

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Oskars OZOLIŅŠ

Doktora studiju programmas „Telekomunikācijas” doktorants

**VIĻŅA GARUMA FILTRU ANALĪZE UN
REALIZĀCIJA ŠKIEDRU OPTIKAS
PĀRRAIDES SISTĒMĀS**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing., Profesors
Ģ.IVANOVS

Rīga 2013



Eiropas sociālais fonds



Eiropas savienība

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

This work has been supported by the European Social Fund within the project «Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University».

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».

PATEICĪBA

Sākumā es vēlos pateikties promocijas darba vadītājam profesoram Ģirtam Ivanovam, kurš mani pieņēma par doktorantu Telekomunikāciju institūtā un darīja promocijas darba izstrādi iespējamu. Paldies par dotajiem padomiem darba izstrādes gaitā un pacietību ilgajās konsultācijās.

Pa šiem gadiem Telekomunikāciju institūtā man ir bijusi tā iespēja sadarboties ar daudziem pētniekiem. Vēlos pateikties Vjačeslavam Bobrovam un Jurgim Poriņam, kas bija mani pirmie telpas biedri un spēja izturēt un sniegt iedvesmojošas atbildes uz maniem daudzajiem jautājumiem. Paldies par palīdzību darba uzsākšanai gan ar simulācijas programmām, gan arī ar mēriekārtām laboratorijā. Tas deva neatsveramu atbalstu. Paldies maniem pašreizējiem telpas biedriem Andim Supem, Sandim Spolītim, Aleksejam Udaļcovam un Sergejam Olonkinam par draudzīgo atmosfēru.

Paldies profesoram Andrim Ozolam par konsultācijām, kurās saņēmu atbildes uz daudzajiem neskaidrajiem jautājumiem un guvu iedvesmu tālākam darbam.

Liela daļa no pētījumu rezultātiem iegūti prakses laikā Dānijas Tehniskajā universitātē, sadarbojoties ar Fotonikas institūta un Wuhan Nacionālās Optoelektronikas laboratorijas zinātniekiem. Paldies profesoram Christophe Peucheret par pieņemšanu savā grupā un iespēju veikt pētījumus un socializēties kopā ar daudziem jaunajiem pētniekiem: Zohreh Lali-Dastjerdi, Yi An, Meng Xiong, Bo Huang, Francesco Da Ros un citiem.

SIA „Agilent Technologies” un SIA „Exfo” pateicība par izrādīto pretimnākšanu, piegādājot pētījumu veikšanai vairākas nozīmīgas mēriekārtas. Paldies arī daudzajiem studentiem, kuriem man bija iespēja vadīt noslēguma darbu izstrādi.

Liela pateicība manam audžu vectēvam Pēterim Bolšaitis par sniegto atbalstu tajā mirklī, kad tas bija visvairāk nepieciešams. Tas iedeva man stingru pamatu zem kājām un motivēja uz arvien augstākiem sasniegumiem. Lielākā daļa no manas vēlmes izstrādāt promocijas darbu ir saistīta ar iedvesmojošiem piemēriem, labiem un atsaucīgiem vārdiem. Paldies Vītola fonda vadītājam Vitai Diķei, kura noticeja maniem nākotnes plāniem.

Paldies mātei Janīnai un brālim Aivaram par sniegto atbalstu promocijas darba izstrādē. Visbeidzot vislielākais paldies manai sievai Nellijai un meitām Helēnai un Patrīcijai, kuras spēja izturēt manas prombūtnes un ilgās darba stundas. Jūsu atbalsts ir nenovērtējams.

Un tiem, kurus es varētu būt aizmirsis pieminēt šeit, es vēlētos izteikt vissirsnīgāko atvainošanos. Paldies Jums visiem par pagātnes un nākotnes sadarbību!

ANOTĀCIJA

Darba nosaukums:

„Viļņa garuma filtru analīze un realizācija šķiedru optikas pārraides sistēmās”;

Darba autors:

Oskars Ozoliņš;

Darba saturs:

Ņemot vērā strauju kopējo patērētāju datu apjoma pieaugumu, kas pēc Cisco pētījumu prognozēm pieaugs par 32% katru gadu un 2016. gadā sasniegs 82 560 PB mēnesī [27], nepieciešams meklēt jaunus risinājumus optisko sakaru sistēmu parametru uzlabošanai. Pasaulē novērojama tendence, ka no 10 Gbit/s datu pārraides ātruma vienā kanālā WDM sistēmā notiek pakāpeniska pāreja uz 40 Gbit/s un 100 Gbit/s datu pārraides ātruma vienā kanālā [47]. Sakarā ar straujo optisko sakaru sistēmu attīstību nepieciešams noskaidrot ekspluatācijā lietoto viļņa garuma filtru pielietojumu ierobežojumus, kā arī meklēt efektīvākus risinājumus, lai viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas padarītu elastīgākas.

Promocijas darbs veltīts esošo viļņa garuma filtru izpētei un parametru analīzei viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās, kā arī jauna veida viļņa garuma filtru iespēju un ierobežojumu novērtējumam pilnīgi optiskās sakaru sistēmās. Rezultātā promocijas darbā ir apkopots pabeigts pētījumu posms, kurā viļņa garuma filtru pielietošanas iespējas novērtētas gan pašreizējās, gan nākotnes optisko šķiedru sakaru sistēmās.

Darba apjoms:

143 lappuses, darbā ir 3 tabulas, 84 attēli, 164 literatūras avoti un 5 pielikumi.

ANNOTATION

Title of the thesis:

„Analysis and Realization of Wavelength Filters in Fiber Optic Transmission Systems”;

Author of the thesis:

Oskars Ozoliņš;

Content of the thesis:

It is necessary to find solutions for optical transmission system's parameters improvement because of rapid overall increase of consumer data amount that by the Cisco forecasts will grow by 32% every year and in 2016 will reach 82 560 PB per month [27]. The tendency in the world is that the 10 Gbit/s data rate per channel in wavelength division multiplexing system is being progressively switched to 40 Gbit/s and 100 Gbit/s data rate per channel [47]. Due to the rapid development of optical transmission systems wavelength filter parameter limitations must be investigated and also new solutions must be found for more flexible and scalable wavelength division multiplexing systems.

Doctoral thesis is devoted to study of wavelength filters and its parameters in wavelength division multiplexing systems, as well as, development and estimation of novel filter applications in all-optical communication systems. As a result, the thesis summarizes the completed research in which the wavelength filters applications are evaluated in both current and future optical fiber communication systems.

Thesis contains:

143 pages, 3 tables, 84 figures, 164 literature sources and 5 appendices.

PRIEKŠVĀRDS

„In any case, wavelength as a parameter is very likely to provide more functionality, and as a consequence wavelength filters will become even more important than they are already today”.

/Dr. Herbert Venghaus (Herz Heinrich Institute, Germany), 2006/

(Jebkurā gadījumā viļņa garums kā parametrs ļoti iespējams spēs piedāvāt plašāku funkcionalitāti un tā rezultātā viļņa garuma filtri kļūs vēl nozīmīgāki, nekā tie ir jau šodien.)

SATURS

| | |
|---|----|
| SAĪSINĀJUMU SARAKSTS | 9 |
| IEVADS | 14 |
| 1. VIĻŅA GARUMA FILTRU ATTĪSTĪBAS VIRZIENU NOVĒRTĒJUMS VIĻŅGARUMDALES BLĪVĒŠANAS SISTĒMĀS..... | 17 |
| 1.1. Viļņa garuma filtri WDM sistēmas pamata arhitektūrā..... | 17 |
| 1.1.1. Viļņa garuma filtru nozīme optisko pārraides sistēmu attīstībā | 18 |
| 1.1.2. Viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas blokshēma | 20 |
| 1.2. Klasifikācija optiski blīvētās sistēmās | 27 |
| 1.2.1. Optiskie joslas un iegriezuma filtri..... | 28 |
| 1.2.2. Pastiprinājumu izlīdzinošie filtri | 29 |
| 1.2.3. Dispersiju kompensējošie filtri..... | 29 |
| 1.3. WF fiziskās realizācijas | 30 |
| 1.3.1. Fabrī Pero interferometrs..... | 30 |
| 1.3.2. Maha-Cendera interferometrs..... | 30 |
| 1.3.3. Plāno kārtiņu filtri..... | 31 |
| 1.3.4. Šķiedras Brega režģu filtri..... | 32 |
| 1.3.5. Viļņvadu masīva režģa filtri | 33 |
| 1.3.6. Difrakcijas režģu filtri | 34 |
| 1.3.7. Mikroriņķu rezonatori..... | 34 |
| 1.3.8. Fizisko realizāciju parametri | 35 |
| 1.4. Filtru parametru novērtēšanas aktualitāte | 38 |
| 2. KOMPLEKSO PĀRVADES FUNKCIJU APRAKSTS UN NOVĒRTĒŠANA | 45 |
| 2.1. Viļņa garuma filtru matemātisks apraksts..... | 45 |
| 2.1.1. Kompleksā pārvades funkcija..... | 45 |
| 2.1.2. Amplitūdas un fāzes relācijas | 48 |
| 2.1.3. Matemātiskās funkcijas WF aproksimācijai..... | 51 |
| 2.2. Komplekso pārvades funkciju mērījumi..... | 53 |
| 2.2.1. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju mērījumi | 54 |
| 2.2.2. Fāzes pārvades funkciju mērījumi | 58 |
| 2.3. Algoritms viļņa garuma filtru skaitliskai pārbaudei optiski blīvētās sistēmās | 64 |
| 2.3.1. Simulācijas programma viļņa garuma filtru pārbaudei | 64 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 2.3.2. | Algoritma blokskhēma un datu faila formāts | 65 |
| 2.3.3. | Optisko sistēmu parametru izvēle skaitliskās simulācijās | 68 |
| 2.4. | Kopsavilkums | 69 |
| 3. | WDM SISTĒMĀS PIELIETOTO VIĻŅA GARUMA FILTRU NOVĒRTĒJUMS.... | 70 |
| 3.1. | Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas novērtējums | 70 |
| 3.1.1. | Caurlaides joslas platuma noteikšanas kritēriji | 70 |
| 3.1.2. | Efektīvās caurlaides joslas platuma noteikšanas blokskhēma..... | 71 |
| 3.1.3. | Mērījumu rezultāti 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s gadījumā..... | 73 |
| 3.2. | Komplekso pārvades funkciju nozīme optiski blīvētās sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanā..... | 80 |
| 3.2.1. | Spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanas metodika | 80 |
| 3.2.2. | Mērījumu rezultāti 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s gadījumā..... | 82 |
| 3.3. | Efektīvākā kompleksā pārvades funkcija DWDM sistēmā | 90 |
| 3.3.1. | Efektīvākās kompleksās pārvades funkcijas novērtēšanas metodika | 91 |
| 3.3.2. | Skaitliska pārbaude optiski blīvētās sistēmās | 94 |
| 3.4. | Kopsavilkums | 101 |
| 4. | MRR REALIZĀCIJA PILNĪGI OPTISKĀS SISTĒMĀS..... | 103 |
| 4.1. | Mikroriņķa rezonatoru matemātisks apraksts un klasifikācija | 103 |
| 4.2. | Kaskādē saslēgšanas iespējas novērtējums 40 Gbit/s optiskās sistēmās | 106 |
| 4.2.1. | Izgatavotā MRR viļņa garuma filtra parametri..... | 107 |
| 4.2.2. | Recirkulācijas cilpas mērījumu maketa izveide | 109 |
| 4.2.3. | MRR filtra ietekme uz 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK signāliem | 110 |
| 4.3. | Modulācijas formāta pārveide ar viena riņķa MRR..... | 114 |
| 4.3.1. | Matemātiska modelēšana un pārvades funkcijas izvēle | 115 |
| 4.3.2. | MRR rezonatora izgatavošana un iekārtas parametri | 119 |
| 4.3.3. | Mērījumu shēmas izveide un pētījumu metode..... | 121 |
| 4.3.4. | 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ | 121 |
| 4.4. | Kopsavilkums | 124 |
| | NOBEIGUMS | 126 |
| | LITERATŪRA | 129 |
| | PIELIKUMU SARAKSTS..... | 143 |

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

AOM – Acousto-Optical Modulator – akustiski-optiskais modulators

ATF – Amplitude Square Transfer Function – amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija

AR – Auto Regressive – auto regresīvs

ARMA – Auto Regressive Moving Average – auto regresīvs mainīga vidējā

ASCII – American Standard Code for Information Interchange – Amerikas koda standarts informācijas apmaiņai

ASE – Amplified Spontaneous Emission – pastiprināta spontānā emisija

AWG – Arrayed Waveguide Gratings – viļņvadu masīva režģi

B

BER – Bit Error Ratio – bitu kļūdu attiecība

C

CD – Chromatic Dispersion – hromatiskā dispersija

CSRZ – Carrier Suppressed Return to Zero - nomāktas nesējfrekvences ar atgriešanos pie nulles

CW – Continuous Wave – nepārtraukta starojuma

D

DCF – Dispersion Compensating Fiber – dispersiju kompensējošā šķiedra

DCM – Dispersion Compensating Module – dispersiju kompensējošais modulis

DeMUX – Demultiplexor - atblīvētājs

DFB – Distributed Feed Back – izkliedētā atgriezeniskā saite

DG – Diffraction Grating – difrakcijas režģis

DPSK – Differential Phase Shift Keying – diferenciāla fāzes modulācija

DUT – Device Under Test – mērāmā iekārta

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – blīva viļņgarumdales blīvēšana

E

EDC – Electronic Dispersion Compensation - elektroniskā dispersijas kompensācija

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – erbijs leģētās šķiedras pastiprinātājs

ELPF – Electrical Low Pass Filter – elektriskais zemfrekvenču filtrs

ER – Extinction Ratio – augstā un zemā jaudas līmeņa attiecība

ETDM – Electrical Time Division Multiplexing – elektriskā laikdales blīvēšana

EYE – Eye Diagram Analyser – acs diagrammas analizators

F

FBG – Fiber Bragg Grating – šķiedras Brega režģis

FDSS – Frequency Domain Split Step - frekvences apgabala sadalītā soļa metode

FIR – Finite Impulse Response – galīgas impulsa reakcijas

PTF – Phase Transfer Function – fāzes pārvades funkcija

FPI – Fabry Perot Interferometer – Fabrī Pero interferometrs

FSR – Free Spectral Range – brīvā spektrālā josla

FWHM – Full Width Half Maximum – pilns platums līmenī viena puse

G

GD – Group Delay – grupas aizture

GFF – Gain Flattening Filter – pastiprinājumu izlīdzinošais filtrs

I

IIR – Infinite Impulse Response – bezgalīgas impulsa reakcijas

ITU – International Telecommunications Union – Starptautiskā Telekomunikāciju savienība

M

MA – Moving Average – mainīga vidējā

MMF – Multi Mode Fiber – daudzmodu optiskā šķiedra

MPS – Modulated Phase Shift – modulētā fāzes nobīde

MRR – Micro Ring Resonator – mikroriņķa rezonators

MUX – Multiplexor – blīvētājs

MZI – Mach-Zehnder Interferometer – Maha-Cendera (vācu val. Mach-Zehnder) interferometrs

MZM – Mach-Zehnder Modulator – Maha-Cendera modulators

N

NLSE – Nonlinear Srodinger Equation – nelineārais Šrēdingera (vācu val. Schrödinger) vienādojums

NOE – Nonlinear Optical Effects – nelineārie optiskie efekti

NOLM – Nonlinear Optical Loop Mirror – nelineārās optiskās cilpas spogulis

NRZ – Non Return to Zero – bez atgriešanās pie nulles

O

OADM – Optical Add Drop Multiplexor – optiskais ievades-izdales blīvētājs

OBPF – Optical Band Pass Filter – optiskais joslas filtrs

OOK – On Off Keying – intensitātes modulācija

OSA – Optical Spectrum Analyser – optiskā spektra analizators

OSNR – Optical Singal to Noise Ratio – optiskā signāla trokšņa attiecība

OTDM – Optical Time Division Multiplexing – optiskā laikdales blīvēšana

P

PB – Petabyte – petabaits

PC – Polarization Controller – polarizācijas kontrolieris

PIN – PIN – fotodiode

PMD – Polarization Mode Dispersion – polarizācijas modu dispersija

POL – Polarizer – polarizators

R

RF – Radio Frequency – radio frekvence

RZ – Return to Zero – ar atgriešanos pie nulles

Rx – Receiver - uztvērējs

S

SMF – Single Mode Fiber – vienmodu optiskā šķiedra

SOA – Semiconductor Optical Amplifier – optiskais pusvadītāju pastiprinātājs

SOI – Silicon on Insulator – silīcijs uz izolatora

SSMF – Standard Single Mode Fiber – standarta vienmodu optiskā šķiedra

T

TDSS – Time Domain Split Step - laika apgabala sadalītā soļa metode

TFF – Thin Film Filter – plāno kārtiņu filtrs

TLS – Tunable Laser Source – pārskrūvējams lāzers

Tx – Transmitter – raidītājs

V

VCSEL - Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser – no virsmas izstarojošs lāzers ar vertikālu rezonatoru

VOA – Variable Optical Attenuator – pārskrūvējams optiskais vājinātājs

W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana

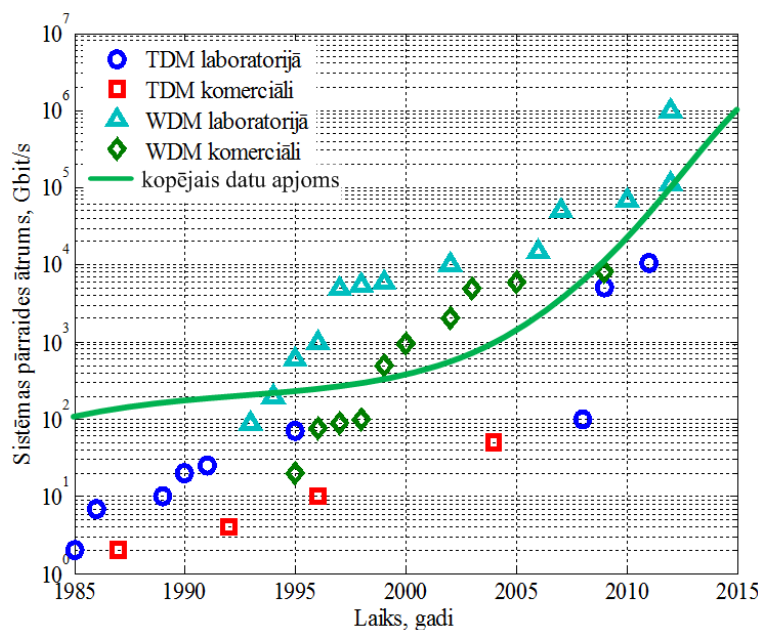
WF – Wavelength Filter – viļņa garuma filtrs

IEVADS

Optisko šķiedru sakaru sistēmu attīstības aizsākumi ir meklējami ievērojamo pētnieku K. C. Kao un G. A. Hockham klasiskajā rakstā 1966. gadā [64]. Rakstā izteikta atziņa, ka optiskā šķiedra būs konkurētspējīga ar esošajiem koaksiālajiem kabeļiem, ja tiks sasniegts vājinājums 20 dB/km. Šāds vājinājuma līmenis sasniegts jau 1970. gadā vienlaicīgi ar nepārtraukta starojuma pusvadītāju lāzera avota izstrādi, kas darbojās istabas temperatūrā [6, 52]. Pirmās paaudzes optiskās šķiedras sakaru sistēmās izmantoti lāzeri (~850 nm viļņa garums) un sasniegts pārraides ātrums līdz 45 Mbit/s. Kā pārraides vide izmantota daudzmodu optiskā šķiedra (MMF) [127]. Savukārt, 1975. gadā ECOC (angļu val. European Conference on Optical Communications) konferencē tika prezentēta 400 Mbit/s pārraide pa gradienta MMF [57]. Ap 1980. gadu parādījās otrās paaudzes optiskās pārraides sistēmas, kurās izmantota vienmodu optiskā šķiedra (SMF) [71, 80]. Šīs sistēmas darbojās viļņa garuma diapazonā ap 1300 nm un pēc tam parādījās datu pārraide arī viļņa garuma diapazonā ap 1550 nm ar ātrumu līdz 1.7 Gbit/s [2]. Šie abi pārraides logi SMF ir norobežoti ar OH- jonu absorbcijas maksimumu pie 1390 nm [90]. Šis absorbcijas maksimums ir ievērojami samazināts jaunākajās optiskajās šķiedrās, kā rezultātā pārraidei pieejams viļņa garuma diapazons no 1270 līdz 1630 nm. Savukārt, trešās paaudzes optisko šķiedru sakaru sistēmas darbojās ar pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s viļņu garuma diapazonā ap 1550 nm un komerciāli tās ieviesa 20. gadsimta astoņdesmito gadu beigās [26, 70]. Ceturtās paaudzes optiskās pārraides sistēmas realizācijās tika izmantoti pusvadītāju lāzeri ar iekšējo modulāciju un optiskā signāla tiešā uztveršana [43]. Optisko šķiedru ieguldīšana ir dārgs process, un tāpēc liela nozīme ir sistēmas pilnveidošanai, lai efektīvi izmantotu tās caurlaides joslu, kas sasniedz 50 THz viļņa garuma diapazonā no 1200 nm līdz 1600 nm [89].

Datu pārraides ietilpības palielināšana vienai optiskai šķiedrai ir iespējama divos atšķirīgos veidos: pirmais veids - blīvēšana, kurā vairākus signālus apvieno pārraidīšanai kopējā kanālā ar laikdales metodi, otrais veids - blīvēšana, kurā atsevišķus signālus apvieno pārraidīšanai ar viļņgarumdales metodi. Pirmo veidu dēvē par optisko laikdales blīvēšanu (OTDM). Ar šo tehniku vienā datu kanālā zinātniskās laboratorijās panākti datu pārraides ātrumi 2.56 Tbit/s [141], 5.1 Tbit/s [51] un 10.2 Tbit/s [124], tomēr, eksistējošās sistēmās šāds ātrums vienā kanālā nebūs nepieciešams tuvākajā nākotnē. Jebkurā gadījumā OTDM ļauj izmantot nelielu daļu no kopējās optiskās šķiedras caurlaides joslas. Kā minēts iepriekš, tad ir arī otrā pieeja optiskās šķiedras caurlaides joslas efektīvākai izmantošanai. Šī pieeja ir viļņgarumdales blīvēšana (WDM), kad datu pārraides kanāliem vienā optiskajā šķiedrā tiek

izmantoti dažādi viļņa garumi. WDM kā tehnoloģija sāka plašāk pētīt pagājušā gadsimta septiņdesmitajos gados un līdz šim brīdim ar tās palīdzību ir realizēta vairāku simtu kanālu pārraide pa vienu optisko šķiedru. 20. gadsimta 90. gados tika izstrādāts ar erbija leģētas optiskās šķiedras (EDFA) pastiprinātājs. Izgudrojums deva iespēju veidot optiskās šķiedras līnijas daudz garākas, salīdzinot ar ceturto optisko šķiedru sakaru sistēmu paaudzi. Vienlaicīgi ar EDFA izgudrošanu attīstījās WDM, sniedzot iespēju palielināt datu pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s vienā kanālā [8]. Sākot ar 1992. gadu kopējais datu pārraides ātrums vienā optiskajā šķiedrā pieauga eksponenciāli līdz 2001. gadā tika sasniegti 10 Tbit/s [2]. Savukārt, 2010. gadā tika sasniegta 69.1 Tbit/s robeža ar pārraides attālumu 240 km [128]. Šie kopējie datu pārraides ātrumi sasniegti kā pārraides vidi izmantojot SMF. Savukārt, 2011. gada 15. augustā publicēts raksts, kurā demonstrēts kopējais datu pārraides ātrums 112 Tbit/s ar pārraides attālumu 76.8 km vienā optiskajā šķiedrā [161]. Telpiskā dalīšana izmantota papildus WDM tehnoloģijai, kurā tiek izmatotas jauna veida optiskās šķiedras ar vairākiem serdeņiem. Jāmin, ka 2012. gada 19. septembrī „ECOC2012” konferencē tika prezentēta 1.01 Pbit/s pārraide pa vienu optisko šķiedru [135]. Kā redzams no 0.1. attēla, tad kopējais vidējais pieprasījums pēc datu apjoma pieaug arvien straujāk. Neapšaubāms fakts ir tas, ka WDM risinājumi ir spējusi nodrošināt atbilstošu kopējo sistēmas datu apjomu [53].



0.1.att. Sistēmas pārraides ātrums un kopējais pieprasījums pēc datu apjoma [53]

No iepriekš minētajiem faktiem secināms, ka WDM ir pamata tehnoloģija, ar kuras palīdzību optiskās šķiedras caurlaides josla var tikt izmantota daudz efektīvāk. Pamata elementi šādās sistēmās ir stabila viļņa garuma raidītāji (pusvadītāju lāzeri) un viļņa garuma

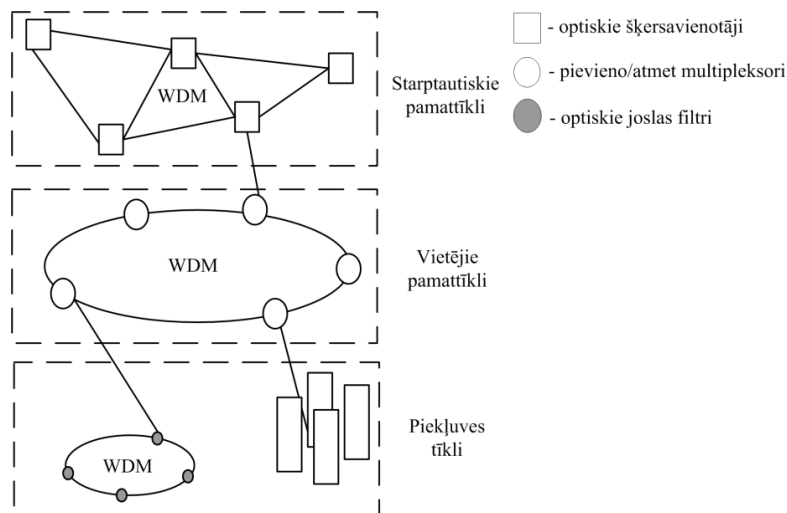
filtri (WF), kuri nodrošina noteikta viļņa garuma vai viļņa garuma diapazona izdalīšanu, pievienošanu, nomešanu un virzīšanu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Dažādu veidu viļņa garuma filtri ir realizēti WDM sistēmās. Viļņa garuma filtri optiski blīvētās sistēmās ir gan pielāgojumi no labi pazīstamiem optiskiem elementiem (piemēram, difrakcijas režģi vai plāno kārtiņu filtri), gan specifiskas iekārtas no planārās integrētās optikas (piemēram, viļņvadu masīva režģi), kā arī tie var būt cieši saistīti ar optiskās šķiedras struktūru (piemēram, šķiedras Brega režģi). Sakarā ar straujo pārraides ātruma pieaugumu liela nozīme jaunākās paaudzes un nākotnes WDM sistēmās jāpievērš viļņa garuma filtru parametru izvēlei. Promocijas darbā tika veikts trīs etapu pētījums. Sākumā veikta analītiska esošo WDM sistēmu viļņa garuma filtru izpēte un parametru analīze, kuras galvenie rezultāti redzami 1. tabulā. Nākošais pētījumu etaps ir esošo tehnoloģiju pielietojumu ierobežojumu novērtēšana jaunās paaudzes WDM sistēmās. Noslēdzošais pētījumu etaps saistīts ar jauna veida viļņa garuma filtra prototipa izstrādi un tā parametru ierobežojumu novērtējumu pilnīgi optiskās WDM sistēmās. Visu etapu rezultāts ir pabeigts promocijas darbs, kurā viļņa garuma filtru pielietošanas iespējas novērtētas gan pašreizējās, gan nākotnes optisko šķiedru sakaru sistēmās.

1. VIĻŅA GARUMA FILTRU ATTĪSTĪBAS VIRZIENU NOVĒRTĒJUMS VIĻŅGARUMDALES BLĪVĒŠANAS SISTĒMĀS

Informācijas un sakaru tehnoloģijas aug un attīstās nepārtraukti [41]. Īpaši straujš pieaugums novērots dažu pēdējo desmitgažu laikā. Pašreizējā datu pārraidē dominē optisko šķiedru sakaru sistēmas [10]. Galvenais iemesls ir lielā SMF caurlaides josla, kas sasniedz 50 THz un vairāk viļņa garuma diapazonā no 1200 nm līdz 1600 nm [89]. Lai šo potenciālu izmantotu pilnībā, nepieciešams izmantot WDM tehnoloģiju, kurā daudzi datu pārraides kanāli ar dažādiem viļņu garumiem tiek apvienoti vienā SMF. Viens no būtiskākajiem uzdevumiem ir šos datu kanālus SMF izejā kvalitatīvi atdalīt vienu no otra [138].

1.1. Viļņa garuma filtri WDM sistēmas pamata arhitektūrā

WDM sistēmās viļņa garuma filtri ir nepieciešami, lai veiktu sistēmas kanālu ar dažādiem viļņa garumiem apvienošanu, atdalīšanu WDM sistēmās un virzīšanu pa optisko tīklu (skat. 1.1.att.).



1.1.att. Globāla optiskā tīkla shematisks piemērs [136, 138]

Zemāk apkopotas funkcijas, ko veic viļņa garuma filtri:

- viena vai vairāku kanālu izdalīšana no lielāka kanālu skaita WDM sistēmās,
- viena vai vairāku kanālu pievienošana, atmešana un virzīšana pēc viļņa garuma optiskajā pārraides tīklā,
- viena kanāla viļņu garuma atdalīšana no nevēlamiem trokšņiem ar dažādiem viļņa garumiem,
- vairāku viļņa garumu apvienošana ar minimāliem zudumiem,

- dispersijas ietekmes kompensācija un pastiprinājuma raksturliķnes izlīdzināšana optiskajos pastiprinātājos [35].

1.1.1. Viļņa garuma filtru nozīme optisko pārraides sistēmu attīstībā

Pieaugot WDM sistēmas kanāla datu pārraides ātrumam, kanālu skaitam un samazinoties intervālam starp kanāliem, īpaša uzmanība jāpievērš viļņa garuma filtra fiziskās realizācijas un parametru izvēlei [138]. Bieži tas ir kompromiss starp ienestiem zudumiem, blakus kanālu izolāciju un ienesto dispersiju. Viļņa garuma filtru parametriem jābūt noturīgiem arī pret klimatiskām un konstruktīvām ietekmēm: paaugstinātu mitrumu, mainīgu darba temperatūru un dažādām mehāniskām iedarbēm [35]. Plašāk pielietotās tehnoloģijas WDM sistēmās viļņa garuma filtru realizācijai ir plāno kārtiņu filtri (TFF), šķiedras Brega režģi (FBG), viļņvadu masīva režģi (AWG) un difrakcijas režģi (DG) [35, 132, 138]. TFF, FBG un AWG plašāk pielietotas komerciālās un ekspluatācijā esošās optiskās blīvēšanas sistēmās [39, 132, 137]. Savukārt, difrakcijas režģu filtru fiziskās realizācijas var tikt veidotas ar pārskatāmajiem parametriem pēc viļņa garumiem un plašāku pielietojumu pagaidām ieguvušas tikai zinātniskos pētījumos [2, 138].

Kā zināms no vēstures liecībām, tad pirmo difrakcijas režģi 1785. gadā radīja amerikāņu astronoms D. Rittenhouse [138]. Savukārt, tilpuma difrakcijas režģu tehnoloģija WDM sistēmās viļņa garuma filtru realizācijā parādījās 2006. gadā. Uzņēmums „YENISTA” izstrādāja pārskatājamu viļņa garuma filtru ar maināmu centrālo viļņa garumu un caurlaides joslas platumu, kas ir piemērots kanālu izdalīšanai WDM sistēmas ar pārraides ātrumu līdz 160 Gbit/s [116]. Ar šādu zinātnisku aparatūru iespējams veikt viļņa garuma filtru efektīvu parametru izvēli WDM sistēmās.

TFF bija pirmie viļņa garuma filtri, kas plaši tika pielietoti WDM sistēmas sākot ar 1990. gadu. Šis fakts skaidrojams ar to, ka optiskie interferences pārklājumi tiek ražoti jau no 1930. gada. Kā rezultātā tehnoloģija ir pielāgojama viļņa garuma filtru izveidei ar minimāliem ienestiem zudumiem, augstu blakus kanālu izolāciju, augstu centrālā viļņa garuma stabilitāti un dažādiem caurlaides joslas platumiem [35, 101, 138]. Iekārtu parametrus detalizēti var apskatīt 1.tabulā. Sākotnēji 1990. gadā parādījās TFF iekārtas ar 200 GHz caurlaides joslas platumu, tomēr, vēlāk tika sasniegts 100 GHz caurlaides joslas platums [41, 75]. Savukārt, jau 2002. gadā komerciāli kļuva pieejamas iekārtas ar 50 GHz caurlaides joslas platumu [117].

Kā nākošo viļņa garuma filtra realizāciju jāmin FBG. Šie elementi realizēti uz Brega difrakcijas, kuru pirmo reizi kā fizikālu parādību ierosināja W.L. Bregs 1912.gadā kā metodi,

ar kuras palīdzību analizēt kristālu struktūras. W.L. Bregs un viņa tēvs W.H. Bregs izmantoja rentgenstarus un pētīja to difrakciju izejot cauri dažādiem kristāliem [15]. 1915. gadā W.L. Bregs un viņa tēvs W.H. Bregs tika apbalvoti ar Nobela Prēmiju par sasniegumiem kristālisko struktūru analizē. W.L. Bregs bija 25 gadus vecs, kad saņēma šo apbalvojumu, kas padarīja viņu par vienu no jaunākajiem Nobela Prēmijas ieguvējiem [46]. Savukārt, optiskās šķiedras foto jutība pirmo reizi tika novērota 1978. gadā ar germāniju leģētā silīcija šķiedrā K. Hila un viņa darba biedru eksperimentos Komunikāciju Pētījumu Centrā Kanādā [55, 65]. Pagrieziena punkts Brega režģu attīstībā, kas to padarīja no zinātniska kurioza par praktiski pielietojamu viļņa garuma filtru WDM sistēmās, bija sāna ieraksta tehnoloģija, kas tika demonstrēta Apvienoto Tehnoloģiju Izpētes Centrā. 1989. gadā G. Meltz un darba biedri parādīja, ka apstarojot optiskās šķiedras sānus ar periodisku intensitātes ainu, kura iegūta pārklājoties diviem koherentiem 244 nm lāzera stariem, tiek veidota periodiska optiskās šķiedras serdeņa laušanas koeficienta izmaiņa – periodisks šķiedras Brega režģis [88, 87]. FBG ir iespējams izveidot ar ļoti šauru caurlaides joslas platumu ~ 0.1 nm, kas ir aktuāli augsta blīvuma WDM sistēmas pētījumos. FBG var izveidot ar labu centrālā viļņa garuma precizitāti (~ 0.05 nm), zemiem ienestiem zudumiem (> 1 dB), augstu blakus kanālu izolācijas vērtību (>30 dB). Savukārt, komerciāli pieejamu iekārtu parametri apkopoti 1.tabulā [65, 78].

Pirmās ziņas par AWG iekārtām parādījās divdesmitā gadsimta astoņdesmito gadu beigās, kad ar publiskiem ziņojumiem klajā nāca Smits 1988. gadā, vēlāk Takahasi 1990. gadā un Dragone 1991. gadā [63, 66]. AWG optiskās ierīces literatūrā tiek dēvētas dažādi: par fāzes režģiem (angļu val. Phased Arrays), viļņvadu masīva režģiem (angļu val. Arrayed Waveguide Gratings) un par viļņvadu režģa maršrutētājiem (angļu val. Waveguide Grating Routers). Akronīms AWG ir biežāk lietotais un arī turpmāk tekstā tiks izmantots tieši šis apzīmējums [2]. Dominējošā tehnoloģija, kas tiek pielietota sakaru nozarē ir uz silīcija bāzes veidotas AWG ierīces, kuru priekšrocība ir to tehnoloģiskā savietojamība ar optiskajām šķiedrām [138]. Vēl iespējams izveidot no InP veidotas AWG iekārtas, kuru priekšrocība, salīdzinot ar silīcija veidotiem AWG ir iespēja tos monolītiski integrēt ar tādām iekārtām kā lāzeriem, pusvadītāju optiskiem pastiprinātājiem, modulatoriem, komutatoriem, viļņa garumu pārveidotājiem, signāla reģeneratoriem un detektoriem. Negatīvais faktors ir to samērā lielā atkarība no temperatūras (0.01 nm/C° [35]), kā arī liels fiziskais izmērs [2, 138]. Uz silīcija bāzes veidotie AWG tirgū parādījās 1994. gadā un joprojām ieņem vadošo lomu salīdzinājumā ar InP iekārtām. 1996. gadā zinātniskos pētījumos tika izstrādātas tādas AWG

iekārtas, kas varēja atdalīt 128 kanālus ar kanālu intervālu 25 GHz, savukārt, 2000. gadā šis kanālu skaits tika dubultots, saglabājot nemainīgu kanālu intervālu [3].

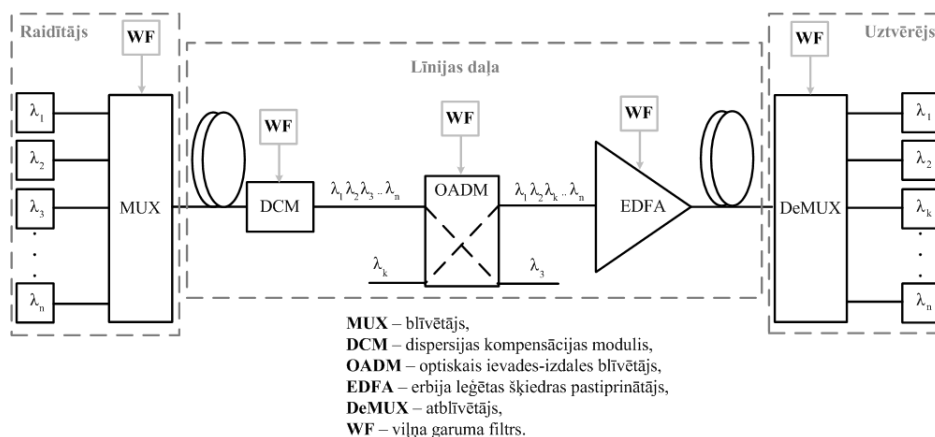
Pārskatājami DG viļņa garuma filtri uz doto brīdi vairāk piemēroti laboratorijas apstākļiem, kad nepieciešama precīza filtra centrālās frekvences vērtība ($\pm 0.005\text{ nm}$) un maināma caurlaides josla [2, 138], savukārt, komerciālās WDM sistēmās viļņa garumu filtru realizācijās priekšroka tiek dota trim tehnoloģijām: TFF, FBG un AWG [11, 39, 137]. FBG tehnoloģija nodrošina augstu blakus kanālu izolāciju, bet ir jālieto optiskie cirkulatori, kas palielina iekārtu fizisko izmēru. Šī iemesla pēc TFF ir priekšrocības, jo nav nepieciešams izmantot papildus optiskos elementus [75]. Šīs divas tehnoloģijas izmanto WDM sistēmās ar kanālu skaitu mazāku par sešpadsmit. Savukārt, AWG tehnoloģija paredzēta lielākam kanālu skaitam. Šo viļņa garumu filtru fizisko realizāciju izveide bija viens no galvenajiem priekšnosacījumiem WDM sistēmu attīstībā un efektīvākā optiskās šķiedras caurlaides joslas izmantošanā. Nav iespējams apgalvot, ka nākotnes sakaru sistēmās tiks izmantoti tikai vienas fiziskās realizācijas viļņa garumu filtri. Lielāka pārliecība ir par to, ka dažādās tehnoloģijas tiks apvienotas vairākās filtrēšanas pakāpēs, minimizējot ienestos zudumus un dispersiju, kas ir būtiski, palielinot datu pārraides ātrumu konkrētā WDM sistēmas kanālā. Tomēr efektīvākas darbības nodrošināšanai nepieciešams noskaidrot esošo viļņa garumu filtru komplekso pārvades funkciju radītos ierobežojumus augsta datu pārraides ātruma un liela abonētu skaita gadījumā gan pašreizējās, gan nākotnes optisko šķiedru sakaru sistēmās, kā arī izstrādāt jauna veida viļņa garumu filtrus, kas būtu paredzēti integrēšanai ar pusvadītāju iekārtām un līdz ar to būtu nepieciešams sasniegt nanometru izmērus. Tāda viļņa garumu filtra pielietojuma ierobežojumi un iespējas apskatītas darba noslēdzošajā nodaļā.

1.1.2. Viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas blokhēma

Lai sniegtu plašāku priekšstatu par viļņa garumu filtru nepieciešamību un pielietojuma iespējām, ir izveidota WDM sistēmas blokhēma, kurā ir redzami daudzi viļņa garumu filtru pielietojumi [121, 138]. WDM sistēmā iespējams nodalīt trīs daļas: optiskais raidītājs, optiskā līnija un optiskais uztvērējs. Turpmākais WDM sistēmas komponentu apskats veidots saistībā ar 1.2. attēlā redzamo blokhēmu.

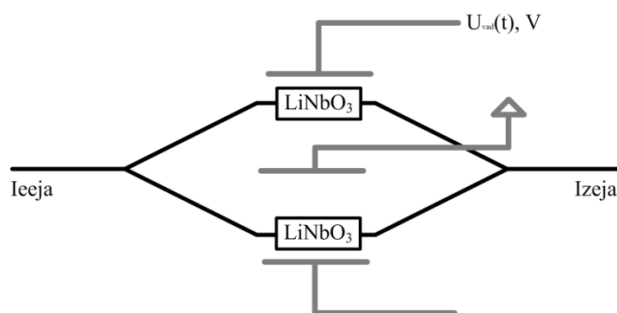
Tipisks optiskais raidītājs ar optiskā signāla ārējo modulāciju sastāv no kodēta datu avota, lāzera, ārējā modulatora un blīvētāja, kurā daudzkanālu sistēmas gadījumā apkopoti vairāki viļņa garumu filtri. Darbā izvēlēta optiskā signāla ārējā modulācija, jo ar to ir iespējams sasniegt drošāku un ātrdarbīgāku datu pārraidi. Optiski modulēta signāla iegūšanai

var izmantot gan iekšējo, gan ārējo lāzera starojuma intensitātes modulāciju [5]. Izvēli starp šīm divām metodēm nosaka pārraides ātrums, kuru nepieciešams sasniegt.



1.2.att. Shematiska WDM sistēmas uzbūve ar viļņa garuma filtru pielietojumiem [118, 138]

Pusvadītāju lāzери ar izkliedēto atgriezenisko saiti (DFB) ir visbiežāk sastopamie vienmodu tipa lāzери S (1460–1530 nm), C (1530–1565 nm) un L (1565–1625 nm) vienmodu optiskās šķiedras diapazonos [5, 138]. DFB lāzериem ir mazs spektra platumš [19, 72], augsta blakus modu nospiešana [123] un liela izejas optiskā jauda [38, 126, 134]. Alternatīvs risinājums ir no virsmas izstarojošs lāzери ar vertikālu rezonatoru (VCSEL). Tā priekšrocības ir zemāka temperatūras atkarība, mazāks enerģijas patēriņš augstāka pārraides ātruma gadījumā un efektīvāka salāgošana ar optiskajām šķiedrām [2, 3, 123]. Abu lāzери struktūra ir realizēta ar izkliedētiem Brega režģiem [50, 65, 139]. Ārējā modulācija realizēta Mahā-Cendera (vācu val. Mach-Zehnder) modulatorā (MZM), kas veidots uz LiNbO₃ kristāla bāzes (skat. 1.3.att.) [5].



1.3.att. MZM principiālā shēma

MZM darbības princips skaidrojams ar elektro – optisku efektu, kas izraisa laušanas koeficienta izmaiņu modulatora zarā, kuram pielikts augstfrekvenču elektriskais signāls. Savukārt, laušanas koeficienta izmaiņas izraisa dažādas signāla aiztures modulatora zaros, kas

novēd pie fāzes starpības interferometrā. Ieejas optiskais signāls tiek sadalīts ar sazarotāju divās ekvivalentās daļās, kuras izplatās abos MZM zaros. Ja netiek pielikts elektriskais lauks, tad abi signāli izejā pienāk vienlaicīgi un notiek konstruktīva interference, pretējā gadījumā notiek destruktīvā interference. Šādā veidā tiek realizēta optiskā signāla intensitātes modulācija [5, 144]. Iekārtas ienestais vājinājums ir atkarīgs no ieejas optiskā signāla polarizācijas stāvokļa. Pēc optiskā modulatora daudzkanālu sistēmās ir izvietots blīvētājs, kurš var sastāvēt no vairākiem viļņa garuma filtriem.

