuoittimen avulla sisääntulevasta signaalista saadaan suodatettua pois mahdolliset korkeataajuiset häiriöt sekä kaistan ulkopuolista kohinaa. Käytettävän suotimen rajataajuuden valinta tapahtuu noden käyttöliittymästä I2C-väylän avulla.

Seuraavaksi signaaliin injektoidaan pilottisignaali. Pilottisignaali generoidaan lähettimessä oskillaattorin avulla ja injektoidaan lähetettävään signaaliin suuntakytkimen kautta. Paluusuunnan tietoliikenne on purskeista eli lähetettävää signaalia ei ole kaikkina ajanhetkinä. Pilottisignaalin avulla voidaan varmistua siitä, että linkki on ehjä myös silloin, kun varsinaista dataa ei kulje linkin läpi. Signaalin taajuudeksi voidaan valita 5.5 MHz tai 6.5 MHz ja se voidaan myös tarvittaessa kytkeä pois päältä. Kumpikin ohjaus tapahtuu vastaavasti kuin suotimen rajataajuuden valinnan tapauksessa I2C-väylän avulla.

Tämän jälkeen signaalista otetaan näyte toisen suuntakytkimen avulla. Näyte viedään liittimen kautta nodelle, johon lähetin on kytkettynä. Näytteen avulla voidaan tarkastella sisääntulevien signaalien tasoja ja säätää viritysvaiheessa pilottisignaalin amplitudi määrityksiä vastaavaksi. Näytteenottopistettä kutsutaan laitteessa OMI-testipisteeksi. Testipistettä hyödynnetään laitteen tuotantovirityksessä sekä sen avulla voidaan selvittää mahdollisia virhetilanteita.

Näytteenoton jälkeen signaali viedään digitaaliseen porrasmuunnintimeen, jota ohjataan ulkopuolelta I2C-väylän avulla. Säädettävän vaimentimen ja vakiovahvistuksen omaavan vahvistinasteen avulla lähettimen OMI säädetään kohdalleen laitteen tuotantovaiheessa. Lähettimelle on määritelty sisäänmenosignaalin jännitteen tehollisarvo, jolla saavutetaan tietty OMI-arvo. Vaimentimen viritys tapahtuu tuomalla sen sisäänmenoon määritellyn tehollisarvon omaava signaali (tai käyttämällä kalibroitua pilottisignaalia) ja mittaamalla

OMI lähettimen lähdöstä. OMI:n kaavan (4) suureista säädetään siis P_{\max} ja P_{\min} arvoja, jotta OMI vastaa haluttua arvoa.

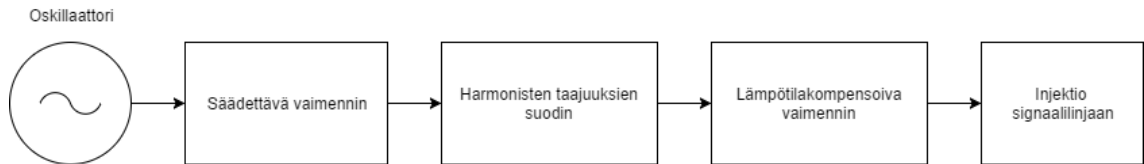
Viimeisenä komponenttina lähettimessä ennen laserdiodia on vahvistinaste. Vahvistinasteen vahvistus on lämpötilakompensoitu ja suuruudeltaan 27 desibeliä tai 36 desibeliä lähettimen laserkonfiguraatiosta riippuen. Vahvistuksen suuruus valitaan laitteen tuotantovaiheessa ladottavilla komponenteilla. Vahvistinasteeseen on myös toteutettu mahdollisuus kytkeä se pois päältä.

Lopulta signaali saapuu laserdiodille, joka on biasoitu sopivaan kohtaan sen siirtofunktiota. Toimintapisteessä laserdiodi säteilee valoa jatkuvasti yhtä suurella intensiteetillä. Saapuva korkeataajuinen vaihtosähkösignaali summataan laserdiodin biasvirtaan, jolloin diodin säteilemä valon intensiteetti saadaan vaihtelemaan. Ulostulona saatava signaalia kutsutaan siten intensiteettimoduloiduksi. Laserin säteilemä signaali ohjataan optiseen kuituun, josta se aloittaa matkansa verkon operaattorille. Laserdiodin biaspisteen ohjaamiseen ja kalibrointiin suunniteltu kytkentä hyödyntää valodiodin avulla saatavaa laserdiodin takaisinkytkentää.

3.1.2 Lähettimen viritettävät osat

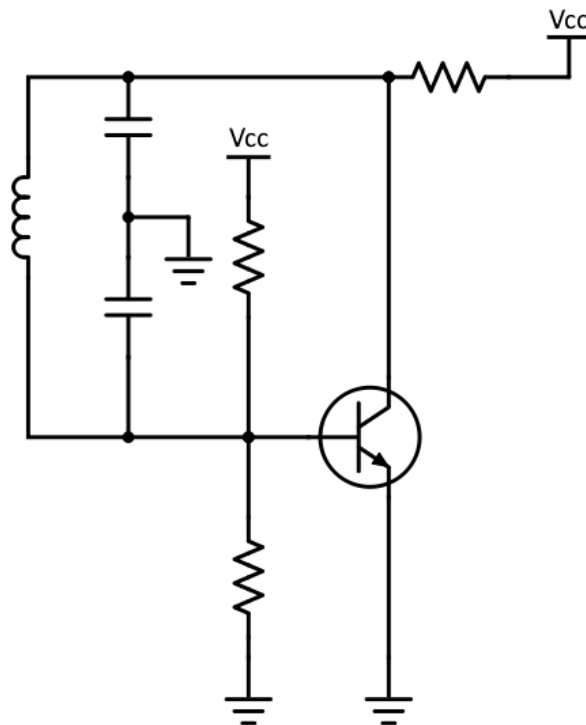
Lähetin sisältää kolme sen tuotannossa viritettävää ulostuloa, joista kahta tarkasteltiin tämän työn osalta tarkemmin. Ensimmäinen viritettävä kohde oli signaalilinjalla sijainneen digitaalisen porraskompensoinnin asetus kohdalleen OMI:n kalibroimiseksi, toinen kohde oli laitteessa generoitavan pilottisignaalin amplitudi ja kolmas kohde oli laserdiodin toimintapiste tai biasointivirta. Viritystarve johtui komponenttien toleransseista ja muista komponenttien välisistä pienistä vaihteluista laitteiden välillä. Tässä työssä etsittiin päivitysmahdollisuuksia kahdelle jälkimmäiselle viritykselle, jotta niiden aikaavievästä käsivirityksestä päästäisiin eroon. Seuraavaksi työssä käsiteltävien viritettävien laitteen osien kytkentöjä esitellään tarkemmin ja niiden alkuperäisiä viritystapoja pyritään havainnollistamaan.

Pilottisignaalin amplitudin suuruus oli määritelty laitteelle olevan tietyllä tasolla sen lähtiessä tuotannosta. Siten laitteessa haluttiin viritää signaalin amplitudi tarkalleen kohdalleen, jotta asiakkaalle ilmoitettuun spesifikaatioon päästäisiin. Lähettimen spesifikaatiossa ilmoitettu injektoitu pilottisignaalin jännitteen amplitudi oli 74.5 dB μ V. Pilottisignaalin muodostamaa oskillaattoria ja signaalin reittiä on kuvattu lohkokaa viotasolla Kuvassa 22. Kuvasta voidaan nähdä, että pilottisignaalin injektoitavaan tehotasoon vaikuttivat useampi kytkentä sen matkalla oskillaattorilta signaalilinjaan. Seuraavaksi pilottisignaaliin vaikuttavia tekijöitä käydään läpi tarkemmin.



Kuva 22: Lohkokaavio pilottisignaalin reitistä oskillaattorista signaaliliinaan.

Lähtökohtana pilottisignaalin amplitudille oli oskillaattorin lähtötaso. Oskillaattorina käytetty kytkentä muistutti Colpitts-oskillaattoria, jonka ulostulo otettiin transistorin emitteriltä. Colpitts-oskillaattoria on havainnollistettu Kuvassa 23. Oskillaattorikytkennän taajuuden määrittävät kytkennän kondensaattorien kapasitanssit sekä kelan induktanssi. [24] Lähettimen oskillaattorikytkennän ulostulojännitteeksi mitattiin testilaitteen tapauksessa 98.23 dB μ V suoraan sen lähdestä.



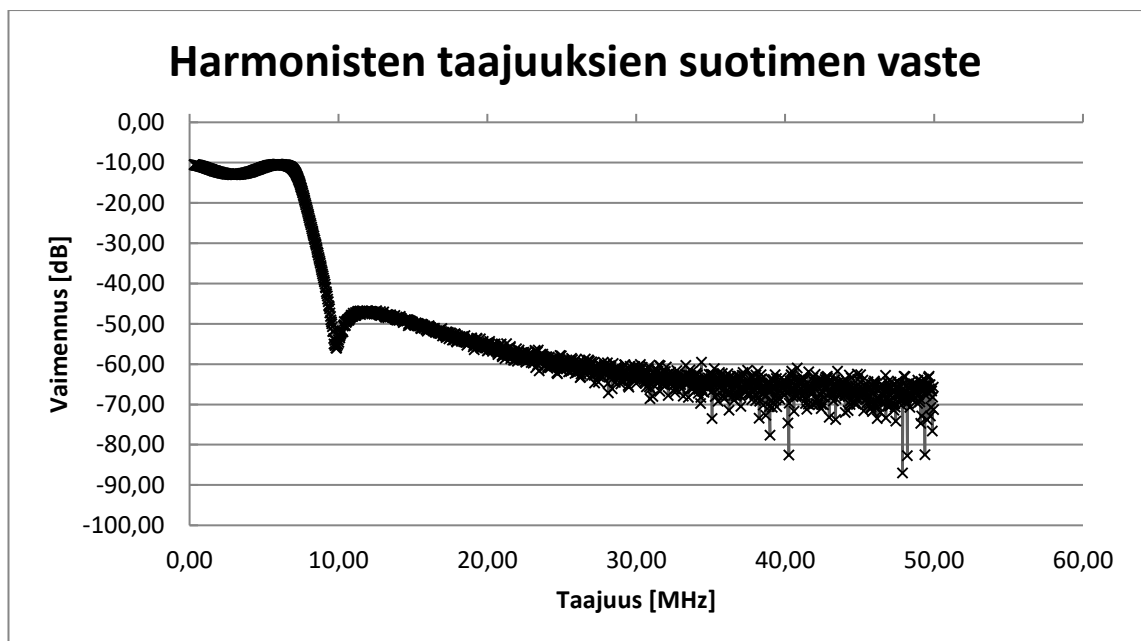
Kuva 23: Colpitts-oskillaattorin piirikaavio. [24]

Lisäksi 5.5 MHz:n oskillaattorin ulostulotehon muutoksia lämpötilasta johtuen oli mitattu Telestellä aiemmin ja tuloksena oli saatu ulostulon vaihteluksi noin yksi desibeli $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä. Pienimmällä lämpötilalla ulostulo oli suurimmillaan ja vastaavasti suurimmalla lämpötilalla ulostulo oli noin yhden desibelin pienempi.