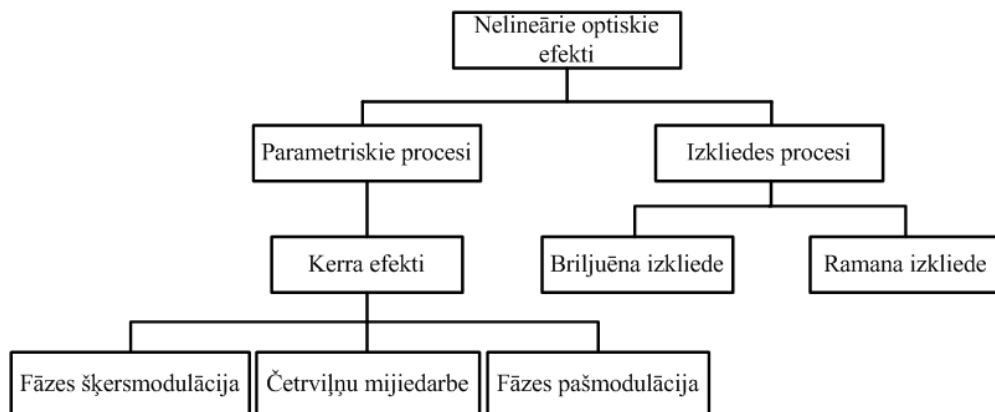
Optiskā līnijas daļa var sastāvēt no optiskās šķiedras, optiskā pastiprinātāja, dispersijas kompensatora un optiskā ievades-izdales blīvētāja. Kā pirmo apskatīsim optisko šķiedru. Optiskā lauka izplatīšanos optiskajā šķiedrā var aprakstīt, izmantojot Maksvela vienādojumus. No šiem vienādojumiem tiek izvests viļņu vienādojums, kas apraksta optiskā signāla izplatīšanos optiskajā šķiedrā [4, 126]:

$$\nabla^2 E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

kur c - gaismas ātrums vakuumā, E - elektriskā lauka vektors, μ_0 - magnētiskā konstante un P - vides polarizācija, kura ir atkarīga no elektriskā lauka un nelineārajā vidē to izsaka ar Teilora polinomu. No vienādojuma (1.1) signāla izplatīšanos var izteikt ar nelineāro Šrēdingera (vācu val. Schrödinger) (NLSE) vienādojumu skalāra formā [4, 126]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} A(z, t) = & \underbrace{-\frac{\alpha}{2} A(z, t)}_{\text{Vājinājums}} + \underbrace{j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} A(z, t)}_{\text{1. kārtas dispersija}} + \underbrace{\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial T^3} A(z, t)}_{\text{2. kārtas dispersija}} - \\ & - \underbrace{\frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial E}{\partial T} \left(|A(z, t)|^2 A(z, t) \right)}_{\text{Augstākās pakāpes nelineārais efekts}} - \underbrace{j \gamma |A(z, t)|^2 A(z, t)}_{\text{Kerra efekti}} - \underbrace{j \gamma T_R \frac{\partial}{\partial z} |A(z, t)|^2 A(z, t)}_{\text{Stimulētā Ramana izkliede}}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

kur α – optiskās šķiedras vājinājums, T – impulsa ilgums, T_R – Ramana efekta ierosināšanās slīpums, γ – optiskās šķiedras nelineārais koeficients. Ar vienādojumu (1.2) iespējams aprakstīt optiskā signāla izplatīšanās ierobežojumus optiskajā šķiedrā. Augstākās pakāpes nelineārais efekts netiek ņemts vērā, jo tas parādās sistēmās ar ļoti īsiem optiskajiem impulsiem < 1 ps [4, 5]. Lineārie šķiedras raksturlielumi ir optiskās šķiedras vājinājums, hromatiskā dispersija (CD) un polarizācijas modu dispersija (PMD). Viena no optiskās šķiedras pamata parametriem ir dispersijas radītā optiskā signāla paplašināšanās, kas var novest pie starp simbolu interferences [4, 162, 163]. Savukārt, PMD nozīme palielinās, pieaugot datu pārraides ātrumam kanālā [21, 67]. Nelineārie optiskie efekti (NOE), kuri parādās optiskajā šķiedrā ir saistīti ar vides nelineāro jūtīgumu, un tos var iedalīt izkļedes (neelastīgajos) un parametriskajos (elastīgajos) procesos (skat. 1.4. att.).



1.4. att. Nelineārie optiskie efekti WDM sistēmās [4]

Lineāro un nelineāro efektu ietekmes novērtējumu uz optisko signālu var veikt ar dažādām skaitliskām metodēm [4]. Frekvences apgabala sadalītā soļa metode ir biežāk pielietotā komerciāli pieejamās simulācijas programmās, jo tā raksturojas ar īsu aprēķinu laiku un zināmu precizitāti [4, 126]. Metodes darbība balstās uz lineāru efektu un nelineāru efektu atsevišķu novērtēšanu optiskās šķiedras apgabalā Δz . NLSE vienādojums, kurš raksturo pikosekunžu ilguma impulsu izplatīšanos vienmodu optiskajās šķiedrās [4], dots zemāk:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_i(t)}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} \cdot A_i(t) + \beta_{1i} \frac{\partial A_i(t)}{\partial t} - \frac{i}{2} \cdot \beta_{2i} \cdot \frac{\partial^2 A_i(t)}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \cdot \beta_{3i} \cdot \frac{\partial^3 A_i(t)}{\partial t^3} = \\ = -i \cdot \gamma_i \cdot \left(|A_i(t)|^2 + 2 \cdot \sum_k^N |A_k(t)|^2 \right) \cdot A_i(t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Aprēķinu metodes izpratnei NLSE vienādojumu jāāpskata vienkāršotā pieraksta formā [4]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{L} + \hat{N})A, \quad (1.4)$$

kur \hat{L} ir lineārais diferenciālais operators, kas norāda vājinājuma un dispersijas lielumu optiskajā šķiedrā:

$$\hat{L} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2}. \quad (1.5)$$

Savukārt, \hat{N} ir nelineārais operators, kas apraksta nelineāro optisko efektu izpausmi optiskajā šķiedrā:

$$\hat{N} = i\gamma \left(|A|^2 + \frac{i}{w_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right). \quad (1.6)$$

Tiek ņemts pietiekoši mazs Δz optiskās šķiedras apgabals, lai lineārie un nelineārie efekti katrā atsevišķā optiskās šķiedras apgabalā darbojas neatkarīgi. Impulsa izplatīšanās apgabals optiskajā šķiedrā no z līdz $z + \Delta z$ apgabalam sadalīts divās daļās. Pirmajā daļā

lineārie optiskās šķiedras raksturlielumi netiek ņemti vērā un aprēķini tiek veikti ņemot vērā nelineāros efektus. Tā kā \hat{N} operatora ir imaginārs, tad signālā $A(z,t)$ optisko fāzi ietekmē laikā mainīgi nelineārie optiskie efekti. Savukārt, otrajā daļā tiek ņemtas vērā nelinearitātes, un optiskā signālā izplatīšanos ietekmē tikai lineārie optiskie efekti. Pēc izplatīšanās Δz apgabala optisko signālu var aprakstīt šādi [4]:

$$A(z + \Delta z, T) \approx \exp(\Delta z \hat{L}) \cdot \exp(\Delta z \hat{N}) \cdot A(z, T). \quad (1.7)$$

Nelineārā apgabala aprēķins notiek laika diapazonā, savukārt, lineārā apgabala - frekvenču diapazonā. Pāreja no laika uz frekvenču diapazonu veikta ar diskrēto ātro Furjē transformāciju. Vienādojums (1.7) ir spēkā pie nosacījuma, kad $\Delta z \rightarrow 0$. Sadalīta soļa metodes precizitāti ir iespējams palielināt simetriski sadalot Δz apgabalu, kur nelinearitātes aprēķinātas apgabala vidusdaļā [4]:

$$A(z + \Delta z, T) \approx \exp\left(\frac{\Delta z}{2} \hat{L}\right) \cdot \exp\left(\int_z^{z+\Delta z} \hat{N}(z') dz'\right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta z}{2} \hat{L}\right) \cdot A(z, T). \quad (1.8)$$

Samazinot Δz apgabala garumu, aprēķinu precizitāte palielinās, un ir jāreķinās ar zināmu aprēķina laiks pieaugumu. Kompromisu ir iespējams atrast izvēloties optiskā signāla izplatīšanās režīmu, kontrolējot nelineāro čirpu Φ_{NL} , kuru apraksta \hat{N} operators [4]:

$$\Delta \Phi_{NL} = \gamma \cdot P_{max} \cdot \Delta z, \quad (1.9)$$

Kā rezultātā ir iespējams novērtēt arī nelielas impulsa izmaiņas. Palielinoties optiskā signāla jaudai kanālā soļa garumu ir jāsamazina, jo $\Delta \Phi_{NL}$ ir atkarīgs no P_{max} . Vienkanāla sistēmās $\Delta \Phi_{NL} = 1..3$ mrad lielums nodrošina atbilstošu precizitāti. Apskatītajā gadījumā Δz soļa garums nepārsniedz 1 km. Daudzkanālu sistēmās Δz lielumu ir jāsamazina līdz pat 1 m, atkarībā no sistēmas parametriem [126]. Komerciāli piejamās simulācijas programmās (angļu val. OptSim, VPIphotonics, Optiwave) šie nosacījumi tiek ņemti vērā. Ar sadalīta soļa metodi var rēķināt tikai lineāro daļu. Tas nozīmē, ka varam atnest nelineāro daļu un NLSE vienādojumu pielīdzināt nullei [4]:

$$\frac{\partial A_i(t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} \cdot A_i(t) - \beta_{1i} \cdot \frac{\partial A_i(t)}{\partial t} + \frac{i}{2} \cdot \beta_{2i} \cdot \frac{\partial^2 A_i(t)}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \cdot \beta_{3i} \cdot \frac{\partial^3 A_i(t)}{\partial t^3} \quad (1.10)$$

Ar ātro Furjē transformāciju iegūstam optiskā signāla komplekso formu $A_i(\omega, z)$ z punktā optiskajā šķiedrā:

$$F\left\{\frac{\partial A_i(t)}{\partial z}\right\} \Rightarrow \frac{\partial A_i(\omega)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_i(\omega) - i\beta_{1i} A_i(\omega) + \frac{i}{2} \beta_{2i} (i\omega)^2 A_i(\omega) + \frac{1}{6} \beta_{3i} (i\omega)^3 A_i(\omega) \quad (1.11)$$

iznesam $A_i(\omega, z)$:

$$\frac{\partial A_i(\omega)}{\partial z} = A_i(\omega) \left[-\frac{\alpha}{2} - i\beta_{1i} \omega - i\frac{1}{2} \beta_{2i} \omega^2 - i\frac{1}{6} \beta_{3i} \omega^3 \right] \quad (1.12)$$

un integrējam:

$$\int \frac{\partial A_i(\omega)}{A_i(\omega)} = \int \left[-\frac{\alpha}{2} - i\beta_{1i}\omega - i\frac{1}{2}\beta_{2i}\omega^2 - i\frac{1}{6}\beta_{3i}\omega^3 \right] \partial z. \quad (1.13)$$

Rezultātā iegūstam:

$$\ln(A_i(\omega, z)) = \left[-\frac{\alpha}{2} - i\beta_{1i}\omega - i\frac{1}{2}\beta_{2i}\omega^2 - i\frac{1}{6}\beta_{3i}\omega^3 \right] \cdot z, \quad (1.14)$$

kur aprēķinām pēc $A_i(\omega, z)$:

$$A_i(\omega, z) = e^{-\left[\frac{\alpha}{2} + i\beta_{1i}\omega + i\frac{1}{2}\beta_{2i}\omega^2 + i\frac{1}{6}\beta_{3i}\omega^3 \right] \cdot z}. \quad (1.15)$$

Kompleksais signāls pēc kārtējā Δz ir vienāds ar:

$$A_i(\omega, z + \Delta z) = A_i(\omega, z) \cdot e^{-\left[\frac{\alpha}{2} + i\beta_{1i}\omega + i\frac{1}{2}\beta_{2i}\omega^2 + i\frac{1}{6}\beta_{3i}\omega^3 \right] \cdot \Delta z}, \quad (1.16)$$

kur $A_i(\omega, z)$ ir ieejas optiskais impulss.

Vienādojums (1.16) var pārrakstīt kā [4]:

$$A_i(\omega, z + \Delta z) = A_i(\omega, z) \cdot e^{-\left[\frac{\alpha}{2} + i\beta_{1i}\omega + i\frac{1}{2}\beta_{2i}\omega^2 + i\frac{1}{6}\beta_{3i}\omega^3 \right] \cdot \Delta z} \cdot e^{-i\omega\beta_{1i} \cdot \Delta z} \quad (1.17)$$

Ņemot vērā, ka [4]:

$$F^{-1}\left\{ F(\omega) \cdot e^{-i\omega\beta_{1i} \cdot \Delta z} \right\} = f(t - \beta_{1i} \cdot \Delta z), \quad (1.18)$$

$\beta_{1i} \cdot \Delta z$ var uzskatīt kā pastāvīgu laika aizturi un $\beta_{1i} \cdot \Delta z = t_0$, kas vienāda visiem kanāliem.

Rezultātā kompleksais signāls $(\omega, z + \Delta z)$ pēc lineārā soļa ir vienāds ar [4]:

$$A_i(\omega, z + \Delta z) = A_i(\omega, z) \cdot e^{-\left[\frac{\alpha}{2} + i\frac{1}{2}\beta_{2i}\omega^2 + i\frac{1}{6}\beta_{3i}\omega^3 \right] \cdot \Delta z}. \quad (1.19)$$

Savukārt, pielīdzinot lineāro daļu nullei, iegūstam:

$$\frac{\partial A_i(t)}{\partial z} = -i\gamma_i \left(|A_i(t)|^2 + 2\sum_k^N |A_k(t)|^2 \right) \cdot A_i(t), k \neq i. \quad (1.20)$$

Pēc nelineāra soļa Δz :

$$\begin{aligned} A_i(t, z + \Delta z) &= A_i(t, z) \cdot e^{-i\gamma_i \left(|A_i(t, z)|^2 + 2\sum_k^N |A_k(t, z)|^2 \right) \cdot \Delta z} \\ &= A_i(t, z) \cdot e^{-i\left(\phi_{ik, SPM}(t, z) + \phi_{ik, XPM}(t, z) \right)} \end{aligned} \quad (1.21)$$

kur:

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega_0}{c \cdot A_{eff}}, \quad (1.22)$$

kur n_2 - nelineārs laušanas koeficients, kas ir atkarīgs no optiskās šķiedras veida, A_{eff} - šķiedras efektīvais laukums, ω_0 - centrālā frekvence, c - gaismas ātrums vakuumā, $\phi_{i,k,SPM(t,z)}$ - signāla fāzes izmaiņas fāzes pašmodulācijas rezultātā un $\phi_{i,k,XPM(t,z)}$ - signāla fāzes izmaiņas fāzes šķērsmodulācijas rezultātā. Signāla $\phi_{i,k,SPM(t,z)}$ fāzes izmaiņas ir iespējams atrast no NLSE vienādjuma nelineāras daļas [4]:

$$A_i(t, z) \cdot e^{-i\gamma_i \left(|A_i(t, z)|^2 + 2 \sum_k^N |A_k(t, z)|^2 \right) \cdot \Delta z} \Rightarrow \phi_{ik,SPM}(t, z) = \gamma_i \cdot \Delta z \cdot |A_i(t, z)|^2. \quad (1.23)$$

Savukārt, $\phi_{i,k,XPM(t,z)}$:

$$A_i(t, z) \cdot e^{-i\gamma_i \left(|A_i(t, z)|^2 + 2 \sum_k^N |A_k(t, z)|^2 \right) \cdot \Delta z} \Rightarrow \phi_{ik,XPM}(t, z) = \gamma_i \cdot \Delta z \cdot 2 \sum_k^N |A_k(t, z)|^2, \quad (1.24)$$

kur k - modulējošo kanālu indeksu skaits, i - modulējoša kanāla indekss, N - visu kanālu skaits, A_i - i kanāla kompleksā amplitūda, t - laiks, z - pozīcija šķiedrā, Δz - soļa garums. Rezultātā ir iegūti analītiskie risinājumi NLSE vienādojuma lineārai un nelineārai daļai (ņemot vērā amplitūdu un fāzi optiskajam signālam).

Optiskie pastiprinātāji ir viena no optiskās līnijas pamata sastāvdaļām. Optiskajos pastiprinātājos tiek pielietoti dažāda veida viļņa garuma filtri, kas katrs veic tam paredzētās funkcijas. Standarta SMF zudumi, minimāla vājinājuma reģionā pie 1.55 μm teorētiski vienādi ap 0.16 dB/km, un tas būtiski ierobežo optiska signāla pārraides attālumu. Optiskā pastiprināšanās var būt realizēta dažādi, piemēram, izmantojot optisko pusvadītāju pastiprinātāju (SOA) vai pastiprinātāju ar retzemju elementu leģētu šķiedru (erbijs, holmijs, samārijs, telūrijs), vai inducētas izkliedes bāzes pastiprinātāju. Visi šie pastiprināšanas tipi balstās uz dažādiem fizikāliem mehānismiem [4, 29, 42].

Hromatiskā dispersija vienmodu optiskajā šķiedrā ir pamata parametrs, kurš ierobežo pārraides attālumu, un tas būtiski izpaužas, palielinot pārraides ātrumu virs 2.5 Gbit/s, jo samazinās uztvertā signāla kvalitāte. Atkarībā no kompensācijas shēmas un dispersijas kompensācijas veikšanas vietas, izšķir trīs kompensācijas metodes: optiskajā raidītājā, optiskajā līnijā un optiskajā uztvērējā. Dispersijas kompensācija raidītāja pusē tiek realizēta ar

čirpa parametra palīdzību. To iespējams īstenot ar dažādam metodēm, piemēram, izmantot lāzera avota vai ārējā modulatora čirpa parametru [44, 142, 143], kā arī elektrisko pirms kodēšanu [54, 147]. Dispersijas kompensācija optiskajā līnijā ir galvenā kompensēšanas metode pamattīklos ar pārraides ātrumu virs 10 Gbit/s [129, 156]. Dispersijas kompensācija uztvērējā raksturojas ar elektronisko dispersijas kompensāciju (EDC), kas realizēta ar sarežģītiem algoritmiem, kā rezultātā hromatiskā dispersija tiek efektīvi kompensēta [16, 97]. Savukārt, ar viļņa garuma filtriem ir iespējama hromatiskās dispersijas kompensācija, kas paliek arvien aktuālāka 100 Gbit/s WDM sistēmās. Vēl viens optiskās līnijas daļas elements: optiskais ievades-izdales blīvētājs (OADM), aprakstīts darba 1.2.1. apakšpunktā.

Optiskais uztvērējs izpilda vairākus uzdevumus: optisko trokšņu filtrēšanu, optiskā signāla demodulāciju, elektrisko trokšņu filtrāciju un dekodēšanu. Pēc tam notiek elektriskā signāla apstrāde un sinhronizācijas signāla izdalīšana. Atkarībā no modulācijas veida, izdala optiskā signāla tiešu uztveršanu un koherentu uztveršanu. Optiskā signāla tiešo uztveršanu izmanto gan komerciāli pieejamajās, gan ekspluatācijā esošajās WDM sistēmās, kas skaidrojams ar intensitātes modulācijas izmantošanu [4]. Tiešās uztveršanas uztvērējs sastāv no viļņa garuma filtra, pusvadītāja foto diodes un elektriskā filtra. Filtrs vienkanāla sistēmās samazina optisko pastiprinātāju radīto troksni [99], savukārt, daudzkanālu sistēmās realizē optiskā signāla izdalīšanu. Viļņa garuma filtru klasifikācija tiek apskatīta tālākajā darba apakšnodaļā. Pēc viļņa garuma filtra ir PIN foto diode, kura pārveido optisko signālu elektriskajā. Netiek lietotas lavīnfotodiodes, jo tās radītie trokšņi ierobežo pielietojšanas iespējas [2]. Savukārt, elektriskais filtrs veic elektrisko trokšņu filtrāciju: tipiski 3-5 pakāpes Beseļa – Tomsona elektriskais filtrs ar frekvenču joslu platumu -3 dB līmenī $0.7 \times \text{bit/s}$. Šī veida filtri ir pazīstami arī kā tikai Beseļa filtri. Tiem ir lineāra fāzes raksturlīkne. Šāda veida filtru pārvades funkcija aprakstās ar šādu izteiksmi [4, 92]:

$$H(s) = \frac{B_N(0)}{B_N(s)} = \frac{b_0}{\sum_{k=0}^N b_k s^k}, \quad (1.25)$$

kur $b_k = \frac{(2N-k)!}{2^{N-k} k!(N-k)!}$ un $B_N(s)$ ir Beseļa polinoms. Beseļa polinoms ir atrisināms, izmantojot $B_0=1$ un $B_1 = s + 1$:

$$B_N = (2n - 1)B_{n-1} + s^2 B_{n-2} \quad (1.26)$$

1.2. Klasifikācija optiski blīvētās sistēmās

Viļņa garuma filtri optiski blīvētās jeb WDM sistēmās ir speciāla fizisko komponentu grupa paredzēta optiskā signāla spektra pārveidei. Darbā izveidotā klasifikācija

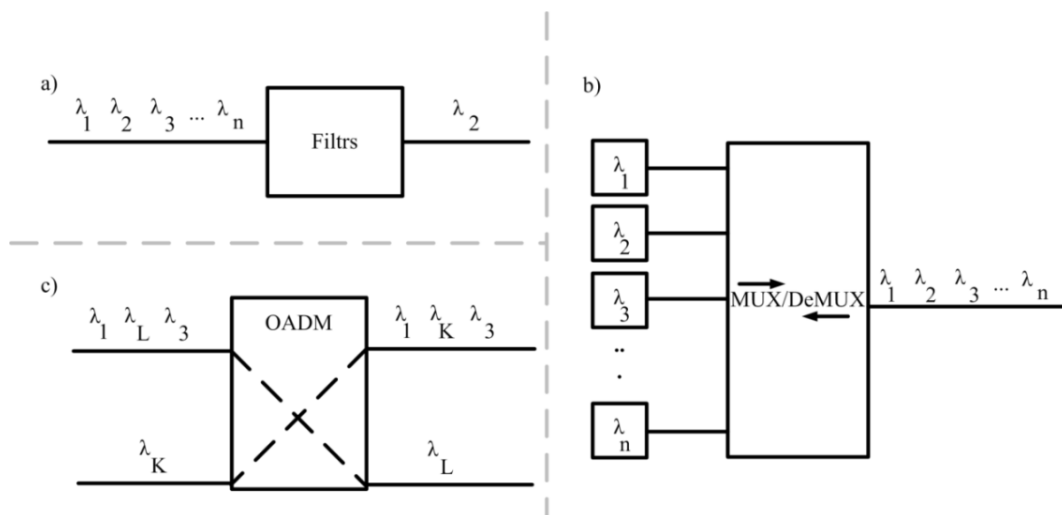
veikta, ņemot vērā viļņa garuma filtru atstāto iespaidu uz optiskā signāla spektru. Viļņa garuma filtros WDM sistēmās iedala optiskajos joslas filtros (OBPF), iegriezuma filtros, pastiprinājumu izlīdzinošajos filtros un dispersiju kompensējošajos filtros [86, 138]. Promocijas darbā lielāka uzmanība pievērsta optiskajiem joslas filtriem un to parametru izvēlei gan pašreizējās, gan nākotnes WDM sistēmās, lai nodrošinātu kvalitatīvāku optisko signālu apvienošanu un atdalīšanu.

1.2.1. Optiskie joslas un iegriezuma filtri

OBPF nofiltrē optisko signālu ar noteiktu viļņa garuma diapazonu no kopējā WDM sistēmas spektra. Savukārt, iegriezuma filtri nofiltrē kopējo viļņa garuma diapazonu, izņemot optisko signālu ar noteiktu viļņa garumu. OBPF un iegriezuma filtrs ir ierīces ar pretēju darbību frekvenču diapazonā. OBPF un iegriezuma filtru raksturo ar caurlaides joslu, ienestajiem zudumiem, dispersijas parametru un blakus kanālu izolācijas vērtību [125]. Visi šie ir galvenie fizisko realizāciju parametri un tiek detaļās apskatīti 1.2.3.apakšpunktā. Savukārt, OBPF matemātisks apraksts dots promocijas darba 2.1.apakšnodaļā.

Vienkanāla optiskajās pārraides sistēmās OBPF pielieto, lai atdalītu kanāla derīgo informāciju no trokšņa, kas rodas pārraides rezultātā [138]. Šis troksnis var tikt uztverts kā kvazibalts troksnis, ar gandrīz konstantu trokšņa spektru noteiktā spektrālajā diapazonā. Šāds troksnis aizņem visu uztvērēja frekvenču diapazonu. Gadījums, kad uz derīgo signālu iedarbojās kvazibalts troksnis, tiek uzskatīts par sliktāko aditīva trokšņa gadījumā, jo uztvērējs nespēj atdalīt derīgo signālu no trokšņa tāpēc, ka tas aizpilda visu uztvērēja frekvenču diapazonu [8]. Šajā gadījumā iespējams izmatot OBPF, kas samazina kopējo trokšņa jaudu. Ja apskata daudzkanālu sistēmas gadījumu, tad OBPF nodrošina iespēju izdalīt konkrētu kanālu no kopējā WDM sistēmas spektra (shematisku piemēru skat. 1.5a.att.). Turklāt, OBPF ir pamata komponente WDM sistēmas blīvētājos un atblīvētājos. Kā redzams 1.5b.attēlā, tad blīvētājs apvieno vairākus viļņu garumus vienā optiskajā šķiedrā. Savukārt, atblīvētājs sadala kopējo WDM sistēmas spektru uz dažādiem kanāliem.

No OBPF tiek veidots ievades-izdales blīvētājs (skat. 1.5c.att.). Šī iekārta WDM sistēmās dod iespēju konkrētu kanālu ar noteiktu viļņa garumu izdalīt no kopējās optiskās plūsmas un tā vietā pievienot citu sistēmas kanālu [48, 86, 138].



1.5.att. Optiskais joslas filtrs (a), blīvētājs un atblīvētājs (b) un optiskais ievades-izdales blīvētājs (c) [17]

1.2.2. Pastiprinājumu izlīdzinošie filtri

Papildus OBPF WDM sistēmās eksistē cita veida viļņa garuma filtri. Viens no šādiem filtriem ir pastiprinājumu izlīdzinošais filtrs (GFF). Nepieciešamība pēc šādiem filtriem saistīta ar to, ka visiem kanāliem WDM sistēmā jābūt ar vienādu jaudas līmeni. Tomēr dažādu faktoru ietekmē šie WDM sakaru sistēmas kanāli atšķiras pēc jaudas līmeņa. Jaudas izmaiņas saistītas ar kanālu pievienošanu un atmešanu kopējā sistēmas spektrā, EDFA pastiprinātāja nevienmērīgo pastiprināšanās līkni, jaudas nevienmērību lāzera avotos, u.c. Pat pie nelielām jaudas līmeņu atšķirībām lielākos pārraides attālumos tās var uzkrāties un pārveidoties lielās jaudas līmeņu atšķirībās. Šo iemeslu dēļ WDM sistēmās nepieciešams izmantot GFF [138, 164].

1.2.3. Dispersiju kompensējošie filtri

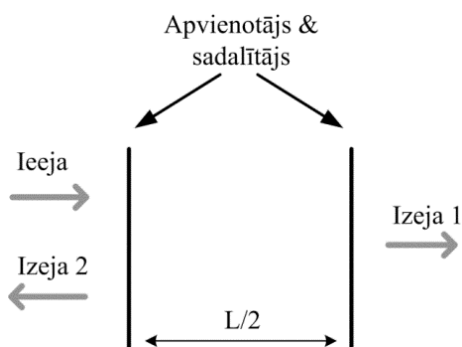
Divos iepriekšējos pielietojumos uzmanība vērsta uz viļņa garuma filtra amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju, tomēr, ietekme uz impulsa izplatīšanos laika apgabalā ir vienlīdz nozīmīga, īpaši pieaugot datu pārraides ātrumam katrā kanālā. Piemēram, 10 Gbit/s optiskā signāla gadījumā var pieļaut 1000 ps/nm kopējo dispersiju, savukārt, 40 Gbit/s optiskā signāla gadījumā tikai 63 ps/nm. Ja kopējā dispersija pārsniedz šo iepriekš minēto sliekšni, tad blakus impulsi var pārklāties un izraisīt starpsimbolu interferenci [138, 164]. Pieejamas vairākas metodes, lai veiktu dispersijas kompensāciju, tostarp arī vairākas viļņa garuma filtru realizācijas (aperiodisks FBG, kā arī AWG dispersijas kompensators) [48].

1.3. WF fiziskās realizācijas

Viļņa garuma filtrus var izgatavot ar dažādām tehnikām, un piemērotākais risinājums katram gadījumam ir atkarīgs no daudziem parametriem, piemēram, sistēmas kanālu skaita, intervāla starp kanāliem, datu pārraides ātruma, temperatūras stabilitātes, fiziskā izmēra. Kā pirmos apskatīsim divus interferometra veidus: Fabrī Pero interferometru (FPI) un Maha-Cendera interferometru (MZI) [86]. Šie viļņa garuma filtra veidi tiek apskatīti, jo vēlāk tiek izmantoti, lai pēc pārvades funkcijām klasificētu darbā plašāk apskatītos viļņa garuma filtrus.

1.3.1. Fabrī Pero interferometrs

Šī tipa filtri bāzēti uz rezonansi spraugā, ko veido divi spoguļi, kas izvietoti paralēli viens otram (skat. 1.6.att.). Tiek izmantota tā sauktā daudzstaru interference, ar kuras palīdzību iespējams izdalīt konkrētu viļņu garumu. Šķiedras FPI tiek veidoti izmantojot standarta SMF (SSMF), kas padara to ērti savietojamu ar pārraides vidi. Filtra rezonators tiek veidots no diviem akurāti nocentrētiem optiskās šķiedras galiem, no kuriem viens pārklāts ar materiālu ar augstu atstarošanās koeficientu. Starp šiem šķiedras galiem ir gaiss. Ja šis attālums ir lielāks, tad tajā ievieto SSMF, kuras gali pārklāti ar neatstarojošu materiālu. Šķiedra paredzēta precīzākai gaismas pārvadei rezonatorā un speciāls pārklājums paredzēts, lai neradītu nevēlamas papildus atstarošanās [40, 138].

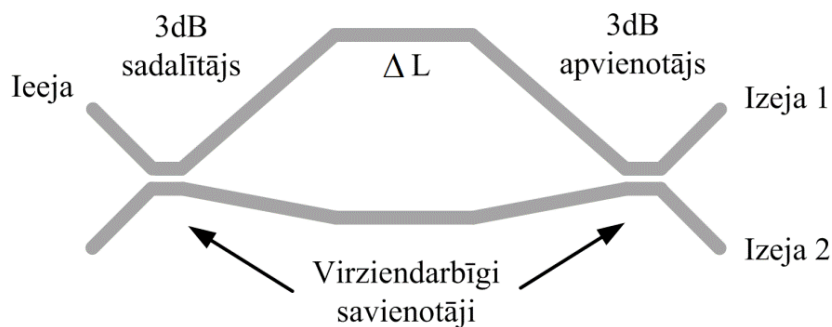


1.6.att. Strukturāls FPI modelis [86]

1.3.2. Maha-Cendera interferometrs

Šis interferometrs balstās uz optiskā signāla aizturi vienā no tā pleciem (skat. 1.7.att.). Ieejas optiskais signāls 3 dB sadalītājā tiek sadalīts divās vienādās daļās, kuras katra izplatās savā MZI plecā. Vienā plecā signāls tiek aizkavēts par $\Delta t = \Delta L \cdot n / c$, kur n - materiāla laušanas koeficients un c - gaismas izplatīšanās ātrums vakuumā un ΔL - ceļu

garuma atšķirība starp abiem MZI pleciem. Koherenta interference apvienotājā noved pie sinusoidālas pārvades funkcijas, kuras periods ir apgriezti proporcionāls ceļu garumu atšķirībai starp abiem MZI pleciem [5, 40, 86].

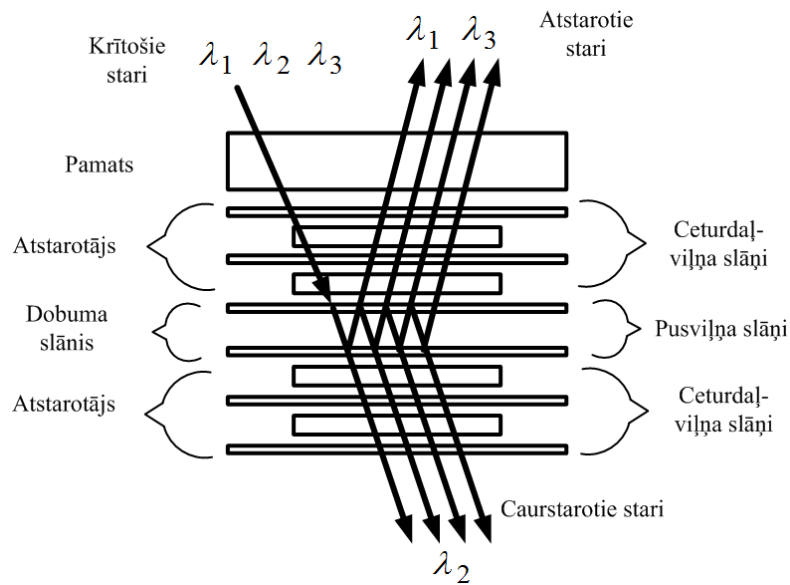


1.7.att. Strukturāls MZI modelis [86]

1.3.3. Plāno kārtiņu filtri

Plāno kārtiņu filtri sastāv no vairākām caurspīdīgām kārtām no dielektriska materiāla ar dažādiem laušanas koeficientiem. Tās tiek secīgi uzklātas uz optiskās virsmas viena pēc otras. Katrā robežā starp kārtām daļa krītošā stara atstarojas atpakaļ, jo katrai kārtai ir savs laušanas koeficients. Šis atstarotais stars pastiprina vai novājina krītošo (atstarotais vilnis mijiedarbojas ar krītošo interferences rezultātā), atkarībā no viļņa garuma. TFF iekārtas sastāv no dažiem līdz dažiem simtiem kārtu, kuras sastāv no diviem vai vairākiem materiālu veidiem, lai varētu izveidot filtrus ar dažādām spektrālām īpašībām [75, 85]. Optiskais joslas TFF sastāv no viena vai vairākiem plāno kārtiņu Fabrī Pero etaloniem. Šis FP etalons sastāv no diviem dielektriskiem plāno kārtiņu atstarotājiem, kurus novietojot paralēli vienu pretī otram tie veido dobumu [133, 138].

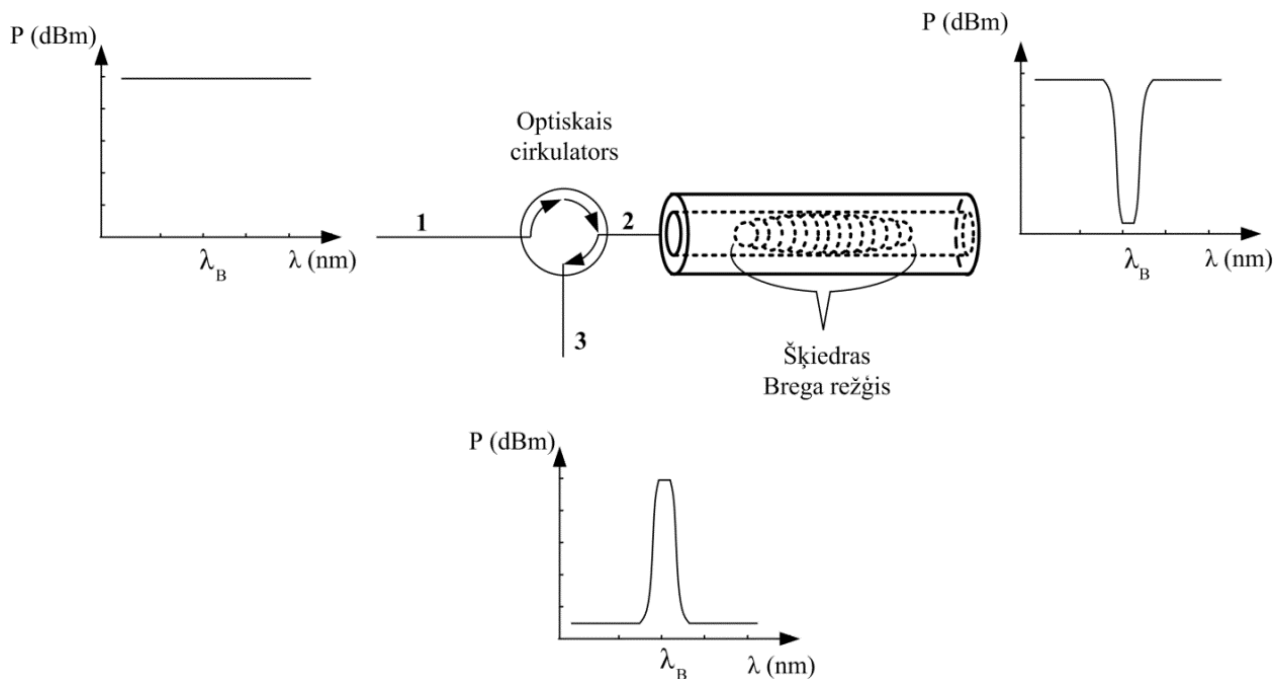
Kā redzams 1.8.attēlā, tad tipiska viena dobuma TFF iekārta satur divus atstarotājus (ceturdaļviļņa slāņi) un dobumu (pusviļņa slānis). Visi slāņi, no kuriem veidotas plānās kārtiņas, ir veidoti kombinējot materiālus ar augstu un zemu laušanas koeficientu. Biežāk lietotie materiāli ar zemu laušanas koeficientu ir SiO_2 , savukārt, materiāli ar augstu laušanas koeficientu TiO_2 un Ta_2O_5 . Šie materiāli plašu pielietojumu ieguvuši tāpēc, ka tiem ir zema absorbcija pie 1550 nm viļņa garuma. Dobuma biezums nosaka centrālo viļņa garumu, ko OBPF filtrēs, bet atstarotāja slāņa biezums nosaka filtra atstarošanās koeficientu [35, 75, 85]. Slāņu skaits atkarīgs no konkrētās darbības prasībām. Kad gaismas staru ar dažādiem viļņa garumiem palaiž ierīcē, daļa gaismas, kas atbilst rezonanses frekvencei dobumā tiek caurstarota, savukārt, pārējā daļa tiek atstarota, kā tas parādīts 1.8.attēlā [35, 75].



1.8.att. Strukturāls viena dobuma TFF modelis [35, 85, 133]

TFF iespējams pielietot kā modulāru arhitektūru, kas sākas ar dažu kanālu izdalīšanu, bet vēlāk var tikt paplašināts, kad rodas vajadzība pēc lielāka kanālu skaita [75].

1.3.4. Šķiedras Brega režģu filtri

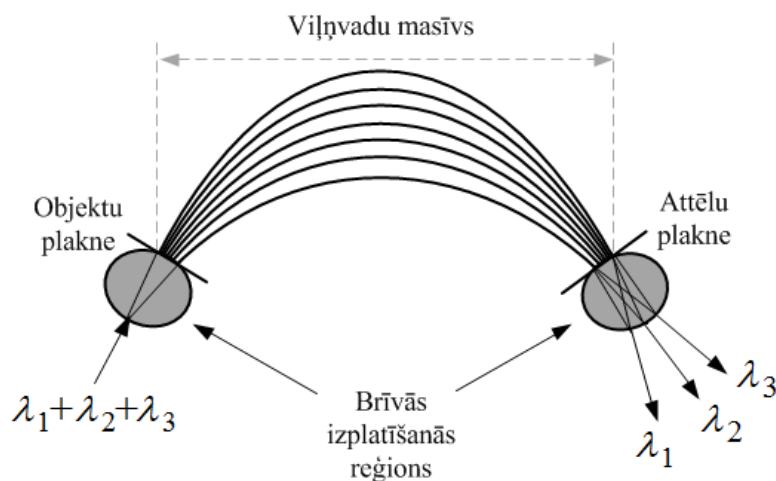


1.9.att. Šķiedras Brega režģis ar optisko cirkulatoru [62, 138]

Šķiedras Brega režģis ir izkliedēta atstarotāja tips, kas izveidots nelielā optiskās šķiedras serdeņa segmentā (skat. 1.9.att.). Tas atstaro noteikta garuma gaismas viļņus, bet neietekmē cita viļņa garuma gaismas viļņu izplatību. Uz režģa pamata veidotas struktūras virzītās optiskās sistēmās sen atpazīstamas tāpēc, ka tās iespējams integrēt optiskajās šķiedrās. Maksimālā atstarošanās ir sasniedzama līdz pat 100% un režģa atstarotās joslas platums no 0.1 nm līdz 100 nm. Šie parametri nodrošina iespēju izmantot Brega režģus optiskās sakaru sistēmās, kur nepieciešama gaismas filtrēšana, atstarošana un izkliede [65, 96, 138].

1.3.5. Viļņvadu masīva režģa filtri

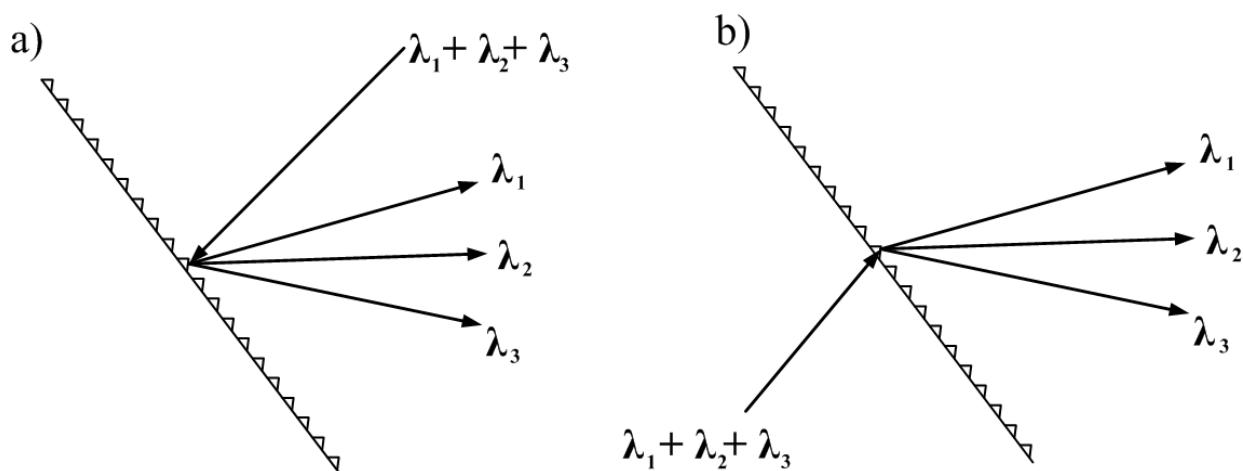
AWG filtri ir planāras ierīces, kas balstītas uz viļņvadu masīva objektu izkliedēšanas un attēla veidošanas īpašībām. Shematiskais AWG filtrs parādīts 1.10. attēlā. Kad optiskais signāls ar dažādiem viļņa garumiem no ieejas sasniedz brīvās izplatīšanās reģionu, tas vairs nav sēniski ierobežots un kļūst diverģents. Nokļūstot uz objekta plaknes optiskais signāls ar dažādiem viļņa garumiem izplatās pa individuāliem viļņvadiem uz brīvās izplatīšanās reģionu izejā. Viļņvadu masīva garums tiek izvēlēts tādā veidā, lai optiskā ceļa garuma atšķirība starp blakus viļņvadiem būtu vienāda ar vairākiem veseliem skaitļiem, kuri dalās ar filtra centrālo viļņa garumu. Tādā veidā optiskais signāls individuālo viļņvadu izejās atnāk ar vienādu fāzi. Diverģents stars ieejā kļūst konverģents ar vienādu amplitūdas un fāzes sadalījumu. Dažādu viļņa garumu telpiska dalīšana tiek nodrošināta ar lineāru masīva viļņvadu garuma palielināšanu, kas veido viļņa garuma atkarību iekārtai. Ja izejas viļņvadi ir novietoti pareizās pozīcijās gar attēla plakni, tad gaisma ar dažādiem viļņa garumiem nonāk atsevišķos izejas viļņvados un vēlāk arī optiskajās šķiedrās [35, 138].