Oskillaattorin jälkeen pilottisignaali kulki virityskomponenttiin, joka oli alkuperäisessä laitteessa trimmerillä toteutettu vaimennin. Trimmerikytkennän avulla signaalia voitiin vaimentaa haluttu määrä. Kytkennän avulla oli mahdollista aiheuttaa erisuuruisia

jännitteenjakoja signaalille, millä saatiin aikaan erisuuruisia vaimennuksia. Vaimennusvaihtelun mitattiin olevan noin seitsemän desibeliä testilaitteen tapauksessa.

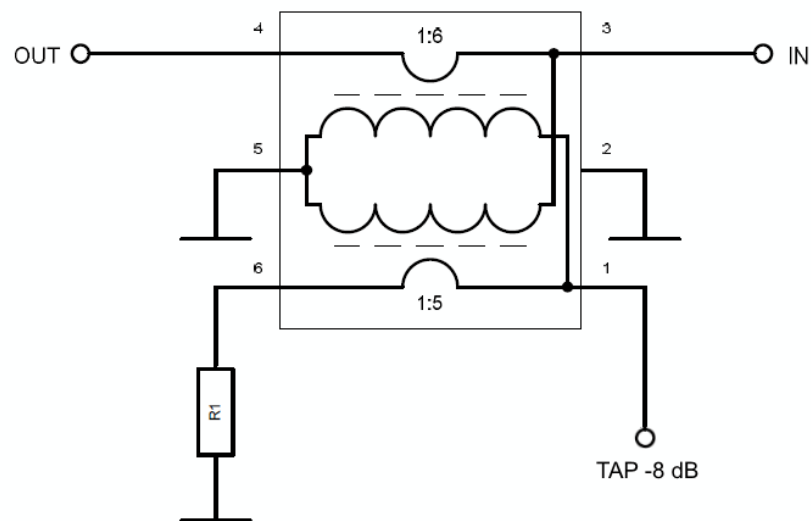
Seuraavana signaalin reitillä oli oskillaattorin tuottamien harmonisten signaalien suodattamiseen tarkoitettu alipäästösuodin. Harmoniset signaalit ovat perustaajuuden monikertoja, joita havaitaan oskillaattorin ulostulossa. Alin harmonin taajuus oskillaattorista oli taajuudella 11 MHz, joten suotimen ylärajataajuudeksi oli valittu noin 7 MHz. Täten 6.5 MHz pilottisignaali ei juuri vaimentunut sen kuljettua suotimen läpi, mutta ensimmäinen harmoninen signaali, matalamman taajuuden pilottisignaalin tapauksessa, vaimeni riittävästi. Suotimessa oli myös päästökaistalla vaimennusta 10-12 dB, joka varmistettiin mittaamalla suotimen vaste. Mittaustuloksena saatu suotimen vaste on esitelty Kuvassa 24.



Kuva 24: Oskillaattorin harmonisten taajuuksien suotimen taajuusvaste.

Suotimen ulostulosta pilottisignaali kulki lämpötilakompensoivaan vaimentimeen. Kuten edellä mainittiin, oskillaattorin ulostuloteho vaihteli yhden desibelin annetulla lämpötilavälillä. Jotta lämpötila ei vaikuttaisi koko kytkennästä saatavaan pilotin ulostuloon, suoritettiin vaimentimella päinvastainen lämpötilavaihtelu oskillaattorin ulostulotehon vaihtelulle. Oskillaattorin lämpötilavaihtelun kumoamiseksi signaalin tuli vaimentua yhden desibelin enemmän -20 °C lämpötilassa verrattuna 80 °C lämpötilaan. Kyseinen vaihtuva vaimennus oli toteutettu π -mallisella vaimentimella, jossa pystysuuntaiset vastukset olivat PTC-vastuksia ja vaakasuuntainen vastus oli NTC-vastus. Lisäksi NTC-vastuksen kanssa rinnankytkettynä oli pienen resistanssin omaava vastus, jolla vaimennuksen suuruutta voitiin hienosäätää. Vaimennusten suuruus kytkennällä vaihteli simulointien mukaan välillä 1.5-2.5 dB lämpötilasta riippuen.

Lopulta pilottisignaali injektoitiin varsinaiseen signaalilinjaan suuntakytkimen avulla. Kytkenässä käytetyn suuntakytkimen havainnollistus on esitelty Kuvassa 25, josta nähdään sen olevan toteutettu muuntajien avulla. Kun signaali tuodaan IN-porttiin, saadaan OUT-portista lähes yhtä suuri signaali ulostulona, ja lisäksi TAP-portista saadaan ulostulona sisääntulon signaali vaimennettuna kahdeksalla desibelillä. Tässä tapauksessa pilottisignaali tuotiin IN-porttiin ja injektoitiin signaalilinjaan TAP-portista. OUT-portti oli päätetty 75 ohmin vastuksella. Kuvassa oleva portti numero kuusi on lähes eristetty pilottisignaalin osalta, joka tarkoittaa sitä, että pilottisignaali ei ideaalisesti kytkeydy kyseiseen porttiin lainkaan.



Kuva 25: Suuntakytkimen piirikaavioesitys. [31]

Yhteenvetona signaali siis vaimeni matkallaan suuntakytkimelle muutenkin kuin viritysvaimentimen vaikutuksesta. Oskillaattorin lähtöteho ja jokainen vaimennus vaihtelivat hieman laitekohtaisesti, joka puolestaan johtui jo edellä mainituista komponenttiyksilöiden pienistä vaihteluista. Viritystrimmerin avulla mahdollistui laitteen pilottisignaalin vaimennuksen säätö, jolloin jokaisen laitteen pilottisignaalin tehotaso saatiin yhtä suureksi sen saapuessa lähettimen signaalilinjaan kaikissa Telesten tuotannosta lähtevistä laitteissa.

Toinen lähettimessä päivitettävä virityskohde oli laserdiodin biasointivirta. Biasvirta täytyi virittää tarkalleen kohdalleen, jotta laserdiodi toimisi sen lineaarisella alueella, tai toisaalta lähettimen säteilemän keskimääräisen valotehon asettamiseksi määrittelyissä annettuun arvoon. Kuten luvun kaksi optinen modulaatioindeksi alaluvussa mainittiin, biasvirta I_{bias} määrittää suoraan keskimääräisen säteiltävän valotehon P_{avg} . Laserdiodien biasvirtojen suhde niistä saataviin valotehoihin vaihteli kuitenkin huomattavasti jopa saman valmistajan diodierien sisällä. Siten viritys oli tarpeellinen laitteiden valotehojen saattamiseksi yhteneviin arvoihin.

Lähettimessä laserille rakennettu säätösilmukka oli tehty negatiivisella käyttöjännitteellä laserkomponentin rakenteesta johtuen. Säätökytkentä on esitelty Liitteessä A. Laserdiodikomponentin anodi oli valmistajan toimesta kytketty komponentin koteloon. Laserin kotelo haluttiin toisaalta kytkeä kytkennän maatasoon ja sitä kautta metalliseen kotelorakenteeseen sen jäähdyttämiseksi. Tästä johtuen laserdiodin kytkentä oli suunniteltu negatiivisen käyttöjännitteen avulla laserdiodin biasoimiseksi myötäsuurteisesti. Myös valodiodi oli biasoitu negatiivisen käyttöjännitteen avulla vastasuuntaan. Kytkennästä löytyivät lisäksi ulostulo laserin virran mittaamiseksi (Laser_cur) ja sisäänmeno laserin kytkemiseksi päälle tai pois päältä (Laser_on_off).

Laserin biasvirtaa säädettiin bipolaaritransistorin ja operaatiovahvistimen avulla. Operaatiovahvistimen ei-invertoivalle navalle tuotiin referenssijännite, ja invertoivalle navalle tuotiin valodiodin virran ja vastusten avulla muodostettu laserin valotehoon verrannollinen jännite. Kyseisen jännitteen muodostavien vastusten osana oli viritustrimmeri, jonka avulla laserin biasvirta viritettiin kohdalleen. Operaatiovahvistimen ulostulo oli kytketty transistorin kannalle, ja transistorin kollektorivirta määrittä suoraan laserin biasvirran.

Operaatiovahvistimen toimintaa voidaan tutkia tarkemmin toteamalla, että negatiivisesti takaisinkytketty operaatiovahvistin pyrkii saamaan molemmat napansa samaan potentiaaliin. Tässä kytkennässä operaatiovahvistimen ei-invertoivalla navalla oli aina tietty referenssijännite, johon operaatiovahvistin pyrki ulostulollaan saamaan myös invertoivan napansa jännitteen. Kun operaatiovahvistin kasvatti ulostuloaan, bipolaaritransistorin kannan ja emitterin välinen jännite kasvoi, jolloin kollektorivirta eli laserdiodin virta ja laserdiodin emittoiman valon intensiteetti kasvoivat. Tästä seurasi suurempi valodiodin vastasuuntainen virta ja vähemmän negatiivinen (eli korkeampi) operaatiovahvistimen invertoivan navan jännite. Vastaavasti pienentämällä ulostuloaan operaatiovahvistin sai pienemmän jännitteen invertoivalle navalleen.

Säätösilmukan viritys tapahtui manipuloimalla operaatiovahvistimen invertoivan navan jännitettä. Valodiodi oli kytketty -3.3 voltin käyttöjännitteeseen sarjavastusten kautta, ja operaatiovahvistimen invertoiva napa oli kytketty sarjavastusten ja valodiodin väliin. Valodiodin biasvirtaa kontrolloitiin säätövastuksena toimivan trimmerin avulla. Laserdiodin säteilemä suurempi valon intensiteetti sai aikaan valodiodissa suuremman estosuuntaisen virran. Kun säätövastuksen arvoa muutettiin, saatiin vakiovirralla vastuksen yli olevaa jännitettä muutettua eli toisin sanoen operaatiovahvistimen näkemä jännite sen invertoivalla navalla muuttui. Tällöin operaatiovahvistin ohjasi laserdiodin virtaa saadakseen valodiodin virran sellaiseen arvoon, jossa molemmat sen navat olivat jälleen samassa potentiaalissa.

3.2 Lähettimen viritys tuotannossa ja virituksen automatisointi

Tässä alaluvussa käsitellään lähettimen viritystapoja. Aluksi kuvaillaan lähettimen käsiviritystä käytännössä, ja lopuksi automaattivirityksen toteutusmahdollisuuksia sekä valittua vaihtoehtoa.