1.10.att. Strukturāls AWG filtra modelis [35, 138]

1.3.6. Difrakcijas režģu filtri

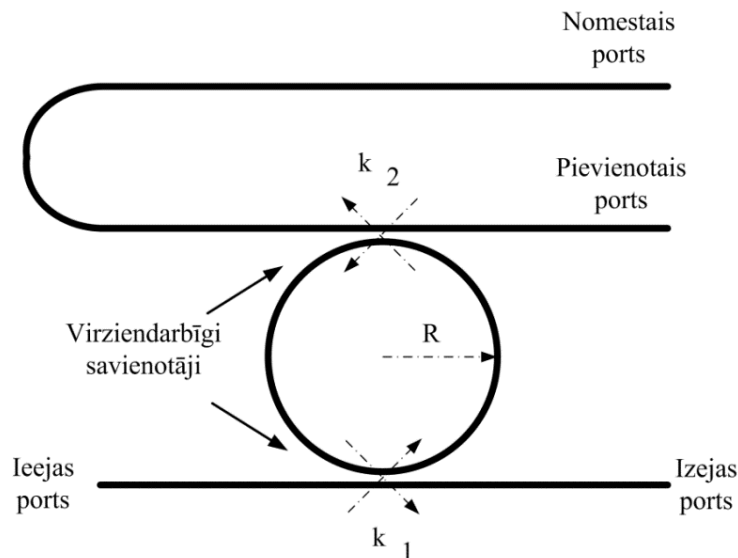
DG filtros iespējams izmantot gan kā caurstarojošus, gan kā atstarojošus difrakcijas elementus (skat. 1.11.att.). Difrakcijas režģa gadījumā dažāda viļņa garuma signālus iespējams sadalīt uz dažādiem virzieniem. Difrakcijas režģis ir optiska virsma, kurā izveidots liels daudzums ar gropītēm, kuru skaits sasniedz no desmitiem līdz tūkstošiem uz vienu milimetru. Režģis spēj sadalīt kopējo optiskā signāla plūsmu dažādos viļņa garumos. Kā redzams 1.11. attēlā, tad sadalīto gaismas viļņu garumu virzieni ir atkarīgi no krītošā optiskā signāla leņķa un arī attāluma starp difrakcijas režģa gropītēm [40, 138].



1.11.att. Strukturāls DG filtra modelis [35, 138]

1.3.7. Mikroriņķu rezonatori

Mikroriņķu rezonatoru (MRR) filtri pārstāv klasi, kura pēc darbības principa pietuvināta iepriekš apskatītajiem FPI. Tomēr ir būtiska atšķirība: šī iekārta nodala pārraidīto un atstaroto signālu dažādos portos. Šīs iekārtas ir samērā nelielas (riņķa rādiuss mērāms μm un viļņu vadi - nm) pēc izmēra, kas sasniedz no dažiem līdz dažiem desmitiem mikrometru. Filtru raksturlīknes un potenciāls kompleksās tehnoloģijās padara tos pievilcīgus integrētās optikas iekārtām [14, 122]. Pagaidām šīs iekārtas nav plaši izplatītas komerciālās WDM sistēmās. 1.12.attēlā tiek apskatīts četru portu MRR, kas darbojās kā OADM. Darba noslēdzošajā nodaļā novērtēta izstrādātā MRR prototipa pielietojanas iespējas un ierobežojumi augsta ātruma optiskās pārraides sistēmās.



1.12.att. Strukturāls viena riņķa MRR filtra modelis [14, 122]

1.3.8. Fizisko realizāciju parametri

Viļņa garuma filtru fiziskās realizācijas balstās uz dažādiem fizikāliem principiem un sarežģītām izgatavošanas metodēm. Ņemot vērā fizisko realizāciju lielo daudzveidību, ir nepieciešami pamata kritēriji viļņa garuma filtriem, lai veiktu to izvēli konkrētām WDM sistēmām. Zemāk apskatīti pamata parametri, kuri būtu jāievēro izvēloties viļņa garuma filtru no piedāvātajām fiziskajām realizācijām. Turklāt, jāņem vērā vairāku pamata faktoru ietekme uz optiskā filtra komplekso pārvades funkciju, kas definēta darba 2.1.apakšnodaļā [3, 35, 138].

- **Ienestie zudumi.** Lai pilnībā aprakstītu ienestos zudumus, ir nepieciešams apskatīt to atkarību no viļņa garuma. Maksimuma vērtība raksturo zudumu līmeni fiksētā viļņa garumā, bet tā nenosaka pilno izkliedi visā caurlaides joslā. Šī izkliede ir minimālo un maksimālo zudumu līmeņu starpība caurlaides joslā. Kanāla izkliede dod sistēmas izstrādātājam informāciju par iespējamo pārraides jaudas līmeņa izkliedi, mainoties raidītāja viļņa garumam viļņa garuma caurlaides joslas robežās. Liela zudumu izkliede ir nevēlama. Vislietderīgāk veikt ienesto zudumu mērījumus pie viļņa garuma, kurā tie ir vislielākie. Šādu metodiku izmanto lielākā daļa komponentu ražotāju, un iekārtas pasē norāda maksimālo ienesto zudumu vērtību.
- **No polarizācijas atkarīgie zudumi.** Zudumi ir atkarīgi no ieejas signāla polarizācijas stāvokļa. Šis parametrs ir jāsamazina līdz minimumam, veidojot optiskos filtrācijas elementus neatkarīgus no polarizācijas stāvokļa. Parametru

nosaka kā zuduma līmeņu variācijas pa visiem polarizācijas stāvokļiem. Tos iegūst no jaudas attiecības starp pārraidāmā signāla labāko un sliktāko (pēc jaudas vērtības) polarizācijas stāvokli.

- **Temperatūras stabilitāte.** Šo nobīdi raksturo kā viļņa garuma nobīdi uz vienu grādu temperatūras izmaiņā. Parametra vērtības var tikt izvēlētas minimālas vai arī maksimālas, atkarībā no vēlamā rezultāta. Ja nepieciešams izveidot pārskatājamu filtru, tad šim parametram jābūt ar pēc iespējas lielāku vērtību. Ja nepieciešama pēc iespējas mazāka nobīde, tad tiek izmantoti temperatūru stabilizējošie apvalki.
- **Caurlaides joslas platums.** Šo parametru iespējams novērtēt, izmantojot vairākus kritērijus, tomēr, biežāk sastopamākais kritērijs ir pilns platums līmenī viena puse (FWHM). Kritērijā joslas platums logaritmiskajā mērogā tiek novērtēts -3 dB līmeni no filtra pārvades funkcijas maksimuma. Praksē sastopami arī citi platuma noteikšanas līmeņi -1 dB un -20 dB.
- **Blakus kanālu izolācija.** Šis parametrs nosaka blakus kanālu signāla vājinājuma līmeni primārajā kanālā. Mērot vājinātā signāla daļu tiek ņemta vērā katra kanāla caurlaides joslas vērtība vissliktākajā gadījumā. Blakus kanālu izolācija (tiek mērīta dB) tiek noteikta, kā signāla minimālā jaudas vājinājuma vērtība ar izlasi no visiem ne primāriem izejas kanāliem, attiecībā uz primāro ieejas kanālu.
- **Brīvā spektrālā josla (FSR).** FSR parāda optiskā filtra pārvades funkcijas periodiskumu t.i. attālumu starp diviem pārvades funkcijas maksimumiem.
- **Pārskatāmība.** Šo parametru definē kā spēju mainīt filtra parametrus, galvenokārt, centrālo frekvenci un mīnus 3 dB caurlaides joslu.
- **Ienestā dispersija.** Caurlaides joslā viļņa garuma filtra fāzes pārvades funkcija ir lineāra, bet „stūros” tā paliek nelineāra, īpaši pie augstām blakus kanālu izolācijas vērtībām, kādas nepieciešamas augsta blīvuma WDM (DWDM) sistēmās. Šie fāzes kropļojumi rada nevēlamu filtra ienesto dispersiju, kas skaidrojama gan ar iekārtas materiāla parametriem, gan ar tās uzbūves īpatnībām [39, 138].

DWDM sistēmu viļņa garuma filtru parametru salīdzinājums

| Šķiedras Brega režģu filtri | Plāno kārtiņu filtri |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Ienestie zudumi > 1 dB; • No signāla polarizācijas stāvokļa atkarīgie zudumi ~0.1 dB; • Blakus kanālu izolācijas vērtība 30 dB; • Kanālu intervāls > 50 GHz; • Temperatūras jutība 0.5 pm/C° un jutīgi pret mehānisku iedarbību; • Nepieciešams temperatūru stabilizējošs apvalks; • Arhitektūra 1x1 un pakāpeniski palielināms kanālu skaits; • Vairāki filtri tiek slēgti virknē, kas ierobežo kanālu skaitu < 16; • Virziendarbīgi, ja struktūrā izmantotas apliecējfunkcijas; • Pielietojami kopā ar optiskajiem cirkulatoriem, pilnīgi pasīvas iekārtas; • Augstāka ienestā dispersija. | <ul style="list-style-type: none"> • Ienestie zudumi > 1 dB; • No signāla polarizācijas stāvokļa atkarīgie zudumi ~0.2 dB; • Blakus kanālu izolācijas vērtība 30 dB; • Kanālu intervāls > 50 GHz; • Temperatūras jutība 0.3 pm/C° un jutīgi pret mehānisku iedarbību; • Nepieciešams temperatūru stabilizējošs apvalks; • Arhitektūra 1x1 un pakāpeniski palielināms kanālu skaits; • Vairāki filtri tiek slēgti virknē, kas ierobežo kanālu skaitu < 16; • Nav virziendarbīgi; • Pilnīgi pasīvas iekārtas; • Neliela dispersija filtra caurlaides joslā. |
| Viļņvadu masīva režģu filtri | Difrakcijas režģu filtri |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ienestie zudumi > 5 dB; • No signāla polarizācijas stāvokļa zudumi ~0.5 dB; • Blakus kanālu izolācijas 25 dB; • Kanālu intervāls > 50 GHz; • Temperatūras jutība ~ 10 pm/C° un jutīgi pret mehānisku iedarbību; • Nepieciešama aktīva temperatūras regulēšana; • Arhitektūra 1xN un nav iespējama kanālu skaita pakāpeniska palielināšana; • Piemēroti sistēmām ar kanālu skaitu > 16; • Nepieciešama attīstīta (daudzkanālu) infrastruktūra; • Nav virziendarbīgi; • Samērā liela polarizācijas modu dispersija. | <ul style="list-style-type: none"> • Ienestie zudumi > 6 dB; • No signāla polarizācijas stāvokļa zudumi ~ 0.2 dB; • Blakus kanālu izolācijas 40 dB; • Kanālu intervāls > 6.25 GHz; • Pārskatājama filtra caurlaides josla un centrālais viļņa garums; • Zema temperatūras jutība un jutīgi pret mehānisku iedarbību; • Arhitektūra 1x1; • Nav virziendarbīgi; • Pārskatājami filtri ir aktīvi; • Dispersija ir maznozīmīgs lielums. |

1.4. Filtru parametru novērtēšanas aktualitāte

Viļņa garuma filtru fāzes pārvades funkcija var radīt būtiskus traucējumus augsta ātruma WDM sistēmās [20, 69, 79]. Fāzes pārvades funkcija kļūst arvien nozīmīgāka pieaugot datu pārraides ātrumam, kas notiek tehnoloģiju attīstības gaitā. Pirmkārt, pārraides ātrums vienā kanālā komerciālās sistēmās tiek palielināts no 10 Gbit/s uz 40 Gbit/s un 100 Gbit/s. Līdzīga tendence ātruma pieaugumam novērojama arī piekļuves tīklos ar WDM tehnoloģiju [84]. Otrkārt, palielinot spektrālo efektivitāti WDM sistēmās kanālu intervālu vērtības tiek samazinātas līdz minimumam, pielietojot OBPF ar daudz šaurāku caurlaides joslas platumu. Kā rezultātā šādās sakaru sistēmās jāņem vērā arī nelielas dispersijas vērtības (<100 ps/nm). Samazinoties optiskās šķiedras caurlaides joslai, kas pieejama konkrētam WDM sistēmas kanālam, jāveic detalizēts viena viļņa garuma filtra ietekmes novērtējums uz pārraidītā signāla kvalitāti. Jāņem vērā OBPF kompleksās pārvades funkcijas „stūrus”, kur dispersijas iespaids ir vislielākais, jo fāzes pārvades funkcija viļņa garuma filtriem šajos diapazonos ir nelineāra. Jāievēro fakts, ka viļņa garuma filtriem ar augstāku blakus kanālu izolāciju ir augstāka ienestās dispersijas vērtība [39, 78, 79].

Tāpēc būtiski zināt viļņa garuma filtru ienestās dispersijas lielumu, lai novērstu potenciālo signāla degradāciju. Nepieciešamība pēc viļņa garuma filtru dispersijas raksturlīkņu iegūšanas parādījās deviņdesmito gadu vidū un atbilstošas mērījumu metodes tika izstrādātas balstoties uz optisko šķiedru mērīšanas metodēm [28, 31, 93]. Tomēr, viļņa garuma filtri ir selektīvās ierīces un to raksturošanai jāņem vērā vairāki faktori. Pirmkārt, pieaug prasības pret mērījumu metodes dinamisko diapazonu, jo viļņa garuma filtra kompleksās pārvades funkcijas apgabalā, kur ir sagaidāmas lielākas dispersijas vērtības, pieaug iekārtas ienestie zudumi. Otrkārt, dispersija kā funkcijas no viļņa garuma pretēji optisko šķiedru gadījumam, ir strauji mainīga funkcija, ko var izskaidrot ar Krāmera – Kroniga (angļu val. Kramers – Kronig) relācijām [138]. Treškārt, dispersijas vērtības viļņa garuma filtriem ir relatīvi nelielas, salīdzinājumā ar optiskajām šķiedrām.

Ne tikai dispersija ietekmē nepieciešamo OBPF caurlaides joslu optiskā signāla izdalīšanai no kopējā WDM sistēmas spektra, kas ne vienmēr nosakāma tikai ar datu pārraides ātrumu, jo jāņem vērā arī tādi faktori kā temperatūras ietekme, lāzera centrālā viļņa garuma nobīde un novecošanās ietekme, un optiskā signāla spektra paplašināšanās nelineāro optisko efektu iespaidā [146]. Tāpēc rodas nepieciešamība pēc atbilstošiem pētījumiem WDM sistēmās ar pieaugošu datu pārraides ātrumu, jo viļņa garuma filtra ienestā dispersija var atstāt būtisku ietekmi uz pārraidīto signālu [8, 21, 73]. Promocijas darba pētījumos par šo problēmu

lielāka uzmanība pievērsta labākas izpratnes veidošanai par viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju ietekmi uz optiskā signāla kvalitāti. Šīs nodaļas būtiskākais piensums ir izveidotais WDM sistēmās plašāk izmantoto viļņa garuma filtru fizisko realizāciju salīdzinājums, kas apkopots 1. tabulā.

Viļņa garuma filtru izstrādes procesā pastiprināta uzmanība vērsta amplitūdas kvadrāta un fāzes pārvades funkciju formai. Saglabājot vēlamo fāzes pārvades funkciju, kura nodrošina minimālus signāla kropļojumus, tiek meklēta piemērota filtra amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija. Ņemot vērā iepriekš minēto nosacījumu, OBPF gadījumā amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijai jābūt pietuvinātai taisnstūrim, lai nodrošinātu minimālu šķērsrunu starp blakus esošajiem kanāliem. Savukārt, šis nosacījums var radīt signāla kropļojumus pieaugot datu pārraides ātrumam, jo ne vienmēr ienestās dispersijas līmenis ir minimāls. Tāpēc svarīgi ir izveidot metodiku, pēc kuras noteikt efektīvo caurlaides joslu OBPF gadījumā. Pamata uzdevums, lai veidotu pilnīgi optiskus tīklus, ir noskaidrot OBPF ietemi uz caur to pārraidīto augsta ātruma optisko signālu. Ņemot vērā pieprasījumu pēc arvien pieaugošā datu apjoma, nepieciešams meklēt jaunus viļņa garuma filtru pielietojuma veidus, lai palielinātu WDM sistēmu efektivitāti. Viens no šādiem risinājumiem būtu optiskā signāla modulācijas formāta pārveide pilnīgi optiskā vidē. Tas paaugstinātu gan signāla apstrādes efektivitāti un līdz ar to sekmētu kopējo sistēmas elastīgumu.

Apkopojot augstāk minētos faktus, tika izvirzīts promocijas **darba mērķis**: veikt teorētisku un eksperimentālu viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju ietekmes novērtējumu uz optiskās blīvēšanas sistēmas parametriem un efektivitāti.

Lai sasniegtu uzstādīto mērķi, bija nepieciešams veikt šādus **pamatuzdevumus**:

1. Noskaidrot plašāk pielietotos viļņa garuma filtrus un to galvenos parametrus viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās, kā arī veikt to salīdzinošo analīzi atkarībā no fiziskās realizācijas;
2. Apkopot analītiskās, skaitliskās un mērījumu metodes viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju noteikšanai un iegūt FBG, TFF, DG, AWG un MRR filtru kompleksās pārvades funkcijas, kā arī izveidot algoritmu iegūto viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju apstrādei un pārbaudei viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas simulācijas blokskēmā;

3. Izstrādāt mērījumu metodi viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas pārbaudei un noskaidrot izvēlēto optisko joslas filtru efektīvās caurlaides joslas vērtības 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK optiskajam signālam;
4. Izstrādāt metodi 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK optisko signālu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanai, saglabājot ekspluatācijā esošo viļņa garuma filtru tehnoloģiju;
5. Noteikt viļņa garuma filtra efektīvāko komplekso pārvades funkciju optiskā signāla atdalīšanai blīvās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās atkarībā no kanāla datu pārraides ātruma (2.5 Gbit/s 10 Gbit/s un 40 Gbit/s), intervāla starp kanāliem (50 GHz, 100 GHz un 200 GHz) un optiskā signāla kodēšanas veida;
6. Izstrādāt mikroriņķa rezonatora prototipu kanālu atdalīšanai un noskaidrot tā kaskādē saslēgšanas ietekmi uz 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajiem signāliem, kā arī izveidot mikroriņķa rezonatora prototipu OOK un DPSK modulētu optisko signālu pārveidei no RZ uz NRZ.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentāli mērījumi. Viļņa garuma filtru matemātisks apraksts veikts ar kompleksām pārvades funkcijām, kā arī fāzes pārvades funkcija iegūta no amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju ar Hilberta transformāciju. Skaitliskās simulācijās izmantots nelineārais Šrēdingera vienādojums, tiešā un inversā ātrā Furjē transformācija, kā arī Monte Karlo metode bitu kļūdu attiecības novērtēšanai. Viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju iegūšanai izmatotas vairākas mērījumu metodes. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas iegūtas ar pārskaņojama lāzera metodi un platjoslas gaismas avota metodi, savukārt, fāzes pārvades funkcija, grupas aizture un dispersija iegūtas ar modulēto fāzes nobīdes metodi. Optiskā signāla kvalitātes novērtēšanai izmantoti jaudas spektru, acu diagrammu un bitu kļūdu attiecības mērījumi.

Promocijas darba **jaunieguvumi** ir:

1. Izstrādāta metode viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas, kuras robežās pārraidītais optiskais signāls saglabā $BER < 10^{-9}$, noteikšanai, lai pilnveidotu optisko komponentu un apakšsistēmu pārraides parametru ITU-T G.671 rekomendāciju.

2. Teorētiski un eksperimentāli veikta 41.6 Gbit/s DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ ar viena riņķa mikroriņķa rezonatora filtru, kā arī vienlaicīga 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ ar vienu mikroriņķa rezonatora filtru.

Promocijas darba izstrādes laikā tika iegūti šādi **galvenie secinājumi**:

1. Ar izstrādāto algoritmu var apstrādāt teorētiski un eksperimentāli iegūtās viļņa garuma filtru kompleksās pārvades funkcijas (FBG, TFF, DG, AWG un MRR) un izveidot lietotāja definētu filtru modeļus, kā rezultātā pilnveidot viļņa garuma filtru modeļu klāstu simulācijas programmās.
2. Ar izveidoto mērījumu metodi iespējams novērtēt viļņa garuma filtru efektīvo caurlaides joslas platumu. Noskaidrots, ka FBG filtru gadījumā efektīvā caurlaides josla samazinās uz pusi pie lielāka pārraides ātruma, kas saistīts ar lielāko ienestās dispersijas vērtību salīdzinājumā ar TFF. Savukārt, TFF gadījumā tā ir nemainīga pie 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma;
3. 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmās spektrālo efektivitāti 200 GHz TFF gadījumā iespējams palielināt divas reizes (no 0.05 bit/s/Hz līdz 0.1 bit/s/Hz), savukārt, 100 GHz TFF gadījumā no 0.1 bit/s/Hz līdz 0.14 bit/s/Hz.
4. Augstāko signāla kvalitāti iespējams iegūt ar Super-Gausa un Pacelta-kosinusa filtriem. Pacelta-kosinusa filtra gadījumā labāka signāla kvalitāte ir novērojama pie mazāka pārraides ātruma, kas saistīts ar lielāku ienesto grupas aizturi nekā Super-Gausa filtra gadījumā. Savukārt, ar Pacelta-kosinusa filtru arī iespējams veikt fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveidi. Šāds risinājums, salīdzinājumā ar Super-Gausa un Lorencas filtriem, ir ar labāku noturību pret kaskādes slēguma radīto caurlaides joslas samazināšanos.
5. 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajiem signāliem pēc pieciem kaskādē saslēgtiem viena riņķa MRR filtriem sasniegta $BER < 10^{-9}$. CSRZ-OOK modulācijas formāts ir noturīgāks pret filtrēšanas efektiem salīdzinot ar CSRZ-DPSK modulācijas formātu, kas skaidrojams ar pēdējā daļēju fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveidi samazinoties MRR efektīvajai caurlaides joslai pie pieciem kaskādē saslēgtiem filtriem.
6. Ar viena riņķa MRR filtru ir iespējams veikt RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveidi, kā arī vienlaicīgu OOK un DPSK optisko signālu pārveidi no RZ uz NRZ, kas konkrētā gadījumā realizēts pie 41.6 Gbit/s pārraides ātruma.

Darba **praktiska vērtība**

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti piecu starptautisko un astoņu Latvijas zinātniski pētniecisko projektu realizācijai un tiks izmantoti Eiropas Savienības fonda projekta Nr.3DP/3.2.2.3.0/12/IPIA/SM/001 „Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos” izstrādei.
2. Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas gan ekspluatācijā esošu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmu uzlabošanai, gan jaunu ieviešanai. Sadarbības līguma ietvaros tās praktiski realizētas SIA "Telia Latvija", AS „Latvenergo” un SIA „TELE2” viļņgarumdales blīvēšanas sistēmu izpētei un pilnveidošanai.
3. Izstrādāta Latvijā patentēta mērījumu shēma viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas pārbaudei ar 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK optisko signālu.
4. Izveidota Latvijā patentēta divu kanālu mērījumu shēma ar 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK optisko signālu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanai, saglabājot ekspluatācijā esošo viļņa garuma filtru tehnoloģiju.

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti **20** starptautiskās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti **10** publikācijās zinātniskajos žurnālos, **2** Latvijas patentos, **6** rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, **8** rakstos konferenču tēžu krājumos (skat. sarakstu 1. pielikumā).

Darbā tika izvirzītas šādas **aizstāvamās tēzes**:

1. Ar izstrādāto metodi ir iespējams noteikt viļņa garuma filtru efektīvo caurlaides joslu, kuras robežās pārraidītais optiskais signāls saglabā $BER < 10^{-9}$. Viļņa garuma filtra caurlaides joslas platuma noteikšanas kritērijos, kas definēti ITU-T G.671 rekomendācijā, netiek ņemta vērā ietekme uz optiskā signāla kvalitāti.
2. Ar izstrādāto metodi ir iespējams paaugstināt viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālo efektivitāti, samazinot kanālu intervālu līdz minimumam un saglabājot pielietoto viļņa garuma filtru tehnoloģiju. Viļņa garuma filtru ražotāji definē caurlaides joslas platumu pie mīnus 3 dB, bet nenorāda kādam viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas kanālu intervālam un pārraides ātrumam tie paredzēti.
3. 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajiem signāliem pēc pieciem kaskādē saslēgtiem viena riņķa MRR filtriem ir iespējams sasniegt $BER < 10^{-9}$. Lielāki kropļojumi

novērojami 40 Gbit/s CSRZ-DPSK optiskajam signālam tāpēc, ka notiek daļēja fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveide.

4. Ar viena riņķa MRR filtru ir iespējams veikt vienlaicīgu 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveidi no RZ uz NRZ saglabājot $BER < 10^{-9}$.

Promocijas darbā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti un definēti iespējamie **turpmākie pētījumu virzieni:**

1. Pilnīgi optiska modulācijas formātu pārveide ar šķiedras Brega režģiem;
2. Optisko signālu reģenerācija parametriskajos pastiprinātājos.

Promocijas darba apjoms ir 143 lappuses. Darbs sastāv no ievada, četrām nodaļām, literatūras saraksta un pielikuma. Ievadā pamatota veikto pētījumu aktualitāte un noteikti promocijas darba pētījumu virzieni.

Darba pirmajā nodaļā apskatītas viļņa garuma filtru attīstības tendences un veikta salīdzinošā analīze starp viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās plašāk pielietotajām fiziskajām realizācijām, kā arī formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvāmās tēzes, apkopoti galvenie rezultāti un definēti turpmākie pētījumu virzieni.

Darba otrajā nodaļā ir apskatīts viļņa garuma filtru matemātiskais raksturojums un apkopotas mērījumu metodes to komplekso pārvades funkciju noteikšanai. Aprakstīti viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju mērījumi un izstrādāts algoritms teorētiski un eksperimentāli iegūto viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju apstrādei un lietotāja definēto filtru izveidei OptSim programmā.

Trešajā nodaļā ir izstrādāta un Latvijā patentēta mērījumu shēma viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas noteikšanai (skat. pieliecību 2. pielikumā), kā arī izveidota un Latvijā patentēta mērījumu shēma viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanai, saglabājot viļņa garuma filtra tehnoloģiju (skat. pieliecību 3. pielikumā). Savukārt, pēc tam noskaidrota viļņa garuma filtru efektīvākā kompleksā pārvades funkcija blīvās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās un noskaidrotas viļņa garuma filtru FWHM joslas vērtības, lai veiktu fāzes uz intensitātes modulācijas formāta pārveidi ar Lorencas, Pacelta-kosinusa un Super-Gausa filtriem.

Ceturtajā nodaļā ir apskatīts jauna veida viļņa garuma filtrs: mikroriņķa rezonators, kas pagaidām netiek pielietots komerciālās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Pētījumi

veikti doktorantūras prakses laikā Dānijas Tehniskajā universitātē, sadarbojoties ar Fotonikas institūta un Wuhan Nacionālās Optoelektronikas laboratorijas zinātniekiem profesora Christophe Peucheret vadībā elektriskās laukdales blīvēšanas (ETDM) laboratorijā (skat. rekomendāciju 4. pielikumā). Veikta sekmīga 41.6 Gbit/s fāzes modulētu optisko signālu pārveidei no ar atgriešanos pie nulles koda uz bez atgriešanos pie nulles kodu, kā arī vienlaicīga 41.6 Gbit/s intensitātes un fāzes modulētu optisko signālu pārveide no ar atgriešanos pie nulles koda uz bez atgriešanos pie nulles kodu.

Nobeigumā apkopoti un pamatoti promocijas darba galvenie secinājumi. Pielikumos ir pievienoti konferenču, publikāciju un projektu saraksti, Latvijas patentu apliecības, doktorantūras prakses rekomendācija un izmantoto iekārtu tehniskās specifikācijas.

2. KOMPLEKSO PĀRVADES FUNKCIJU APRAKSTS UN NOVĒRTĒŠANA

Signālus un fiziskās komponentes matemātiski iespējams aprakstīt ar kompleksām funkcijām. Laika apgabalā fiziskas komponentes iespaidu uz pārraidāmo signālu var novērtēt ar konvolūciju starp funkciju, kas apraksta komponenti, un funkciju, kura raksturo ieejas signālu. Balstoties uz Furjē transformācijas teoriju šo iespaidu ekvivalenti var novērtēt frekvenču diapazonā, izmantojot Furjē transformāciju no ieejas signāla un Furjē transformāciju no izteiksmes, kura apraksta fizisko komponenti [37]. Šajā nodaļā izmantosim frekvences vai viļņa garuma diapazonu, jo apskatītie elementi ir viļņa garuma filtri.

2.1. Viļņa garuma filtru matemātisks apraksts

2.1.1. Kompleksā pārvades funkcija

Pastāv plašs literatūras klāsts par filtru projektēšanu, kurā apskatīti digitālie un analogie filtri, bezgalīgas un galīgas impulsa reakcijas filtri, rekursīvu un nerekursīvu filtru izveide, kas ir paredzēts elektronisko filtra shēmu projektēšanai [24, 86, 138].

Pilns komplekts funkciju ir nepieciešams precīzai patvaļīgas funkcijas aproksimācijai. Labi pazīstams komplekts sastāv no sinusoidālām funkcijām, kuru svērtā summa dod Furjē rindas aproksimāciju. Furjē rinda var tikt pierakstīta kā eksponenciāla funkcija ar kompleksiem argumentiem [37]:

$$H(f) = \sum_0^N [c_n \cdot e^{-i(2\pi \cdot f \cdot n - \phi_n)}] \quad (2.1)$$

kur $H(f)$ - viļņa garuma filtra frekvenču pārvades funkcija, N - filtra kārtā, bet $c_n \cdot e^{-i(-\phi_n)}$ - kompleksie svāra koeficienti. Optiskais analogs atrodams interferometros kā viļņa garuma filtros. Interferometri tiek iedalīti divās vispārējās klasēs, lai gan ir daudz dažādu to variāciju. Pirmā klase ir MZI (skat.1.7.att.), kuru nošķirošā pazīme ir galīgs skaits ar aizturēm bez jebkādam atgriezeniskām saitēm, tāpēc šos filtrus var klasificēt kā mainīga vidējā (MA) jeb galīgas impulsa reakcijas (FIR). Otrā klase ir FPI, šo filtru gadījumā optiskais signāls izejā ir bezgalīga summa no ieejas optiskā signāla ar dažādām aizturēm. Šāda tipa viļņa garuma filtrus klasificē kā auto-regresīvus (AR) jeb bezgalīgas impulsa reakcijas (IIR) [8, 86]. Slēdzot kaskādē šāda veida filtrus, to caurstarotā pārvades funkcija var tik aprakstīta šādā veidā:

$$H(f) = \frac{1}{\sum_0^N [c_n \cdot e^{-i(2\pi \cdot f \cdot n - \phi_n)}]} \quad (2.2)$$

Savukārt, atstarotā pārvades funkcija ir summa no AR un MA, kuri tiek klasificēti kā auto-regresīvi mainīga vidējā (ARMA) filtri. Tādā gadījumā FIR un IIR klasifikācija ir nepiemērota, jo filtrs var būt AR vai ARMA un tik un tā būt ar bezgalīgu impulsa reakciju. Tāpēc IIR un FIR terminoloģijas vietā vairāk piemērota MA, AR un ARMA terminoloģija. TFF un FBG ir vairāku FPI filtru kaskāde ar atbilstošu slāņu vai periodu skaitu. To caurstarotā pārvades funkcija ir kā AR, bet atstarotā pārvades funkcija kā ARMA [86]. Savukārt, AWG un DG ir klasificējami kā MA, jo to struktūrā ir galīgs skaits ar optiskā signāla aizturēm bez jebkādām atgriezeniskām saitēm [37, 86, 138].

Lai apskatītu tālāk šo tematu, ieviesīsim dažas definīcijas. Viļņa garuma filtram ar taisnstūra amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju (ATF), kurš OBPF gadījumā ir centrēts ap ω_0 , ar caurlaides joslas platumu $\Delta\omega$, kompleksā pārvades funkcija ir definēta kā $H(i \cdot \omega)$, kur $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ir leņķiskā frekvence un f ir frekvence [86, 138]:

$$H(i \cdot \omega') = e^{-i\omega'}, 0 \leq |\omega'| \leq \Delta\omega \quad (2.3)$$

$$\omega' = \omega - \omega_0 = 2 \cdot \pi (f - f_0) \quad (2.4)$$

Izteiksmē f_0 ir viļņa garuma filtra centrālā frekvence. Filtra centrālo frekvenci izvēlās, lai tā sakristu ar daudzkanālu sakaru sistēmas filtrējamā kanāla centrālo frekvenci. Ideālam OBPF ATF ir ar taisnstūra formu. Tas dod iespēju veikt pilnīgu atdalīšanu starp vēlamajām un nevēlamajām jaudas spektra daļām. Jāņem vērā būtisks faktors: fizikāli šādus filtrus nav iespējams realizēt. Šajā gadījumā svarīgi noskaidrot pārvades funkciju, kas raksturo OBPF fiziskās realizācijas. Filtru matemātisks raksturojums ir noderīgs vairākos aspektos: to iespējams izmantot skaitliskā pārraides sistēmas simulācijā, kā arī iespējams noskaidrot nepieciešamos datus OBPF fizisko realizāciju izveidei [138].

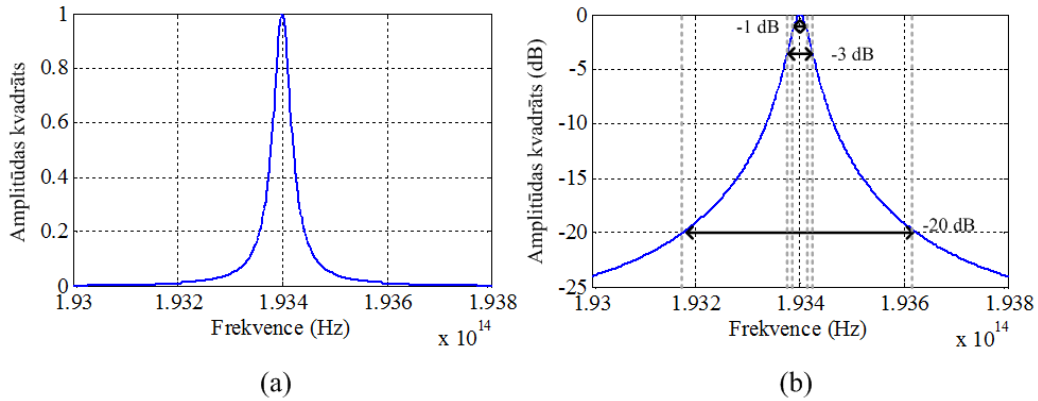
Tālākajā nodaļas gaitā lineāra optiska elementa kā viļņa garuma filtrs pārvades funkciju pārrakstīsim formā, lai novērtētu filtra parametrus leņķiskajai frekvencei. Tāpēc pārvades funkcija jāuzraksta:

$$H(i \cdot \omega) = |H(i \cdot \omega')| \cdot e^{i\phi(\omega)} \quad (2.5)$$

Balstoties uz lineāru sistēmu teoriju, tad filtra pārvades funkcija ir Furjē transformācija no filtra impulsa reakcijas [37].

$$H(i \cdot \omega') = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-i \omega' t} dt \quad (2.6)$$

Zemāk, 2.1.attēlā dota ATF gan lineārā, gan logaritmiskā mērogā Lorenca filtram:



2.1.att. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija Lorenca filtram (a) lineārā mērogā, (b) logaritmiskā mērogā.

Viļņa garuma filtram ar mainīgu ATF, kura redzama 2.1.attēlā, tā caurlaides joslas platumu apraksta dažādus vājinājuma līmeņus. Biežāk izmantotie līmeņi ir -1 dB, -3 dB un -20 dB līmeņi. Attiecīgās caurlaides joslas ir 20 GHz, 40 GHz un 440 GHz.

Pārraides parametrus iespējams aprakstīt ar ATF, savukārt, fāzes uzvedību apraksta fāzes pārvades funkcija (PTF), kuru var uzrakstīt šādi (izmantojot 2.5 izteiksmi):

$$\phi(\omega') = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{Im}(H(i \cdot \omega'))}{\operatorname{Re}(H(i \cdot \omega'))} \quad (2.7)$$

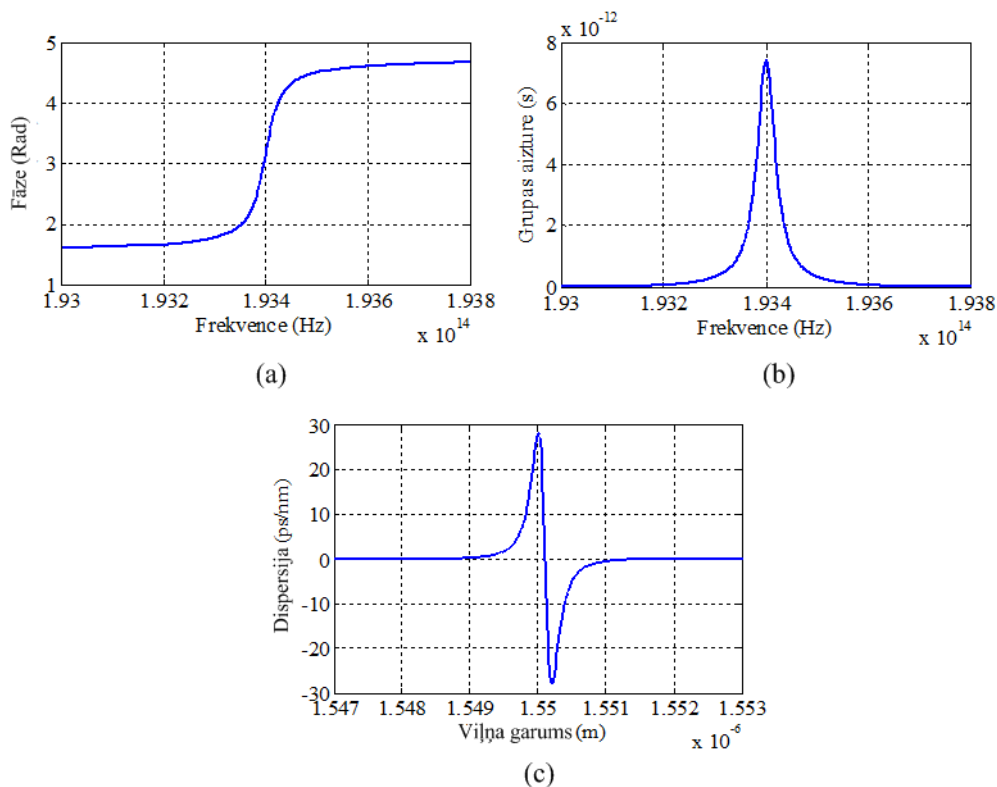
Savukārt, grupas aizture ir definēta kā:

$$\tau(\omega') = -\frac{d\phi(\omega')}{d\omega'} \quad (2.8)$$

Grupās aiztures definīcijas zīme var atšķirties, jo tas ir atkarīgs no tā, kurā vietā izvēlas šo zīmi izvietot. Praksē tikai relatīvā grupas aizture un tās variācijas atkarībā no viļņu garuma ir ar praktisku nozīmi, kas nerada nepieciešamību definēt absolūto grupas aizturi. Dispersija parasti tiek definēta ps/nm un tā ir grupas aiztures atvasinājums pēc viļņa garuma [138].

$$D(\lambda) = \frac{d\tau(\omega')}{d\lambda} \quad (2.9)$$

Augstāk dotā definīcija ir pilnībā atbilstoša biežāk lietotajām optiskajām šķiedrām un D parāda kopējo hromatisko dispersiju, kura uzkrājusies optiskajā signālā kopējā šķiedras garumā. 2.2.attēlā parādītas Lorenca filtra fāzes, grupas aiztures un dispersijas raksturlīknes.



2.2.att. Lorenca filtra fāzes, grupas aiztures un dispersijas raksturlīknes

2.1.2. Amplitūdas un fāzes relācijas

No teorijas zināms, ka lineāru sistēmu fāzes pārvades funkciju ir iespējams iegūt no amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas, ja tiek izpildīts „minimālās fāzes” nosacījums [23, 37]. Tāpēc, izmantojot šo metodi, iespējams iegūt optiskā filtra ienestās dispersijas lielumu no tā amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas. Apskatāmais „minimālās fāzes” nosacījums nodrošina matemātisku sakarību starp amplitūdu un fāzi optiskajā filtrā, kas ir analogs Krāmera – Kroniga relācijām starp absorbciju un laušanas koeficientu materiālam. Matemātiski lielumi, kuri apmierina šādas relācijas ir zināmi kā Hilberta transformācijas. Šo iemeslu dēļ, augstāk minētās relācijas bieži tiek izmantotas viļņa garuma filtru raksturošanai [77, 94].

Šajā apakšpunktā atbilstoši [120] tiek dots Krāmera - Kroniga relāciju izvedums balstoties uz cēlonības principu lineārās sistēmās. Apskatīsim pasīvu lineāru optisko filtru ar impulsa reakciju $h(t)$. Šāda fizikāla sistēma atbilst cēlonības principam, tāpēc tās impulsa

reakcija ir reāls lielums un apmierina šādu nosacījumu: $h(t) = 0$ un $|h(t)| < \infty$. Pieņemsim, ka $H(\omega)$ ir optiskā filtra pārvades funkcija (t.i. Furjē transformācija no impulsa reakcijas) un $H_L(s)$ ir Laplasa transformācija, kur s ir komplekss lielums. Furjē transformācija var tikt aprēķināta no Laplasa transformācijas $H_L(i \cdot \omega) = H(\omega)$. Fakts, ka $h(t)$ atbilst cēlonības principam nozīmē to, ka $H_L(s)$ ir analītisks labās rokas pusplaknē.

Pieņemsim, ka $h(t)$ ir lineāras sistēmas impulsu reakcija. Tas cēlonības princips var tikt aprakstīts šādā veidā:

$$h(t) = h(t) \cdot u(t), \quad (2.10)$$

kur $u(t)$ ir:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}, \quad (2.11)$$

Furjē transformācija no iepriekšējās izteiksmes ir

$$H(\omega) = \pi \cdot \delta(\omega) - \frac{i}{\omega}, \quad (2.12)$$

Veicot Furjē transformāciju no 2.10 izteiksmes, iegūstam:

$$H(\omega) = \frac{1}{2\pi} H(\omega) * \left(\pi \delta(\omega) - \frac{i}{\omega} \right). \quad (2.13)$$

Ņemot vērā iepriekšējos aprēķinus iespējams uzrakstīt šādu izteiksmi:

$$H(\omega) = \frac{1}{i \cdot \pi} \cdot P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(\Omega)}{\Omega - \omega} d\Omega \quad (2.14)$$

Augstāk uzrakstītajā izteiksmē P ir Koši galvenā vērtība. Izteiksme 2.14 var tikt izrēķināta no impulsa reakcijas. Svarīgs rezultāts no 2.14 ir tas, ka reālā (attiecīgi imaginārā) daļa no kompleksās pārvades funkcijas var tikt noteikta zinot tās imagināro (attiecīgi reālā) daļu. Reālā un imaginārā daļa no kompleksās sastāda Hilberta transformācijas pāri [138]. Ja mēs sadalām $H(\omega)$ reālajā un imaginārajā daļā, tad iegūstam:

$$H(\omega) = H_r(\omega) + iH_i(\omega) \quad (2.15)$$

Un iegūstam vispārīgās Krāmēra-Kroniga relācijas:

$$H_r(\omega) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H_i(\Omega)}{\Omega - \omega} d\Omega \quad (2.16)$$

$$H_i(\omega) = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H_r(\Omega)}{\Omega - \omega} d\Omega \quad (2.17)$$

Tā kā impulsa reakcija atbilst cēlonības principam, tad varam rakstīt:

$$H(\omega) = \int_0^{+\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^{+\infty} h(t) \cos(\omega t) dt - i \int_0^{+\infty} h(t) \sin(\omega t) dt. \quad (2.18)$$

Logaritms no pārvades funkcijas lineārai iekārtai, kas definēta 2.5 izteiksmē, var tikt uzrakstīts šādi:

$$\ln(H(\omega')) = \ln|H(\omega')| - i \cdot \phi(\omega') \quad (2.19)$$

Tādējādi, izmantojot rezultātus no 2.14 izteiksmes, iespējams iegūt Hilberta transformācijas relācijas pārvades funkcijai starp amplitūdas naturālo logaritmu un fāzi optiskajam filtram. Lai gan, jāievēro faktors, ka $\ln(H_L(s))$ funkcijai ir jāizpildās sākotnējam pieņēmumam par tās analītiskumu labās rokas pusplaknē. Nopietns fakts ir tas, ka $H_L(s)$ var būt nulles labās rokas pusplaknē, kur logaritms nav definēts. Ja pieņemam, ka $H_L(s)$ nav nulles priekš $R(s) \geq 0$, kur R apzīmē reālo daļu, tad fāze būs noteikta viennozīmīgi no amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas, izmantojot šādu izteiksmi:

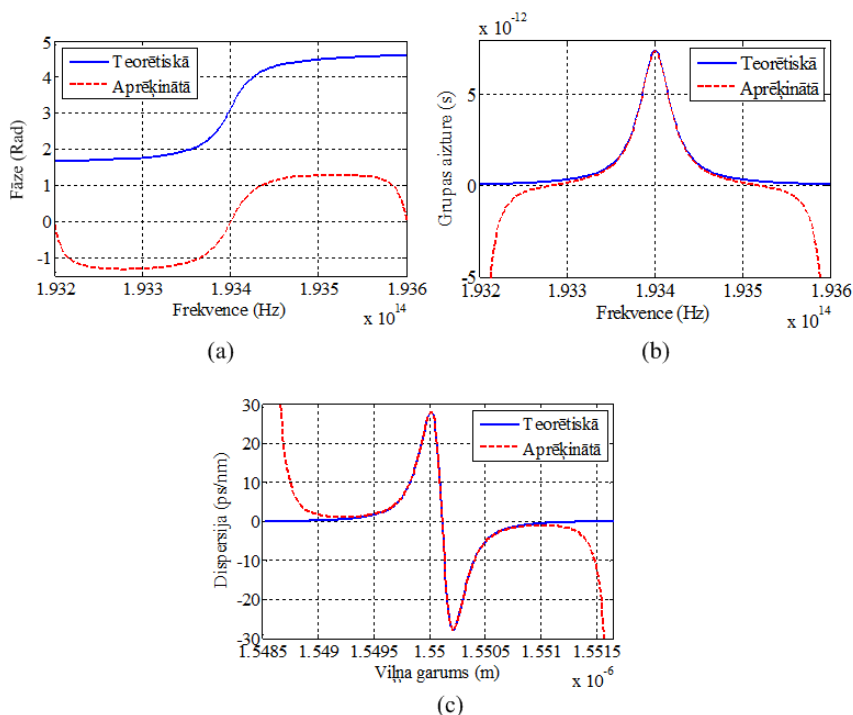
$$\phi(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln|H(\Omega)|}{\Omega - \omega} d\Omega \quad (2.20)$$

Filtri, kuriem logaritms no Laplasa transformācijas impulsa reakcijai ir analītisks labās rokas pusplaknē tiek saukti par „minimālās fāzes” [138].