3.2.1 Alkuperäinen käsin suoritettu viritys

Lähetin koottiin Telestellä tuotannossa ja se viritettiin kohdalleen ennen asiakkaalle toimitusta. Edellä kuvatut käsiviritykset suoritettiin trimmereiden avulla ja lisäksi digitaalinen porrasvaimennin viritettiin sähköisesti kohdalleen. Käsiviritys tapahtui käytännössä kytkemällä lähetin mittalaitteeseen ja ruuvaamalla trimmereitä kunnes vastekuvat vastasivat mallikuvia. Pilottisignaalin virituksen tapauksessa mittalaitteena toimi spektrianalysaattori ja laserin biaspisteen virituksen yhteydessä optinen tehomittari.

Viritykseen kului lähettimen valmistusprosessissa suhteellisen paljon aikaa, jolloin virituksen automatisoinnilla todettiin saavutettavan monia etuja. Ensimmäisenä lyhyempi viritysaika toisi säästöjä valmistuskustannuksissa, ja laitteita voitaisiin valmistaa myös suurempi määrä samassa aikayksikössä käsiviritykseen verrattuna. Lisäksi inhimillisen virheen mahdollisuus virityksessä eliminoituisi ohjelmakoodin suorittaman virituksen myötä. Mainittujen etujen vuoksi lähettimen virituksen automatisoinnille nähtiin tarve ja sen toteuttamista päätettiin tutkia tämän työn myötä.

3.2.2 Virituksen automatisoinnin suunnittelu

Virituksen automatisoimiseksi tarvittiin tietyt ominaisuudet sisältäviä komponentteja tai piirejä, ja suunnittelussa oli huomioitava myös lähettimen sisältävän jo valmiiksi joitakin automatisoinnissa hyödynnettävissä olleita ominaisuuksia. Rajoitteena oli piirilevyn koko, jonka tuli olla sama kuin alkuperäisellä lähettimellä.

Automatisaation toteuttamiseksi virityskokonaisuuksille aiheutui joitakin selkeitä vaatimuksia. Ensimmäisenä vaatimuksena virityskokonaisuudelle oli, että sen tuli olla sähköisesti ohjattavissa, jotta ohjelmakoodin avulla voitaisiin suorittaa viritys. Sähköiseen ohjaukseen liittyen levyille saapui valmiina I2C-väylä, jonka avulla väylän kanssa yhteensopivia laitteita voitaisiin ohjata. Automatisaation komponenttien valinnassa tuli siten ottaa huomioon mahdollisuus hyödyntää valmista ohjausväylää. Toinen selkeä vaatimus virityskokonaisuudelle oli, että virituksen tuloksena saatu tila pitäisi jäädä muistiin levyille, vaikka laitteesta kytkettäisiin virta pois.

Ohjattavuuden ja muistiominaisuuksien lisäksi uusien virityskokonaisuuksien tuli toteuttaa vastaavat toiminnot kuin aikaisempien käsin säädettävien virityskomponenttien. Ensimmäisen virityskokonaisuuden osalta sen tarkoituksena oli vaimentaa noin 5 MHz:n taajuisia signaalia noin 0 – 7 desibeliä. Toisen virityskokonaisuuden tehtävänä oli

alkuperäisessä kytkennässä toimia säätövästuksena kontrolloiden valodiodin estosuuntaista virtaa. Kyseisten määriteltyjen vaatimusten perusteella aloitettiin etsimään sähköisesti ohjattavia ja vastaavat tehtävät suorittavia komponentteja tai piirejä.

Ensimmäisen automatisointikohteen vaimennustarpeeseen voitiin soveltaa luvussa kaksi esiteltyä analogista vaimenninta. RFSA2033-vaimennin oli todettu Telestellä luotettavaksi komponentiksi ja komponentti toteutti sille asetetut automatisaation vaatimukset osittain. Vaimennin toimi vaaditulla taajuusalueella ja sen vaimennus oli valittavissa välillä 0 – 28 dB. Lisäksi vaimennuksen suuruus oli valittavissa sähköisesti ohjausjännitteen avulla. Vaimennin tarvitsisi kuitenkin erillisen muistia sisältävän komponentin tarjoamaan sille viritetty ohjausjännite myös virityksen jälkeen. Vaihtoehtoja muistiominaisuuden toteutukselle olivat ainakin ohjausjännitteen jako vakiojännitteestä muistia sisältävän digitaalisen potentiometrin avulla, tai ohjausjännitteen tuottaminen mikroprosessorin avulla. Mikroprosessorin avulla ohjausjännitettä olisi voitu lisäksi laskea jatkuvasti takaisinkytkennän avulla tai se olisi voitu lukea kertavirityksen jälkeen muistista.

Toisessa virityskohteessa säätövästuksena toimivan trimmerin tilalle olisi ollut muuten mahdollista vaihtaa suoraan vaihtaa digitaalinen potentiometri, mutta kytkennässä käytetyn negatiivisen jännitteen vuoksi se ei ollut mahdollista. Rajoitus johtui digitaalisten potentiometriä käytön mahdottomuudesta negatiivisilla jännitteillä. Ratkaisu negatiivisen jännitteen tuomaan ongelmaan löytyi toisesta Telestellä käytössä olleesta laserdiodin ohjauskytkennästä. Vaihtoehtoisessa ohjauskytkennässä ulkoinen positiivinen ohjausjännite tuotiin ohjauskytkentään ja sen avulla voitiin säätää laserdiodin biasvirran suuruus. Siten ohjausjännitteen tuottamiseen muistiominaisuudella oli samat vaihtoehdot kuin ensimmäisen virityksen tapauksessa.

Virityskytkentöjen ohjausjännitteiden toteutukselle oli siis vaihtoehtoisia toteutustapoja, joista tässä työssä valittiin digitaalisten potentiometriä avulla toteutettu vaihtoehto. Valinta perustui ratkaisun yksinkertaisuuteen, rajoitettuun tilaan piirilevyllä ja mielenkiintoon hyödyntää digitaalisia potentiometrejä. Potentiometreille tuotettiin referenssijännitteet pienikokoisen shunttiregulaattorin avulla, mistä viritysvaiheessa haettiin sopivat ohjausjännitteen arvot potentiometriä avulla.

3.2.3 Lähettimen uuden piirikaavion suunnittelu

Edellisen luvun suunnitelmien perusteella lähettimelle aloitettiin piirtämään uutta piirikaaviota. Piirikaavion pohjaksi otettiin alkuperäinen lähetin, johon muokattiin virityskokonaisuuksiin suunnitellut muutokset. Muutoksien yhteydessä tehtyjä ratkaisuja on kuvailtu seuraavassa.

Pilottisignaalin vaimennuksen toteutus tehtiin piirikaaviotasolla melko suoraviivaisesti korvaamalla lähettimen edellisen piirikaavion trimmerikytkentä edellisessä luvussa

suunnitellulla analogisen vaimentimen ja digitaalisen potentiometrin yhdistelmäkytkennällä. Analogisen vaimentimen sisäänmeno- ja ulostuloimpedanssit olivat 50 ohmia ja muu kytkentä oli sovitettu 75 ohmiin. Siten signaalille tehtiin impedanssisovitus 75 ohmiin kummallekin puolelle vaimenninta. Tässä kytkennässä päätettiin soveltaa vaimentimen negatiivista kulmakerrointa, jolloin suuremmalla ohjausjännitteellä saavutettaisiin suurempi vaimennus. Tällöin vaimentimen SLOPE-pin kytkettiin maahan. Käyttöjännite vaimentimelle otettiin suodatettuna levyllä jo olleesta +3.3 voltin linjasta. Kuten edellä kuvattiin, vaimentimen ohjausjännite tuotiin sen VC-piniin regulaattorilta digitaalisen potentiometrin kautta jaettuna.

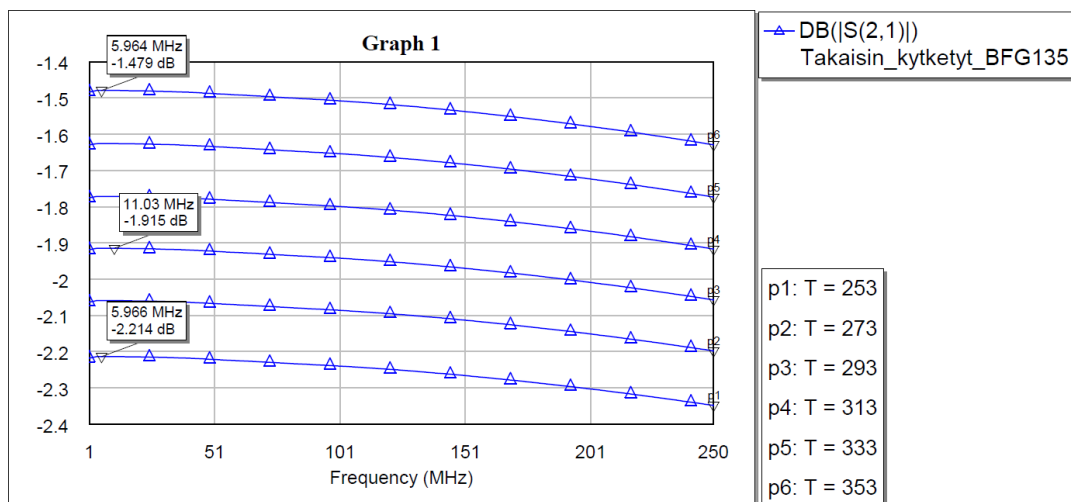
Ohjausjännite päätettiin jakaa kolmen voltin referenssijännitteestä sopivien vaimennusten aikaansaamiseksi. Referenssijännite tuotettiin shunttiregulaattorin avulla. Tarkemman vaimennusalueen aikaansaamiseksi potentiometrin lisäksi ohjausjännitelinjaan kytkettiin sarjavastus ennen potentiometriä. Käytetyn potentiometrin kokonaisresistanssi oli 10 kilo-ohmia, joten alkuperäiselle lähettimelle tehtyjen mittausten perusteella etuvastukseksi valittiin alkuarvauksena 18 kilo-ohmin vastus. Tarkoituksena oli hakea etuvastukselle sopiva arvo prototyypilevyjen mittausten avulla. Potentiometri tarvitsi lisäksi kaksi käyttöjännitettä sekä ohjauspuolelle että kytkintransistoreilleen. Sopivat arvot käyttöjännitteille löytyivät komponentin datalehdestä, ja molemmille käyttöjännitteille löytyi lisäksi kytkennästä jo valmiina sopivat +3.3 voltin ja 12 voltin linjat.

Vaimentimen lämpötilakäyttäytymistä tutkittiin tässä vaiheessa suunnittelua sopivan lämpötilakompensoinnin mitoittamiseksi. Lämpötilakompensointia tarvittiin jo valmiiksi oskillaattorin ulostulotehon vaihdeltua lämpötilan vaihdellessa, ja nyt tarkoituksena oli selvittää aiheuttaisiko uusi komponentti tarvetta kompensoinnin muutoksille. Vaimentimen lämpötilakäyttäytymisestä mitattiin Taulukon 3 mukaiset mittaustulokset. Mittaukset suoritettiin Hewlett Packardin vektoripiirianalysaattorilla 8721ES kahdella eri ohjausjännitteen avulla lämpötila-alueella -20 – +60 °C. Tuloksista voidaan nähdä lämpötilan vaikuttavan vaimennukseen maksimissaan noin 0.7 desibeliä, mutta ohjausjännitteen arvolla vaikutti olevan suuri vaikutus lämpötilariippuvuuteen. Vaihtelu oli noin 0.1 dB tässä sovelluksessa käytetyn vaimennusarvon ympäristössä, joten kyseistä arvoa päätettiin soveltaa jatkossa. Lopputulemana mittausten perusteella vaimennin näytti vahvistavan lämpötilan aiheuttamaa vaihtelua pilottisignaalin tehotasolle noin 1.1 desibeliin ääripäiden välillä.

Taulukko 3: RFSA2033 vaimentimen lämpötilakäytös kahdella eri ohjausjännitteellä.

Lämpökaapin lämpötila [°C]	Prossessorin lämpötila-anturin lämpötila [°C]	Vaimentimen vaimennus ohjausjännitteellä yksi [dB]	Vaimentimen vaimennus ohjausjännitteellä kaksi [dB]
-20.8	-9.25	-10.3	-17.5
-9.8	-0.83	-10.29	-17.57
0.2	9.09	-10.29	-17.66
9.9	17.51	-10.28	-17.75
19.7	26.52	-10.3	-17.84
30	36.44	-10.3	-17.95
40.6	45.77	-10.33	-18.02
50.5	54.49	-10.36	-18.11
60.5	63.22	-10.41	-18.19

Alkuperäinen kytkentä sisälsi lämpötilakompensoinnin, joka oli toteutettu noin 75 ohmin π -termistorivaimentimen avulla. Tässä työssä termistoreiksi valittiin komponenttivalmistajan uudet, hiukan resistanssiarvoiltaan ja lämpötilakertoimiltaan poikenneet, lämpöriippuvat vastukset edellisen lähetinkytkennän vanhempien komponenttien sijaan. Huoneenlämpöisinä valitut PTC-vastukset olivat resistanssiltaan 470 ohmia ja NTC-vastus 100 ohmia, ja lämpötilakertoimet olivat PTC-vastuksille 4110 ppm/K ja NTC vastukselle 3250 ppm/K. Sopivia normaalin sarjavastuksen arvoja simuloitiin National Instrumentsin AWR: Microwave Office-ohjelmistolla, josta tuloksena saatu käyrä 10 ohmin vastuksella on esitelty Kuvassa 26. Lämpötilavälillä -20 – 80 °C kompensointipiirin vaimennus olisi 0.7 desibeliä suurempi alhaisimmassa lämpötilassa kuin korkeimmassa lämpötilassa. Vaihteluvälin tulisi mittausten mukaan olla noin 1.1 desibeliä, mutta 10 ohmin arvolla saadut tulokset todettiin tarpeeksi hyväksi alkuarvaukseksi, ja tarkempi arvo päätettiin hakea prototyypilevyn mittausten avulla.



Kuva 26: Simuloinnin tuloksena saatu lämpötilakompensoivan vaimentimen vaimennuskäyrästä.

Laserdiodin biasvirran ohjauskytkentä muutettiin täysin alkuperäisestä, mutta piirtämisessä otettiin mallia toisen laitteen toimivasta vastaavasta kytkennästä. Uusi ohjauskytkentä on esitelty Liitteessä B. Kytkennässä operaatiovahvistimet D7-A ja D7-B sekä kanavatransistori V9 ohjasivat laserdiodin biasvirtaa. Vastaavasti kuin alkuperäisessä ohjauskytkennässä operaatiovahvistimen D7-A ei-invertoivalle navalle tuotiin referenssijännite, ja sen invertoivalle navalle tuotiin valodiodin virtaan verrannollinen jännite. Operaatiovahvistin oli vastusjaon kautta suoraan negatiivisesti takaisinkytketty ja sen ulostulojännite oli siten verrannollinen valodiodin virtaan. Ulostulojännite tuotiin toisen operaatiovahvistimen D7-B ei-invertoivalle navalle, ja invertoivalle navalle tuotiin kytkennän ohjausjännite. Operaatiovahvistimen ulostulojännitteen avulla puolestaan ohjattiin kanavatransistorin kautta laserdiodin säteilemää valoa, jolloin säätösilmukka sulkeutui. Kanavatransistori oli avaustyypin N-kanavainen MOSFET, jolloin suuremmalla positiivisella hilan ja lähteen välisellä jännitteellä saatiin transistorin läpi kulkevaa virtaa kasvatettua.

Ensimmäisen operaatiovahvistimen takaisinkytkentävastusten ja valodiodin sarjavastusten arvojen valinnalla voitiin ohjausjännitteen arvot asettaa halutuiksi. Tässä tapauksessa ohjausjännite jaettiin vastaavasti kuin pilottisignaalin vaimentimen ohjauksessa kolmen voltin referenssijännitteestä. Alkuperäisessä kytkennässä ohjausjännite tuli 3.3 voltin käyttöjännitteen omanneelta mikroprosessorilta, jolloin ohjausjännitteen arvot olivat myös alle kolme volttia. Vastusarvoja ei kytkennässä muutettu tämän ja mallipiirin jännitteiden yhtäsuuruuksien vuoksi.

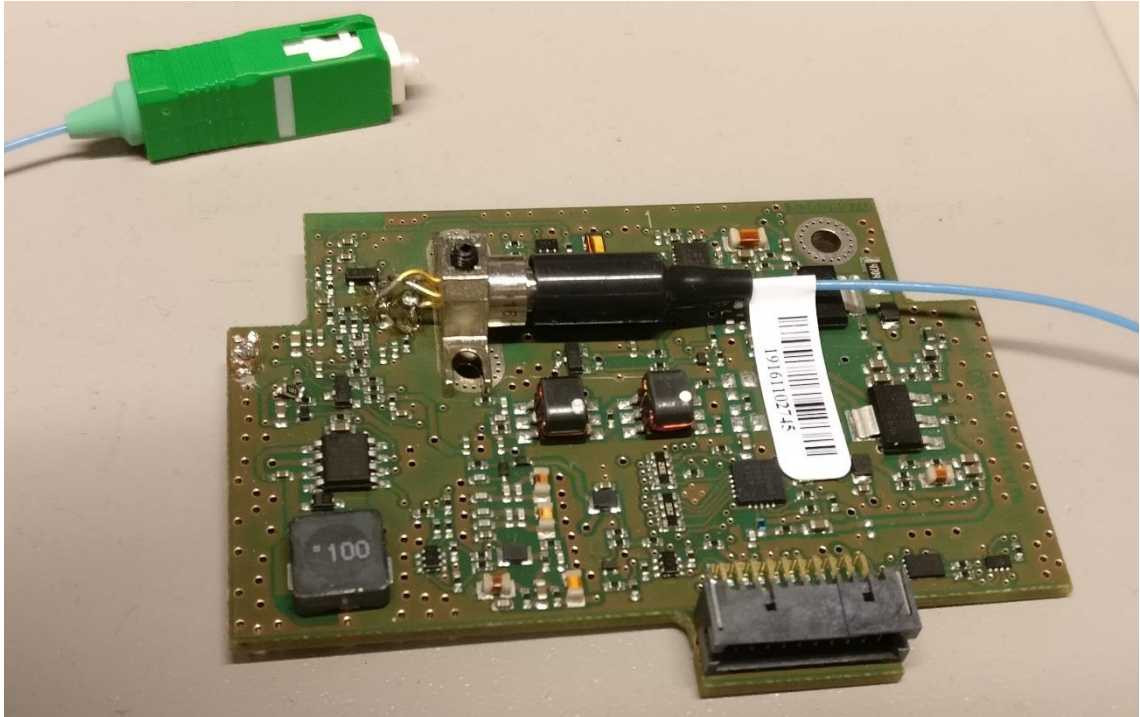
Kytkennän operaatiovahvistin D9-A ja transistori V11 toimivat virranrajoittimina. Operaatiovahvistin toimi komparaattorina, jonka toinen napa oli kytketty referenssijännitteeseen, ja toisen navan jännite muuttui laserdiodin biasvirran muuttuessa. Normaaliolosuhteissa referenssijännite oli suurempi kuin virranmittausjännite, jolloin

operaatiovahvistimen ulostulo oli sen negatiivisen käyttöjännitteen lähistöllä. Tällöin transistori V11 ei johda, ja säätösilmukka toimi normaalisti. Kun virranmittaukseen käytettävien rinnankytkettyjen vastusten R54, R4 ja R5 yli ollut jännite kasvoi referenssijännitteen arvoa suuremmaksi, vaihtoi operaatiovahvistin ulostulonsa lähelle positiivista käyttöjännitettä. Silloin transistori V11 alkoi johtaa, ja pakotti kanavatransistorin hila-lähde jännitteen lähelle nolaa, jolloin kanavatransistori lakkasi johtamasta. Virranrajoituskytkennän avulla voitiin suojata laserdiodia liian suurelta virralta ja estää sen hajoaminen.