Ekvivalentas izteiksmes amplitūdas – fāzes izteiksmēm, kas ir redzamas izteiksmē 2.20, ir bieži sastopamas literatūrā. Ja izteiksmē 2.20 ieviešam mainīgo $u = \ln(\Omega/\omega)$, tad izteiksme var tikt pārrakstīta formā, kura parāda sakarību starp amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju un fāzes pārvades funkciju:

$$\phi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d}{du} [\ln|H(\omega \cdot e^u)|] \cdot \ln\left(\coth \frac{|u|}{2}\right) du \quad (2.21)$$

Faktors $\ln\left(\coth \frac{|u|}{2}\right)$ ir maksimāls, kad $u = 0$, kas atbilst $\omega = \Omega$ un strauji samazinās, kad $|u|$ pieaug. Rezultātā galvenais devums no integrāļa ir tad, kad $u = 0$ un fāze pārvades funkcijai pie ω ir atkarīga no amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas stāvuma pie tās pašas frekvences. No šī secinām, ka realizējot ATF ar asiem „stūriem” „minimālās fāzes” OBPF iegūstam dispersijas pieaugumu tieši šajos „stūros”. „Minimālās fāzes” viļņa garuma filtram nav iespējams vienlaicīgi iegūt zemu dispersiju un augstu blakus kanālu izolācijas vērtību. Filtri, kuri nav „minimālās fāzes”, piedāvā vairāk brīvības pakāpes, lai sasniegtu iepriekš uzstādītos mērķus. Lai gan jāņem vērā faktors, ka filtri, kuri neatbilst „minimālās fāzes” nosacījumam, arī ir ar lielu dispersiju, ja to ATF ir ar asiem „stūriem” Tas nozīmē tikai to, ka šādiem filtriem dispersiju nav iespējams izrēķināt caur amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju [77, 94, 138].



2.3.att. Lorencas filtra fāzes, grupas aiztures un dispersijas raksturlīknes

Izteiksme 2.14 norāda, ka ATF teorētiski ir jāintegrē pie visām frekvencēm, lai iegūtu PTF ar Krāmera-Kroniga relācijām. Lai gan praksē šis nav izpildāms uzdevums. Tāpēc tiek izdarīts pieņēmums, ka ATF vērtībām, kas atrodas tālu no viļņa garuma filtra centrālās frekvences ir mazs iespaids uz PTF. 2.3. attēlā tika veikts MRR viļņa garuma filtra parametru aprēķins un novērtēta gan ATF, gan PTF. PTF gadījumā teorētiski tā tiek iegūta no nomestā porta kompleksās pārvades funkcijas. Pēc tam PTF ar Hilberta transformācijas palīdzību tiek aprēķināta no teorētiskās ATF. Kā redzams no 2.3.attēla, tad ļoti laba atbilstība novērojama pie viļņa garuma filtra centrālās frekvences. Tomēr, praksē nākas satapties ar trokšņainiem mērījumu datiem un nelielu mērījumu punktu skaitu, kas rada grūtības pielietot Hilberta transformāciju un iegūt precīzu teorētiskā un aprēķinātā no mērījumiem sakritību. Tāpēc var lietot arī matemātiskas funkcijas, ar kurām var aproksimēt trokšņainos ATF mērījumu datus un tad pielietot Hilberta transformāciju PTF iegūšanai.

2.1.3. Matemātiskās funkcijas WF aproksimācijai

Super-Gausa optiskais filtrs

Super-Gausa optiskajam filtram amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija dota zemāk:

$$|H(f)| = \exp\left(-\frac{(f-f_0)^{2N}}{2\Delta f^{2N}}\right), \quad (2.22)$$

kur f_0 - filtra centrālā frekvence un N - filtra kārtā. Δf automātiski tiek novērtēta ar -3 dB joslas platumu, kas apzīmēta ar f_{3dB} . Saikne starp abiem parametriem ir šāda:

$$\Delta f = \frac{f_{3dB}}{2^{2N}\sqrt{\ln(2)}} \quad (2.23)$$

Ar Super-Gausa filtru komplekso pārvades funkciju var aproksimēt AWG filtrus ar Super-Gausa pārvades funkciju un plāno kārtiņu filtrus ar mazu laušanas koeficienta modulāciju [126].

Lorenca optiskais filtrs

Lorenca optiskajam filtram ir sekojoša pārvades funkcija:

$$|H(f)|^2 = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{2(f-f_0)}{\Delta f_s} \right)^2} \right)^N, \quad (2.24)$$

kur f_0 - filtra centrālā frekvence, N - filtra pakāpe. Δf automātiski tiek novērtēta ar -3 dB joslas platumu, kas apzīmēta ar f_{3dB} , un to var ievadīt OptSim parametru logā. Piemēram, ja $N = 1$, tad $\Delta f_s = f_{3dB}$, saikne starp abiem parametriem ir šāda:

$$f_{3dB} = \Delta f_s \sqrt{2^{\frac{1}{N}} - 1} \quad (2.25)$$

Augstākas pakāpes Lorenca filtrs, pielāgojot trīs parametrus (f_0 , Δf_s un N), kurus var iegūt no reāliem mērījumiem, var izveidot simulācijas daudzu veidu vienas ieejas un vienas izejas optiskajiem filtriem [126].

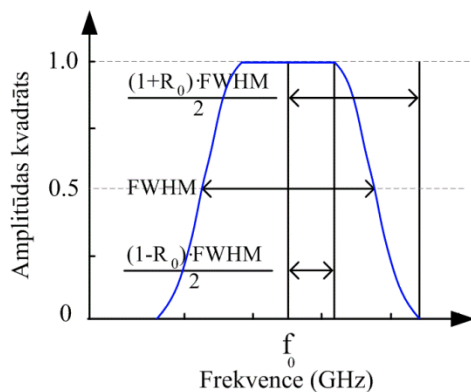
Pirmās pakāpes Lorenca filtram ir diezgan vienmērīgs pārvades funkcijas slīpums, jo tas ir pirmās kārtas optiskais joslas filtrs. Lai palielinātu pārvades funkcijas slīpumu, var palielināt filtra pakāpju skaitu N , neizmainot f_{3dB} joslas platumu. Ar Lorenca filtru komplekso pārvades funkciju var aproksimēt FPI un MRR filtrus.

Pacelta-kosinusa optiskais filtrs

Pacelta-kosinusa optiskajam filtram ir sekojoša pārvades funkcija:

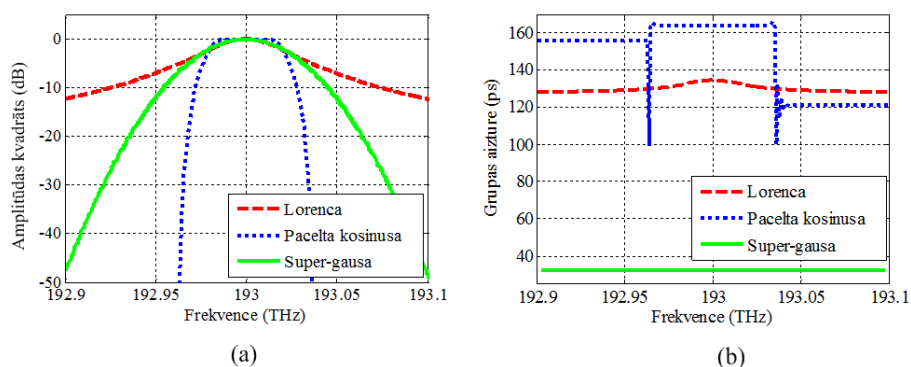
$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f - f_0| < (1 - R_0) \frac{B_w}{2} \\ \frac{1}{2^\alpha} \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{R_0 B_w} \left(|f - f_0| - \frac{B_w}{2} \right) \right] \right\}^\alpha, & (1 - R_0) \frac{B_w}{2} < |f - f_0| < (1 + R_0) \frac{B_w}{2} \\ 0, & |f - f_0| > (1 + R_0) \frac{B_w}{2} \end{cases} \quad (2.26)$$

kur f_0 - filtra centrālā frekvence, B_w - joslas platumu līmenī viena puse FWHM. R_0 - nogriešanas parametrs (sk. 2.4. att.). α - eksponente, kurā standarta Pacelta-kosinusa funkcija ir kāpināta.



2.4. att. Pacelta-kosinusa optiskā filtra funkcija [126]

Ar Pacelta-kosinusa filtru komplekso pārvades funkciju var aproksimēt AWG filtrus ar plakānu virsotni, difrakcijas režģus, plāno kārtiņu filtrus un šķiedras Brega režģus [126]. Super-Gausa, Lorenca un Pacelta-kosinusa filtru pārvades funkciju salīdzinājums parādīts 2.5. attēlā.



2.5. att. Matemātisko funkciju salīdzinājums pārvades funkciju aproksimācijai

Lai veiktu precīzu viļņa garuma filtra precīzu aproksimāciju ar matemātisku funkciju ir jāveic gan ATF, gan PTF mērījumi un iegūtās raksturlīknes ir jāsalīdzina ar matemātiski iegūtajām. Jāmin arī fakts, ka dispersijas parametrs var atšķirties atkarībā no fiziskās realizācijas. Tāpēc tālākajā nodaļā gaitā pievērsīsimies reālu viļņa garuma filtru pārvades funkciju iegūšanas iespējām ar mērījumu metodēm.

2.2. Komplekso pārvades funkciju mērījumi

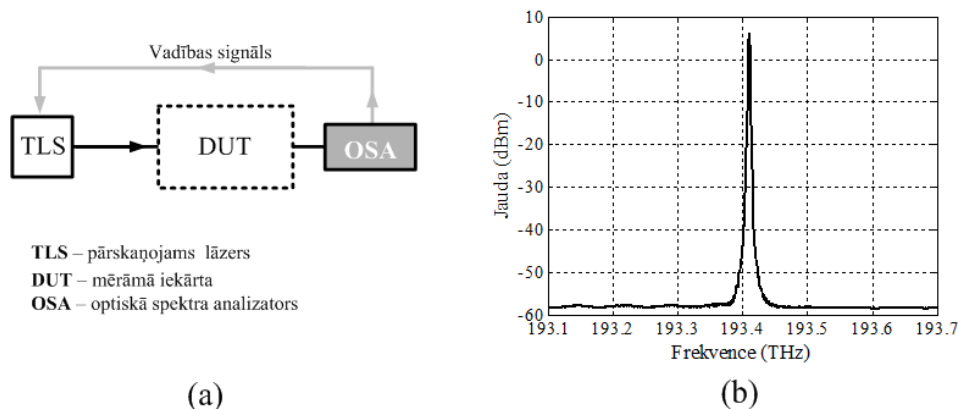
Komplekso pārvades funkciju iegūšana darbā sadalīta divās daļās. No sākuma tiek iegūtas ATF, savukārt, pēc tam tiek iegūtas PTF. Tas ir saistīts arī ar mēriekārtu pieejamību šo mērījumu veikšanai attiecībā uz PTF. Pateicoties Telekomunikāciju Institūta veiksmīgai sadarbībai ar kompāniju „Agilent Technologies”, 2011. gada februārī tika veikti vairāku uz to

brīdi Šķiedru Optikas Pārraides Sistēmu laboratorijā esošo viļņa garuma filtru PTF mērījumi. Mērījumos izmantoto iekārtu tehniskā specifikācija ir dota 5. pielikumā, kurā ir atrodamas arī pieļaujamās mērījumu kļūdu vērtības.

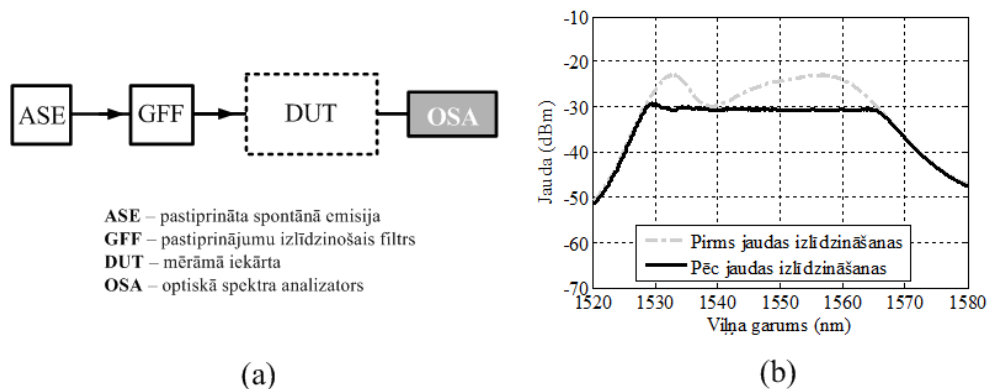
2.2.1. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju mērījumi

Divas atšķirīgas metodes var tikt izmantotas, lai iegūtu viļņa garuma filtra ATF. Galvenā atšķirība starp šīm metodēm ir izmantotā gaismas avota veids.

Pirmajā gadījumā var tikt izmantots pārskaņojams lāzers (TLS) kopā ar optiskā spektra analizatoru (OSA). Šajā gadījumā liela nozīme ir abu šo iekārtu sinhronizācijā, kā arī lāzera viļņa garuma un maksimālās jaudas stabilitātē izmantotajā mērījumu diapazonā. Šādos risinājumos parasti tiek izmantoti viena ražotāja mērinstrumenti, kas savā starpā tiek kontrolēti ar vadības shēmu. Shēmas realizācija redzama 2.6.attēlā. Mērījumu veikšanai tika izmantots Agilent 86038B pārskaņojams lāzers, kas „sajūgts” ar optiskā spektra analizatoru. Turpmākajās darba nodaļās šo metodi dēvēsim par TLS metodi.



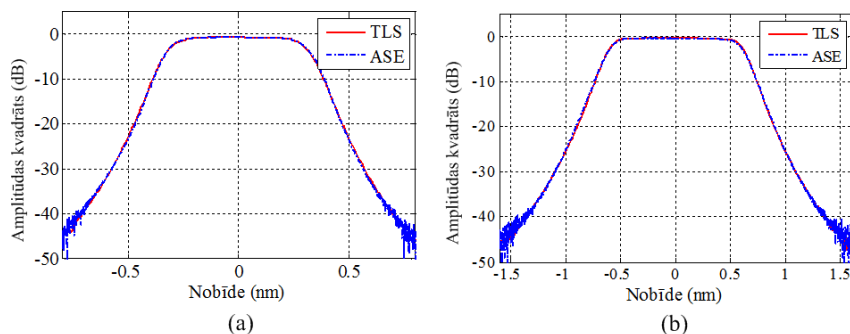
2.6. att. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas mērījumu shēma ar TLS (a) un pārskaņojama nepārtraukta starojuma lāzera (b) jaudas spektrs



2.7. att. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas mērījumu shēma ar ASE (a) un platjoslas trokšņveida pastiprinātās spontānās emisijas gaismas avota jaudas spektrs

Otrās metodes galvenā atšķirība no TLS metodes ir gaismas avots. Mērījumu shēmā tiek izmantots platjoslas gaismas avots. Shēmas realizācija redzama 2.7.attēlā. Konkrētā gadījumā nav nepieciešams izmantot papildus vadības shēmu, lai sinhronizētu gaismas avotu ar OSA. Tomēr, šīs metodes galvenais ierobežojums ir viļņu garuma darbības diapazons (no 1530 nm līdz 1565 nm), jo gaismas avots mērījumu shēmā realizēts kā platjoslas trokšņveida pastiprinātās spontānās emisijas avots (sastāv no pumpējoša gaismas avota: lāzerdiodes ar 975 nm centrālo viļņa garumu un 10 m garas erbija legētas šķiedras). Gaismas avota jaudas spektra izlīdzināšanai izmantots GFF. Papildus izmantots ADVANTEST Q8384 OSA. Turpmākajās darba nodaļās šo metodi dēvēsim par pastiprinātās spontānās emisijas (ASE) metodi, kas saistīts ar izmantoto gaismas avotu.

Darbā tika veikti ATF mērījumi vairākiem viļņa garuma filtriem: TFF, FBG, AWG un DG, kas tiek izmatoti komerciālos DWDM sistēmu risinājumos. Pēdējais no minētajiem viļņa garuma filtriem vairāk ir piemērots zinātniskiem pētījumiem, jo tas veidots ar pārskatājamu viļņa garumu un caurlaides joslas platumu, kas vēlāk būs redzams no mērījumiem.

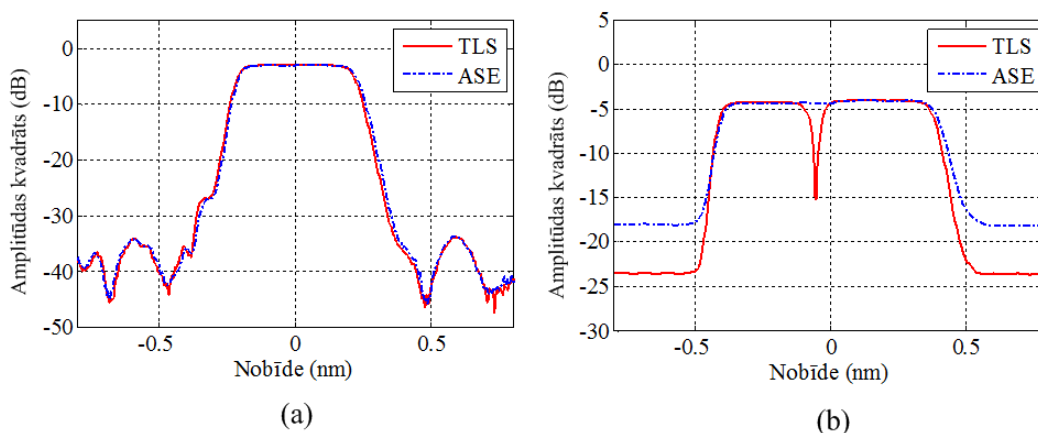


2.8. att. 100 GHz (a) un 200 GHz (b) TFF amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas logaritmiskajā mērogā iegūtas ar TLS un ASE metodēm

2.8.attēlā redzamas amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas 100 GHz un 200 GHz TFF viļņa garuma filtriem. Turpmākajā darbā tās tiks dēvētas kā 100 GHz un 200 GHz TFF, jo tāds ir to komerciālais nosaukums. 100 GHz TFF viļņa garuma filtra ienestais vājinājums ir 1.2 dB, caurlaides joslas platumi -1 dB, -3 dB un -20 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 68.8 GHz, 81.3 GHz un 118.8 GHz.

Savukārt, 200 GHz TFF viļņa garuma filtra ienestais vājinājums ir 1.2 dB, caurlaides joslas platumi -1 dB, -3 dB un -20 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 137.5 GHz, 200 GHz un 275 GHz. Ienestais vājinājums tika noteikts pie centrālā viļņa garuma, kas TFF viļņa garuma

filtriem (100 GHz un 200 GHz) ir 1550.12 jeb 193.4 THz un 1550.92 nm jeb 193.3 THz attiecīgi.



2.9. att. 55 GHz (a) un 100 GHz (b) FBG amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas logaritmiskajā mērogā iegūtas ar TLS un ASE metodēm

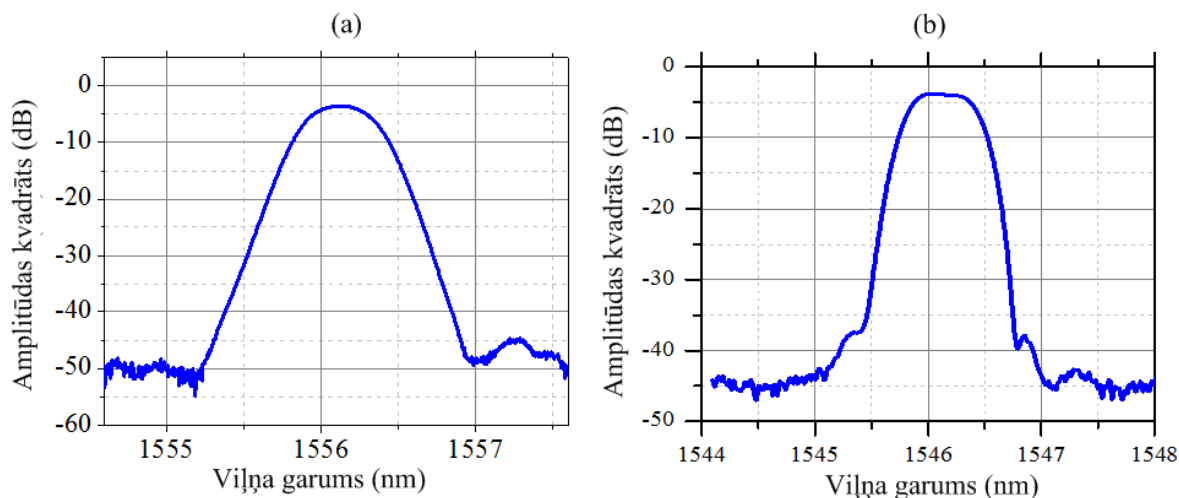
Savukārt, 2.9.attēlā redzamas amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas 55 GHz un 100 GHz FBG viļņa garuma filtriem. Turpmākajā darbā tās tiks dēvētās kā 55 GHz un 100 GHz FBG, jo tāds ir to komerciālais nosaukums. 55 GHz FBG viļņa garuma filtra ienestais vājinājums ir 3.5 dB, caurlaides joslas platums -1 dB, -3 dB un -20 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 50 GHz, 55 GHz un 75 GHz.

100 GHz FBG viļņa garuma filtra ienestais vājinājums ir 4.5 dB, caurlaides joslas platums -1 dB un -3 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 88.8 GHz un 100 GHz (veicot mērījumus ar ASE metodi). Ienestais vājinājums tika noteikts pie centrālā viļņa garuma, kas FBG viļņa garuma filtriem (55 GHz un 100 GHz) ir 1550.12 nm jeb 193.4 THz un 1549.32 jeb 193.5 THz attiecīgi.

Veicot mērījumus ar TLS metodi 100 GHz FBG gadījumā, tika novērotas nozīmīgas atšķirības gan filtra blakus kanālu izolācijas vērtībā, gan parādījās „pīķis” caurlaides joslā. Šī nesakrītība ir skaidrojama ar to, ka TLS metode ir precīzāka (izvēlēts koherents gaismas avots un OSA izšķirtspēja ir augstāka) un parāda to, ka 100 GHz FBG sastāv no diviem kaskādē slēgtiem 55 GHz FBG ar dažādiem centrālajiem viļņa garumiem (izvēlēti blakus esoši DWDM sistēmas viļņa garumi). Šis pieņēmums tika apstiprināts arī veicot PTF mērījumus, kā arī atverot iekārtas iepakojumu tika konstatēts, ka šī iekārta veidota no diviem 55 GHz FBG.

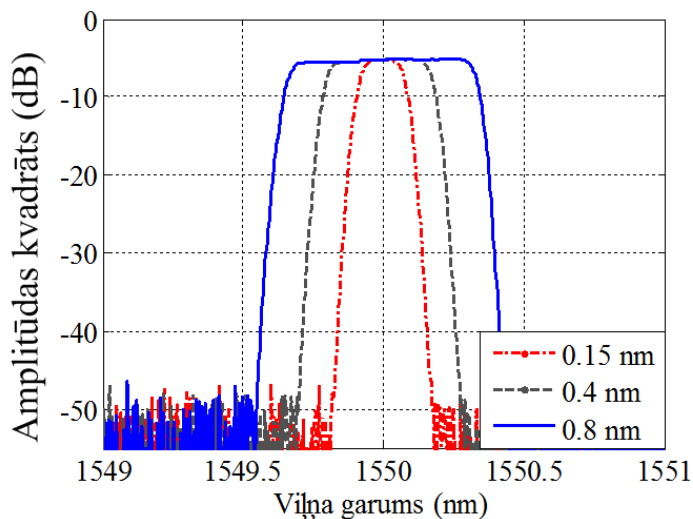
2.10.attēlā redzamas amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas 50 GHz Gausa formas un 50 GHz plakanas virsmas AWG viļņa garuma filtriem. 50 GHz Gausa formas AWG viļņa

garuma filtra ienestais vājinājums ir 3.5 dB, caurlaides joslas platums -1 dB, -3 dB un -20 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 35 GHz, 57.7 GHz un 130 GHz.



2.10. att. 50 GHz (a) Gausa formas un 50 GHz (b) plakanas virsmas AWG amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas logaritmiskajā mērogā iegūtas ar ASE metodi

Savukārt, 50 GHz plakanas virsmas AWG viļņa garuma filtra ienestais vājinājums ir 4 dB, caurlaides joslas platums -1 dB, -3 dB un -20 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 57.5 GHz, 78.7 GHz un 137.5 GHz. Ienestais vājinājums tika noteikts pie sliktākā kanāla centrālā viļņa garuma. AWG ir iekārtas, kas vienlaicīgi atdala vairākus kanālus. Apskatītie ir AWG viļņa garuma filtri paredzēti 64 kanālu WDM sistēmām.

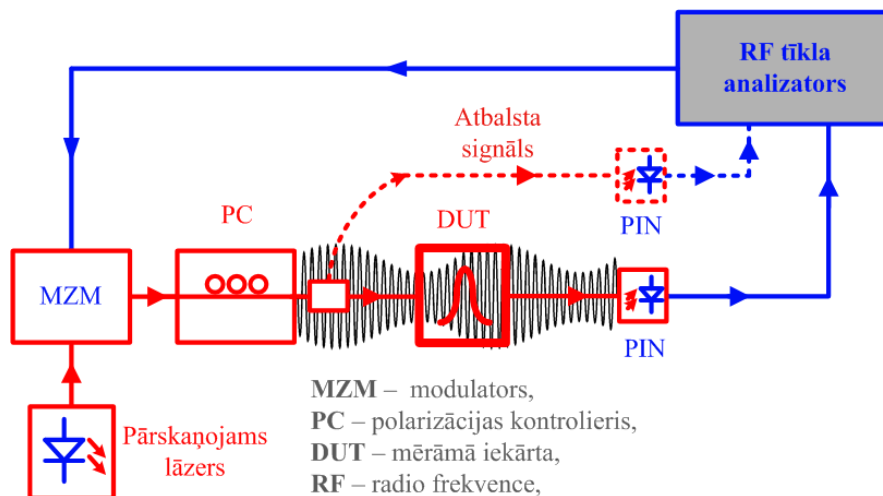


2.11. att. Pārskatājama DG amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas logaritmiskajā mērogā iegūtas ar ASE metodi

2.11. attēlā redzamas pārskārojama DG amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas logaritmiskajā mērogā. Šis Anritsu „Xtract” viļņa garuma filtrs ir ar pārskārojamu caurlaides joslu un centrālo viļņa garumu, kā arī tā ATF ir ar plakanu virsmu un ir pietuvināta taisnstūrim. Filtra vadības blokā ir automātiskās centrēšanas funkcija, kas ļauj to centrēt ar precizitāti 15 pm (<2 GHz). ANRITSU „Xtract” pārskārojamais viļņa garuma filtrs aptver visus standarta vienmodas optiskās šķiedras frekvenču diapazonus. Ar „Xtract” filtra palīdzību iespējams ne tikai mainīt centrālo viļņa garumu plašā diapazonā no 1450 nm (206.8 THz) līdz 1650 nm (181.8 THz), bet arī filtrēšanas joslu no 0.15 nm (18 GHz) līdz 0.7 nm (87.5 GHz). Galvenais trūkums ir 6 dB iekārtas ienestais vājinājums, kas ierobežo tā izmantošanu DWDM sistēmās bez optiskā pastiprinātāja.

2.2.2. Fāzes pārvades funkciju mērījumi

Fāzes pārvades funkciju iegūšanai tika pielietota Agilent 86038B mēriekārta, kas deva iespēju novērtēt tādus viļņa garuma filtru parametrus kā PTF, grupas aizturi (GD) un ienesto dispersiju kā funkciju no viļņa garuma. Konkrētajā mēriekārtā ir realizēta modulētā fāzes nobīdes (MPS) metode.



2.12. att. Fāzes pārvades funkcijas mērījumu shēma

MPS metodes blokshēma redzama 2.12.attēlā. Gaisma no pārskārojama lāzera tiek modulēta ar sinusoidālu signālu (tipiski no 100 MHz līdz 1.25 GHz) ārējā MZM. Polarizācijas kontrolieris iekārtā tiek izmantots, lai izveidotu dažādus gaismas polarizācijas stāvokļus, kas nepieciešams diferenciālās grupas aiztures mērījumos. Pēc izplatīšanās caur mērāmo iekārtu (DUT) tas tiek detektēts ar PIN fotodiode. RF tīkla analizators tiek izmantots, lai iegūtu f_m un nomērītu elektriskās fāzes starpību starp ieejas un izejas signāliem [1, 30, 120]. Praksē viļņa

garums tiek pārskatīts un atbilstošā grupas aizsture tiek izrēķināta no izmērītās fāzes starpības, atbilstoši 2.27 izteiksmei:

$$\Delta\tau(\Delta\lambda) = \frac{\Delta\phi}{360^\circ} \cdot \frac{1}{f_m} \quad (2.27)$$

kur $\Delta\phi$ - fāzes izmaiņas grādos, kas rodas neliela viļņa garuma soļa gadījumā, f_m - modulācijas frekvence Hz un apakšraksts $\Delta\lambda$ nozīmē, ka grupas aizsture tiek mērīta atkarībā no viļņa garuma izmaiņām. Izteiksmes 2.27 labās puses pirmā daļa parāda, par kādu daļu no modulācijas fāzes nobīdes cikla pieaug fāzes izmaiņa, atkarībā no viļņa garuma izmaiņas, savukārt, otrā daļa parāda vienas radiofrekvences cikla ilgumu. Kopā abas daļas ir ar laika mērvienību [1, 56].

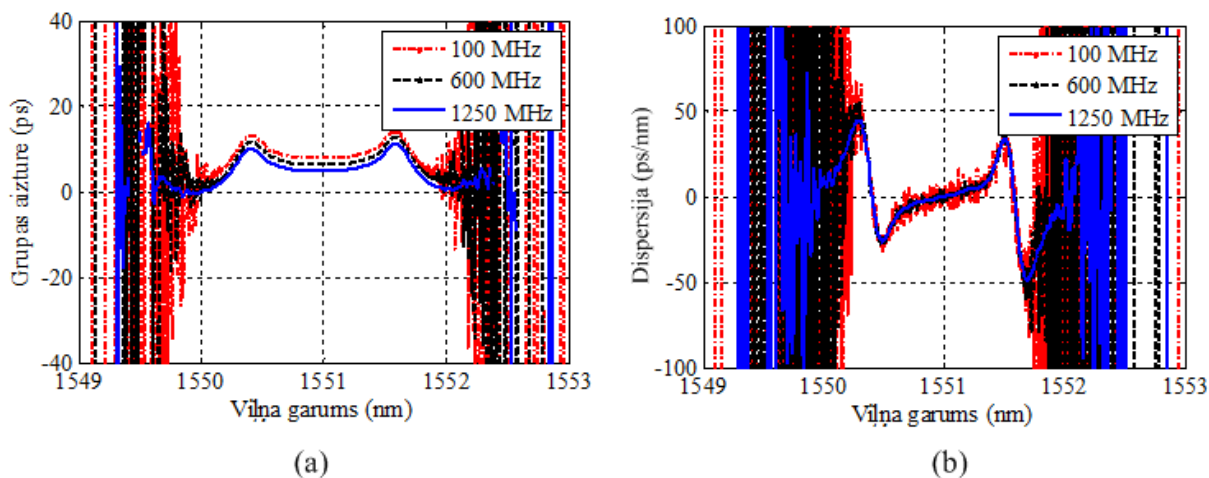
Dispersija tiek definēta atbilstoši 2.28 izteiksmei:

$$D = \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} \quad (2.28)$$

kur $\Delta\tau$ - atbilstošas grupas aizstures izmaiņas sekundēs viļņa garuma izmaiņām $\Delta\lambda$ metros. Praksē dispersijas mērvienība ir pikosekundes uz nanometru (ps/nm). Apvienojot 2.27 un 2.28 izteiksmes, iegūstam šādu sakarību:

$$\Delta\phi = (360^\circ \cdot D \cdot f_m \cdot \Delta\lambda) + \Delta\phi_{\text{troksnis}} \quad (2.29)$$

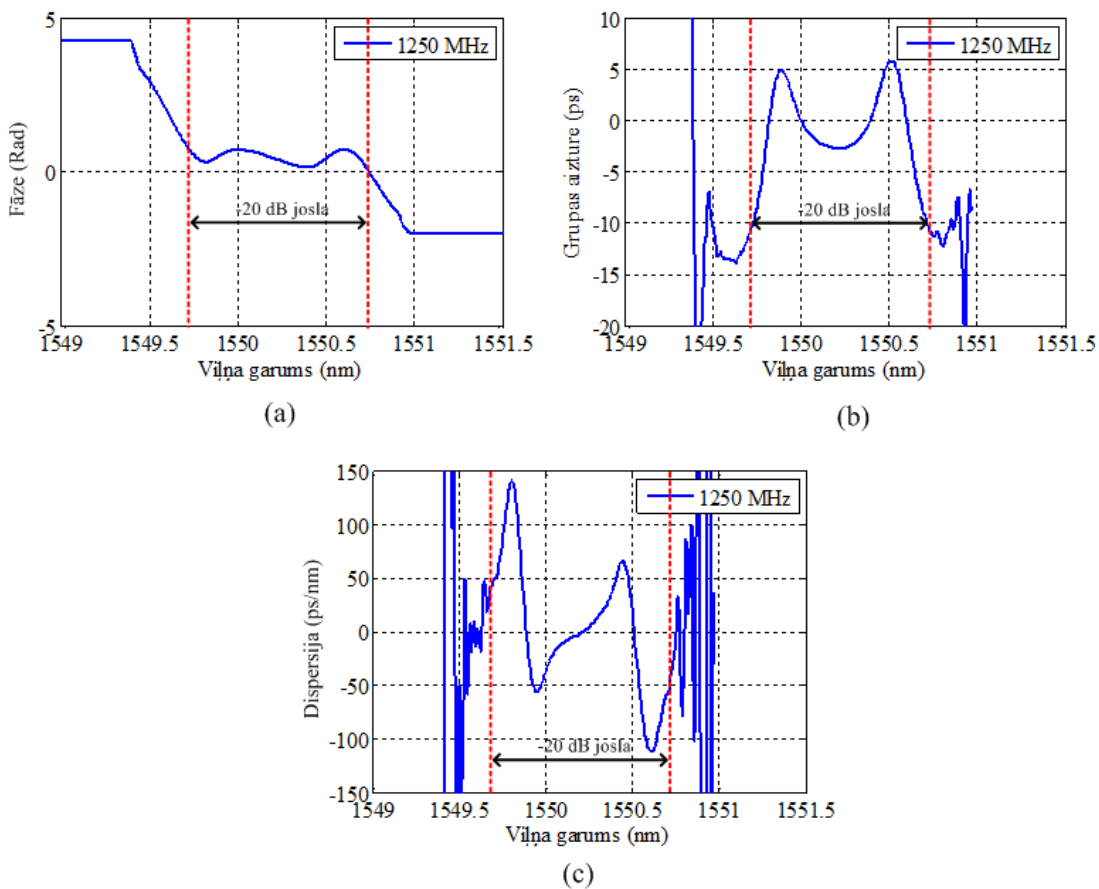
Izteiksme 2.29 norāda atbilstošo fāzes daudzumu, ko iespējams nomērīt saistībā ar izvēlēto viļņa garuma soli, modulācijas frekvenci un iekārtas dispersiju [93] un norāda uz to, ka nepieciešams izvēlēties atbilstošus parametrus, lai samazinātu trokšņainus mērījumus [1, 30, 56].



2.13. att. 200 GHz TFF (a) grupas aizsture un (b) dispersija pie dažādām f_m

2.13. attēlā redzams, ka samazinot viļņa garuma soli vai modulācijas frekvenci, tiek palielināts fāzes trokšņa iespaids. Situācijā, kad tiek mērīti viļņa garuma filtri augsta blīvuma WDM sistēmām, tad viļņa garuma solis tiek samazināts līdz minimāli iespējamajam, kas norāda uz to, ka modulācijas frekvence nedrīkst būt pārāk zema beztrokšņainu rezultātu iegūšanai. Darbā visi mērījumi tika veikti pie vairākām modulācijas frekvencēm (100 MHz, 600 MHz un 1250 MHz), lai noskaidrotu atbilstošāko un samazinātu fāzes trokšņa iespaidu uz mērījumu rezultātiem. Kā redzams 2.13. attēlā, tad mērījumu rezultāti ir mazāk trokšņaini pie 1250 MHz frekvences.

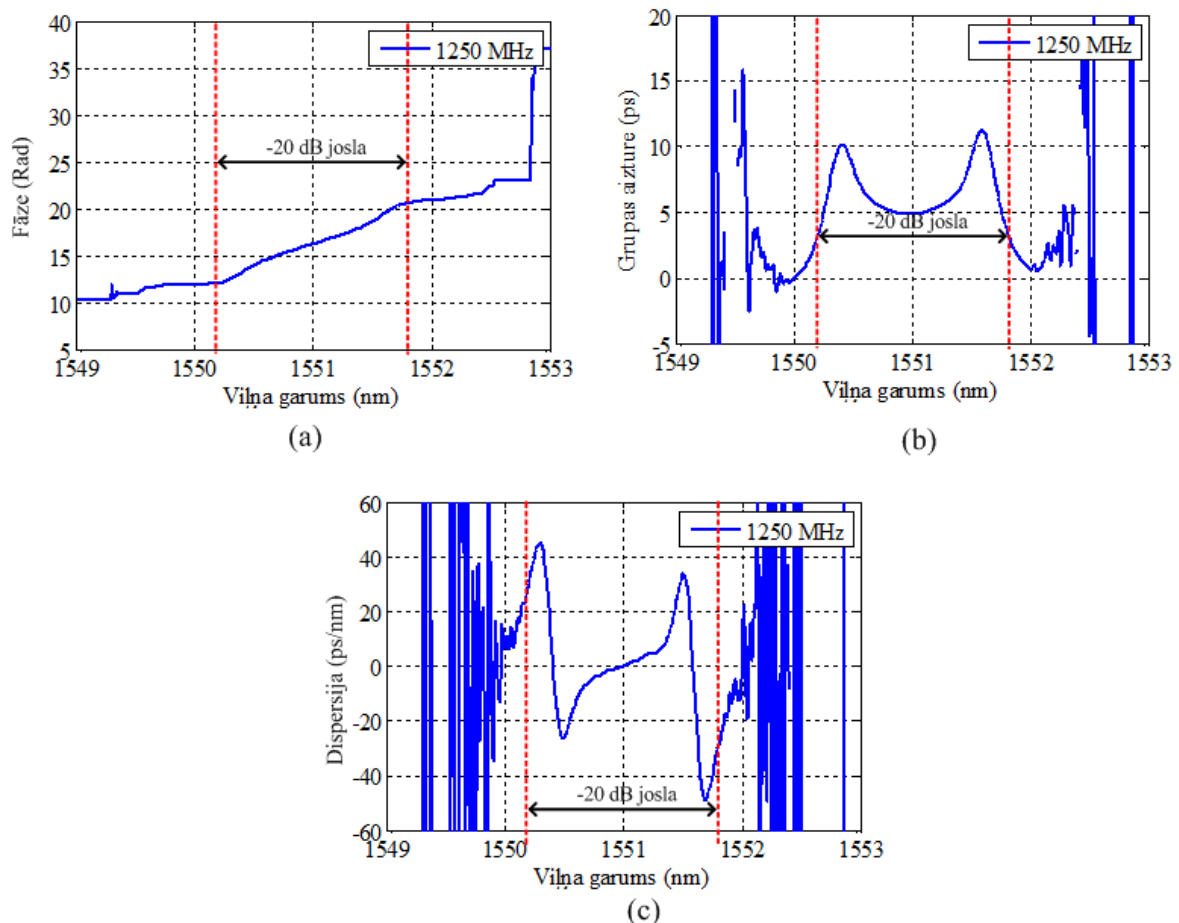
Tika veikti piecu viļņa garuma filtru mērījumi: 100 GHz TFF, 200 GHz TFF, 55 GHz FBG, 100 GHz FBG un 50 GHz plakanas virsmas AWG. Jāmin, ka šī ir līdz šim precīzākā metode fāzes pārvades funkcijas iegūšanai no reālas iekārtas. Iepriekš veiktajos aprēķinos (skat. 2.1.2. apakšnodaļu) amplitūdas un fāzes relācijas neveda pietiekošu precizitāti, kas tikai pasliktinās trokšņainu amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas mērījumu gadījumos.



2.14. att. 100 GHz TFF (a) fāzes pārvades funkcija, (b) grupas aizture un (c) dispersija iegūtas ar MPS metodi

2.14. attēlā redzama 100 GHz TFF fāzes pārvades funkcija, grupas aizture un dispersija, kas iegūtas ar MPS metodi. Grupas aiztures izmaiņas -20 dB caurlaides joslā sasniedz 16 ps, savukārt, dispersija ir vienāda ar 0 ps/nm pie centrālā viļņa garuma. Maksimālā dispersijas vērtība -20 dB joslā ir no -111 ps/nm līdz 141 ps/nm.