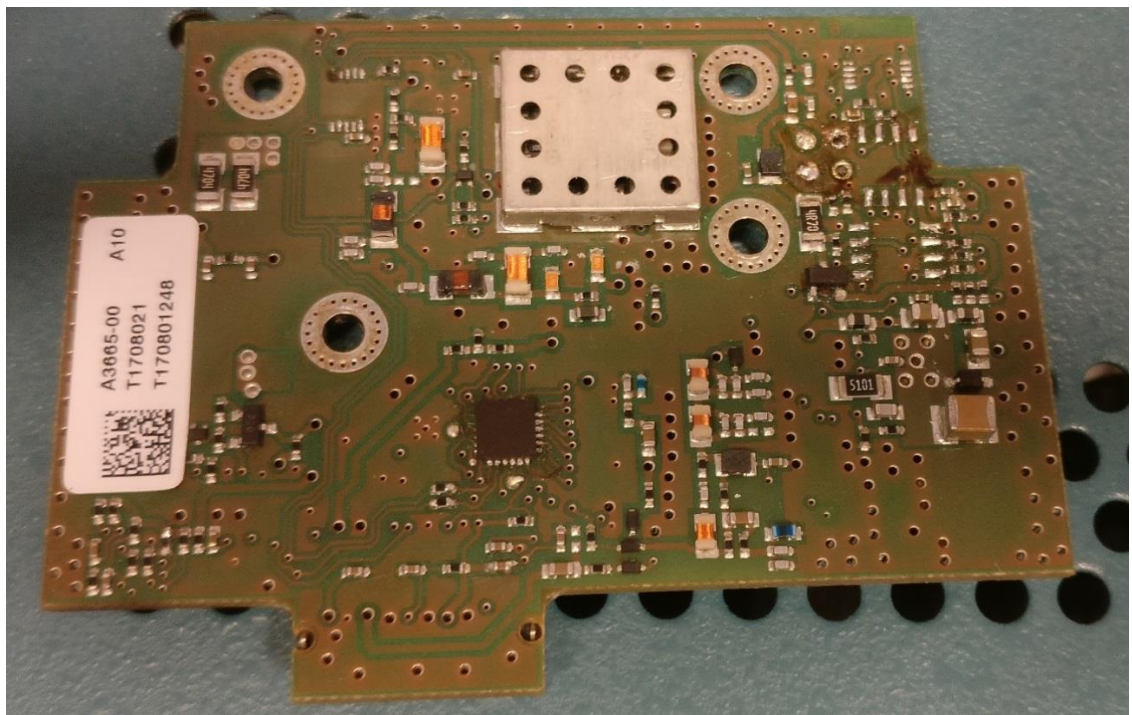
Lisänä mallikytkentään piti siihen toteuttaa mahdollisuus kytkeä laser pois päältä ulkoisella jännitteellä. Toiminnallisuus päätettiin toteuttaa kytkintransistoreilla virranmittauspiirin yhteyteen. Kun laserdiodi haluttiin kytkeä pois päältä, tuotiin Laser_on_off piniin ylhäällä ollut jännite. Tällöin virranmittausoperaatiovahvistimen ei-invertoivalle navalle kytkeytyi +12 voltin jännite, jolloin laserdiodin biasvirta laski olemattomaksi. Kytkin olisi voitu kytkeä myös muualle ohjauspiiriin, joka ilmeni mallikytkennän mittausten yhteydessä. Mainittu kytkentäpiste valikoitui, koska siitä laserdiodin virta palautui nopeiten takaisin tasapainotilaan verrattuna muihin kytkentäpisteisiin.

Virranmittaus oli kytkennässä toteutettu vastaavasti kuin alkuperäisessä lähettimessä operaatiovahvistimen D9-B avulla. Laserdiodin biasvirran reitille oli kytketty sarjaan 4.7 ohmin virranmittausvastus, jonka kumpikin jalka oli kytketty vastusten kautta operaatiovahvistimelle. Negatiivisesti takaisinkytketty operaatiovahvistin tuotti ulostuloonsa takaisinkytkentävastusten suhteella kerrotun virranmittausvastuksen yli olleen jännitteen. Kun vastusten suhde oli tiedossa, voitiin ulostulojännitteestä Laser_cur laskea käyttäjälle laserdiodin läpi kulkenut virta mikroprosessorin avulla.

Kuvailtujen piirikaaviosuunnitelmien perusteella lähettimelle tehtiin layoutsuunnittelijan toimesta layoutsuunnittelu, ja ohjelmistosuunnittelijan toimesta testausohjelma. Layoutin piirron yhteydessä lähettimen hakkuriin tehtiin pieniä muutoksia kaikkien uusien komponenttien mahdollistamiseksi levyille. Kun suunnittelu oli valmis, tilattiin kytkennän testausta varten prototyypilevyjä piirilevyvalmistajalta. Levyjen saavuttua Telesten tuotannossa ladottiin levyille komponentit, minkä jälkeen levyt olivat valmiita testausta varten. Kuvissa 27 ja 28 on esitelty valokuvissa prototyypipiirilevyn kumpikin puoli. Kuvassa 27 levyllä on juotettu laserdiodi, johon on kiinnitetty optista kuitua (kuvassa sinisellä). Kuvassa 28 aiemmin käsitelty oskillaattorikytkentä on suojattu metallikoteloinnilla, jotta kytkennän häiriöt muualle levyyn saataisiin minimoitua. Seuraavassa luvussa on esitelty testauksessa saatuja mittaustuloksia.



Kuva 27: Valokuva prototyyppiirilevystä laserdiodilla.



Kuva 28: Valokuva prototyyppiirilevystä.

4. MITTAUSTULOKSET

Lähettimen mittaukset suoritettiin Telesten tuotekehityksen laitteilla. Mittaukset päätettiin suorittaa viritettävien osa-alueiden säätöalueille niiden suuruuksien ja tarkkuuksien riittävyysien selvittämiseksi. Lisäksi lähettimestä mitattiin sen lämpötilariippuvuutta uusien virityksen alla olleiden ominaisuuksien osalta, sen tuottamia häiriöitä ja I2C-väylä kuormitusta uusien komponenttien myötä.

4.1 Pilottisignaalin amplitudin viritys

Pilottisignaalin osalta mittaukset kohdistettiin sen jännitteen amplitudin viritysalueen suuruuteen, virityksen tarkkuuteen ja jännitteen vaihteluun lämpötilaolosuhteiden muuttuessa. Tuloksia verrattiin alkuperäisen lähettimen vastaaviin mittaustuloksiin, jotta automatisoidulla virityksellä saavutettaisiin riittävät tarkkuudet jokaisen ominaisuuden osalta. Mittaukset suoritettiin kytkemällä lähetin Telesten AC9100 nodeen, ja mittaamalla jännitteitä Advantestin spektrianalysaattorilla R3261C.

Signaalilinjaan injektoidavan pilottisignaalin jännitteen tehollisarvon viritysalue pyrittiin saamaan yhtä suureksi kuin alkuperäisessä lähettimessä. Alkuperäisen lähettimen viritysalueeksi mitattiin 23 desibeliä vaimennetusta OMI-testipisteestä 48.3 – 55 dB μ V. Lähes vastaava säätöalue saatiin suunnitellulla lähettimellä, kun etuvastuksen arvoksi asetettiin 22 kilo-ohmin vastus. Tällöin viritysalueeksi mitattiin spektrianalysaattorilla samasta testipisteestä 46.3 – 55.2 dB μ V. Viritysalueen osalta toteutettu kytkentä vaikutti täyttävän sille asetetut vaatimukset.

Pilottisignaalin amplitudin tehollisarvo tuli olla injektio pisteessä 74.5 dB μ V laitteen lähtiessä tuotannosta, mikä tarkoitti OMI-testipisteestä mitattuna 51.5 dB μ V:n suuruista arvoa. Trimmereillä viritetyssä lähettimessä säätö oli portaaton, joten haluttu signaalin tehollisarvo voitiin etsiä hyvin tarkasti. Automatisoidussa virityksessä säätö oli rajoitettu 128 askeleeseen, joten säädön tarkkuutta oli tarpeen tarkastella. Tarkkuutta testattiin halutun tehotason ympäristössä 50 – 53 dB μ V alueella. Tulokset on esitelty Taulukossa 4. Askelmien välillä mitattiin olevan 0.1 – 0.3 desibeliä eroa ja yleisin askelmien välinen ero oli 0.2 dB. Virityksen tarkkuuden riittävyttä tarkasteltiin Telesten tuotannon insinöörin kanssa ja se todettiin riittäväksi ulostulolle määritellyn tarkkuuden osalta.

Taulukko 4: Pilottisignaalin mitatut jännitteen amplitudin tehollisarvot digitaalisen potentiometrin asennon muuttuessa.

Potentiometrin asento	Mitattu pilottisignaalin amplitudi OMI-testipisteestä [dB μ V]
92	49.9
91	50.0
90	50.1
89	50.3
88	50.4
87	50.6
86	50.8
85	51.0
84	51.2
83	51.5
82	51.7
81	51.9
80	52.1
79	52.3
78	52.5
77	52.7
76	52.9
75	53.1

Lämpötilavaihtelua mitattiin lämpötiloissa -20 °C:sta +70 °C:seen lämpökaapissa. Alkuperäisen lähettimen lämpötilakäyttämisen mittaustulokset on esitelty Taulukossa 5. Laserin lämpötila mitattiin Fluken lämpötilamittarilla sen kotelosta, jotta laitteen lämpötilasta saatiin varmuus. Tuloksista voidaan nähdä, että pilotin amplitudi vaihteli koko lämpötila-alueella 1.7 desibeliä. Välillä -20 °C – +72 °C vaihtelu oli yhden desibelin.

Taulukko 5: Alkuperäisen lähettimen pilottisignaalin lämpötilavaihtelu.

Lämpökaapin lämpötila [°C]	Laserin lämpötila [°C]	Pilottisignaalin amplitudi [dB μ V]	Pilottisignaalin taajuus [MHz]
-40	-36	89.3	5.536
-20	-16	90	5.536
0	3	90.6	5.536
20	23	90.8	5.508
40	43	91	5.508
60	63	91	5.48
72	75	91	5.48

Lähes vastaava mittaus suoritettiin tässä työssä suunnitellulle lähettimelle, ja laserin lämpötila mitattiin vastaavasti kuin alkuperäisen lähettimen mittauksessa. Tuloksina saadut jännitteen amplitudien arvot on esitelty Taulukossa 6. Amplitudin vaihtelu oli suurimmillaan 0.29 dB, joka saavutettiin lopulta vaihtamalla lämpökompensaatiopiirin sarjavastus 27 ohmin suuruiseksi. Lämpötilavaihtelu todettiin riittävän pieneksi.

Taulukko 6: Suunnitellun lähettimen pilottisignaalin lämpötilavaihtelu.

Lämpökaapin lämpötila [°C]	Noden käyttöliittymän lämpötila [°C]	Laserin lämpötila [°C]	Pilottisignaalin amplitudi [dB μ V]	Pilottisignaalin taajuus [MHz]
-20	-13	-15.4	51.62	5.502
-10	-4	-6	51.60	5.499
0	6	3.5	51.57	5.495
10	15	13.2	51.52	5.490
20	25	23.1	51.52	5.485
30	35	33	51.51	5.479
40	45	42.9	51.49	5.473
50	55	53	51.33	5.463
60	65	63	51.33	5.456
70	75	73	51.33	5.448

Signaalin taajuuden vaihtelu lämpötilan mukana on havaittavissa kummankin lähettimen tapauksessa. Sen oli todettu olevan riittävän vähäistä huomioimatta jättämiseen jo alkuperäisen lähettimen osalta.

Eräs ero työssä suunnitellun ja alkuperäisen lähettimen välillä oli pilottisignaalin amplitudin hiukan suurempi satunnainen vaihtelu. Spektrianalyysaattorilla mitattaessa

amplitudi vaihteli jatkuvasti noin 0.03 desibeliä tässä työssä suunnitellulla lähettimellä. Alkuperäisellä lähettimellä vaihtelu oli luokkaa 0.01 dB. Vaihtelua pyrittiin vähentämään parantamalla vaimentimen ohjausjännitteen suodatusta seuraavalla piirilevyllä.

4.2 Laserdiodin toimintapisteen viritys

Laserdiodin biasoinnin osalta mitattiin valotehon avulla sen viritysaluetta, tarkkuutta viritysalueen sisällä ja vaihtelua lämpötilan mukana. Tuloksia tarkasteltiin Telestellä kerätyn lasereiden mittaustuloksiin verrattuna, ja lisäksi tuloksien avulla pohdittiin virityksen riittävyyttä.

Lähetin sisälsi monia vaihtoehtoisia malleja lasereiden valotehojen osalta, joka puolestaan aiheutti biasvirtojen suurehkojakin vaihteluja. Suurimmillaan biasvirran arvojen oli mitattu olevan Teosten lasereissa noin 55 mA ja pienimmillään noin 15 mA, jolloin myös työssä rakennetun lähettimen biasvirran vaihteluväli piti olla kyseisellä välillä. Riittävä säätöalue biasvirroille saavutettiin asettamalla 4.7k ohmin vastus digitaalisen potentiometrin resistanssin kanssa sarjaan. Tällöin suurimmillaan biasvirta oli 62 mA ja pienimmillään lähes 0 mA.

Viritysalueen riittävyyden asetuksen jälkeen tarkistettiin valotehon virityksen tarkkuus. Tarkkuutta mitattiin valotehomittarin avulla vaihtamalla potentiometrin asentoja. Mittaustuloksia on esitelty Taulukossa 7. Valotehon muutos havaittiin olevan lineaarisella asteikolla yhtä suuri askelmien välillä koko viritysalueella ja suuruudeltaan noin 0.062 mW. Kyseinen havainto tehtiin kahdella eri valoteholla ja biasvirralla käytetyn laserin mittausten yhteydessä. Pienimmän valotehon laserit olivat 2 dBm:n suuruisia, jolloin mitatulla säätötarkkuudella valotehon viritystarkkuus 2 dBm:n ympäristössä olisi noin 0.13 dB. Suurempien valotehojen omaavien laserien yhteydessä säätö olisi tarkempi käytetyn valotehon ympäristössä. Tarkkuus todettiin Teosten tuotannon insinöörin kanssa todennäköisesti riittäväksi valotehon viritämiseksi kohdalleen.

Taulukko 7: Suunnitellun lähettimen valotehon ja biasvirran vaihtelu digitaalisen potentiometrin asennon muuttuessa.

Potentiometrin asento	Valoteho [dBm]	Valoteho [mW]	Biasvirta [mA]	Valotehon muutos edelliseen arvoon [mW]
5	-9.93	0.102	12	
6	-7.77	0.167	13	0.065
7	-6.37	0.231	13	0.064
8	-5.32	0.294	14	0.063
20	0.22	1.053	18	
21	0.43	1.116	19	0.063
22	0.67	1.17	19	0.054
23	0.9	1.232	20	0.062
24	1.11	1.295	20	0.063
25	1.32	1.358	20	0.063
26	1.52	1.422	21	0.064
27	1.7	1.484	21	0.062
28	1.89	1.547	22	0.063
29	2.06	1.61	22	0.063
124	8.77	7.548	61	
125	8.8	7.607	61	0.059
126	8.83	7.666	62	0.059
127	8.87	7.728	62	0.062

Seuraavaksi mitattiin lähettimen valotehon vaihtelua lämpötilan vaihdella. Alkuperäisen lähettimen valotehoa oli mitattu lämpötilavälillä -40 – +70 °C ja saadut tulokset on esitelty Taulukossa 8. Mittauksessa käytetty laser oli asetettu huoneenlämpötilassa sen käytettävään toimintapisteeseen, jossa valoteho oli noin 3 dBm. Vaihtelu oli suurimmillaan 0.7 desibeliä, ja jos -40 °C mittaus jätetään huomioimatta vaihteluväli oli 0.5 desibeliä.

Taulukko 8: Alkuperäisen lähettimen valotehon vaihtelu lämpötilan muuttuessa.

Commanderin lämpötila [°C]	Fluken lämpötila [°C]	Valoteho [dBm]
-36	-35.8	2.1
-16	-16	2.5
3	3	2.7
23	22.9	2.8
43	43.1	2.7
63	63.6	2.5
75	76	2.3

Tässä työssä suunnitellun lähettimen lämpötilavaihtelua mitattiin lämpötilavälillä -20 – +70 °C. Valotehon mittaus suoritettiin EXFO Maxtester FOT-920 valotehomittarilla. Mittaustulokset on esitelty Taulukossa 9. Vaihteluväli oli mittauksissa suurimmillaan 0.4 desibeliä, mikä todettiin riittävän hyväksi.

Taulukko 9: Suunnitellun lähettimen valotehon vaihtelu lämpötilan muuttuessa.

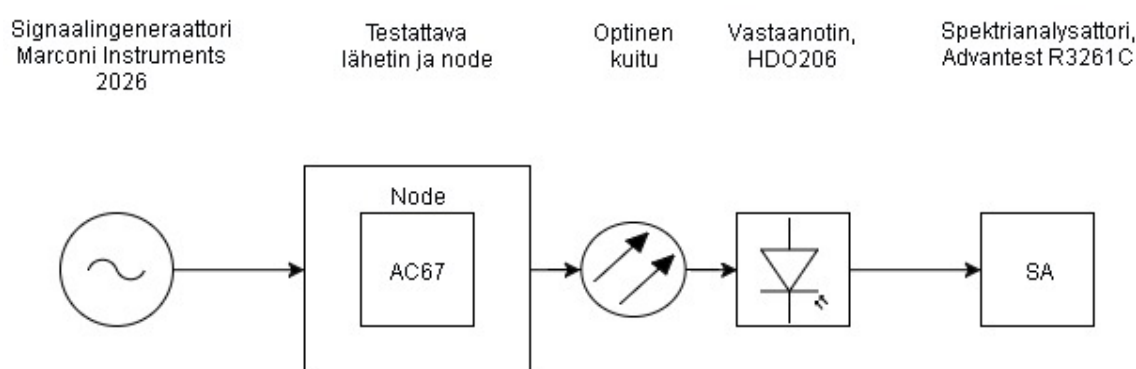
Lämpökaapin lämpötila [°C]	Noden käyttöliittymän lämpötila [°C]	Laserin lämpötila [°C]	Valoteho [dBm]
-20	-13	-15.4	2.77
-10	-4	-6.0	2.75
0	6	3.5	2.93
10	15	13.2	2.92
20	25	23.1	3.04
30	35	33.0	3.10
40	45	42.9	2.97
50	55	53.0	3.18
60	65	63.0	3.07
70	75	73.0	3.14

Biasvirran virityksen osalta saadut mittaustulokset vaikuttivat tyydyttäviltä kaikilta osin. Siten kytkentään ei tehty muutoksia levyn seuraavaan versioon.

4.3 Käytännön soveltuvuuden mittaukset

Lähettimestä mitattiin viritettävien osioiden lisäksi sen tuottamia häiriöitä, taajuusvastetta ja I2C-väylän kuormitusta, jotta muutokset kytkennässä tuottaisivat varmasti käytännön ympäristössä toimivan ja spesifikaation mukaisen tuotteen. Häiriöitä mitattiin erillisen optisen vastaanottimen ja spektrianalysaattorin avulla, taajuusvastetta mitattiin piirianalysaattorin avulla, ja I2C-väylän kuormitusta mitattiin oskilloskoopin avulla.

Häiriöiden mittaukset tehtiin kahteen otteeseen, jotta mittaustuloksista voitaisiin poimia vain lähettimen aiheuttamat häiriöt. Mittausten erona oli lähettimen kytkeminen kahteen eri nodeen mittausten ajaksi. Järjestelyllä mitatuista häiriöistä voitiin rajata pois noden aiheuttamat häiriöt, ja määrittää tuloksista vain lähetimestä peräisin olevat häiriöt. Vastaanotin oletettiin tässä tapauksessa häiriöttömäksi. Mittausjärjestelyssä nodejen piirilevyille juotettiin kiinni koaksiaalikaapelit, joihin tuotiin lähettimelle sisäänmenosignaali. Lähettimen ulostulo tuotiin optisen vaimentimen kautta Telesten HDO206 vastaanottimelle, ja vastaanottimesta signaalia mitattiin spektrianalysaattorilla. Optinen vaimennin oli tarpeen kytkeä ketjuun ennen vastaanotinta, jotta vastaanottimelle määriteltyä suurinta mahdollista sisäänmenon valotehoa ei ylitettäisi. Mittausjärjestelyä on havainnollistettu Kuvassa 29.



Kuva 29: Lähettimen häiriöiden mittausjärjestely.

Vastaanottimessa ulostulossa näkyvää signaalia vaimennettiin vielä 30 desibeliä, jotta signaali ei säröytyisi spektrianalysaattorissa. Pilottisignaalin ja sisäänmenosignaalin OMI säädettiin neljään prosenttiin, jolloin spektrianalysaattorin näytöllä signaalien tehollisarvot olivat 83 dB μ V:n luokkaa ja pohjakohina oli noin 6 dB μ V. Hyväksyttävällä laitteella häiriöiden tehollisarvon tuli olla 55 desibeliä kantoaaltoason alapuolella taajuuskaistalla 5 – 204 MHz, joten mittausjärjestelyllä liian suuret häiriöt olisivat mitattavissa spektrianalysaattorin näytöllä pohjakohinan yläpuolella. Häiriöitä etsittiin aina 2.5 gigahertsiin asti.

Ensimmäisenä lähetin kytkettiin Telesten ACE8 nodeen. Mittauksessa löydettyjen häiriöpiikkien tehollisarvot ja taajuudet on koottu Taulukkoon 10. Pilottisignaalin tehollisarvo oli tässä mittauksessa 83.1 dB μ V ja pohjakohina noin 6 dB μ V. Seuraavana häiriöitä mitattiin AC9100 nodesta, mistä saadut mitaustulokset on koottu Taulukkoon 11. Tässä tapauksessa pilottisignaalin tehollisarvo oli 82.6 dB μ V ja pohjakohina noin 6 dB μ V. Taulukoissa esiteltävien häiriöpiikkien lisäksi havaittiin sisäänmenosignaalin harmonisia komponentteja. Signaalin ja harmonisten tehollisarvojen suhde oli yhtä suuri suoraan signaaligeneraattorista mitattuna, joten niiden todettiin olevan peräisin signaaligeneraattorista tai spektrianalysaattorista.