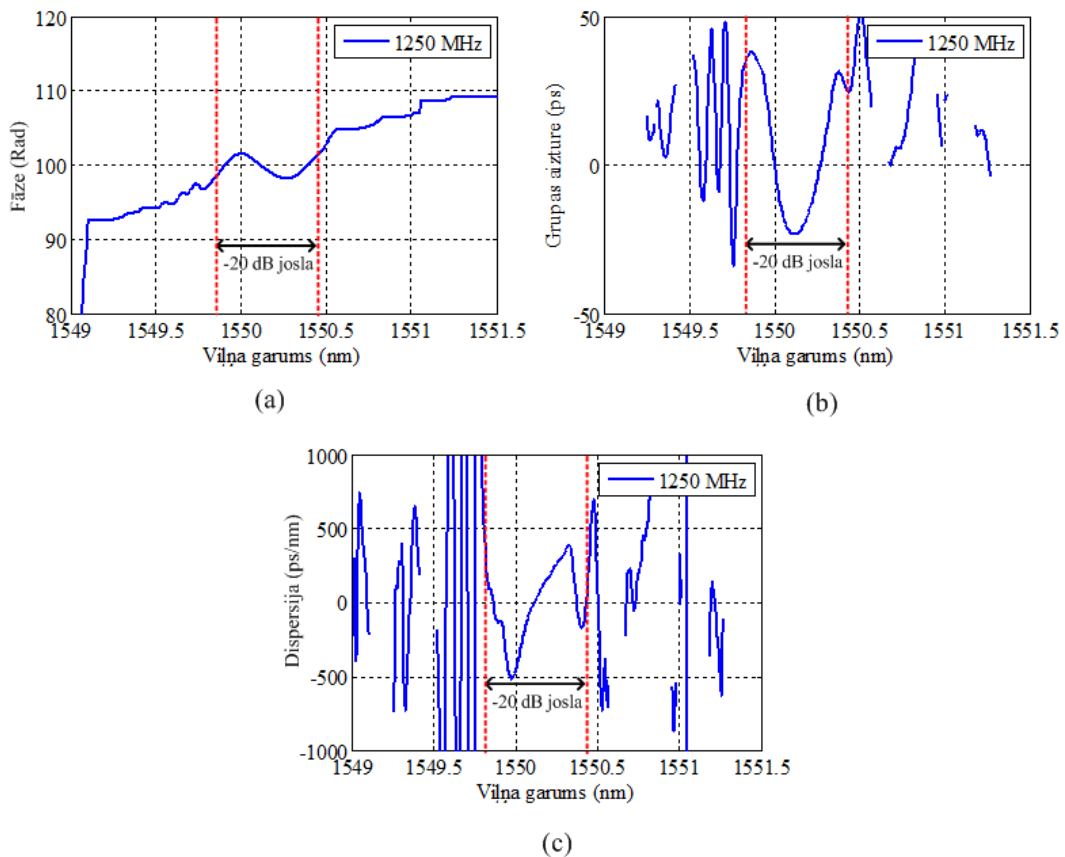
Ārpus -20 dB joslas iegūtie rezultāti ir trokšņaini un parāda galveno ierobežojumu mērot viļņa garuma filtrus. Šajā gadījumā mērījumu metodes dinamiskais diapazons ir pietiekošs, lai veiktu precīzus mērījumus tikai caurlaides joslā. Tas saistīts ar lielo vājinājuma vērtību, ko ienes viļņa garuma filtrs ārpus tā caurlaides joslas, kā rezultātā optiskais signāls tiek novājināts un fāzes vērtība tīkla analizatorā nav iegūstama. Pārējais diapazons tiek parādīts rezultātos to ticamībai.



2.15. att. 200 GHz TFF (a) fāzes pārvades funkcija, (b) grupas aizture un (c) dispersija iegūtas ar MPS metodi

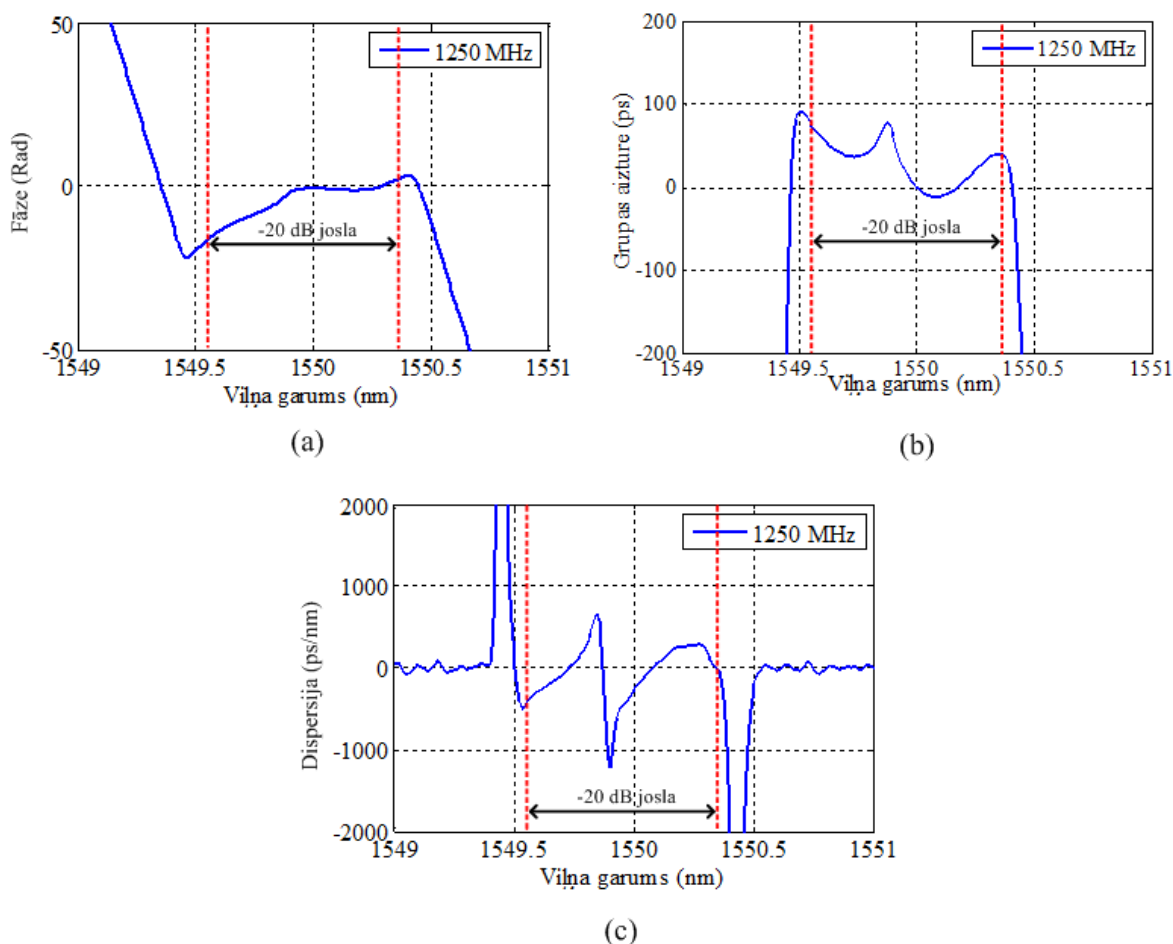
Savukārt, 2.15. attēlā redzama 200 GHz TFF fāzes pārvades funkcija, grupas aizture un dispersija, kas iegūtas ar MPS metodi. Grupas aiztures izmaiņas -20 dB caurlaides joslā sasniedz 9 ps, savukārt, dispersija ir vienāda ar 0 ps/nm pie centrālā viļņa garuma. Maksimālā dispersijas vērtība šajā joslā ir no -49 ps/nm līdz 45 ps/nm. Salīdzinot šos abus viļņa garuma filtrus var secināt, ka veidojot viļņa garuma filtrus divreiz šaurākus relatīvā grupas aizture pieaug divas reizes.

Šajā gadījumā tiek salīdzinātas relatīvās grupas aiztures, jo to ietekme uz optisko signālu, kas izplatās caur iekārtu, ir daudz lielāka nekā absolūtajai aizturai. Šāda sakarība norāda uz to, ka samazinot caurlaides joslu viļņa garuma filtram, tiek palielināta tā ienestā dispersija, kas paaugstinot pārraides ātrumu vienā kanālā var novest pie optiskā signāla kvalitātes degradācijas. Vēl lielāku iespaidu šis efekts rada, kad šādi filtri tiek saslēgti kaskādē un ienestā dispersija uzkrājas. Tāpēc liela uzmanība jāpievērš arī caurlaides joslas samazināšanās ietekmei, kas detaļās tiek novērtēta tālākajās darba nodaļās.



2.16. att. 55 GHz FBG (a) fāzes pārvades funkcija, (b) grupas aizture un (c) dispersija iegūtas ar MPS metodi

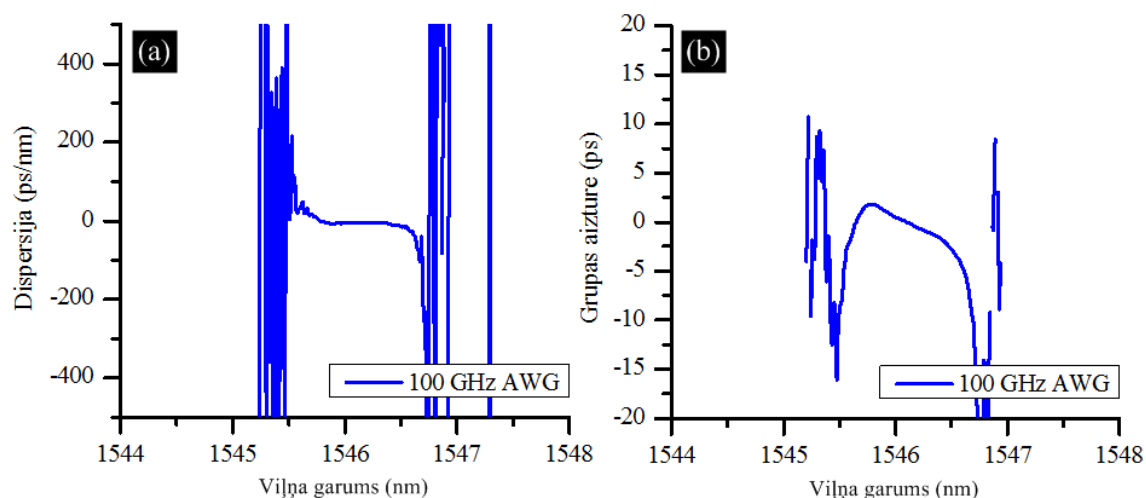
2.16. attēlā redzama 55 GHz FBG fāzes pārvades funkcija, grupas aizture un dispersija, kas iegūtas ar MPS metodi. Grupas aiztures izmaiņas -20 dB caurlaides joslā sasniedz 61 ps, savukārt, dispersija ir vienāda ar 0 ps/nm pie centrālā viļņa garuma. Maksimālā dispersijas vērtība šajā joslā ir no -514 ps/nm līdz 390 ps/nm.



2.17. att. 100 GHz FBG (a) fāzes pārvades funkcija, (b) grupas aizture un (c) dispersija iegūtas ar MPS metodi

Savukārt, 2.17. attēlā redzama 100 GHz FBG fāzes pārvades funkcija, grupas aizture un dispersija, kas iegūtas ar MPS metodi. Grupas aiztures izmaiņas -20 dB caurlaides joslā sasniedz 89 ps, savukārt, dispersija ir vienāda ar 0 ps/nm pie centrālā viļņa garuma. Maksimālā dispersijas vērtība šajā joslā ir no -1213 ps/nm līdz 644 ps/nm. Kā redzams no rezultātiem, tad 100 GHz FBG grupas aiztures raksturlīknē ir redzams „pīķis” ap centrālo viļņa garumu, kas nav redzams 55 GHz FBG gadījumā. Tas skaidrojams ar to, ka 100 GHz FBG ir iegūts apvienojot divus 55 GHz FBG, kas tika konstatēti gan ATF, gan arī tagad PTF mērījumos, kā arī vēlāk apstiprinājās vizuāli atverot iekārtas iepakojumu.

Darbā tika veikti AWG filtru PTF mērījumi 50 GHz plakanas virsmas filtram, kas saistīti gan ar to nelielo relatīvo grupas aizturi, kas rada ienesto dispersiju.



2.18. att. 50 GHz plakanas virsmas AWG (a) grupas aizture un (b) dispersija

2.18.attēlā parādītas 50 GHz plakanas virsmas AWG filtra grupas aiztures un dispersijas raksturlīknes. Kā redzams, tad dispersija -20 dB caurlaides joslā ir mazākā salīdzinājumā ar iepriekš apskatītajām tehnoloģijām, kas arī raksturīgs šādas konstrukcijas filtriem.

2.3. Algoritms viļņa garuma filtru skaitliskai pārbaudei optiski blīvētās sistēmās

Zināms, ka eksperimentu veikšana var būt dārgs un laikietilpīgs process. Tas ir saistīts ar mēriekārtu un pašu sakaru sistēmas komponentu izmaksām. Šo procesu iespējams vienkāršot ar simulācijas programmas palīdzību [61].

2.3.1. Simulācijas programma viļņa garuma filtru pārbaudei

Simulācijas programmas ir vairākas (piemēram, OptSim, VPIphotonics, Optiwave) un plaši tiek izmantotas gan jaunu zinātnisku atklājumu veikšanai, gan arī inženiertehnisku problēmu risināšanai. Galvenais ieguvums ir iespēja pārbaudīt izvirzīto hipotēzi pirms dārgas aparatūras iegādes. Promocijas darbā skaitlisku aprēķinu veikšanai tika izmantota simulācijas programma OptSim, jo tajā tiek piedāvāta lietotāja definēta viļņa garuma filtra izveide, kas dod iespējas izmantot gan aprēķinus, gan mērījumus iegūto komplekso pārvades funkciju pārbaudi jaunākajās optiski blīvētajās sistēmās. OptSim ir optisko sakaru sistēmu simulācijas programma, kuru lieto WDM, DWDM, OTDM, u.c. optisko sakaru sistēmu skaitliskai modelēšanai. To var izmantot, lai izveidotu optisko sakaru sistēmu, simulētu to un izpētītu tās

darbību, ņemot vērā sistēmas elementu parametrus. OptSim reprezentē optisko sakaru sistēmu kā savstarpēji saistītu bloku kopumu, kur katrs bloks atbilst konkrētam sakaru sistēmas elementam. Simulācijas laikā signāli tiek secīgi pārraidīti caur izveidotās simulācijas shēmas komponentēm. Katrs bloks tiek skaitliski aprēķināts atsevišķi ar lietotāja definētiem parametriem un signāla informāciju, kas saņemta no iepriekšējiem blokiem.

Aprēķinu metodes pamatā ir kompleksu diferenciālvienādojumu risināšana, kas ņem vērā lineāru un nelineāru ietekmi, kā arī optisko un elektrisko troksni [126]. Darbā pielietotajās programmatūrās šie visi nosacījumi tiek ņemti vērā un programmatūra izvēlas Δz soļa garumu pēc iespējas mazāku, atkarībā no sistēmas sarežģītības pakāpes. Visi komerciāli pieejamie optisko sistēmu simulācijas rīki izmanto sadalītā soļa metodi, lai atrisinātu NLSE (skat. izteiksmes no 1.2 līdz 1.24), kas apraksta optiskā signāla izplatīšanos pārraides vidē. Ideja balstās uz to, ka tiek ņemti mazi optiskās šķiedras gabali un tiek rēķināts šis vienādojums, pārmaiņus iekļaujot lineāro vai nelineāro operatoru. Tas nozīmē, ka pirmajā tiek ņemts vērā lineārais operators, bet otrajā nelineārais operators un trešajā atkārtoti lineārais operators. Pastāv divas atšķirīgas aprēķinu metodes: frekvences apgabala sadalītā soļa metode (FDSS) un laika apgabala sadalītā soļa metode (TDSS). Šīs metodes atšķiras tikai ar to, kā tiek aprēķināts lineārais operators L , jo nelineārais operators N abu metožu gadījumā tiek rēķināts laika apgabalā. Savukārt, operators L , kas pilnībā tiek raksturots ar tā impulsa reakciju $h(t)$, FDSS metodē tiek rēķināts frekvences apgabalā, bet TDSS - laika apgabalā, aprēķinot tā ietekmi uz $A(t, z)$ caur konvolūciju laikā. Jāatzīmē, ka FDSS metode ir vieglāk realizējama, toties aproksimācijas dēļ tajā var rasties aprēķinu kļūdas. Savukārt, TDSS ir sarežģītāka metode, tomēr, ar to iegūtie rezultāti ir precīzi un ticami, tāpēc realizētās simulācijas tika īstenotas ar TDSS metodi [126].

2.3.2. Algoritma blokshēma un datu faila formāts

Optiskie filtri ir lineāras komponentes, kuras tiek aprakstītas ar kompleksām pārvades funkcijām, kā tas minēts šīs nodaļas sākumā. Izmantojot OptSim lietotāja definētu filtra bloku var modelēt dažādus viļņa garuma filtrus. Tomēr, lai skaitliskas simulācijas būtu iespējams veikt OptSim simulācijas programmas vidē ir nepieciešams algoritms komplekso pārvades funkciju mērījumu datu apstrādei un pārveidei simulācijas programmai saprotamā veidā. Promocijas darba izstrādes laikā tika izveidots šāds algoritms ietverot prasības, kas ir jāievēro, veidojot skaitliskus viļņa garuma filtra modeļus, to pielietošanai simulācijas shēmā. Algoritma blokshēma redzama 2.19. attēlā. Lietotāja definēts viļņa garuma filtra bloks ļauj

īstenot nepieciešamo viļņa garuma filtru. Filtra pārvades funkcija (amplitūda un grupas aizture vai fāze kā funkcija no frekvences vai viļņa garuma) tiek definēta standarta ASCII (angļu val. The American Standard Code for Information Interchange) datu failā (*filters.DAT*), ievērojot noteiktas prasības, kas aprakstītas algoritma blokshēmā. Lietotāja definēta filtra blokā tiek izmantots pārklāšanās un pievienošanas algoritms (angļu val. Overlap-Add algorithm), lai veiktu ievadīto datu apstrādi un pārvades funkcijas sintēzi [126]. Jāatzīmē tas, ka sintezēto pārvades funkciju var nobīdīt pa frekvenču vai viļņa garuma asi un veikt simulācijas pie izvēlēta viļņa garuma. Tomēr dažās situācijās filtru sintēze nav iespējama. Šīs situācijas parasti rodas, ja:

- Daži ieejas parametri nav saskaņoti savā starpā, piemēram, filtrs ir definēts frekvenču diapazonā, kas ir ārpus simulācijas frekvenču joslas platumā;
- Filtrs ir definēts frekvenču diapazonā, kas ir daudz mazāks nekā simulācijas frekvenču joslas plātums;
- Filtra pārvades funkcijas eksperimentālie mērījumi ir mainīgi, un līdz ar to iegūtā pārvades funkcijā ir augsts trokšņu līmenis.

Jāņem vērā, ka ieejas datu failā pārvades funkcija tiek norādīta diskrētos punktos, tāpēc, lai savienotu blakus esošos punktus, tiek izmantots interpolācijas (angļu val. Cubic Spline) algoritms. Pat tad, ja interpolācijas algoritms ir ļoti precīzs, daudzos gadījumos tas var izdot negaidītus rezultātus, ja ieejas datu failā atsevišķas frekvences atrodas pārāk tālu viena no otras. Šādās situācijās pārvades funkcijas variācija no viena punkta uz nākamo ir ļoti liela, realizētā interpolācija var atšķirties no reālās filtra pārvades funkcijas. Tāpēc tiek definēti šādi vispārēji noteikumi:

- divu blakus esošu datu punktu amplitūdas atšķirībai nevajadzētu būt lielākai par 1-2 *dB*,
- divu blakus esošu datu punktu fāzes atšķirībai nevajadzētu būt lielākai par 1 radiānu,
- divu blakus esošu datu punktu grupas aiztures atšķirībai nevajadzētu būt lielākai par 10 ps.

Turklāt abscisa (frekvence vai viļņa garums) jādefinē augošā secībā un izmantot divus vai vairākus punktus ar vienādu frekvenci (vai viļņa garumu) nav atļauts, kā arī maksimāli pieļaujama punktu skaits ir 4095. Ja datu fails satur vairāk nekā 4095 punktus, tad tiek ņemti vērā tikai pirmie 4095 punkti.


```

#
# Datne lietotāja definēta filtra izveidei
# Datnes formāts:
# frekvence
# amplitūdas kvadrāts un fāze
# lineārā mērogā
# absolūtas vērtības
##
193.00000000 0.00304630 -1.59853502
193.00050000 0.00304939 -1.59868327
193.00100000 0.00305250 -1.59883168
193.00150000 0.00305564 -1.59898024
193.00200000 0.00305879 -1.59912895
193.00250000 0.00306197 -1.59927782
193.00300000 0.00306516 -1.59942684
193.00350000 0.00306837 -1.59957602
193.00400000 0.00307161 -1.59972535
193.00450000 0.00307486 -1.59987484
193.00500000 0.00307813 -1.60002449
193.00550000 0.00308143 -1.60017430
193.00600000 0.00308474 -1.60032428
193.00650000 0.00308808 -1.60047441

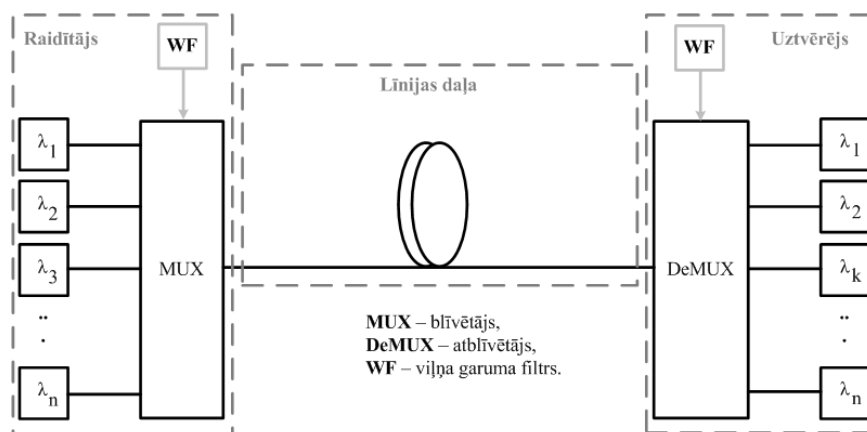
```

2.20.att. Lietotāja definēta filtra faila daļas piemērs ASCII formātā

Pielietojot augstāk izveidoto algoritmu, aprēķinos un mērījumos iegūtās viļņa garuma filtru kompleksās pārvades funkcijas, tika veikta to skaitliskā pārbaude OptSim simulācijas programmā. Nākošajā apakšpunktā tiek norādīti pamata sistēmas parametri, kas ievēroti turpmākajās darba nodaļās, veicot skaitlisku viļņa garuma filtru ierobežojumu novērtējumu optiski blīvētās sistēmās.

2.3.3. Optisko sistēmu parametru izvēle skaitliskās simulācijās

Iepriekš aprakstītie viļņa garuma filtri tiek izmantoti optiski blīvētas sakaru sistēmas raidītājā un uztvērējā. Lielāka uzmanība tiek pievērsta dažādu fizisku realizāciju ietekmei uz sistēmas galvenajiem parametriem.



2.21.att. Optiski blīvētas sistēmas simulācijas blokskhēma

Darbā izmantotā simulācijas blokskhēma redzama 2.21.attēlā. Izveidotā simulācijas shēma sastāv no trīs daļām: raidītāja, līnijas daļas un uztvērēja. Shēmā iespējams izveidot vairākus kanālus, kas katru reizi tiek izvēlēti, atbilstoši uzdevuma nosacījumiem. Raidītājs sastāv no datu avota, koda formētāja, nepārtraukta starojuma lāzera avota, ārēja MZM un

optiskā blīvētāja, kas var tikt veidots ar viļņa garuma filtriem. Datu avots izveidots ar iespēju ģenerēt 2.5 Gbit/s, 10 Gbit/s un 40 Gbit/s bitu plūsmu, kas reprezentē informāciju, kura tiek pārraidīta pa optisko šķiedru. Tālāk tiek izmantots koda formētājs, lai veidotu vairākus kodus no ienākošās informācijas bitiem. Darbā tiks izmantoti NRZ, RZ, Duobinary un diferenciāla fāzes modulācija (DPSK) modulācijas formāti. Šie formāti tika iegūti MZM ar nepārtraukta starojuma lāzeru. Tālāk ir optiskās līnijas daļa, kas sastāv no optiskās šķiedras un optiskā pastiprinātāja. Iegūtais optiskais signāls pārraidīts standarta vienmodu optiskajā šķiedrā, kuras garums tiek izvēlēts atbilstoši katra uzdevuma prasībām. Uztvērēja bloks sastāv no atblīvētāja veidota no viļņa garuma filtriem, PIN fotodiodes un Beseļa – Tomsona elektriskā filtra.

2.4. Kopsavilkums

Darba 2. nodaļā tika apskatītas viļņa garuma filtru kompleksās pārvades funkcijas un to iegūšanas veidi. Viena no iespējām ir aprēķināt filtra teorētisko pārvades funkciju, kas praksē noder, kad nav pieejamas mēriekārtas šo parametru iegūšanai. Savukārt, precīzāku parametru iegūšanai nepieciešams izmantot mēriekārtas. Tāpēc apskatītas mērījumu metodes amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas iegūšanai. Tālāk tika meklēti risinājumi fāzes pārvades funkcijas iegūšanai, izmantojot Hilberta transformāciju amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijai. Šai pieejai ir savi ierobežojumi, kad tiek izmantoti mērījumos iegūtie dati, kas nereti ir samērā trokšņaini. Tāpēc tika apskatīta iespēja visus filtrus aproksimēt ar noteiktām matemātiskām funkcijām, kas dod savu rezultātu, tomēr, jāņem vērā, ka dispersija, ko ienes viļņa garuma filtrs, ir stipri atkarīga no fiziskās realizācijas. Tāpēc tika veikti kompleksās pārvades funkcijas mērījumi. Šis ir precīzākais veids kā iegūt viļņa garuma filtra fiziskās realizācijas ienestās dispersijas lielumu. Komplekso pārvades funkciju mērījumi tika veikti FBG, TFF, AWG un difrakcijas režģu filtriem, kas ir izplatītākās fiziskās realizācijas WDM sistēmās. Lai ar iegūtajām kompleksajām pārvades funkcijām varētu veikt plašākus pētījumus WDM sistēmās, tika izstrādāts algoritms, kas dod iespēju tās ievietot kādā no simulācijas programmām, kuras paredzētas optiski blīvēto sistēmu modelēšanai. Rezultātā tiek izvēlēta OptSim simulācijas programma, kurā ar izveidoto algoritmu (skat.2.19.att.) iespējams būtiski paplašināt viļņa garuma filtru modeļu klāstu. Tas deva iespēju veikt apjomīgākus un ticamākus skaitliskus pētījumus tādās sistēmās un to parametru novērtējumu, kurus nav iespējams izveidot laboratorijā, sakarā ar to augstajām izmaksām. Izveidotais algoritms ir izmantots vairākās autora zinātniskajās publikācijās [84, 100, 102, 103, 108, 111, 114, 115, 149, 150].

3. WDM SISTĒMĀS PIELIETOTO VIĻŅA GARUMA FILTRU NOVĒRTĒJUMS

Darba 3. nodaļā tika apskatīti dažādi viļņa garuma filtri, kuri izmantoti kā optiskie joslas filtri viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas kanālu atdalīšanai, to piemērotība un pielietojuma ierobežojumi WDM sistēmās. Nodaļa strukturēta trīs daļās: pirmajā daļā analizēta izstrādātā jaunā mērījumu metode viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas noteikšanai, otrajā daļā izveidota mērījumu shēma un noskaidrotas iespējas palielināt sistēmas kopējo spektrālo efektivitāti ar tām pašām viļņa garuma filtrēšanas tehnoloģijām, trešajā daļā noskaidrotas efektīvākās kompleksās pārvades funkcijas viļņa garuma filtriem un sniegti ieteikumi DPSK optiskā signāla pārveidei uz intensitātes optisko signālu ar Lorenca, Pacelta-kosinusa un Super-Gausa filtriem.

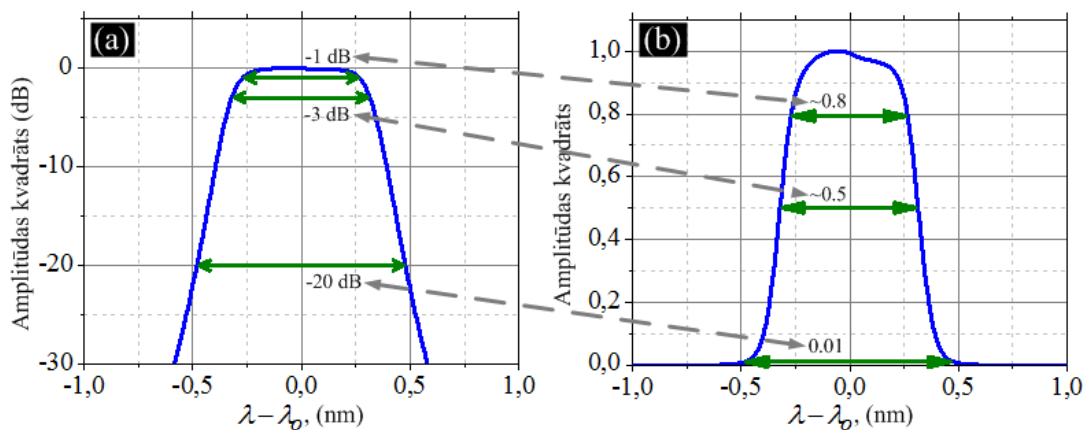
3.1. Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas novērtējums

Kā minēts iepriekš, tad šajā apakšpunktā tika noskaidrota efektīvā caurlaides josla. Šādas joslas definēšanas nepieciešamība rodas tāpēc, ka jau esošajos caurlaides joslas platuma noteikšanas kritērijos netiek novērtēti iespējami kropļojumi signālam, kas caur viļņa garuma filtru tiek pārraidīts. Tāpēc tika definēta efektīvā caurlaides josla, kuras robežās, nobīdot optiskā signāla centrālo viļņa garumu, tā kļūdu koeficients ir $< 10^{-9}$ [104, 105, 106]. Plašāk izmantotie caurlaides joslas platuma noteikšanas kritēriji apskatīti 3.1.1. apakšpunktā.

3.1.1. Caurlaides joslas platuma noteikšanas kritēriji

Caurlaides joslas platuma definīcijas ir vairākas: ekvivalentā taisnstūra kritērijs, gamma kritērijs, vidējā kvadrātiskā platuma kritērijs un pilns platums līmenī viena puse. Pēdējais no minētajiem kritērijiem ir plašāk lietotais viļņa garuma filtru gadījumā [138]. Tā nosaukums nāk no platuma noteikšanas lineārajā mērogā. Praksē caurlaides joslas platums viļņa garuma filtriem tiek novērtēts pie dažādiem vājinājuma līmeņiem logaritmiskajā mērogā. Šādi vairāki līmeņi, kas redzami 3.1. attēlā, ir izveidoti, jo fizikāli nav iespējams realizēt ideālu OBPF, kuram ATF ir ar taisnstūra formu [86]. Ja tas būtu iespējams, tad nebūtu nepieciešams ieviest vairākus līmeņus, pie kuriem noteikt caurlaides joslas platumu. Darbā pamatā tiek lietots FWHM kritērijs, kas līdzvērtīgs mīnus 3 dB līmenim no maksimuma logaritmiskajā mērogā. Tomēr, pēc šī kritērija nav iespējams noteikt maksimālo pieļaujamo nobīdi viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas kanāla centrālajam viļņa garumam no filtra

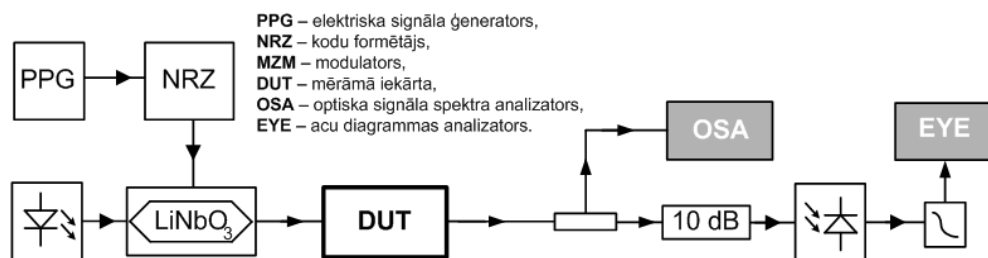
centrālā viļņa garuma, novērtējot signāla kropļojumus. Jāņem vērā fakts, ka pie dažādiem pārraides ātrumiem šīs pieļaujamās nobīdes vērtības var atšķirties. Šādas efektīvās joslas novērtēšanas nepieciešamība aktuāla jaunās paaudzes piekļuves sistēmās, kuras ir balstītas uz augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšanu [100, 102, 103, 108, 109,]. Tajās var pakāpeniski palielināt datu pārraides ātrumu un kanālu skaitu. Katra nepilnība viļņa garuma filtra parametros var radīt būtiskus pārraidītā signāla kvalitātes kropļojumus. Tāpēc nepieciešams izveidot tādu metodi caurlaides joslas platuma noteikšanai, kas ņemtu vērā gan signāla kvalitātes mērījumus, gan iespējamu datu pārraides ātruma pieaugumu. Sakarā ar to, darbā izstrādāta un Latvijā patentēta efektīvās caurlaides joslas noteikšanas blokshēma [110], kura redzama 3.2. attēlā (skat. apliecību 2. pielikumā).



3.1.att. TFF amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija (a) logaritmiskajā un (b) lineārajā mērogā
Parādīti plašāk pielietotie caurlaides joslas platuma noteikšanas kritērijiem

3.1.2. Efektīvās caurlaides joslas platuma noteikšanas blokshēma

Optiskajam signālam izplatoties caur viļņa garuma filtru notiek izmaiņas jaudas spektrā. Ja optiskā signāla centrālais viļņa garums nesakrīt ar viļņa garuma filtra centrālo garumu, tad pie noteiktas nesakrītības rodas kropļojumi [68]. Būtiski šos kropļojumus novērtēt jaunās paaudzes piekļuves sistēmās, kuras balstītas uz viļņgarumdales blīvēšanu [109].



3.2. att. Efektīvās caurlaides joslas platuma noteikšanas mērījumu shēma [110]

Praksē pielietoto caurlaides joslas platuma noteikšanas kritēriju galvenais trūkums ir tas, ka netiek novērtēta optiskā signāla kvalitāte pēc pārraides caur viļņa garuma filtru ar dažādu viļņa garuma nobīdi attiecībā pret filtra centrālo viļņa garumu. Tas dotu iespēju novērtēt viļņa garuma filtru veiktspējas ierobežojumus jeb iespējamus optiskā signāla kropļojumus [105, 106].

Izgudrojuma mērķis ir iegūt praktiski izmantojamu viļņa garuma filtra efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēmu, ar kuru būtu iespējams novērtēt filtru radītos kropļojumus optiskajam signālam, kas caur to izplatās [110]. Mērījumu shēma parādīta 3.2. attēlā. Tā sastāv no raidītāja daļas, mērāmās iekārtas un uztvērēja daļas. Optiskais raidītājs sastāv no elektriskā signāla ģenerators, koda formētāja, lāzera avota un signāla ārējā modulatora. Elektriskā signāla ģenerators veido pseido – gadījuma bitu secību ar darbības frekvenci no 100 MHz līdz 12.5 GHz. Koda formētājs veido bez atgriešanās pie nulles kodu. Nepārtrauktu optiskā signālu veido lāzers ar sadalīto atgriezenisko saiti. Optiskā signāla ārējais modulators ir MZM uz LiNbO₃ kristāla bāzes.

Tad shēmā pieslēgta testējamā iekārta, kas ir viļņa garuma filtrs. Mērījumu shēmas uztvērēja daļa ir tiešās uztveršanas uztvērējs, kas pievienots optiskajam 1:2 sazarotājam un sastāv no optiskā vājinātāja, pusvadītāja foto diodes un elektriskā zemfrekvenču filtra. Izgudrojuma shēmā pārraidītā signāla kvalitātes novērtēšanas daļa sastāv no elektriskā augstfrekvenču osciloskopa un optiskā spektra analizatora, kas attiecīgi pievienoti pie elektriskā filtra un pie optiskā sazarotāja.

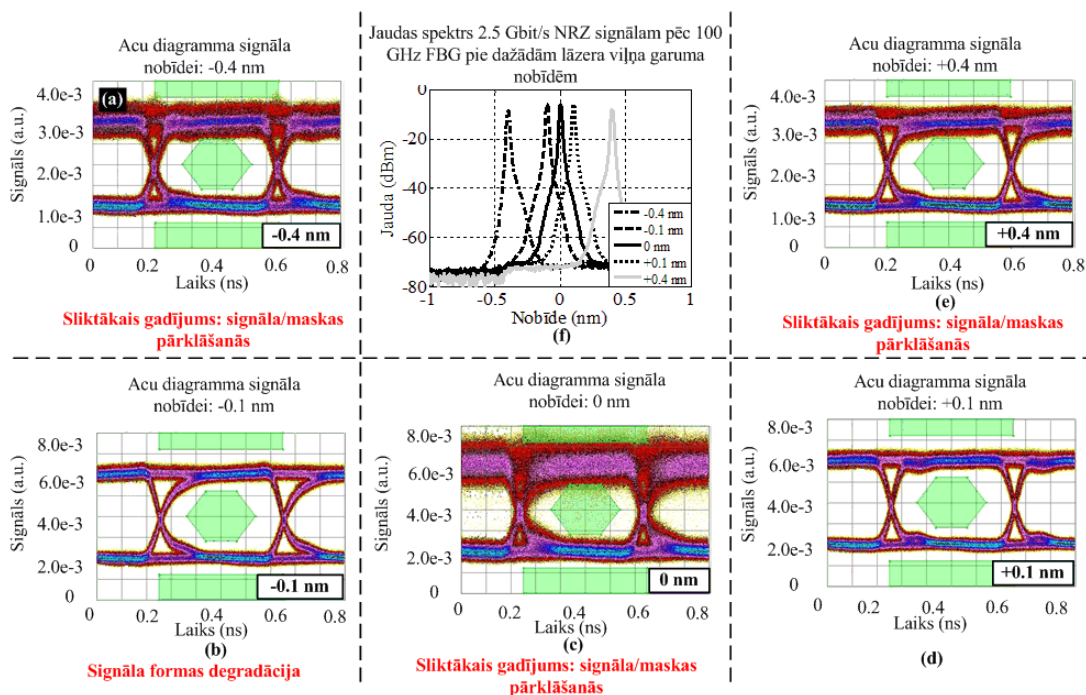
Elektriskā pseido – gadījuma bitu secība ar darbības frekvenci no 100 MHz līdz 12.5 GHz tiek padota no elektriskā signāla ģenerators uz koda formētāju, kurš veido bez atgriešanās pie nulles kodu. Šis kods no koda formētāja tiek padots uz optiskā signāla ārējā modulatora elektrisko augstfrekvenču ieeju. Lai veidotu optisko plūsmu papildus elektriskajam bez atgriešanās pie nulles kodam, uz modulatoru tiek padots nepārtraukta starojuma optiskais signāls no lāzera ar sadalīto atgriezenisko saiti. Ārējā modulatora izejā tiek iegūts optiskais signāls ar datu pārraides ātrumu no 100 Mbit/s līdz 12.5 Gbit/s, kas kodēts ar bez atgriešanās pie nulles kodu.

Tad optiskais signāls ar dažādu viļņa garuma nobīdi attiecībā pret viļņa garuma filtra centrālo viļņa garumu tiek padots uz mērāmo iekārtu. Pēc pārraides caur mērāmo iekārtu optiskais signāls tiek sadalīts ar 1:2 optisko sazarotāju. Pēc optiskā sazarotāja ir optiskais vājinātājs, kurš samazina optisko signālu par 10 dB, kas paredzēts pusvadītāja foto diodes strāvas samazināšanai. Pēc optiskā vājinātāja optiskais signāls ar dažādu viļņa garuma nobīdi

attiecībā pret viļņa garuma filtra centrālo viļņa garumu tiek padots uz pusvadītāja foto diodi, kur tiek pārveidots uz elektrisko signālu un ar zemfrekvenču elektrisko filtru tiek nofiltrēti elektriskie trokšņi. Izgudrojuma shēmā pārraidītā signāla kvalitātes novērtēšana tiek veikta ar elektrisko augstfrekvenču osciloskopu, kas ieslēgts pēc elektriskā filtra un optiskā spektra analizatoru, kurš pievienots 1:2 optiskajam sazaratājam [110].

3.1.3. Mērījumu rezultāti 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s gadījumā

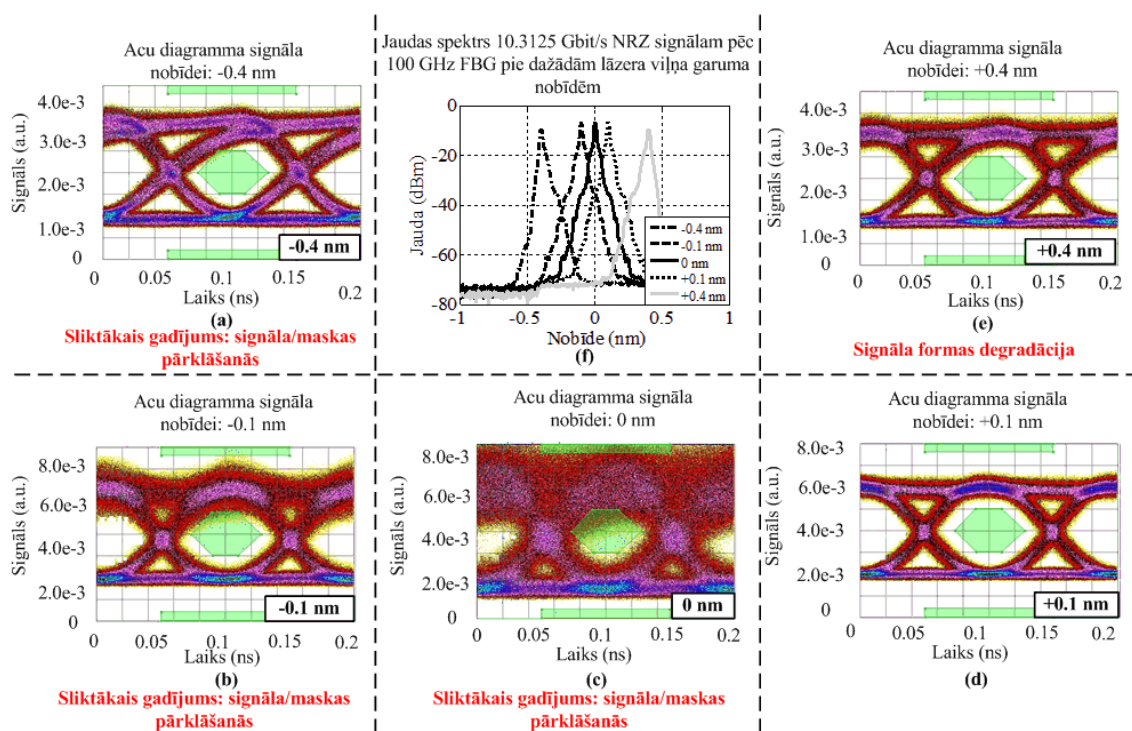
Apakšpunktā parādīti efektīvās caurlaides joslas mērījumi vairākiem viļņa garuma filtriem (100 GHz FBG, 55 GHz FBG, 200GHz TFF un 100 GHz TFF), pie diviem pārraides ātrumiem 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s, un NRZ kodu. NRZ kodēšanas formāts izvēlēts, jo tas vēsturiski ir visizplatītākais modulācijas formāts, vienkārši realizējams un ar salīdzinoši kompakto jaudas spektru [145]. Vairāki viļņa garuma filtri ir izvēlēti, lai parādītu to, ka izstrādātā mērījumu shēma der dažādu viļņa garuma filtru fizisko realizāciju novērtēšanai [104, 105, 106, 110].



3.3. att. 2.5 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 100 GHz FBG pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm

Kā minēts mērījumu shēmas aprakstā, tad lāzera viļņa garums tiek nobīdīts attiecībā pret viļņa garuma filtra centrālo viļņa garumu. Pie katras nobīdes vērtības tiek noteikta signāla

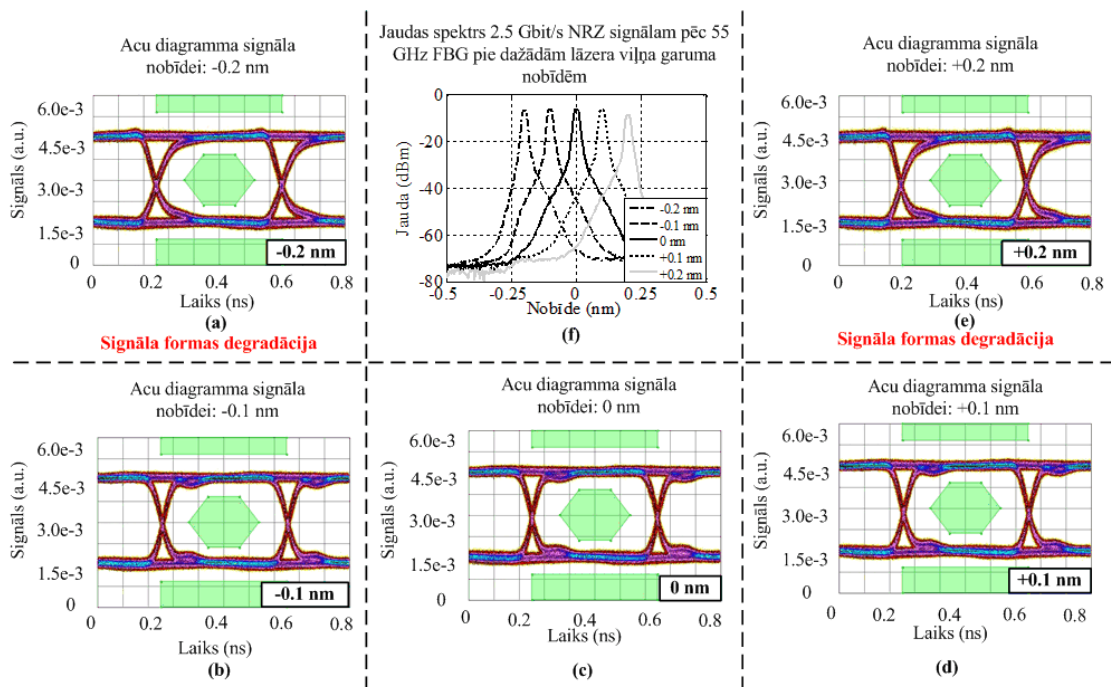
kvalitāte ar signāla acu diagrammas maskām. Nobīde tiek veikta tik tālu līdz tiek novērota būtiska optiskā signāla degradācija. Par nobīdes soli izvēlēts 0.1 nm, kas atbilst Starptautiskās telekomunikāciju savienības (ITU)-T rekomendācijā G.694.1 definētajam mazākajam kanālu intervālam [59]. Tādā veidā tiek iegūta efektīvā caurlaides josla, kuras robežās optiskais signāls netiek būtiski degradēts un atbilst kvalitātes prasībām (bitu kļūdu attiecība (BER) $<10^9$) [110].