Taulukko 10: Häiriömittauksissa löydetyt häiriötaajuudet ja häiriöpiikkien tehollisarvot lähettimen ollessa kiinni ACE8 nodessa.

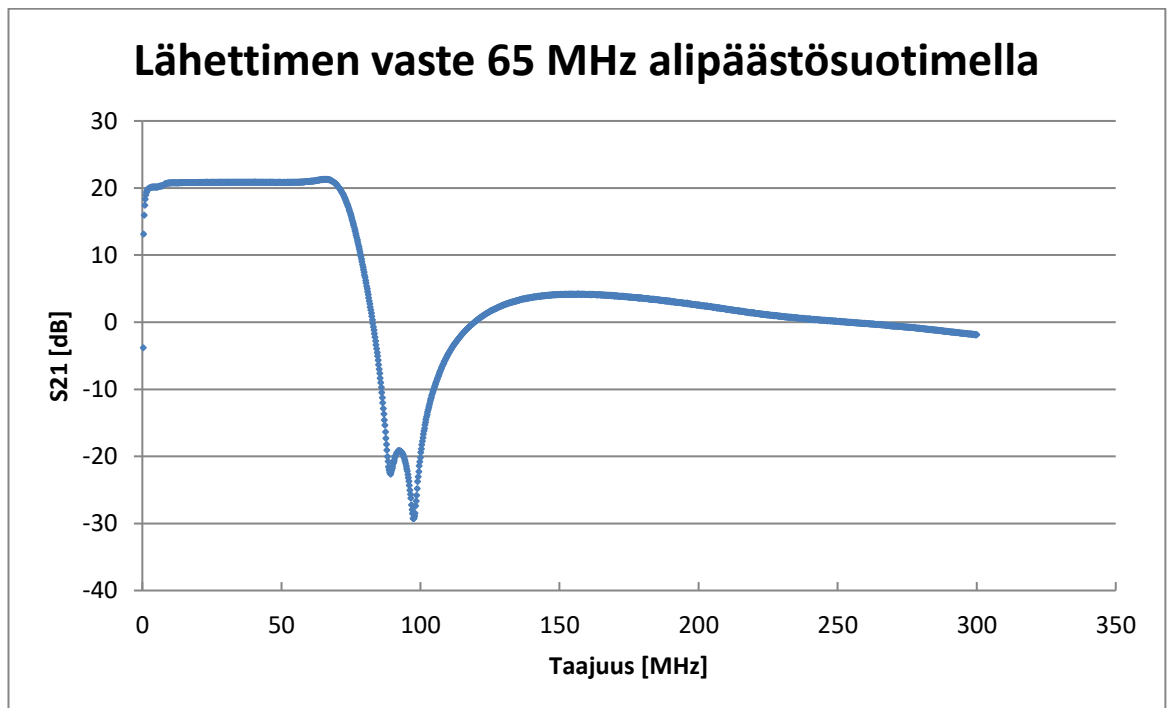
Taajuus [MHz]	Tehollisarvo [dB μ v]
1.452	29.5
1.528	21
2.904	19
3.056	18
3.362	20
3.667	23
4.279	25
4.357	29.5
4.585	23
5.162	23
5.196	21
5.503	20
5.7804	22
5.836	23
5.829	19
7.284	22
8.268	19.5
8.572	19
9.184	18.5

Taulukko 11: Häiriömittauksissa löydetyt häiriötaajuudet ja häiriöpiikkien tehollisarvot lähettimen ollessa kiinni AC9100 nodessa.

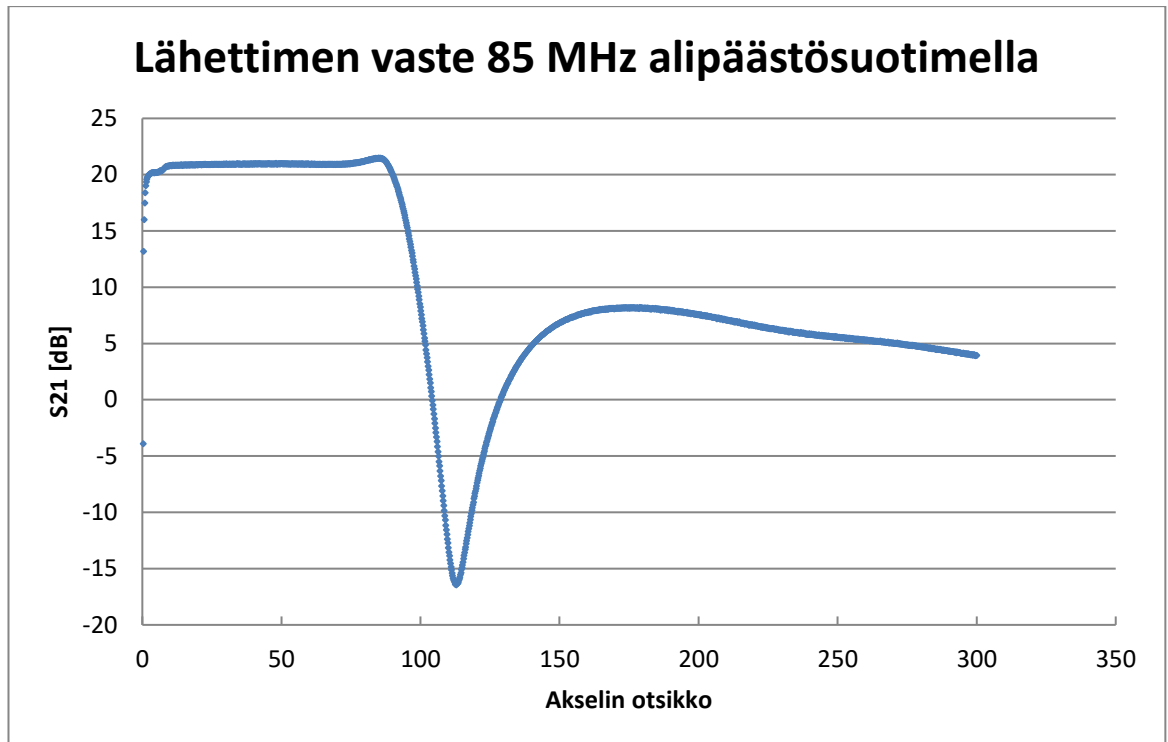
Taajuus [MHz]	Tehollisarvo [dB μ V]
5.839	16
6.133	15
7.659	16
8.27	14

Ainoastaan taajuuksilla 5.83 ja 8.27 MHz mitatut häiriöt havaittiin kummankin noden mittauksissa, joten niiden voitaisiin ajatella olevan peräisin lähettimestä. Häiriöt olivat suuruudeltaan kuitenkin riittävän pieniä, jotta niistä ei todettu aiheutuvan haittoja.

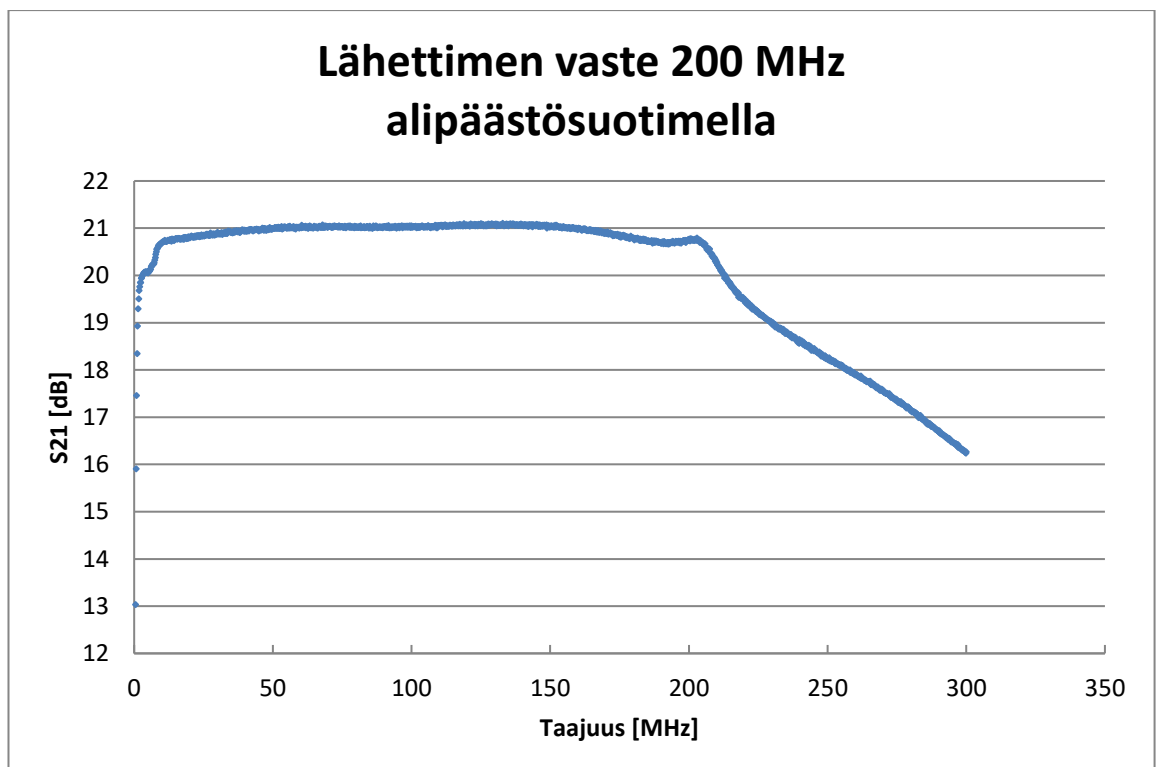
Lähettimen taajuusvastetta mitattiin juottamalla koaksiaalijohdot lähettimen sisäänmenoon ja ulostuloon. Hewlett-Packardin 8712ES piirianalysointilaite kytkettiin juotettuihin johtoihin, ja lähettimen taajuusvasteita mitattiin eri alipäästösuotimen asetuksilla. Laitteen spesifikaation mukaan vasteen piti olla päästökaistalla vaihtelultaan enintään ± 0.5 dB. Tuloksina saadut taajuusvastekuvaajat on esitelty Kuvissa 30-33. Työssä ei muokattu signaalilinjan komponentteja, joten tuloksina saadut kuvaajat vastasivat hyvin lähelle alkuperäisiä lähettimen taajuusvasteen kuvaajia. Piirilevyn layout vaihtui hieman signaalilinjan osalta, mutta muutokset eivät aiheuttaneet merkittäviä muutoksia taajuusvasteisiin.



Kuva 30: Suunnitellun lähettimen taajuusvaste RF-sisäänmenosta laseriodille 65 MHz alipäästösuotimella.