3.4. att. 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 100 GHz FBG pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm

3.3. attēlā un 3.4. attēlā attiecīgi ir parādītas 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas un jaudas spektri pēc 100 GHz FBG viļņa garuma filtra pie dažādām signāla nobīdes vērtībām (-0.4 nm, -0.1 nm, 0 nm, 0.1 nm, 0.4 nm). Šāds 0.8 nm diapazons izvēlēts, jo tas atbilst 100 GHz un sakrīt ar apskatītā filtra FWHM caurlaides joslas platumu (noteikts no ASE mērījumu metodes rezultātiem). Mērījumi veikti ar 0.1 nm nobīdes soļa vērtību un uzrādīti rezultāti, kuros novērojami būtiski optiskā signāla kvalitātes kropļojumi. Šos kropļojumus var izskaidrot ar viļņa garuma filtra komplekso pārvades funkciju (skat. 2.9.b. un 2.17. attēlus). Ja aplūkojam amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju, kura iegūta ar ASE metodi, tad nav izskaidrojami tie kropļojumi, kuri rodas pie 0 nm nobīdes starp lāzera viļņa garumu un viļņa garuma filtra centrālo viļņa garumu. Savukārt, aplūkojot

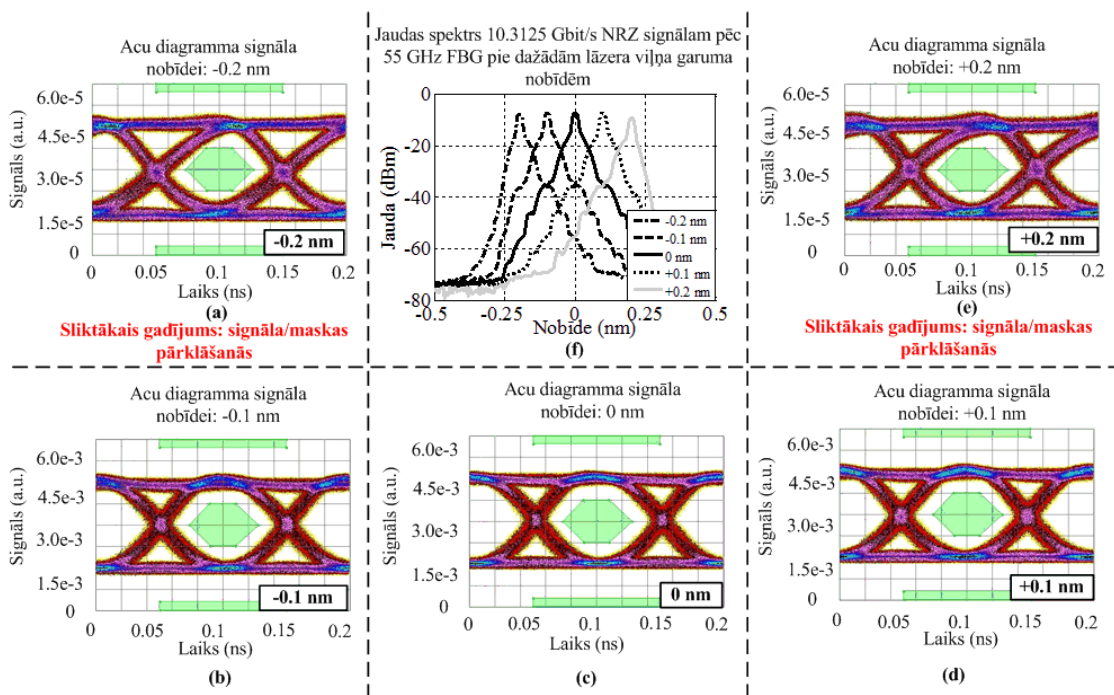
mērījumu rezultātus ar TLS metodi ir skaidri redzams, ka 100 GHz FBG filtram ATF vidusdaļā izveidojies iegriezuma filtrs, kas arī rada nepieņemami augstu ienestās dispersijas lielumu. Kā redzams no mērījumu rezultātiem, tad pieaugot datu pārraides ātrumam kropļojumu iespaids palielinās, kas saistīts ar paplašināto jaudas spektru un šaurākajiem impulsiem (pakļauti lielākai dispersijas ietekmei). 100 GHz FBG filtra gadījumā secinām, ka ir izveidojušās divas efektīvās caurlaides joslas 0.2 nm platumā, kas abas izvietojas pa labi un pa kreisi no 2.9.b. attēlā redzamā iegriezuma filtra. Jaudas spektrā 3.3. attēlā un 3.4. attēlā iegriezuma filtra ietekme nav redzama, kas saistīts ar optiskā spektra analizatora ierobežoto izšķirtspēju.



3.5. att. 2.5 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 55 GHz FBG pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm

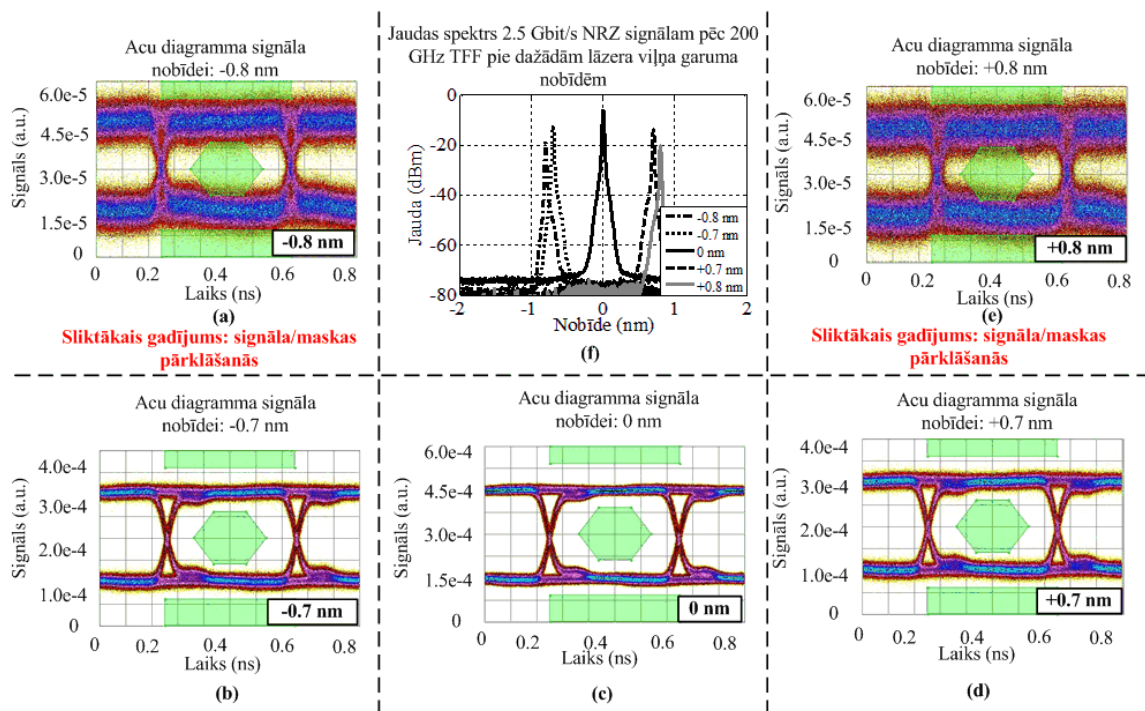
Savukārt, 3.5. attēlā un 3.6. attēlā ir 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas un jaudas spektri pēc 55 GHz FBG viļņa garuma filtra pie dažādām signāla nobīdes vērtībām (-0.2 nm, -0.1 nm, 0 nm, 0.1 nm, 0.2 nm). Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem 55 GHz FBG gadījumā, tad lielākie kropļojumi signāla amplitūdai un fāzei tiek iegūti amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas „stūros”. Savukārt, pie 2.5 Gbit/s pārraides ātruma nav izteikta signāla degradācija izvēlētajā mērījumu diapazonā, kas izpaužas 3.5.a. attēlā un 3.5.e. attēlā redzamajās acu diagrammās pie -0.2 nm un 0.2 nm nobīdes un 3.5.f.

attēlā. Šajos rezultātos var novērot signāla formas kropļojumus, kas saistīti ar jaudas spekta daļēju nofiltrēšanu. Pie 10.3125 Gbit/s datu pārraides ātruma optiskā signāla kropļojumi izpaužas būtiskāk un 3.6.a. attēlā un 3.6.e. attēlā redzamajās acu diagrammās pie -0.2 nm un 0.2 nm nobīdes redzam signāla un maskas pārklāšanos, kas ir saistīts ar platāku jaudas spektru un līdz ar to definētā BER vērtība tiek pārniegta. 55 GHz FBG filtra gadījumā efektīvā caurlaides josla pie 2.5 Gbit/s pārraide ātruma ir 0.4 nm jeb 55 GHz un pie 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma ir 0.2 nm jeb 25 GHz. Konkrētajā gadījumā, pieaugot datu pārraides ātrumam, efektīvā caurlaides josla samazinās. Tas skaidrojams ar to, ka 55 GHz FBG ir samērā liela ienestā dispersija un signāls vairāk pakļauts ATF „stūru” ietekmei. No šiem mērījumu rezultātiem redzams, ka būtiska loma ir atbilstošai filtra parametru novērtēšanai gadījumā, kad tiek plānota datu pārraides ātruma palielināšana.

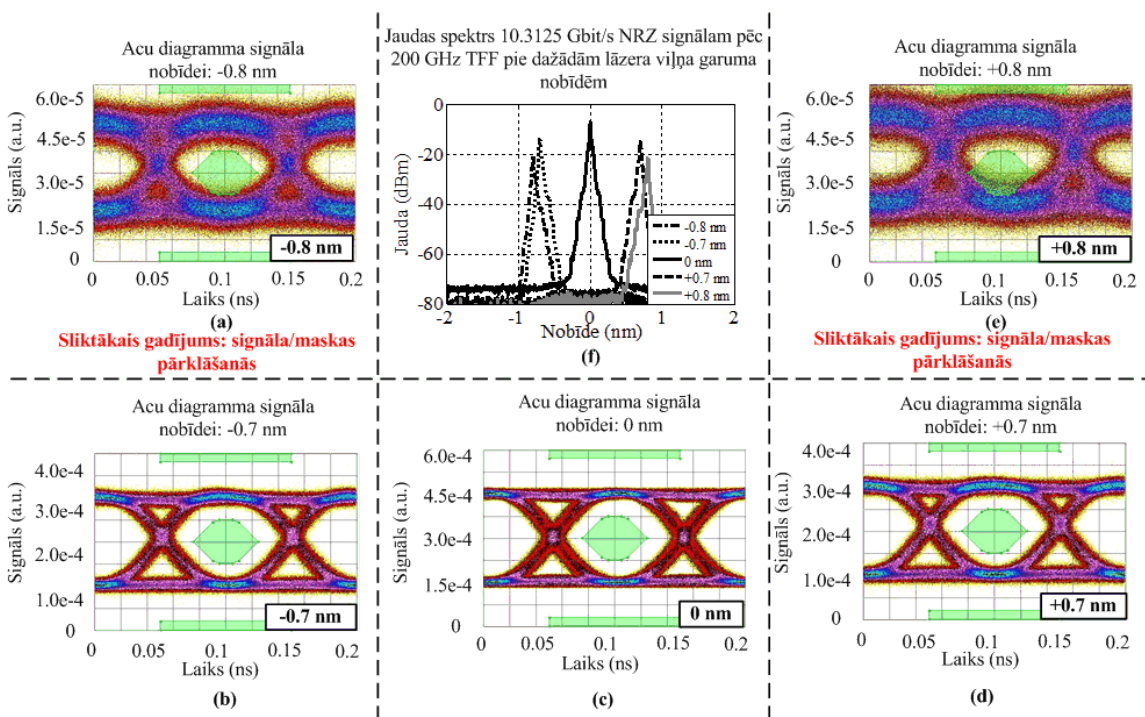


3.6. att. 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 55 GHz FBG pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm

3.7. attēlā un 3.8. attēlā ir parādītas 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas un jaudas spektri pēc 200 GHz TFF viļņa garuma filtra pie dažādām signāla nobīdes vērtībām (-0.8 nm, -0.7 nm, 0 nm, 0.7 nm, 0.8 nm). Mērījumu rezultāti atspoguļoti pie šādas vērtības, lai novērtētu viļņa garuma filtra ATF „stūru” ietekmi uz pārraidītā signāla kvalitāti. 3.7.a. attēlā un 3.7.e. attēlā redzamajās acu diagrammās pie -0.8 nm un 0.8 nm nobīdes redzam signāla un maskas pārklāšanos.



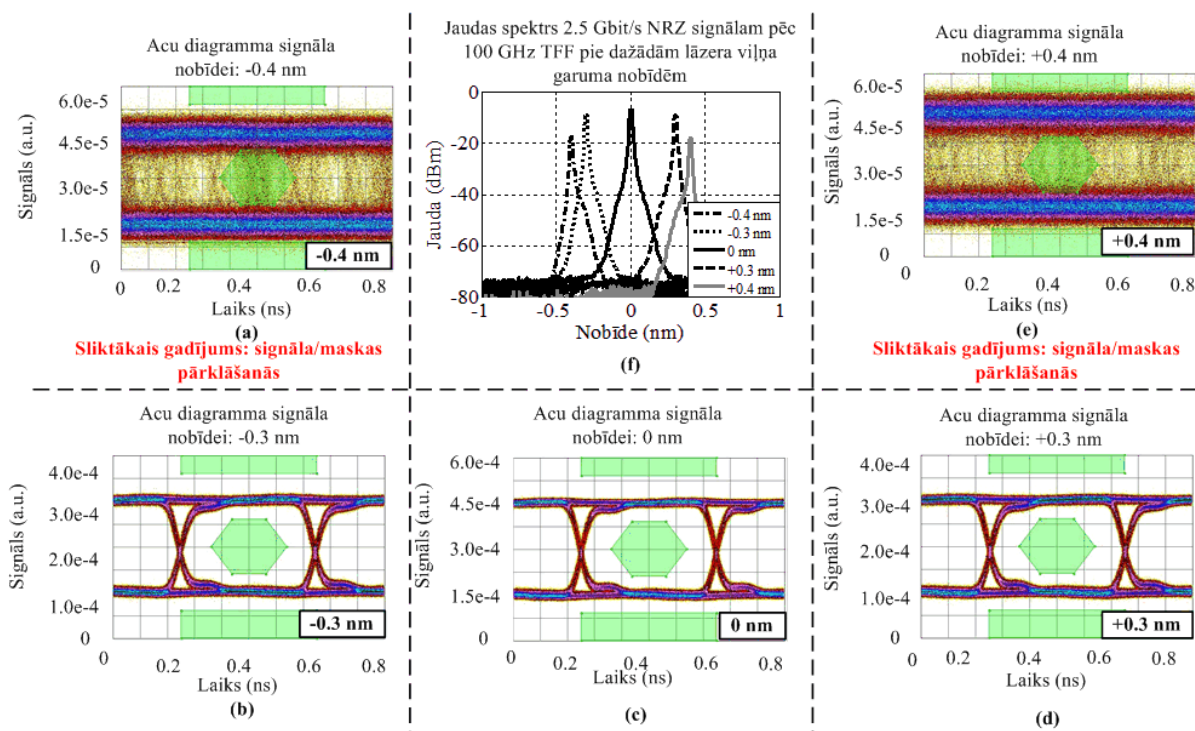
3.7. att. 2.5 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 200 GHz TFF pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm



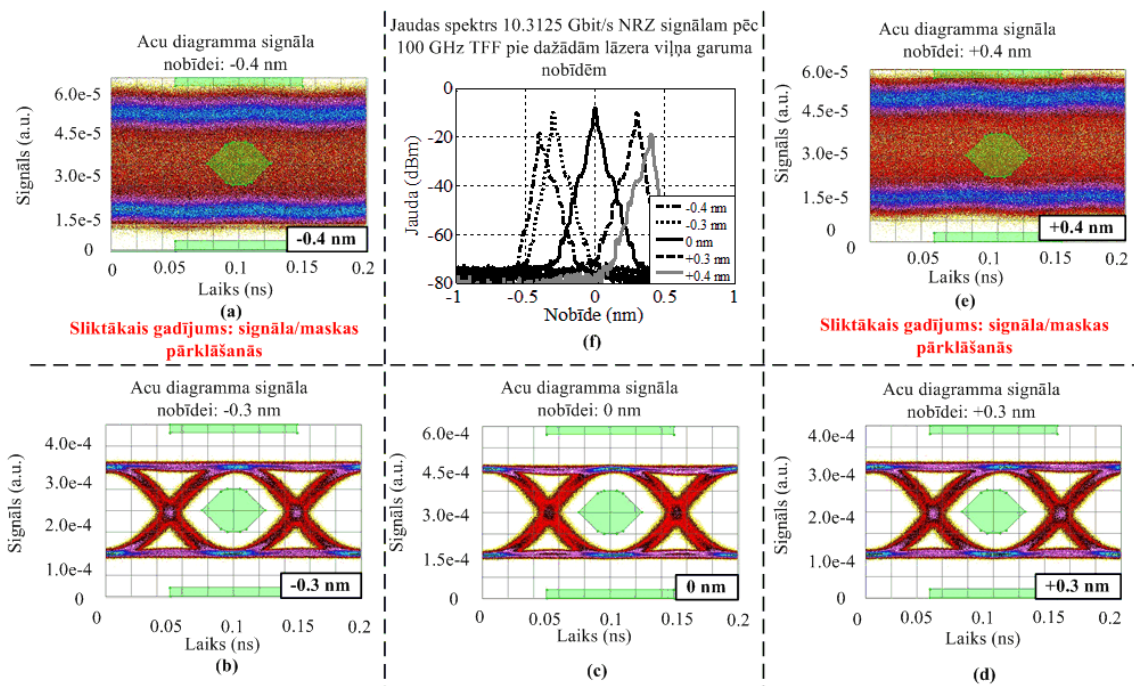
3.8. att. 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 200 GHz TFF pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm

Līdzīga tendence ir pie lielāka datu pārraides ātruma (skat. 3.8.a. attēlā un 3.8.e. attēlā redzamās acu diagrammās). Atšķirība ir platākajās acu diagrammas līnijās, kas saistīts ar lielāko ienestās dispersijas uz laiciskā džitera ietekmi pie augstāka datu pārraides ātruma. Rezultātā efektīvā caurlaides josla 200 GHz TFF pie abiem izmantotajiem datu pārraides ātrumiem ir 1.4 nm jeb 175 GHz.

Savukārt, 3.9. attēlā un 3.10. attēlā ir parādītas 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas un jaudas spektri pēc 100 GHz TFF viļņa garuma filtra pie dažādām signāla nobīdes vērtībām (-0.4 nm, -0.3 nm, 0 nm, 0.3 nm, 0.4 nm). Mērījumu rezultāti atspoguļoti pie šādas vērtības, lai novērtētu viļņa garuma filtra ATF „stūru” ietekmi uz pārraidītā signāla kvalitāti. Līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā, signāla kropļojumi ir novērojami pie nobīdes, kad signāls tiek nobīdīts uz ATF „stūriem”. Efektīvā caurlaides josla šajā gadījumā sakrīt gan 2.5 Gbit/s, gan 10.3125 Gbit/s datu pārraides ātruma gadījumā un ir 0.6 nm jeb 75 GHz. Kā zināms, tad ienestās dispersijas vērtība pieaug tieši ATF „stūros”, kas arī var būt daļa no signāla kropļojumu iemesliem. Izteiktāk tas novērojams FBG viļņa garuma filtru mērījumos, jo to ienestā dispersija ir vairākas reizes lielākā nekā TFF viļņa garuma filtriem [20, 138].



3.9. att. 2.5 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 100 GHz TFF pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm



3.10. att. 10.3125 Gbit/s NRZ optiskā signāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 100 GHz TFF pie dažādām lāzera viļņa garuma nobīdēm

2. tabula

DWDM sistēmu OBPF caurlaides joslas platumu salīdzinājums

| Filtra nosaukums | Caurlaides joslas platumi | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------|---------------|--|
| | -1 dB līmenī | -3 dB līmenī | -20 dB līmenī | Efektīvā josla |
| 100 GHz FBG (ASE metode) | 88.8 GHz | 100.0 GHz | --- | Divas joslas pa 25 GHz pie 2.5 Gbit/s |
| 100 GHz FBG (TLS metode) | 48.8 GHz | 53.8 GHz | | Viena josla 25 GHz, otra josla 12.5 GHz pie 10.3125 Gbit/s |
| | 38.8 GHz | 43.8 GHz | | |
| 55 GHz FBG | 50.0 GHz | 55 GHz | 75.0 GHz | 50 GHz pie 2.5 Gbit/s 25 GHz pie 10.3125 Gbit/s |
| 200 GHz TFF | 137.5 GHz | 200.0 GHz | 275.0 GHz | 175.0 GHz |
| 100 GHz TFF | 68.8 GHz | 81.3 GHz | 118.8 GHz | 75.0 GHz |

TFF viļņa garuma filtru gadījumā, atšķirībā no FBG viļņa garuma filtriem, efektīvā caurlaides josla iegūtajos mērījumu rezultātos nav atkarīga no pārraides ātruma. Tas saistīts ar to, ka šiem filtriem ir mazāka ienestās dispersijas vērtība. Uzskatāmi tas ir redzams 2. tabulā,

kurā ir apkopoti ATF (iegūtas ar ASE metodi) caurlaides joslas platumi apskatītajiem viļņa garuma filtriem, kuri iegūti ar praksē pielietotajiem caurlaides joslas platumu noteikšanas kritērijiem, un ar darba gaitā izstrādāto un patentēto mērījumu shēmu. Jāatzīmē 100 GHz FBG viļņa garuma filtrs, kura gadījumā ir izveidojušās divas efektīvās joslas. Ja apskata ATF mērījumus, kuri iegūti ar TLS metodi (skat. 2.9.b. attēlu), tad skaidri redzami iemesli šādām divām efektīvajām caurlaides joslām. Salīdzinot iegūtos rezultātus secinām, ka darbā apskatīto TFF viļņa garuma filtru efektīvā josla atrodas starp -1 dB joslu un -3 dB joslu, savukārt, FBG viļņa garuma filtra gadījumā tā ir atkarīga no izmantotā datu pārraides ātruma un tam pieaugot samazinās. Līdz ar to neizpildās tā pati sakarība kā TFF viļņa garuma filtriem, kas ir saistīts ar FBG viļņa garuma filtru lielāko ienestās dispersijas vērtību [20, 138].

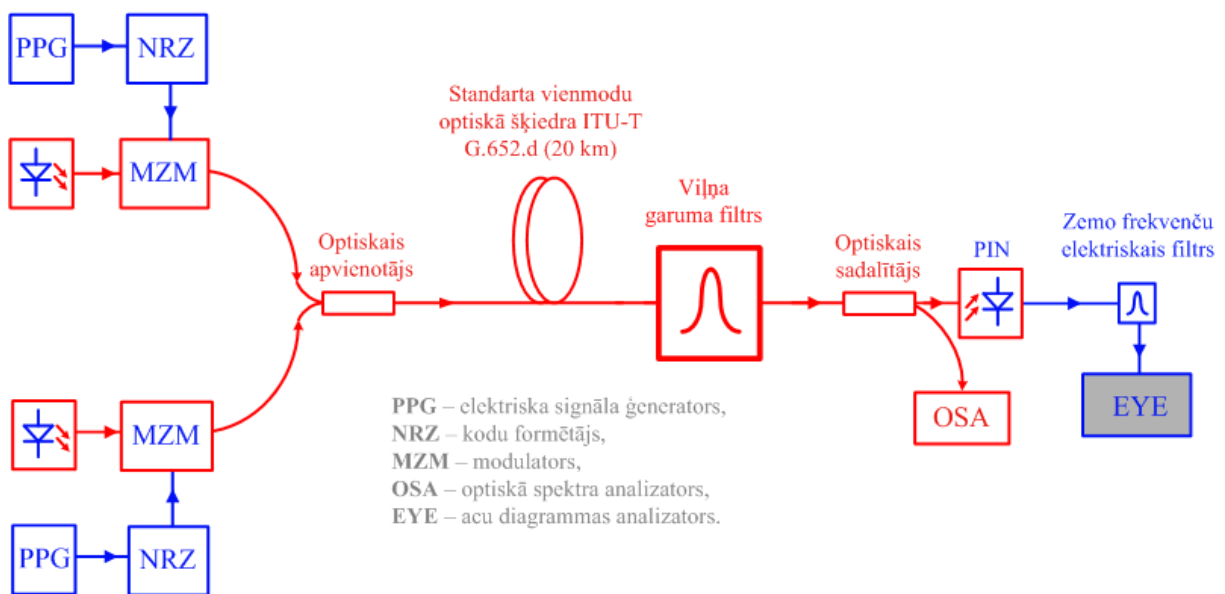
3.2. Komplekso pārvades funkciju nozīme optiski blīvētās sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanā

Ne vienmēr iespējams noteikt mazāko iespējamo kanālu intervālu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmā, novērtējot tikai ražotāja definētos viļņa garuma filtra parametrus. Tas norāda uz to, ka ne vienmēr ražotāju definētie parametri viļņa garuma filtriem parāda visas iespējas, kuras varētu izmantot viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas parametru uzlabošanā - spektrālās efektivitātes paaugstināšanā [102, 109]. Viens no spektrālās efektivitātes palielināšanas veidiem ir, izmantojot tās pašas viļņa garuma filtru tehnoloģijas, samazināt kanāla intervālu līdz minimāli iespējamajam. Iepriekšējā apakšpunktā lielāka uzmanība tika pievērsta signāla, kurš izplatās caur viļņa garuma filtru, kropļojumiem. Lielākie kropļojumi radās, kad nobīdītais optiskais signāls sasniedza ATF „stūrus” [120, 138]. Šajā apakšpunktā izmantosim ATF „stūru” radītos kropļojumus, lai nofiltrētu blakus esošo kanālu un samazinātu kanālu intervālu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmā, un līdz ar to paaugstinātu spektrālo efektivitāti. Katram no apskatītajiem filtriem tika noteikts individuāls minimālais kanālu intervāls, kas ir saistīts ar tehnoloģijas īpatnībām un atšķirīgajām efektīvajām caurlaides joslām.

3.2.1. Spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanas metodika

Izstrādātas dažādas viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas [12, 22, 95, 161] ar iespēju pārraidīt informāciju ar noteiktu frekvenču attālumu starp blakus esošajiem kanāliem un datu pārraides ātrumu konkrētā kanālā. Pašlaik lielākajā daļā pētījumu ir mēģinājumi palielināt kopējo pārraides ātrumu vienai optiskajai šķiedrai. Lielākā daļa no šiem pētījumiem ir balstīti

uz jaunām modulācijas metodēm konkrētam viļņu garumam [51, 124]. Alternatīvs risinājums ir samazināt frekvenču intervālu starp blakus esošajiem kanāliem līdz minimumam, saglabājot tos pašus viļņa garuma filtrus [60, 102, 108, 109]. Izgudrojuma mērķis ir palielināt viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālo efektivitāti, saglabājot esošās viļņa garuma filtru tehnoloģijas. Darba gaitā izstrādātā un patentētā mērījumu blokshēma, kura izmantota šo pētījumu veikšanai atspoguļota 3.11. attēlā [13] (skat. pieliecību 3. pielikumā).



3.11. att. Spektrālās efektivitātes paaugstināšanas mērījumu shēma [13]

Mērījumu blokshēmai ir trīs daļas. Pirmā daļa ir optiskais raidītājs, kas sastāv no elektriskā signāla ģenerators, koda formētāja, lāzera avota un signāla ārējā modulatora. Elektriskā signāla ģenerators veido pseido – gadījuma $2^{31}-1$ bitu secību ar darbības frekvenci no 100 MHz līdz 12.5 GHz. Koda formētājs veido bez atgriešanās pie nulles kodu. Nepārtrauktu optiskā signālu veido lāzers ar sadalīto atgriezenisko saiti. Optiskā signāla ārējais modulators ir MZM uz LiNbO_3 kristāla bāzes.

Mērījumu blokshēmas pirmā un otrā daļas ir savienotas ar 2:1 optisko apvienotāju. Blokshēmas otrā daļa sastāv no optiskās pārraides vides. Pārraides vide ir standarta vienmodu optiskā šķiedra (ITU G.652) [58]. Optiskai šķiedrai ir liels efektīvais laukums $80 \mu\text{m}^2$, vājinājums 0.2 dB/km, dispersija 17 ps/nm/km, dispersijas slīpums 0.07 ps/nm²/km, un nelineārais koeficients $2.5 \cdot 10^{-20}$ cm/W pie 1550 nm viļņu garuma. Šķiedru optiskās līnijas garums ir vienāds ar 20 km, kas ir tipisks pārraides attālums piekļuves pārraides sistēmās. Mērījumu blokshēmas otrā un trešā daļas tiek savienotas ar 1:2 optisko sazarotāju.

Blokshēmas trešā daļa ir tiešās uztveršanas uztvērējs, kurš sastāv no viļņa garuma filtra, pusvadītāja foto diodes un elektriskā filtra. Viļņa garuma filtrs mērījumu shēmā tiek mainīts un katrā gadījumā noteikts minimālais intervāls starp šiem diviem blokshēmas kanāliem. Pēc foto diodes pievienots 4. pakāpes Beseļa – Tomsona elektriskā signāla filtrs. Optiskā signāla kvalitātes novērtēšanas daļa sastāv no elektriskā augstfrekvenču osciloskopa un optiskā spektra analizatora, kas attiecīgi pievienoti pie elektriskā filtra un pie optiskā sazarotāja.

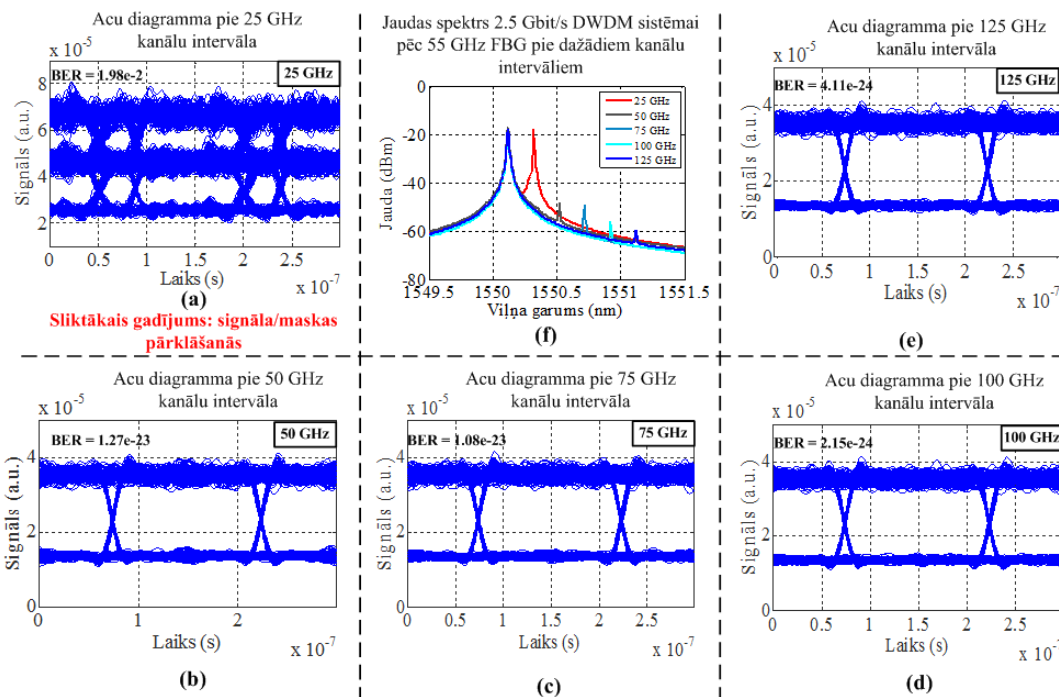
Elektriskā pseido – gadījuma $2^{31}-1$ bitu secība ar darbības frekvenci 2.5 GHz vai 10.3125 GHz tiek padota no elektriskā signāla ģeneratora uz koda formētāju, kurš veido bez atgriešanās pie nulles kodu. Šis kods no koda formētāja tiek padots uz optiskā signāla ārējā modulatora elektrisko augstfrekvenču ieeju. Lai veidotu optisko plūsmu papildus elektriskajam bez atgriešanās pie nulles kodam, uz modulatoru tiek padots nepārtraukta starojuma optiskais signāls ar iepriekš izvēlētiem parametriem no lāzera ar sadalīto atgriezenisko saiti. Ārējā modulatora izejā tiek iegūts optiskais signāls ar datu pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s vai 10.3125 Gbit/s, kas kodēts ar bez atgriešanās pie nulles kodu. Izmantojot 2:1 optisko apvienotāju, tiek apvienoti viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas abi optiskie signāli un tiek padoti uz optisko līniju.

Katram no šiem optiskajiem signāliem ir pārskatājama nesējfrekvence jeb centrālais viļņa garums, kas nodrošina maināmu frekvenču intervālu starp blakus esošajiem kanāliem. Pēc pārraides pa standarta vienmodu optisko šķiedru iepriekš apvienotais optiskais signāls tiek sadalīts ar 1:2 optisko sazarotāju. Pēc optiskā sazarotāja ir viļņa garuma filtrs, kurš nofiltrē attiecīgo optisko kanālu un samazina trokšņu līmeni. No izmantotā viļņa garuma filtra ir atkarīga kanālu intervāla izvēle šajā mērījumu shēmā. Pēc optiskā filtra optiskais bez atgriešanās pie nulles kods tiek padots uz PIN foto diodi, kur tiek pārveidots uz elektrisko signālu un ar elektrisko filtru tiek nofiltrēti elektriskie trokšņi [13].

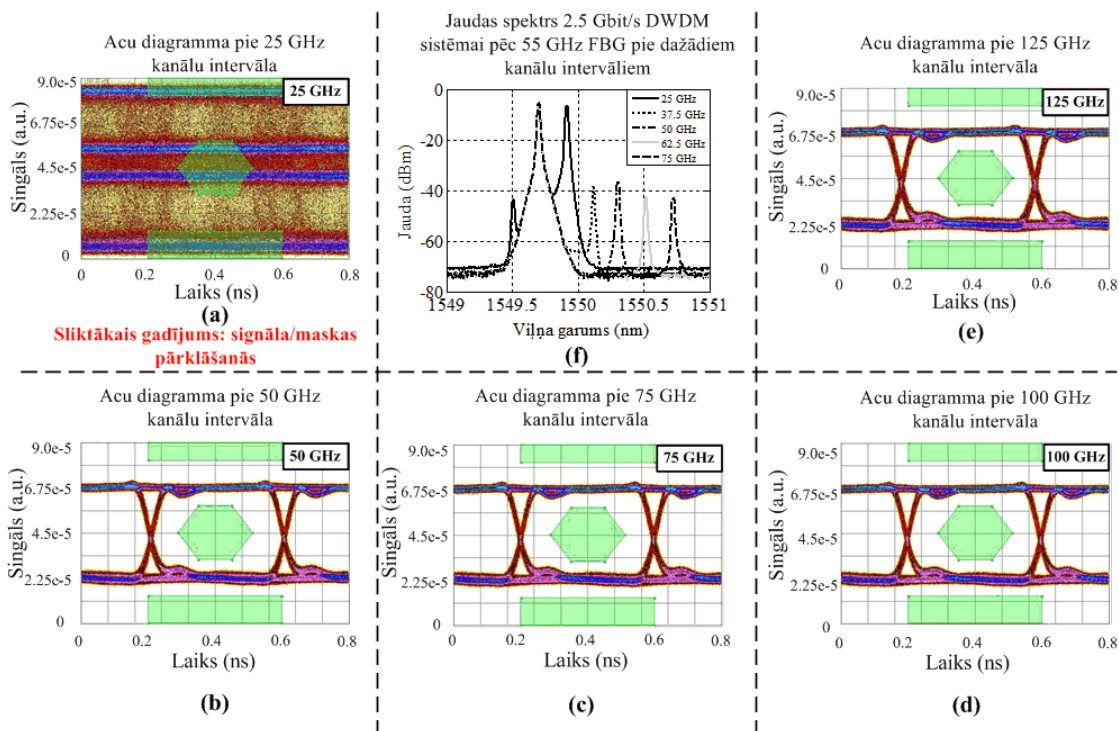
3.2.2. Mērījumu rezultāti 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s gadījumā

Apakšpunktā ir apkopoti pētījumu rezultāti par viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālās efektivitātes palielināšanas iespējām, kuras saistītas ar iespēju saglabāt esošās viļņa garuma filtra tehnoloģijas ar minimāli iespējamo kanālu intervālu katram filtram. Apskatīti ir viļņa garuma filtri (55 GHz FBG, 200GHz TFF un 100 GHz TFF) pie diviem pārraides ātrumiem 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s un NRZ kodu. Šajā apakšpunktā netiek atspoguļoti

rezultāti no 100 GHz FBG, kas ir saistīts ar konkrētā viļņa garuma filtra neatbilstību DWDM sistēmas prasībām.



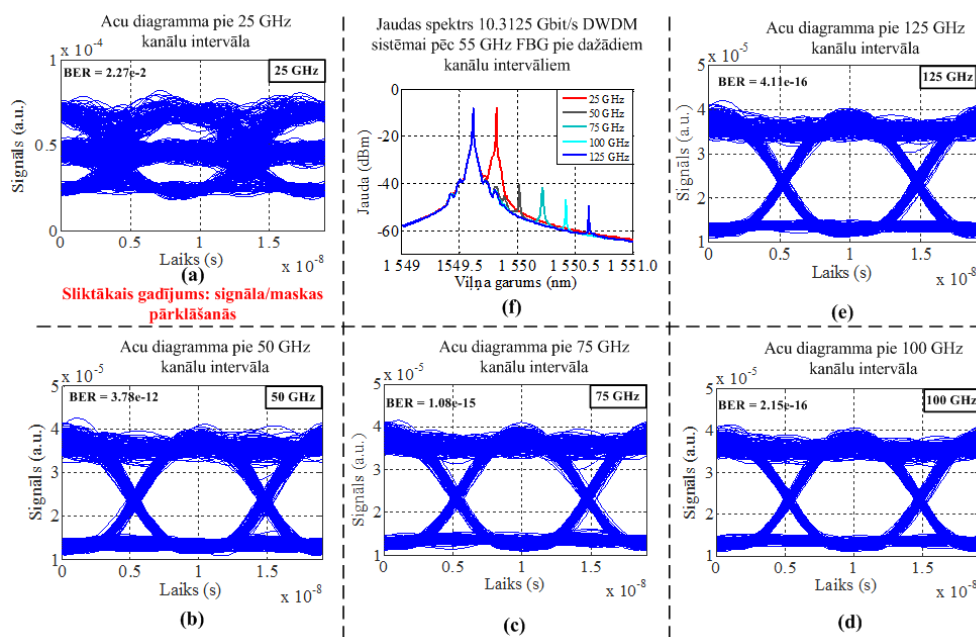
3.12. att. Skaitliskās 2.5 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 55 GHz FBG pie dažādiem kanālu intervāliem



3.13. att. Eksperimentālās 2.5 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 55 GHz FBG pie dažādiem kanālu intervāliem

Pētījumos izmantotā blokshēma ir aprakstīta 3.2.1. apakšpunktā. Tajā ir divi WDM sistēmas kanāli. Viens no kanāliem tiek noskaņots uz viļņa garuma filtra centrālo viļņa garumu, savukārt, otra kanāla centrālais viļņa garums ir pārskaņojams ar iespēju izveidot dažādus intervālus starp kanāliem. Optiskā signāla kvalitāte tiek novērtēta kanālam ar fiksēto viļņa garumu pie dažādām kanāla intervāla vērtībām. Šīs kanālu intervālu vērtības atšķiras atkarībā no apskatītā viļņa garuma filtra, kas saistīts ar to efektīvo joslu.

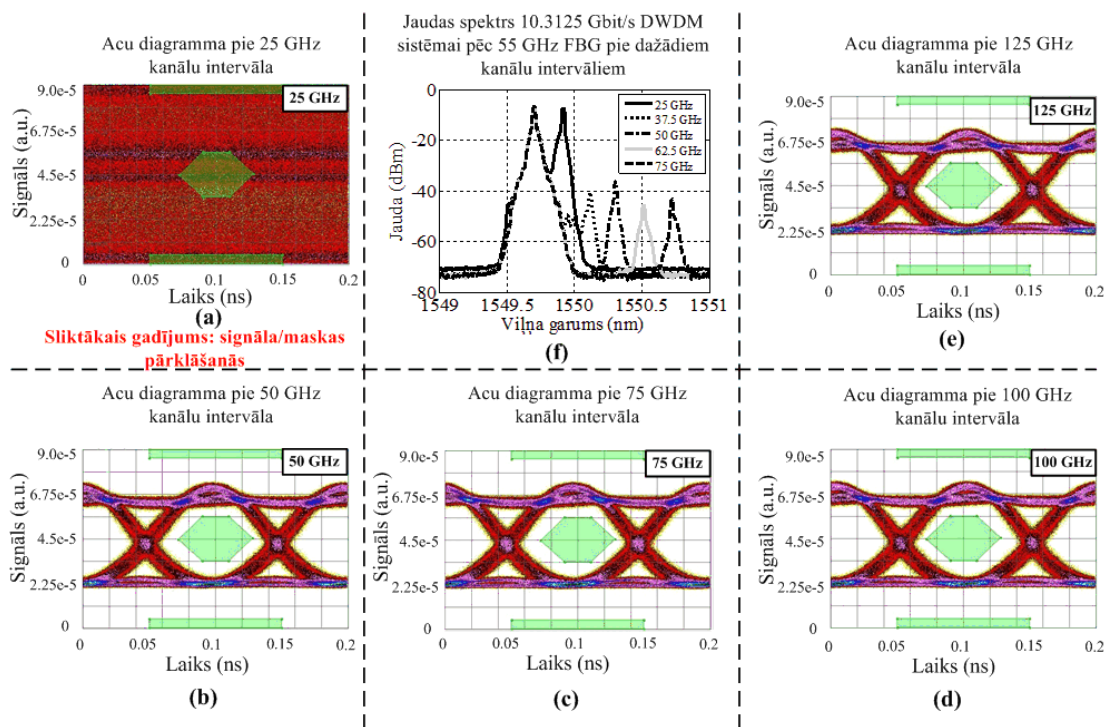
Kā pirmais tiek apskatīts 55 GHz FBG viļņa garuma filtrs. Šī filtra izpētē ir izmantotas gan simulācijas blokshēma, gan atbilstoša mērījumu blokshēma. Simulācijas blokshēma ir veidota OptSim simulācijas programmas vidē (aprēķinu metode aprakstīta 2.3.1. apakšpunktā). 3.12. attēlā un 3.13. attēlā ir attiecīgi parādītas simulācijas un eksperimentālās 2.5 Gbit/s DWDM piekļuves sakaru sistēmas acu diagrammas un jaudas spektri pēc 55 GHz FBG pie dažādiem kanālu intervāliem no 25 GHz līdz 125 GHz ar 25 GHz soli. Solis izvēlēts, lai sakristu ar ITU-T G.694.1 rekomendācijā definēto DWDM sistēmas viļņa garuma režģi [59].



3.14. att. Skaitliskās 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 55 GHz FBG pie dažādiem kanālu intervāliem

25 GHz kanālu intervāla gadījumā ir novērojama abu kanālu optisko signālu uztveršana (skat. 3.12.a un 3.13.a. attēlus) un arī nelineāra mijiedarbe (skat. 2.13.f. attēlu), kas izpaužas kā jaunu viļņa garuma komponentu parādīšanās. Šie iemesli noved pie uztveramā

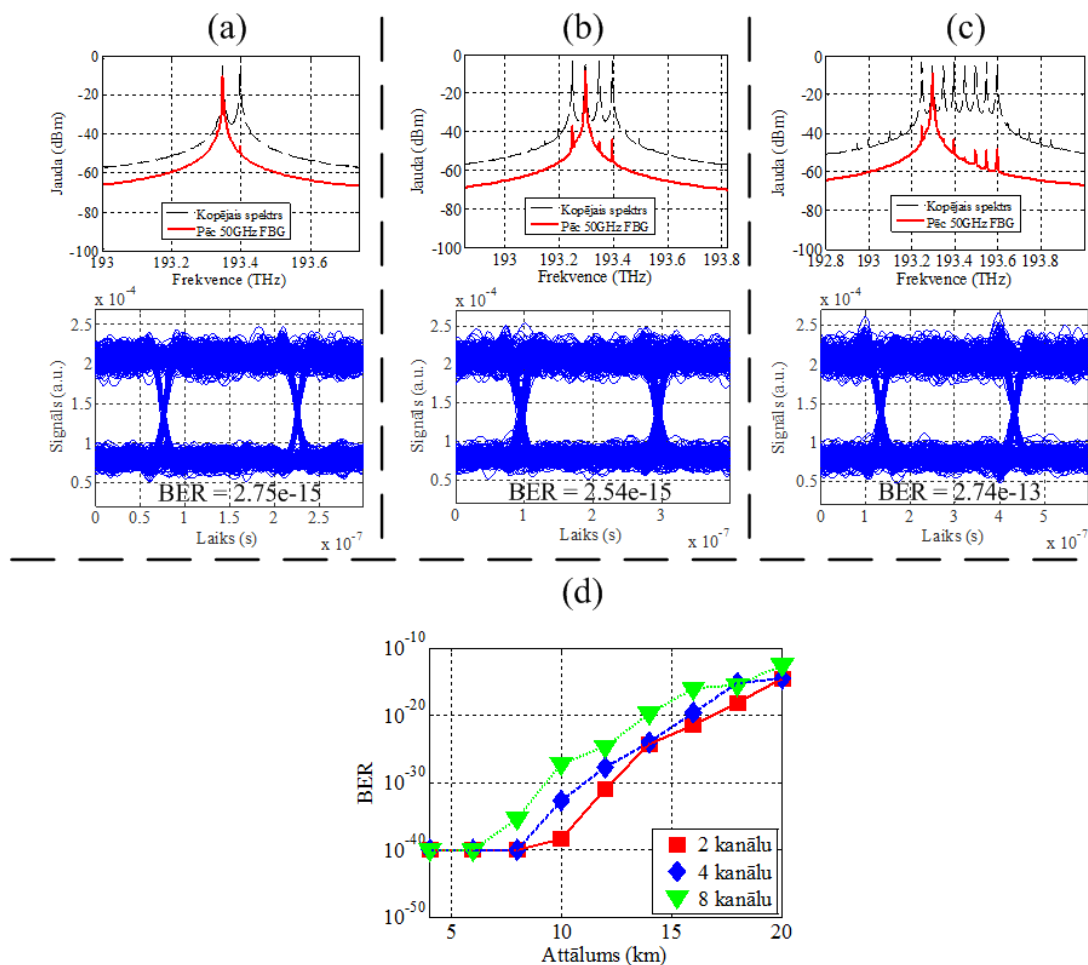
kanāla kropļojumiem un līdz ar to arī pie paaugstināta BER. Šajā gadījumā sekmīga datu pārraide nav iespējama. Lai nodrošinātu atbilstošu BER, tad intervāls starp blakus esošajiem kanāliem tika palielināts par 25 GHz. Kā rezultātā blakus esošā kanāla jauda tika efektīvi samazināta ar viļņa garuma filtra ATF „stūri”, jo 55 GHz FBG filtra blakus kanālu izolācijas vērtība ir ~35 dB. Kā redzams no 3.12.b. attēla un 3.13.b. attēla atspoguļotās acu diagrammas, tad 50 GHz kanālu intervāls ir pietiekošs atbilstošas BER vērtības nodrošināšanai uztveramajam kanālam. Lielākas kanālu intervālu vērtības (75 GHz, 100 GHz and 125 GHz) ir uzrādītas, lai parādītu izstrādātās DWDM piekļuves sistēmas stabilitāti izmantotajā viļņa garuma diapazonā.



3.15. att. Eksperimentālās 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 55 GHz FBG pie dažādiem kanālu intervāliem

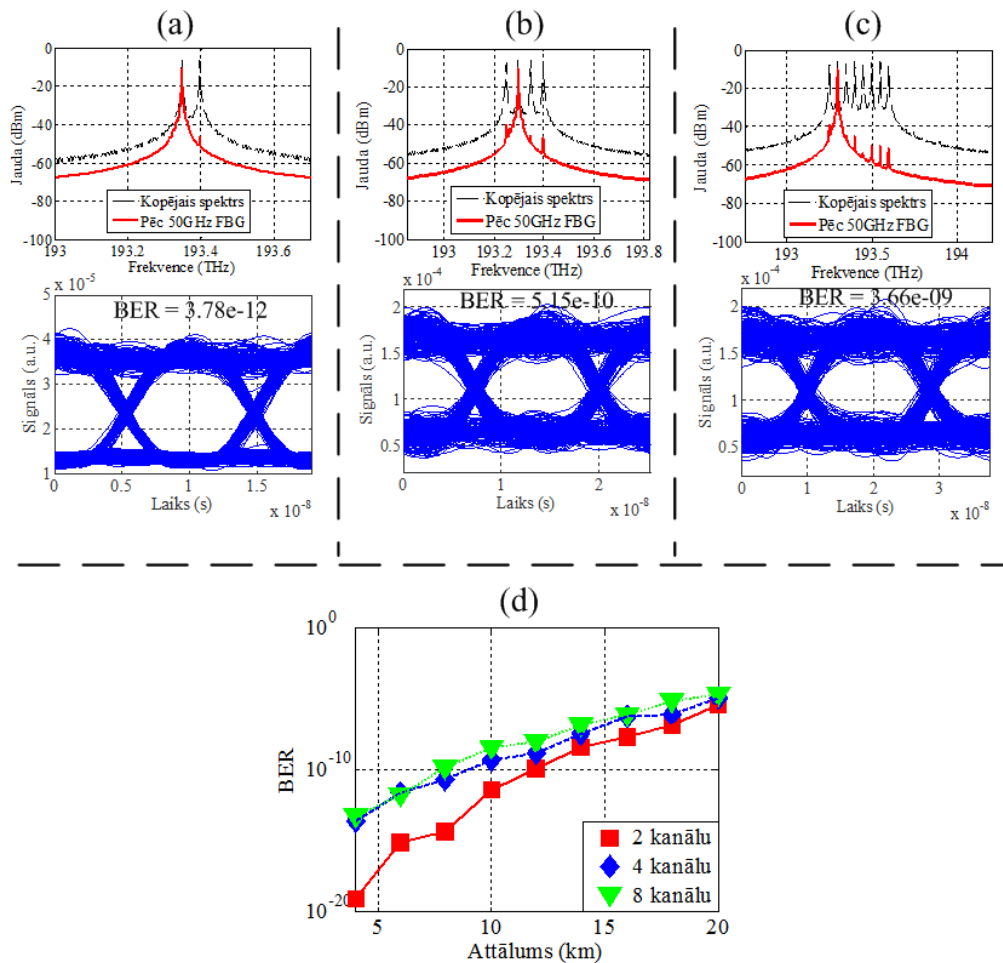
Savukārt, 3.14. attēlā un 3.15. attēlā ir atbilstoši parādītas simulācijas un eksperimentālās 10.3125 Gbit/s DWDM piekļuves sakaru sistēmas acu diagrammas un jaudas spektri pēc 55 GHz FBG pie dažādiem kanālu intervāliem no 25 GHz līdz 125 GHz ar 25 GHz soli. Pieaugot datu pārraides ātrumam, optisko impulsu platums samazinās un kā zināms no Furjē transformācijas īpašībām, tad jaudas spektrs paplašinās [37]. Tas noved līdz lielākai ienestās dispersijas ietekmei un optiskā signāla degradācijai. Līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā arī pie 10.3125 Gbit/s datu pārraides ātruma 50 GHz intervāls starp kanāliem ir pietiekošs, lai

nodrošinātu atbilstošu BER vērtību. Kā rezultātā spektrālā efektivitāte izveidotajai 10.3125 Gbit/s DWDM jaunās paaudzes sistēmai ar 55 GHz FBG tika palielināta no 0.188 bit/s/Hz uz 0.206 bit/s/Hz. Lai pārliecinātos par intervāla starp kanāliem izvēles atbilstību arī lielāka kanālu skaita gadījumā, tad tika veiktas papildus simulācijas, jo eksperimentāli realizēt šādu pētījumu bija neiespējami augsto izmaksu dēļ.



3.16. att. 2. 5 Gbit/s divu (a), četru (b) un astoņu (c) kanālu DWDM sistēmas slīktākā kanāla acu diagrammas un BER atkarība no līnijas garuma (d) nofiltrēta ar 55 GHz FBG pie 50 GHz intervāla starp kanāliem

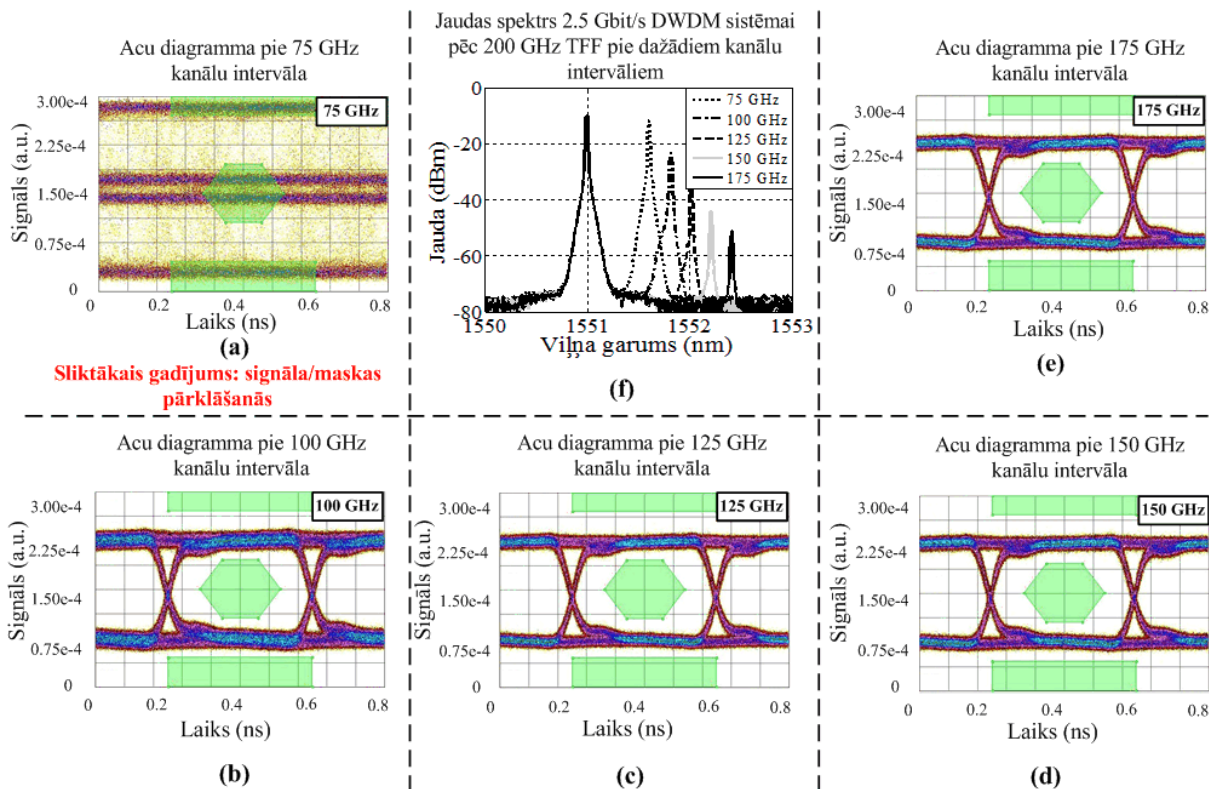
Attiecīgi 3.16. attēlā un 3.17. attēlā ir parādītas 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas slīktākā kanāla acu diagrammas un BER atkarība no līnijas garuma nofiltrēta ar 55 GHz FBG pie 50 GHz intervāla starp kanāliem. Šajā gadījumā tika izveidotas trīs simulācijas shēmas ar diviem, četriem un astoņiem kanāliem katram datu pārraides ātrumam.



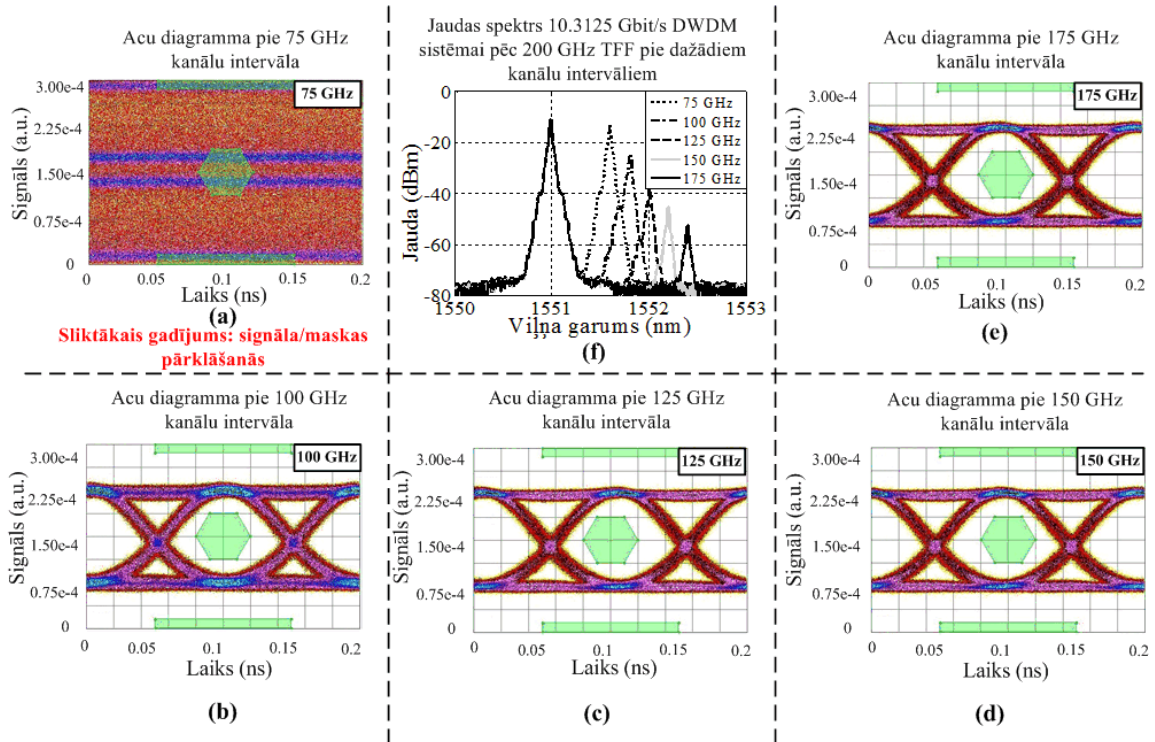
3.17. att. 10.3125 Gbit/s divu (a), četru (b) un astoņu (c) kanālu DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas un BER atkarība no līnijas garuma (d) nofiltrēta ar 55 GHz FBG pie 50 GHz intervāla starp kanāliem

Kā redzams no 3.16. attēla, tad pieaugot kanālu skaitam palielinās NOE ietekme. NOE ietekme pieaug pakāpeniski, palielinoties pārraides attālumam, kas pārskatāmi redzams 3.16.d. attēlā. Pie 2.5 Gbit/s pārraides ātruma DWDM piekļuves sistēmā pēc 20 km SSMF ar 55 GHz FBG ir iespējams nodrošināt sekmīgu pārraidi visu kanālu skaita gadījumā. Savukārt, palielinot datu pārraides ātrumu uz 10.3125 Gbit/s, pārraides attālums DWDM piekļuves sistēmā samazinās uz pusi (skat. 3.17.d. attēlu), kas izkaidrojams ar pieaugušās dispersijas ietekmi uz signāla kvalitāti. Šajā gadījumā signāla kvalitāte ir izteikti sliktāka lielāka kanālu skaita gadījumā, kas ir skaidrojams ar NOE ietekmes pieaugumu. Apkopojot iegūtos rezultātus 55GHz FBG viļņa garuma filtra gadījumā, secinām, ka eksperimentāli noskaidrotais minimālais kanāla intervāls atbilst aprēķinātajam un iespējams palielināt DWDM sistēmas spektrālo efektivitāti [111, 114, 115].

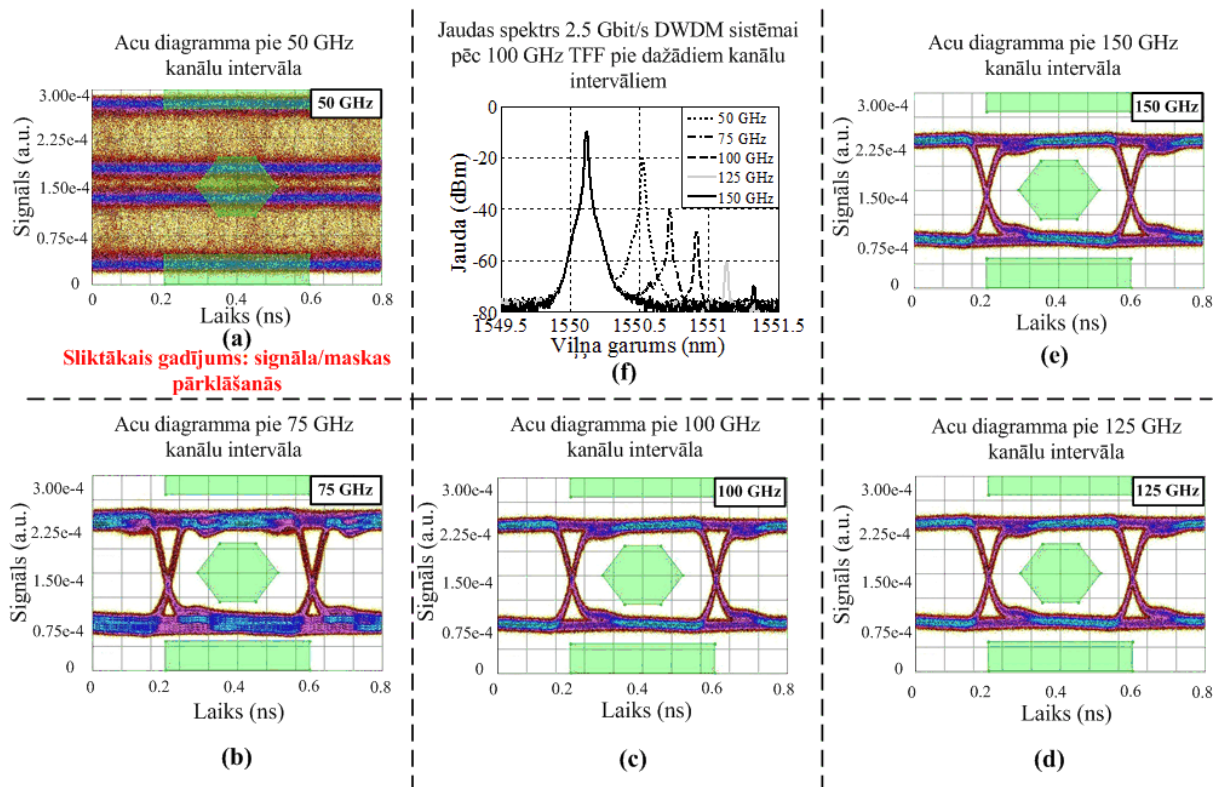
Apskatīsim 200 GHz TFF viļņa garuma filtru. Attiecīgi 3.18. attēlā un 3.19. attēlā ir parādītas 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas un jaudas spektri pēc 200 GHz TFF pie dažādiem kanālu intervāliem vērtībās no 75 GHz līdz 175 GHz ar 25 GHz soli. Kā redzams no 3.18.a. attēla un 3.19.a. attēla, tad abu kanālu detektēšana novērojama pie 75 GHz intervāla starp kanāliem. Tas ir saistīts ar to, ka blakus esošā kanāla jauda nav pietiekoši samazināta. Lai samazinātu nevēlamo mijiedarbi, tad intervāls starp kanāliem tika palielināts par 25 GHz. Kā rezultātā blakus esošā kanāla jauda tika efektīvi samazināta ar viļņa garuma filtra ATF „stūri”, jo 200 GHz FBG filtra blakus kanālu izolācijas vērtība ir ~40 dB. Kā redzams no 3.18.b. attēla un 3.19.b. attēla atspoguļotās acu diagrammas, tad 100 GHz kanālu intervāls ir pietiekošs atbilstošas BER vērtības nodrošināšanai uztveramajam kanālam. Lielākas kanālu intervālu vērtības (125 GHz, 150 GHz and 175 GHz) ir uzrādītas, lai parādītu izstrādātās 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s DWDM piekļuves sistēmas stabilitāti izmantotajā viļņa garuma diapazonā. Kā rezultātā spektrālā efektivitāte izveidotajai DWDM jaunās paaudzes sistēmai ar 200 GHz TFF tika palielināta divas reizes (pie 2.5 Gbit/s pārraides ātruma tika palielināta no 0.0125 bit/s/Hz līdz 0.025 bit/s/Hz un pie 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma no 0.05 bit/s/Hz līdz 0.1 bit/s/Hz).



3.18. att. Eksperimentālās 2.5 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 200 GHz TFF pie dažādiem kanālu intervāliem

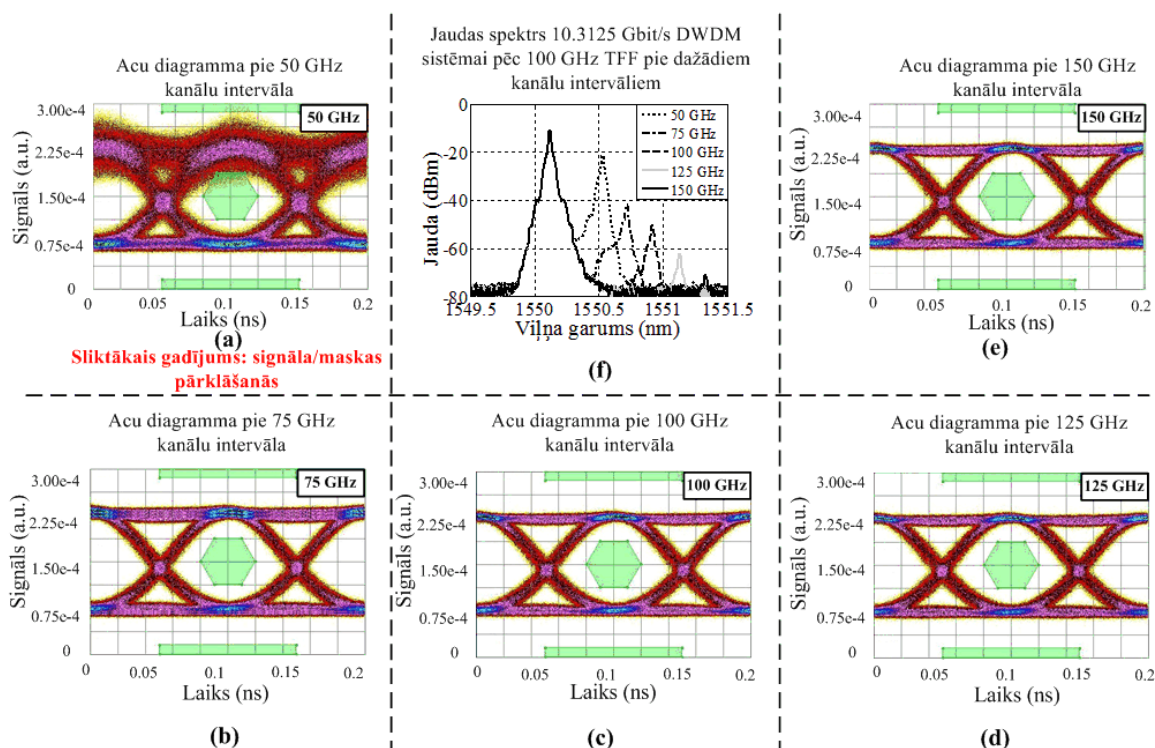


3.19. att. Eksperimentālās 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 200 GHz TFF pie dažādiem kanālu intervāliem



3.20. att. Eksperimentālās 2.5 Gbit/s DWDM sistēmas sliktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 100 GHz TFF pie dažādiem kanālu intervāliem

Savukārt, 3.20. attēlā un 3.21. attēlā ir attiecīgi parādītas 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas slīktākā kanāla acu diagrammas un jaudas spektri pēc 100 GHz TFF pie dažādiem kanālu intervāliem vērtībās no 75 GHz līdz 175 GHz.



3.21. att. Eksperimentālās 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas slīktākā kanāla acu diagrammas (a-e) un jaudas spektri (f) pēc 100 GHz TFF pie dažādiem kanālu intervāliem

Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem 3.20.b. attēlā un 3.21.b. attēlā, tad 75 GHz kanālu intervāls ir pietiekams, lai nodrošinātu atbilstošu BER vērtību. Kā rezultātā, spektrālā efektivitāte izveidotajai DWDM jaunās paaudzes sistēmai ar 100 GHz TFF tika palielināta pie 2.5 Gbit/s pārraides ātruma no 0.025 bit/s/Hz līdz 0.033 bit/s/Hz un pie 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma no 0.103 bit/s/Hz līdz 0.138 bit/s/Hz.

Izmantojot šajā apakšpunktā piedāvāto metodi: samazināt frekvenču intervālu starp blakus esošajiem kanāliem līdz minimumam, saglabājot tos pašus viļņa garuma filtrus, ir iespējams palielināt DWDM sistēmas spektrālo efektivitāti.

3.3. Efektīvākā kompleksā pārvades funkcija DWDM sistēmā

Darba iepriekšējos apakšpunktos tika noskaidrota filtra efektīvā caurlaides josla, pēc kuras var novērtēt iespējamo kanālu intervālu DWDM sistēmās atkarībā no izmantotā viļņa

garuma filtra tehnoloģijas. Savukārt, šajā apakšpunktā tika noskaidrota piemērotākā kompleksā pārvades funkcija viļņa garuma filtram DWDM sistēmās. Tā kā noteicošie faktori piemērotākai kompleksai pārvades funkcijai ir datu pārraides ātrums un modulācijas formāts, tad pētījumā izmantoti plašāk pielietotie datu pārraides ātrumi kanālos un modulācijas formāti DWDM sistēmās [107, 145].

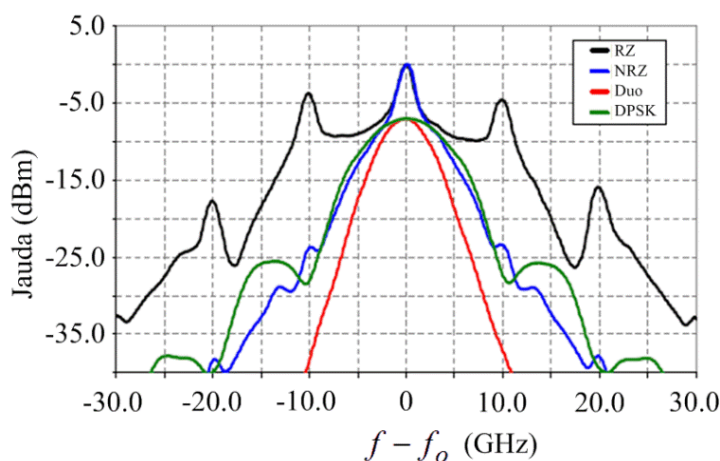
3.3.1. Efektīvākās kompleksās pārvades funkcijas novērtēšanas metodika

Optiskajam signālam, izplatoties caur vairākiem viļņa garuma filtriem, notiek spektra sašaurināšanās, kas ir saistīta ar temperatūras nestabilitāti pārraidē izmantotajām iekārtām un viļņa garuma filtra FWHM joslas samazināšanos [112, 113, 120, 138]. Šīs FWHM joslas samazināšanās ātrums ir atkarīgs no amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas formas. Visstraujāko FWHM joslas samazināšanos pie kaskādē saslēgtiem vairākiem viļņa garuma filtriem var novērot Lorenca filtram, savukārt, vislēnāko – plakanas virsmas filtriem [107]. Daudzkanālu DWDM sistēmās iepriekšminētie faktori var būt galvenie pārraidītā signāla degradācijas iemesli [75, 101, 161]. Tāpēc ir jānoskaidro efektīvākā FWHM josla dažādas amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas formām, kas nodrošina atbilstošu optiskā signāla kvalitāti saskaņā ar ITU-T rekomendācijām. Tomēr, ne vienmēr pietiekams noskaidrot efektīvāko amplitūdas kvadrāta pārvades funkciju, jo pieaugot datu pārraides ātrumam, fāzes pārvades funkcijas ietekme palielinās (pieaug ienestās dispersijas apjoms).

Šis pētījums ir realizēts ar OptSim simulācijas programmu. Trīs dažādas kompleksās pārvades funkcijas (skat. 2.5.attēlu) tika izvēlētas viļņa garuma filtru realizācijai DWDM sistēmas simulācijas shēmā. Šādas funkcijas izvēlētas, jo ar Lorenca filtru ir iespējams aproksimēt: Fabrī Pero filtrus, mikroriņķa rezonatorus; ar Pacelta-kosinusa filtru: difrakcijas režģus, šķiedras Brega režģus; ar Super-Gausa filtru: viļņvada masīva režģus, plāno kārtiņu filtrus [107, 120, 138].

DWDM pārraides sistēmās atkarībā no pielietojuma veida tiek izmantoti dažādi modulācijas formāti. Optiskajam signālam ir četri parametri, kurus iespējams mainīt: amplitūda, fāze, frekvence un polarizācijas stāvoklis [145]. Lielākā daļa no pārraides sistēmām izmanto binārus amplitūdas modulācijas formātus ar NRZ kodu, kas ir saistīts ar raidītāju un uztvērēju vienkāršo realizāciju. Sakarā ar pieaugošajām prasībām pret pārraides ātrumu vienā DWDM sistēmas kanālā ir nepieciešami savādāki modulācijas formāti kā RZ, Duobinary un DPSK. Kā jau minēts iepriekš, tad NRZ-intensitātes modulācija (OOK) ir plašāk pielietotā optiskajās pārraides sistēmās [75, 145]. NRZ-OOK ir slīdzinoši šaurs jaudas

spektrs, kas dod labāku noturību pret ienesto dispersiju. Tomēr, starp impulsiem nav drošības intervāla, kas noved pie starpsimbolu interferences [145]. Šī iemesla dēļ NRZ-OOK ir labāk pielietot piekļuves sistēmās, kur datu pārraides ātrums un attālums ir salīdzinoši mazāks [102]. Savukārt, RZ-OOK gadījumā starp bitiem ir aizsargintervāls. Šajā gadījumā jaudas spektrs ir plašāks, kas nodrošina labāku noturību pret starpsimbolu interferenci un nelineārajiem optiskajiem efektiem [145]. Plašais jaudas spektrs noved pie mazākas noturības pret ienesto dispersiju un arī nelielu spektrālo efektivitāti [107]. Salīdzinot ar diviem iepriekšējiem, Duobinary ir šaurākais jaudas spektrs. Tas ir trīs līmeņu kods, kuru izmanto amplitudas modulācijas gadījumā [140]. Tomēr, labākā noturība pret nelineārajiem optiskajiem efektiem ir DPSK gadījumā, jo pārraidītā signāla jauda ir konstanta [145]. 3.22 attēlā ir parādīts jaudas spektru salīdzinājums starp dažādajiem modulācijas formātiem 10.0 Gbit/s optiskajam signālam.



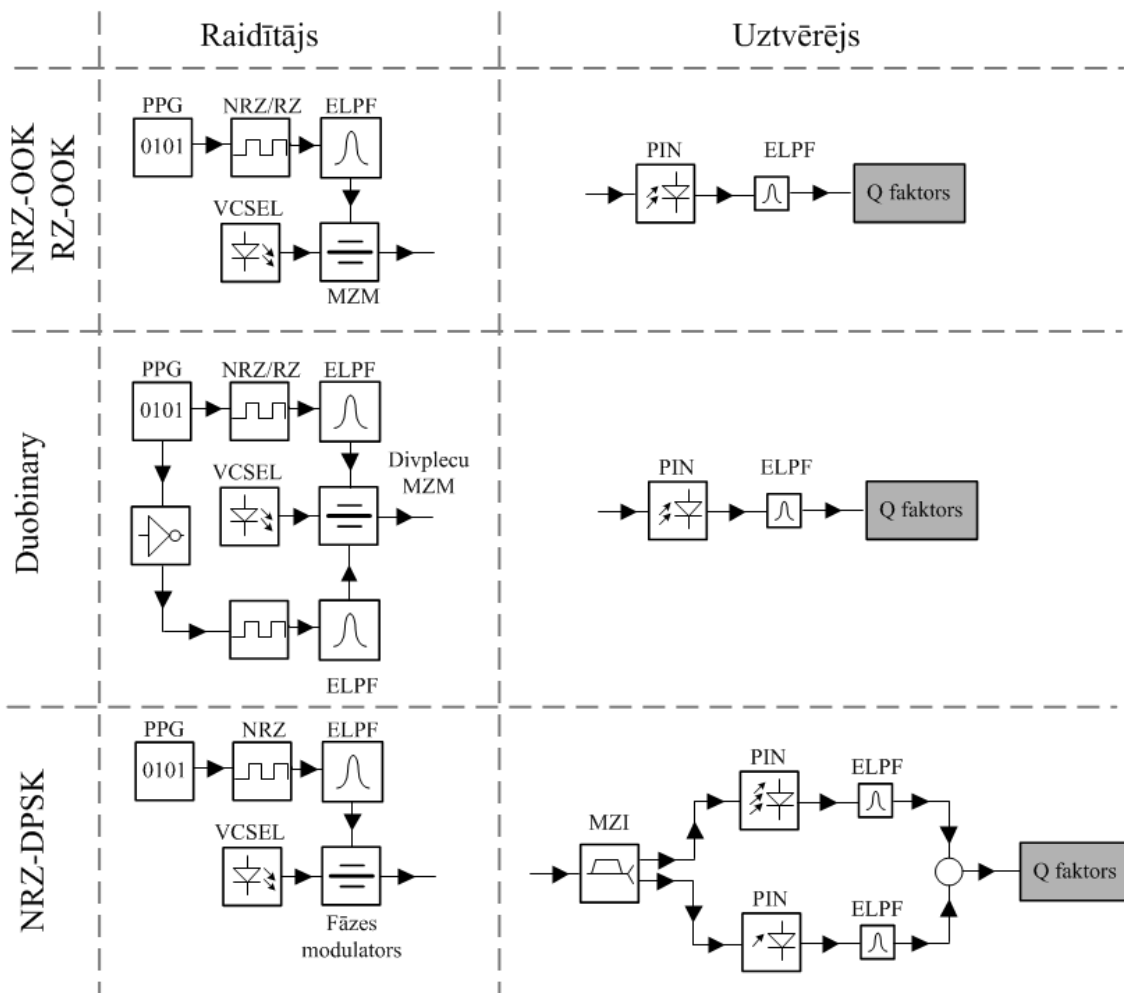
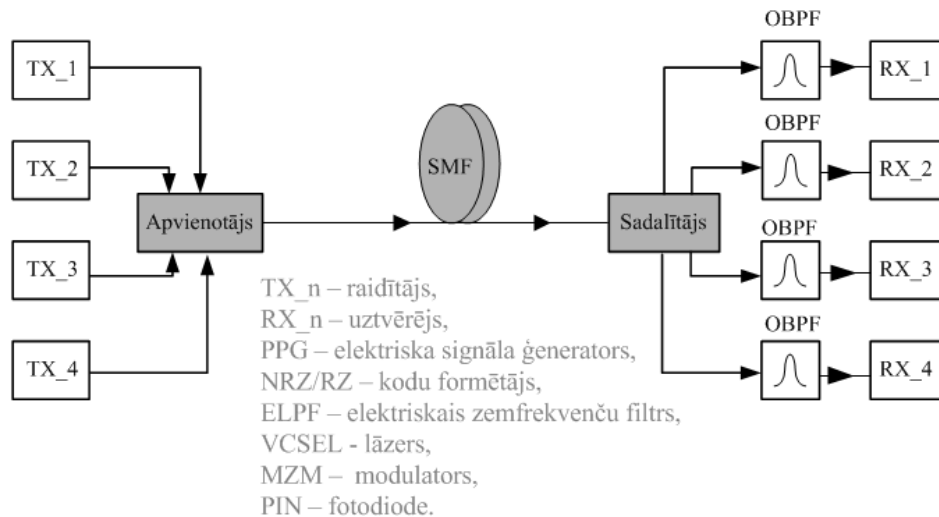
3.22. att. Jaudas spektrs 10.0 Gbit/s optiskajam signālam pie dažādiem modulācijas formātiem [83]

Sakarā ar vairāku modulācijas formātu esamību ir nepieciešama pamatīga piemērotāko viļņa garuma filtru parametru izpēte DWDM sistēmās, jo jaudas spektri būtiski atšķiras [83, 145].

Pētījumā tika novērtēts uztvertā signāla Q faktors no acu diagrammas, kas tiek noteikts pēc 3.1 izteiksmes:

$$Q = \frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.1)$$

kur m_1 , σ_1 (m_0 , σ_0) ir vidējā vērtība un standartnovirze uztvertajam signālam “1” (“0”). Atbilstoši $Q = 6$ (15.56 dB) BER vērtība ir $\sim 10^{-9}$, un $Q = 7$ (16.94 dB) – $\sim 10^{-12}$ [43].



3.23. att. Efektīvākās kompleksās pārvades funkcijas noskaidrošanas simulācijas shēma, raidītāju un uztvērēju konfigurācijas pie dažādiem modulācijas formātiem [126]

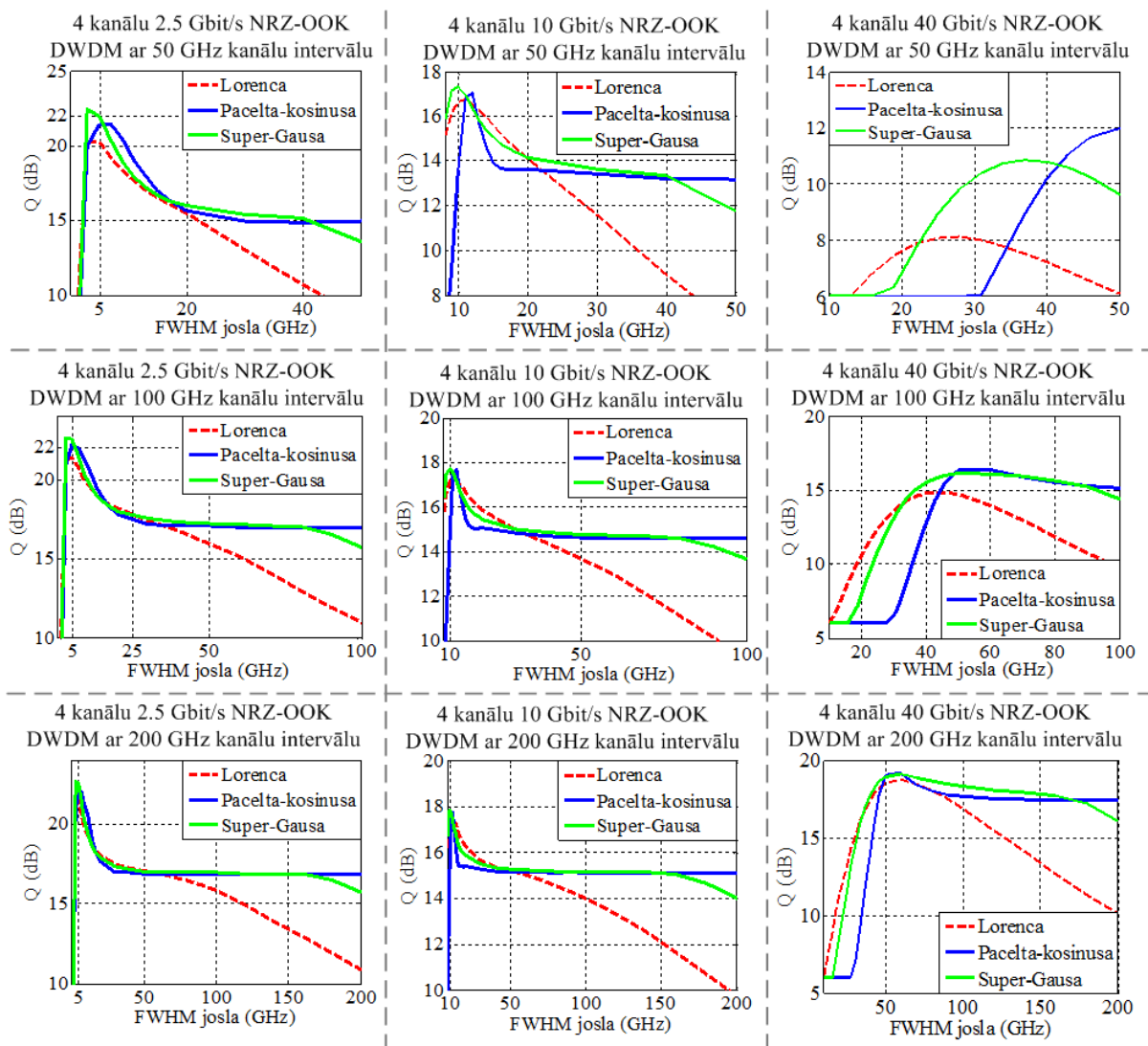
Pētījumā izmantotajā simulācijas shēmā ir četri kanāli, lai varētu novērot visu NOE ietekmi uz pārraidīto optisko signālu. Raidītāja un uztvērēja uzbūves ir atkarīgas no izmantotā

modulācijas formāta. Kopējie bloki, kuri izmantoti visās simulācijas shēmas variācijās ir elektriskais pseido – gadījuma signāla ģenerators ar $2^{31}-1$ bitu secību, nemainīga starojuma (CW) lāzers, koda formētājs (atkarīgs no modulācijas formāta) un ārējais optiskais modulators (atkarīgs no modulācijas formāta). Elektriskais pseido – gadījuma signāla ģenerators veido informāciju, kura tiek pārraidīta izveidotajā sakaru sistēmā. Tad tiek izmantots koda formētājs, kas veido kodu atkarībā no izvēlēta koda formāta. Tad CW lāzera gaisma tiek modulēta optiskajā modulatorā ar izvēlēto kodēto elektrisko signālu. Pēc tam optiskais signāls tiek pārraidīts pa SSMF. Amplitūdas modulācijas signāli tika uztverti ar tiešās detektēšanas uztvērēju (kvadrātisko detektoru), kurš sastāv no PIN fotodiodes un elektriskā zemfrekvenču filtra (ELPF), savukārt, fāzes modulācijas signāli tika uztverti koherentā līdzsvarotā uztvērējā (sinhronā detektorā), kurš sastāv no viena bita aiztures MZI un divām PIN fotodiodēm. Šādā gadījumā tika iegūta labāka uztvērēja jutība, kas ir arī viena no DPSK priekšrocībām, salīdzinājumā ar intensitātes modulācijas formātiem. Tomēr, jāņem vērā fakts, ka šāds uztvērējs ir samērā komplicēts un dažos gadījumos nepieciešami vienkāršāki risinājumi, kuru realizācija parādītā 3.3.2. apakšpunktā [151, 155, 158].