Kuva 31: Suunnitellun lähettimen taajuusvaste RF-sisäänmenosta laserdiodille 85 MHz alipäästösuotimella.



Kuva 32: Suunnitellun lähettimen taajuusvaste RF-sisäänmenosta laserdiodille 200 MHz alipäästösuotimella.

Lähetinten kuormitusta noden I2C-väylään tutkittiin asettamalla suurin mahdollinen määrä eli neljä lähetintä AC9100 nodeen. Jokaiseen lähettimeen oli lisätty kaksi komponenttia kuormittamaan I2C-väylää, jolloin väylän suorituskyky varmistettiin täydellä kuormituksella. Väylän nousu- ja laskuaikoja tutkittiin oskilloskoopilla ja tuloksina saadut nousu- ja laskuajat olivat I2C-väylän standardin [30] mukaisia.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin, rakennettiin ja testattiin optisen lähettimen laitteistomuutos automaattista tuotantoviritystä varten. Työ aloitettiin kuvailemalla kaapelitelevisioverkon historiaa ja nykyisyyttä johdannossa. Luvussa kaksi käsiteltiin taustateoriaa liittyen optiseen tiedonsiirtoon sekä lähettimessä käytettyihin komponentteihin ja suunnittelutekniikoihin. Luku kolme sisälsi lähettimen rakenteen ja virityksen esittelyn sekä kuvauksen lähettimen suunnitteluvaiheesta. Neljäs luku esitteli työssä rakennetulle lähettimelle tehtyjä mittauksia ja niiden tuloksia. Mittauksia suoritettiin yleisesti virityksen riittävyyden selvittämiseksi sekä laitteen käytännön toimivuuden varmistamiseksi.

Lähettimen kaksi käsin viritettyä ulostuloa olivat sen pilottisignaalin amplitudin suuruus sekä laserdiodin toimintapisteen asettaminen. Pilottisignaalin virityksen tapauksessa virityskomponentin tehtävänä oli tuottaa tietynsuuruinen vaimennusikkuna, jonka sisällä vaimennuksen tarkkuus olisi riittävä ulostulon asettamiseksi spesifikaation mukaiseksi. Laserin toimintapisteen virittäminen kohdalleen suoritettiin käsin viritetyssä lähettimessä säätövastuksen avulla ja työssä suunnitellussa kytkennässä ohjausjännitteen avulla. Kummassakin virityksessä päätettiin työn tarkoituksen kannalta oleellinen sähköinen ohjaus toteuttaa digitaalisten potentiometrien avulla. Digitaalisia potentiometrejä käytettiin jakamaan ohjausjännitteitä: pilottisignaalin tapauksessa analogisesti ohjattavalle vaimentimelle ja laserdiodin toimintapisteen tapauksessa laserdiodin säätösilmukalle.

Suunnitellusta lähettimestä tehtiin prototyypipiirilevy, ja digitaalisille potentiometreille tehtiin testausohjelma mittauksia varten. Viritettävyyden kannalta suoritettavat mittaukset olivat viritysikkunan suuruuden selvittäminen sekä viritystarkkuus ikkunan sisällä. Pilottisignaalin amplitudin suuruuden virityksen ikkunan tavoitteeksi asetettiin käsin viritetyn lähettimen viritysikkuna. Tavoiteltuun viritysikkunaan päästiin pienten muutosten jälkeen, ja viritystarkkuus ikkunan sisällä todettiin riittäväksi tuotannossa vaadittujen tarkkuuksien osalta. Laserdiodin toimintapisteen asetuksessa viritysikkunaksi määriteltiin Telestellä käytettyjen laserdiodien mitattujen biasvirtojen vaihteluväli. Myös toimintapisteen virityksen osalta viritysikkuna saatiin asetettua riittävän suureksi pienen muutoksen jälkeen. Tässä tapauksessa viritystarkkuus oli aivan sallitun tarkkuuden rajoilla, mutta se todettiin todennäköisesti riittäväksi automaattivirityksen suorittamiseksi.

Yleisesti kumpikin suunniteltu virityskytkentä vaikuttivat toimivilta, mutta kummankin virityksen tapauksessa tarkempi säätö olisi saavutettu enemmän askelmia sisältäneen digitaalisen potentiometrin avulla. Työssä valitun 128 askelmaa sisältäneen digitaalisen

potentiometrin sijaan esimerkiksi 256 askelmaa sisältävä potentiometri olisi taannut varmemmin riittävän tarkkuuden kumpaankin viritykseen.

Lähettimelle suoritettujen muiden mittausten yhteydessä testattiin laitteen aiheuttamia häiriöitä, lämpötilastabiiliutta, I2C-väylän kuormitusta ja sen taajuusvastetta. Laitteen ei todettu lähettävän liian suuria häiriöitä mitatulla taajuuskaistalla muutamasta megahertsistä kahteen ja puoleen gigahertsiin. Lähetin todettiin riittävän lämpötilastabiiliksi vertaamalla sen ulostulojen vaihtelua käsin viritetyn lähettimen vastaaviin arvoihin. I2C-väylän kuormitus mitattiin oskilloskoopilla väylän nousu- ja laskuajoista, jotka todettiin väylän standardin mukaisiksi. Lopulta testattiin vielä signaalilinjan taajuusvaste hiukan muuttuneen piirilevyn layoutin vuoksi. Tuloksina saatujen kuvaajien perusteella taajuusvasteet olivat edelleen laitteen spesifikaation mukaisia.

Laitteelle tehtyjen mittausten perusteella siihen tehtiin vielä pieniä korjauksia. Tämän jälkeen levystä tilattiin suurempi prototyyppisarja, josta voitaisiin luovuttaa suurin osa Telesten tuotantoprosesseista vastaavalle yksikölle. Yksikössä automaattiviritykselle oli tarkoituksena valmistaa viritysalgoritmi ja- ohjelma, joka suorittaisi laitteen automaattivirityksen.

LÄHTEET

- [1] S. Aidarous and T. Plevyak, "Management of CATV Networks", Wiley-IEEE Press, First Edition, 1998.
- [2] Ciciora, Farmer, and Large, "Modern Cable Television Technology", Morgan Kauffman Publishers, Inc, 1999.
- [3] G. Donaldson and D. Jones, "Cable television broadband network architectures," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 122-126, Jun 2001.
- [4] Cablelabs DOCSIS 3.0 standardi: "Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Physical Layer Specification", CM-SP-PHYv3.0-I13-170111.
- [5] I. Kaminow, T. Li, "Optical Fibre Telecommunications IV-B: Systems and Impairments", Academic Press, 4th edition, 2002.
- [6] Michael J. Emmendorfer, Thomas J. Cloonan, John Ulm, Zoran Maricevic, "A Side-by-side Comparison of Centralized vs. Distributed Access Architectures," National Cable & Telecommunications Association (NCTA) artikkeli, 2014. Viitattu 22.4.2017. Saatavilla: <http://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2014/2014-a-side-by-side-comparison-of-centralized-vs-distributed-access-architectures>
- [7] Cablelabs DOCSIS 3.1 standardi: "Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Physical Layer Specification", CM-SP-PHYv3.1-I10-170111.
- [8] H. Young, R. Freedman, "University Physics with Modern Physics", Addison-Wesley, 13th edition, 2012.
- [9] R. Ramaswami, G. H. Sasaki, and K. N. Sivarajan, "Optical Networks", Elsevier Morgan Kaufmann, 3rd edition, 2010.
- [10] C. DeCusatis, C. DeCusatis, "Fiber Optic Essentials", Elsevier/Academic Press, 2005
- [11] Koaksiaalikaapelivalmistaja Commscope:n internetsivu P3 500 JCASS kaapelista. Viitattu 27.3.2017. Saatavilla: http://www.commscope.com/catalog/broadband/product_details.aspx?id=46994
- [12] C.B. Hitz, J.J. Ewing, J. Hecht, "Introduction to Laser Technology", 3rd ed. Wiley-IEEE Press, 2001.

- [13] IEC standardi 60728-6/CDV: “Cable networks for television signals, sound signals and interactive services, Part 6: Optical equipment.”
- [14] D. Stoneback, D. Raskin, “Return Systems for Hybrid Fibre/Coax Cable TV networks”, 1st ed. Prentice Hall, 1997.
- [15] Digitaalisten potentiometrien valmistajan valikoima, Analog Devices, verkkosivu. Saatavissa: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/digital-potentiometers.html>
- [16] Digitaalisten potentiometrien valmistajan valikoima, Texas Instruments, verkkosivu. Saatavissa: <http://www.ti.com/lscds/ti/data-converters/digital-potentiometers/digital-potentiometers-products.page>
- [17] ISL95311 digitaalisen potentiometrin datalehti, Intersil. Saatavissa: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/isl9/isl95311.pdf>
- [18] Vaimenninvalmistajan tuotevalikoima, Analog Devices, verkkosivu. Saatavissa: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/attenuators.html>
- [19] Vaimenninvalmistajan tuotevalikoima, Mini-Circuits, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.minicircuits.com/WebStore/Attenuators.html>
- [20] Vaimenninvalmistajan tuotevalikoima, Qorvo, verkkosivu. Saatavissa: <http://www.qorvo.com/products/control-products/attenuators>
- [21] RFSA2033 vaimentimen datalehti, Qorvo. Saatavissa: <http://www.qorvo.com/products/p/RFSA2033>
- [22] Vaimenninvalmistajan tuotevalikoima, Peregrine, verkkosivu. Saatavissa: <http://www.psemi.com/products/digital-step-attenuators-dsa>
- [23] PE4314 digitaalisen porrasmuuntimen datalehti, Peregrine. Saatavissa: <http://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4314ds.pdf>
- [24] D. Pozar, “Microwave Engineering”, Wiley, 3rd edition, 2005.
- [25] R. Ludwig, P. Bretchko, “RF Circuit Design”, Prentice Hall, 2000.
- [26] IEEE:n Microwaves101 internetsivu vaimentimista. Viitattu 19.5.2017. Saatavissa: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/attenuators>
- [27] Potentiometers, internetsivu. Viitattu 20.5.2017. Saatavissa: <http://www.electronics-tutorials.ws/resistor/potentiometer.html>

- [28] I.R. Sinclair, *Passive components for circuit design*, 1. publ. ed. Newnes, Oxford, 2001.
- [29] T. Williams, *The Circuit Designer's Companion*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, Kent, 2012.
- [30] I2C-bus specification and user manual, UM10204, NXP Semiconductors. Viitattu 21.5.2017. Saatavissa:
http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf
- [31] Datasheet/Application Note: SMD 15 dB Directional Coupler Transformer, Teleste Corporation, 2010.

LIITE A: ALKUPERÄISEN LÄHETTIMEN LASERDIODIN BIASOINTIVIRRRAN OHJAUSKYTKENTÄ