3.3.2. Skaitliska pārbaude optiski blīvētās sistēmās

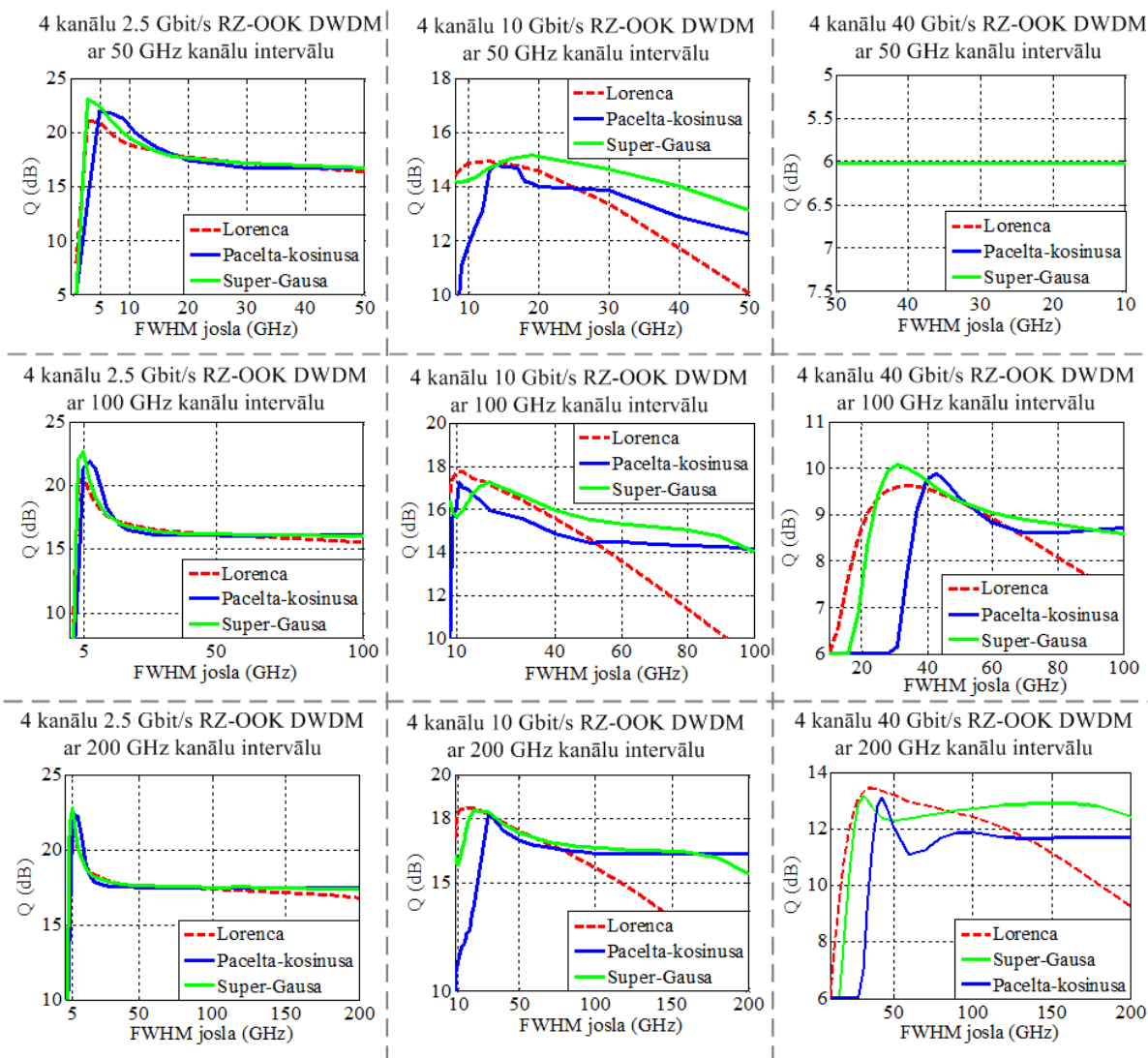
Pētījumā noskaidrotas sakarības starp Q faktoru un viļņa garuma filtru FWHM joslu. Apskatīti trīs dažādi viļņa garuma filtri: Lorenca, Pacelta-kosinusa un Super-Gausa, četru kanālu 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmā ar 50/100/200 GHz kanālu intervālu pie dažādiem modulācijas formātiem: NRZ-OOK, RZ-OOK, Duobinary un NRZ-DPSK. Pētījuma galvenais mērķis - noskaidrot efektīvākās FWHM joslas, pie kurām Q faktors sasniedz maksimumu. Noteicošais parametrs simulācijās bija datu pārraides attālums, kurš katra modulācijas formāta un pārraides ātruma gadījumā atšķiras, tomēr, tas tika saglabāts konstants pie visiem intervāliem starp kanāliem. Šāda pārraides attāluma izvēle skaidrojama ar pieaugošo hromatiskās dispersijas un NOE ietekmi uz pārraidīto signālu, palielinoties pārraides ātrumam.

Q faktora atkarība no FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-OOK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem parādīta 3.24. attēlā. Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, tad kanālu intervālu samazināšana noved pie samazināta Q faktora vērtības pie visām FWHM joslas vērtībām dažādiem viļņa garuma filtriem. Tas skaidrojams ar NOE ietekmes palielināšanos, kā rezultātā pārraidītā signāla kvalitāte samazinās.



3.24. att. Q faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-OOK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem

Palielinoties datu pārraides ātrumam FWHM josla palielinās, kas ir skaidrojams ar platāko jaudas spektru šaurāku impulsu gadījumā. Labākie rezultāti iegūti Super-Gausa un Pachelta-kosinusa filtru gadījumos. Apskatot labāko gadījumu, tad piemērotākās FWHM joslas dažādiem iepriekš minētajiem viļņa garuma filtriem pie 2.5/10/40 Gbit/s ir attiecīgi 5 GHz, 10 GHz un 50 GHz. Kā redzams, tad 50 GHz intervāls starp kanāliem nav piemērots 40 Gbit/s DWDM sistēmai, jo šķērsrunas un jaudas spektru pārklāšanās ietekme starp blakus kanāliem noved pie pārraidītā signāla kvalitātes degradēšanās (Q faktors ir zemāks par 15.7 dB jeb $BER > 10^{-9}$).

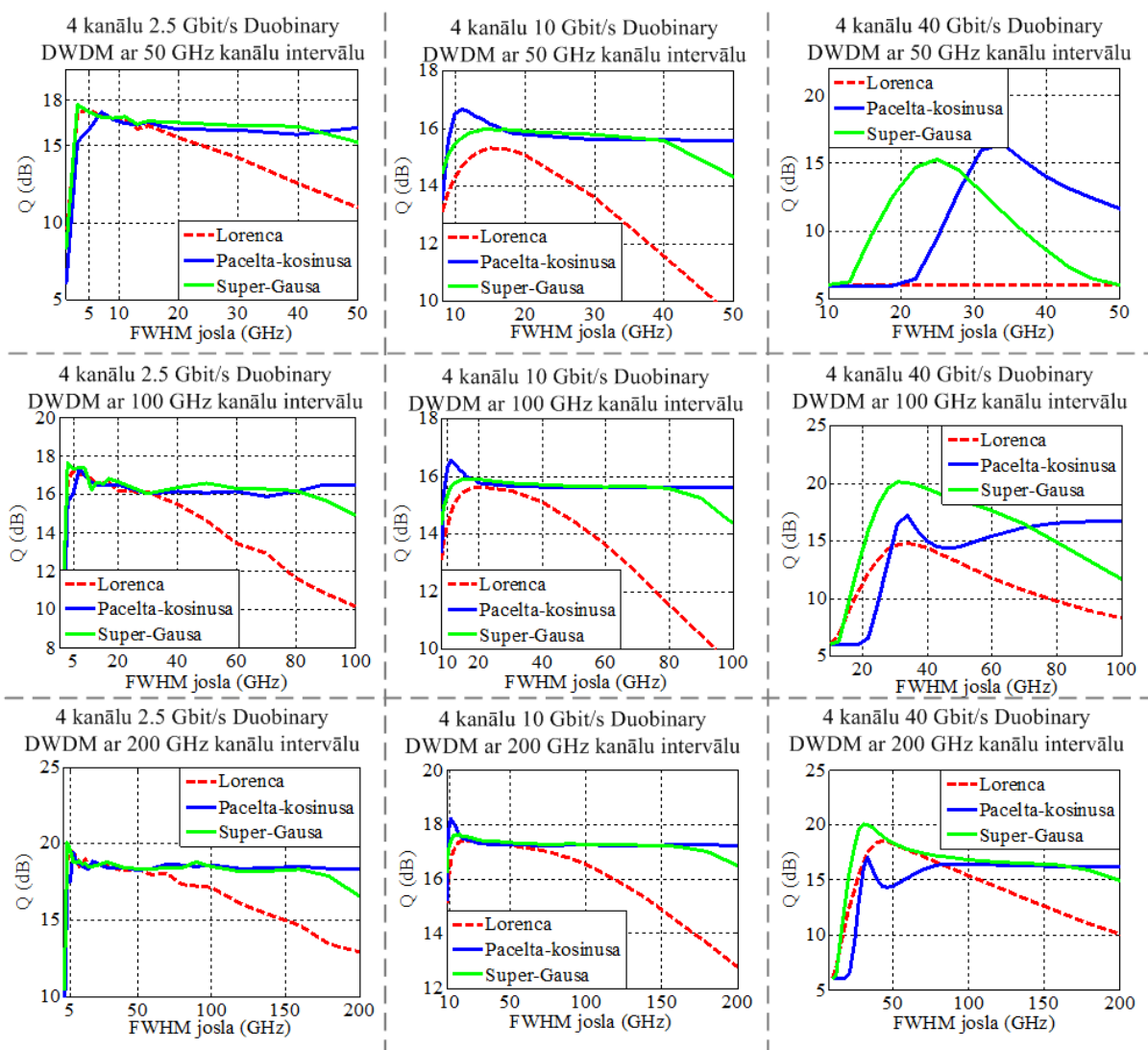


3.25. att. Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu RZ-OOK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem

Savukārt, Q faktora atkarība no FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-OOK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem parādīta 3.25. attēlā. Kā tas bija gaidāms, tad intervāla starp kanāliem samazināšana un datu pārraides ātruma palielināšana ir ar līdzīgām sakarībām kā iepriekšējā gadījumā. Visu trīs viļņa garuma filtru gadījumā pie 5-6 GHz un 10-20 GHz FWHM joslām attiecīgi pie 2.5 Gbit/s un 10 Gbit/s pārraides ātruma, savukārt, pie 40 Gbit/s pārraides ātruma nav iespējams realizēt sekmīgu datu pārraidi, kas saistīts ar lielāku dispersijas iespaidu.

3.26. attēlā ir parādīta Q faktora atkarība no FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu Duobinary 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem. Kā redzams no rezultātiem, tad labāko rezultātu uzrāda Super-Gausa

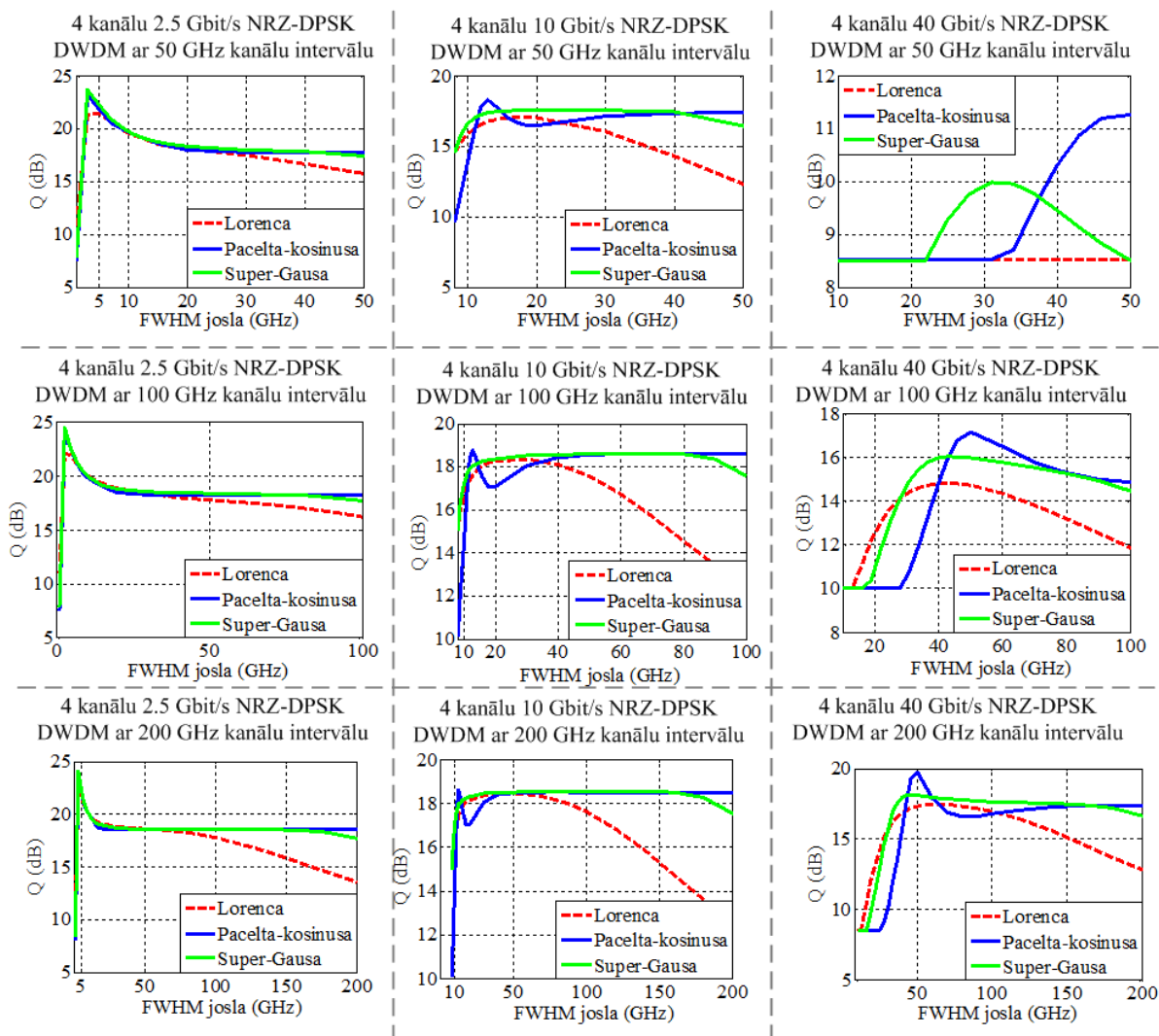
un Pacelta-kosinusa filtri. Pacelta-kosinusa filtra gadījumā labāka signāla kvalitāte ir novērojama pie mazāka pārraides ātruma, kas saistīts ar salīdzinoši lielāko ienesto grupas aizturi nekā Super-Gausa filtra gadījumā. Šī modulācijas formāta gadījumā iespējams realizēt 40 Gbit/s DWDM sistēmu ar 50 GHz kanālu intervālu, kas ir saistīts ar kompakto jaudas spektru (skat. 3.22.attēlu).



3.26. att. Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu Duobinary 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem

Q faktora atkarība no FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-DPSK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem parādīta 3.27. attēlā. Šī modulācijas formāta gadījumā tika iegūti vislielākie pārraides attālumi bez dispersijas kompensācijas un pastiprināšanas tehnikām, kas norāda uz NRZ-DPSK

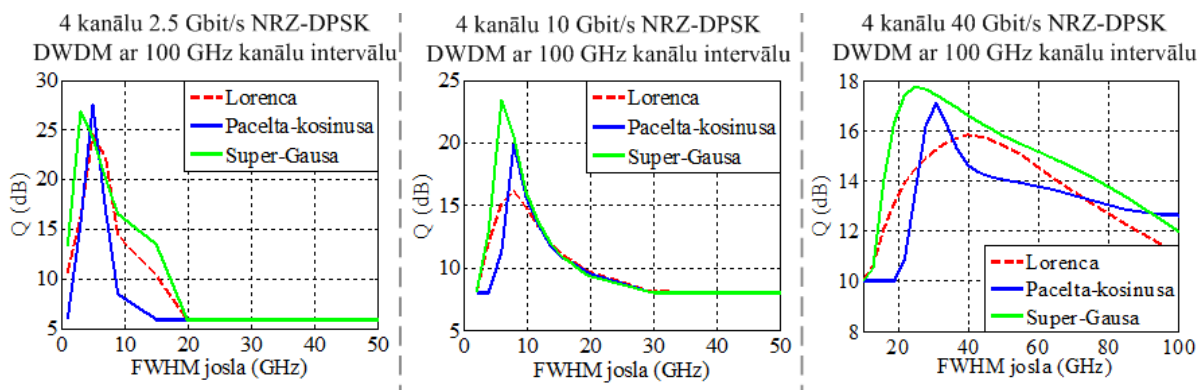
priekšrocībām, salīdzinot ar citiem modulācijas formātiem. Savukārt, galvenais trūkums šim modulācijas formātam ir plašais jaudas spektrs, kas padara neiespējamu 40 Gbit/s DWDM sistēmas izveidi ar 50 GHz kanālu intervālu.



3.27. att. Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-DPSK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem realizēts ar sinhrono detektoru.

Šajā gadījumā Pacelta-kosinusa filtrs uzrādīja labāko rezultātu, jo tā amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija ir vistuvākā ideāla OBPF amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijai. Atšķirībā no iepriekšējiem rezultātiem ir izmantota sarežģītāka uztvērēja uzbūve, kas saistīts ar modulācijas formāta realizāciju, jo visa informācija ir ierakstīta signāla fāzē. Kā zināms, tad ne vienmēr iespējams izveidot sarežģītākās uzbūves uztvērēju. Tāpēc darbā tiek piedāvāta

metode, ar kuras palīdzību, izmantojot šaurjoslas filtrēšanu (Pacelta-kosinusa filtru) un kvadrātisko detektoru, ir iespējams uztvert NRZ-DPSK modulācijas formātu.

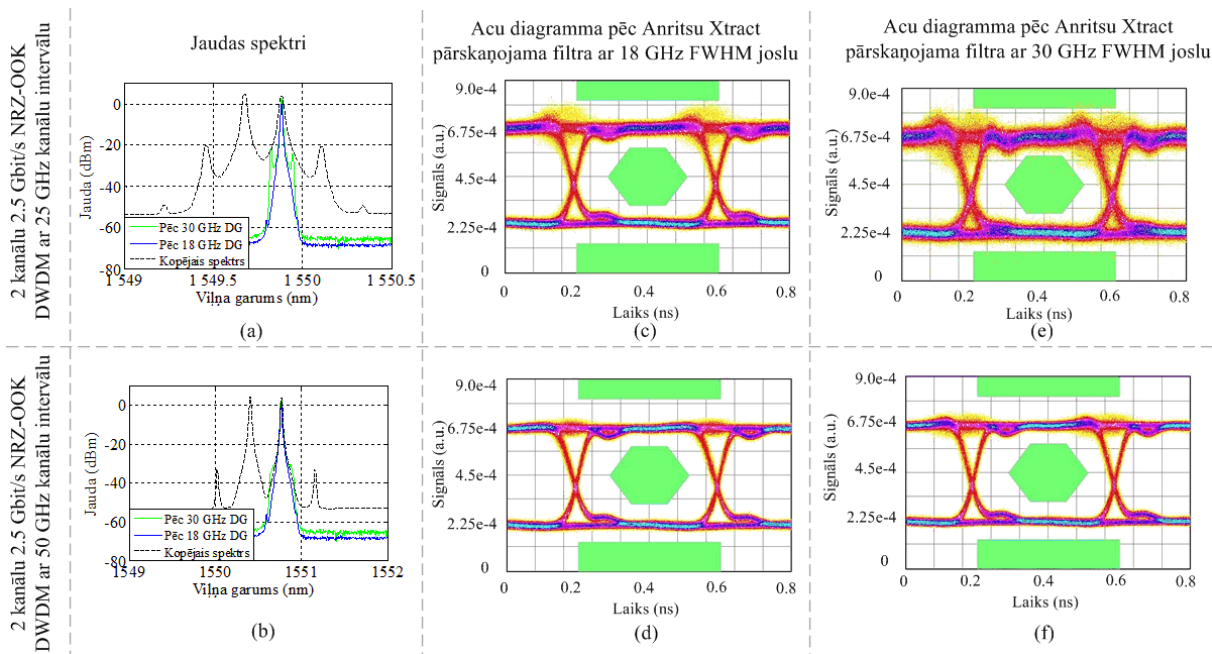


3.28. att. Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-DPSK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 100 GHz intervālu starp kanāliem, kura realizēta ar kvadrātisko detektoru

Iegūtie rezultāti redzami 3.28. attēlā, kurā atspoguļots Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-DPSK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 100 GHz intervālu starp kanāliem, kura realizēta ar kvadrātisko detektoru. Notiek modulācijas formāta pārveide no fāzes uz intensitātes, samazinot viļņa garuma filtra FWHM joslas vērtību [33, 82, 158]. NRZ-DPSK demodulācija varētu būt par iemeslu FWHM joslas vērtībām sinhronā detektora gadījumā, jo strauji pasliktinās signāla kvalitāte pēc 30 GHz FWHM joslas vērtības (Super-Gausa filtra gadījumā 3.27. att.) [107]. Savukārt, 3.28. attēlā parādītā tendence ir pretēja. Vislabākā signāla kvalitāte 40 Gbit/s DWDM sistēmā ar 100 GHz intervālu starp kanāliem ir pie 24 GHz FWHM joslas Super-Gausa filtram kvadrātiskā detektora gadījumā [18]. Līdzīgus rezultātus ir ieguvuši arī citu pētījumu autori (arī eksperimentāli), kuri izmantojuši gan Super-Gausa, gan Lorentza filtrus [33, 82, 158]. Super-Gausa filtra gadījumā datu pārraides ātrums ir jāpāreizina ar koeficientu 0.6, lai iegūtu atbilstošo FWHM joslu DPSK signāla demodulācijai. Šī pētījuma galvenā pienestā vērtībā ir NRZ-DPSK demodulācija ar Pacelta-kosinusa filtru un pēc tam veiksmīga detektēšana ar kvadrātisko detektoru.

Lai pārlicinātos par iegūto rezultātu patiesumu, tika veikti papildus eksperimenti NRZ-OOK modulācijas formāta gadījumā. Papildus izveidota eksperimentāla divu kanālu 2.5/10 Gbit/s mērījumu shēma (3.11. attēlā redzamā shēma ir papildināta ar EDFA

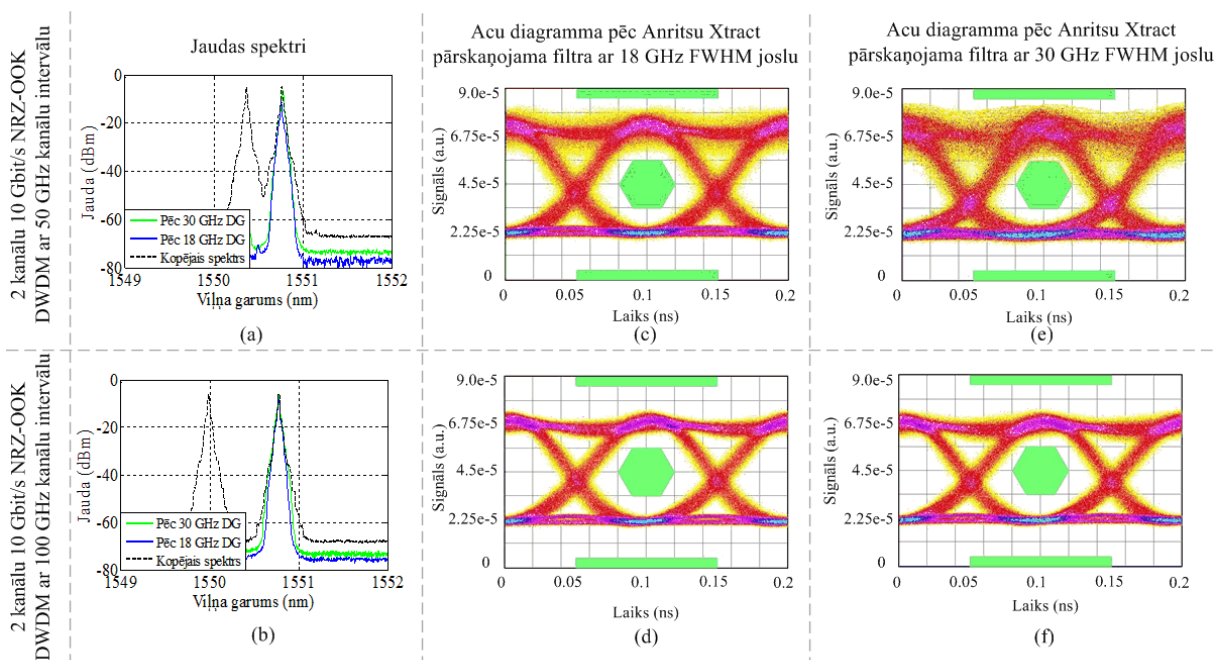
pastiprinātāju ar 16 dBm un 10 dBm izejas jaudu) ar maināmu intervālu starp kanāliem un pārskāņojamu viļņa garuma filtru.



3.29. att. Eksperimentālās 2.5 Gbit/s DWDM sistēmas jaudas spektri (a, b) sliktākā kanāla acu diagrammas (c-f) un pēc Anritsu „Xtract” ar 18 GHz un 30 GHz FWHM joslu pie dažādiem kanālu intervāliem

Pētījumā tika izmantots Anritsu „Xtract” DG viļņa garuma filtrs, kuram ir iespēja izmainīt FWHM joslu robežās no 18 GHz līdz 87.5 GHz. Tā amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija redzama 2.11. attēlā. Izmantotas divas FWHM vērtības 18 GHz un 30 GHz, lai pārlicinātos par iespēju uzlabot uztvertā signāla kvalitāti, samazinot FWHM joslu, kā rezultātā samazinās trokšņu līmenis uztvērējā. Augstāks pārraides ātrums netika izmantots, kas saistīts ar pārāk lielajām iekārtu izmaksām eksperimentālās shēmas uzlabošanai.

3.29. attēlā parādītas izveidotās eksperimentālās 2.5 Gbit/s DWDM sistēmas jaudas spektri (a, b) sliktākā kanāla acu diagrammas (c-f) un pēc Anritsu „Xtract” ar 18 GHz un 30 GHz FWHM joslu pie 25 GHz un 50 GHz kanālu intervāliem. Attēla augšējā līnijā parādīti rezultāti, kuri ir iegūti 25 GHz kanāla intervāla gadījumā. Kā redzams, tad samazinot FWHM joslu acu diagrammā ir iespējams samazināt ASE troksni un uzlabot signāla kvalitāti (palielināt Q faktora vērtību). Salīdzinot dažādu kanālu intervālu gadījumā iegūtos rezultātus secinām, ka starpkanālu šķērsruna un NOE samazinās pie lielāka kanālu intervāla, kas apstiprina iegūto rezultātu sakritību ar skaitliskiem aprēķiniem.



3.30. att. Eksperimentālās 10 Gbit/s DWDM sistēmas jaudas spektri (a, b) sliktākā kanāla acu diagrammas (c-f) un pēc Anritsu „Xtract” ar 18 GHz un 30 GHz FWHM joslu pie dažādiem kanālu intervāliem

Palielinot datu pārraides ātrumu uz 10 Gbit/s tika samazināta pastiprinātāja jauda un palielinātas kanālu intervālu vērtības, lai samazinātu NOE ietekmi un realizētu atbilstošu datu pārraidi. 3.30. attēlā parādītas izveidotās eksperimentālās 10 Gbit/s DWDM sistēmas jaudas spektri (a, b) sliktākā kanāla acu diagrammas (c-f) un pēc Anritsu „Xtract” ar 18 GHz un 30 GHz FWHM joslu pie 50 GHz un 100 GHz kanālu intervāliem. Līdzīgi kā iepriekšējos rezultātos, arī šeit novērojamas atbilstošas sakarības, kas apstiprina iegūto teorētisko rezultātu atbilstību.

3.4. Kopsavilkums

Darba 3. nodaļā lielāka uzmanība pievērsta viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju piemērotības un pielietojumu ierobežojumu novērtēšanai. Izveidota metode viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas pārbaudei, kas patentēta Latvijā [110] (skat. pieliecību 2. pielikumā). Ar tās palīdzību noskaidrots, ka FBG filtru gadījumā efektīvā caurlaides josla samazinās uz pusi no 50 GHz 2.5 Gbit/s NRZ-OOK gadījumā uz 25GHz pie 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK gadījumā, kas saistīts ar lielu ienestās dispersijas vērtību -20 dB joslā: no -514 ps/nm līdz 390 ps/nm [104, 106]. Savukārt, 100 GHz un 200 GHz TFF iekārtām efektīvās

caurlaides joslas attiecīgi ir 75 GHz un 175GHz, kā arī tā ir nemainīga pie 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma, kas ir skaidrojams ar samērā mazu ienestās dispersijas lielumu [105]. Izstrādāta mērījumu shēma WDM sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanai [13]. 200 GHz TFF iekārtas gadījumā 2.5 Gbit/s NRZ-OOK WDM sistēmas spektrālā tika palielināta no 0.05 bit/s/Hz līdz 0.1 bit/s/Hz un pie 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma no 0.0125 bit/s/Hz līdz 0.025 bit/s/Hz. Apskatīti gan praksē pielietotie viļņa garuma filtri, kuru parametri un veiktspēja DWDM sistēmās novērtēta ar jaunām un Latvijā patentētām mērījumu shēmām [60, 99, 101, 109, 116], gan izstrādāti vispārīgāki ieteikumi komplekso pārvades funkciju izvēlei dažādu modulācijas formātu gadījumā. Noskaidrota efektīvākā viļņa garuma filtra kompleksā pārvades funkcija optiskā signāla atdalīšanai blīvās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Labāko signāla kvalitāti iespējams iegūt ar Super-Gausa un Pacelta-kosinusa filtriem. Pacelta-kosinusa filtra gadījumā labāka signāla kvalitāte ir novērojama pie mazāka pārraides ātruma, kas saistīts ar lielāko ienesto grupas aizturi nekā Super-Gausa filtra gadījumā [107, 112, 113]. Parādīts, ka ar Pacelta-kosinusa filtru arī ir iespējama DPSK signāla demodulācija. Šāds pētījums citu zināmu autoru pētījumos nav konstatēts. Parādīts, ka ar Pacelta-kosinusa filtru arī ir iespējams veikt fāzes modulācijas formāta pārveidi uz intensitātes modulācijas formātu un uztvert kvadrātiskajā detektorā. Citu autoru aprakstītajos pētījumos fāzes modulācijas formāta pārveide uz intensitātes modulācijas formātu veikta ar Lorenca un Super-Gausa filtriem. Šāds risinājums, salīdzinājumā ar Super-Gausa un Lorenca filtriem, ir ar labāku noturību pret kaskādes slēguma radīto caurlaides joslas samazināšanos. 40 Gbit/s NRZ-DPSK optiskā signāla gadījumā Pacelta-kosinusa filtra FWHM caurlaides joslas vērtībai ir jābūt robežās no 30 GHz līdz 40 GHz [107].

4. MRR REALIZĀCIJA PILNĪGI OPTISKĀS SISTĒMĀS

Darba 4. nodaļā apskatīts jauna veida viļņa garuma filtrs: mikroriņķa rezonators, kas netiek pielietots komerciālās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Pētījumi veikti doktorantūras prakses laikā Dānijas Tehniskajā universitātē, sadarbojoties ar Fotonikas institūta un Wuhan Nacionālās Optoelektronikas laboratorijas zinātniekiem profesora Christophe Peucheret vadībā, elektriskās laikdales blīvēšanas (ETDM) laboratorijā (skat. rekomendāciju 4. pielikumā). Vairāki pētījumi veikti ar MRR filtriem un to matemātiskais apraksts ir labi zināms [122]. Savukārt, praksē pielietotās sakaru sistēmas ir jāpilnveido, kas saistīts ar pieaugošo patērētāju datu apjomu. Pēc Cisco pētījumu prognozēm kopējais patērētāju datu apjoms pieaugs par 32% katru gadu un 2016. gadā sasniegs 82 560 Petabaiti (PB) mēnesī [27].

3.tabula

Patērētāju interneta datu apjoms [27]

| Gadi | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PB mēnesī | 20 523 | 29 974 | 37 660 | 48 488 | 63 204 | 82 560 |

Aplūkojot 3. tabulu, skaidri redzams, ka patērētāju datu apjomi mēnesī pieaug un ir nepieciešams meklēt jaunus risinājumus optisko pārraides sistēmu pilnveidošanai. Šajā nodaļā lielāka uzmanība veltīta mikroriņķa rezonatoru ierobežojumu un pielietojuma iespēju novērtējumam augsta ātruma optiskajās sakaru sistēmās, kā arī piedāvāts jauns risinājums vienlaicīgai amplitūdas modulācijas un fāzes modulācijas RZ signālu pārveidei uz NRZ signāliem ar vienu mikroriņķa rezonatoru.

4.1. Mikroriņķa rezonatoru matemātisks apraksts un klasifikācija

MRR filtru darbības princips ir līdzīgs FPI. Tas nozīmē, ka kompleksā pārvades funkcija MRR nomestajam portam ir ar Lorenca filtra formu. Atšķirība ir atstarotā optiskā signāla apstrādē, jo ar FPI to nav iespējams praktiski veikt. Nepilnība ir novērsta MRR filtros, jo (skat. 1.12. attēlu) ir iespējams nodalīt šos optiskos signālus katru uz savu portu, attiecīgi nomesto un izejas.

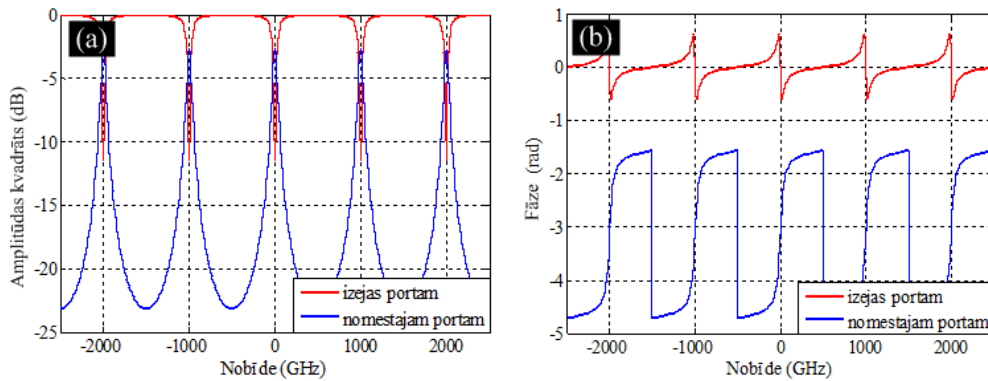
Lai iegūtu precīzu MRR viļņa garuma filtra matemātisko aprakstu, tad tika izmantotas matemātiskas izteiksmes, kurās ņemtas vērā arī materiāla īpašības. Lielāka uzmanība pievērsta viena riņķa MRR filtra arhitektūrai, kas skaidrojams ar tā uzbūves un

izstrādes vienkāršību. Tomēr, viena riņķa MRR viļņa garuma filtru izmantošanā ir jāņem vērā FWHM joslas sašaurināšanās, kad šie filtri tiek saslēgti kaskādē. Kā pirmo apskatīsim viena riņķa MRR, kura kompleksās pārvades funkcijas izejas portam un nomestajam portam ir attiecīgi parādītas zemāk (iegūtas no [122]):

$$E_{izejas} = \frac{t_1 - t_2 \cdot \alpha \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot i \cdot \left(\frac{f-f_0}{FSR}\right)}}{1 - t_1 \cdot t_2 \cdot \alpha \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot i \cdot \left(\frac{f-f_0}{FSR}\right)}} \quad (4.1)$$

$$E_{nomestais} = \frac{-k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot e^{-\pi \cdot i \cdot \left(\frac{f-f_0}{FSR}\right)}}{1 - t_1 \cdot t_2 \cdot \alpha \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot i \cdot \left(\frac{f-f_0}{FSR}\right)}} \quad (4.2)$$

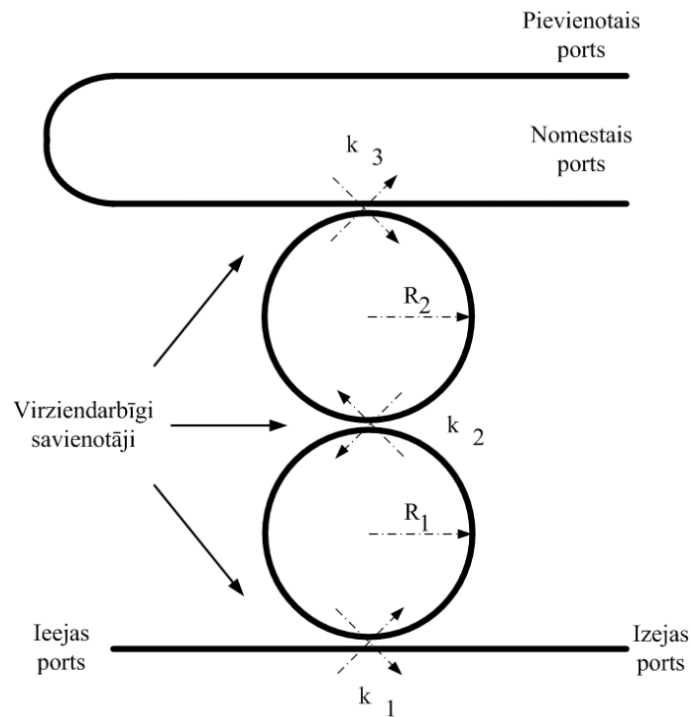
kur $k_{1,2}$ - elektromagnētiskā lauka saites koeficients un apraksta virziendarbīgos savienotājus (skat.1.12.attēlā), $t_{1,2} = 1 - k_{1,2}$ - izmantots pieraksta saīsināšanai, α - elektromagnētiskā lauka zudumu koeficients vienam riņķim, f_0 - MRR filtra centrālā frekvence, $FSR = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n_{eff}}$ - brīvā spektrālā josla, jeb attālums starp divām centrālajām frekvencēm kompleksai pārvades funkcijai. Kompleksā pārvades funkcija šiem filtriem ir periodiska, c - gaismas ātrums vakuumā, R - MRR rādiuss un n_{eff} - efektīvais laušanas koeficients [122, 138].



4.1. att. MRR filtra (a) amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija un (b) fāzes pārvades funkcija izejas portam un nomestajam portam ($FSR = 1000$ GHz, $k_{1,2} = 0.36$ un $\alpha = 0.95$)

Kā redzams no 4.1. attēla, tad nomestajam portam ir Lorenca filtra forma, savukārt, izejas portam ir iegriezuma filtra forma. Šīs pārvades funkcijas iegūtas ar Matlab aprēķinu programmu. Turpmākā nodaļas izklāstā nomestā porta un izejas porta pārvades funkciju

pielietojuma ierobežojumi un iespējas apskatītas atsevišķi. Sākumā apskatīti nomestā porta kompleksās pārvades funkcijas pielietojuma ierobežojumi. Apskatīsim arī sarežģītāku MRR uzbūvi, kurā izvietoti divi riņķi kā iespējamais risinājums ierobežojumiem, kuri rodas saslēdzot kaskādē viena riņķa MRR filtrus. 4.2. attēlā parādīta divu riņķu MRR struktūra.



4.2.att. Strukturāls divu riņķu MRR filtra modelis [122]

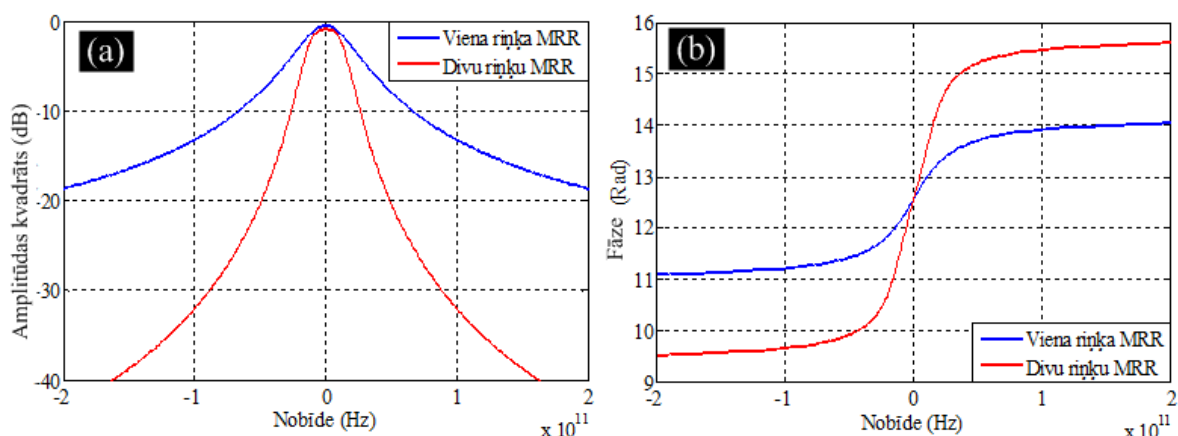
Divu riņķu MRR filtra struktūrā starp taisnajiem viļņvadiem izvietots papildus riņķis un parādās saites koeficients starp abiem riņķiem. Rezultātā, izmainās arī matemātiskās izteiksmes, ar kurām tiek aprakstīts divu riņķu MRR viļņa garuma filtrs.

$$E_{izejas} = \frac{-t_1 \cdot k_1^2 \alpha_1 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_1} \right)} \cdot \left(t_3 \cdot \alpha_2 e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_2} \right)} - t_2 \right)}{1 - t_3 \cdot t_2 \cdot \alpha_2 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_2} \right)} - t_2 \cdot t_1 \cdot \alpha_1 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_1} \right)} - t_3 \cdot t_1 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_1} \right)} \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_2} \right)}} \quad (4.3)$$

$$E_{nomestais} = \frac{-k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot e^{\pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_1} \right)} \cdot e^{\pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_2} \right)}}{1 - t_3 \cdot t_2 \cdot \alpha_2 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_2} \right)} - t_2 \cdot t_1 \cdot \alpha_1 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_1} \right)} - t_3 \cdot t_1 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_1} \right)} \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR_2} \right)}} \quad (4.4)$$

kur $k_{1,2,3}$ - elektromagnētiskā lauka saites koeficients un apraksta virziendarbīgos savienotājus (skat.1.12.attēlā), $t_{1,2,3} = 1 - k_{1,2,3}$ - izmantots pieraksta saīsināšanai, $\alpha_{1,2}$ -

elektromagnētiskā lauka zudumu koeficients katram riņķim, f_0 - MRR filtra centrālā frekvence, $FSR_{1,2} = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot R_{1,2} \cdot n_{eff}}$ - brīvā spektrālā josla, jeb attālums starp divām centrālajām frekvencēm kompleksai pārvades funkcijai. Kompleksā pārvades funkcija šiem filtriem ir periodiska, c - gaismas ātrums vakuumā, $R_{1,2}$ - MRR rādiuss un n_{eff} - efektīvais laušanas koeficients [122].



4.3. att. MRR filtra (a) amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija un (b) fāzes pārvades funkcija viena riņķa struktūrai ($FSR = 1000$ GHz, $k_{1,2}=0.36$ un $\alpha =0.95$) un divu riņķu struktūrai ($FSR = 1000$ GHz, $k_{1,3}=0.36$, $k_2=0,0695$ un $\alpha_{1,2}=0.95$)

Kā redzams no 4.3. attēla, tad palielinot MRR struktūrā riņķa skaitu ATF funkcijai pieaug blakus kanālu izolācijas vērtība un virsma izlīdzinās, tuvinoties plakanas virsmas filtriem. Kā arī PTF viena riņķa MRR gadījumā ir lēzenāka. Apakšpunktā 4.2. noskaidrots, kāda ir viena riņķa MRR nomestā porta ATF ietekme uz optisko signālu, ja tie tiek saslēgti kaskādē.

4.2. Kaskādē saslēgšanas iespējas novērtējums 40 Gbit/s optiskās sistēmās

Pētījums tika veikts, lai noskaidrotu optiskā signāla degradācijas pakāpi, izplatoties caur vairākiem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem. Pētījumā izmantotas gan aprēķinu metodes, gan eksperimentālās metodes.

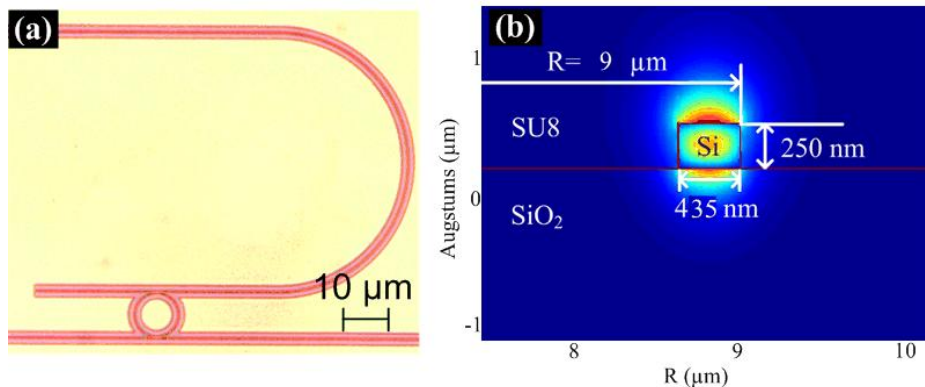
No silīcija veidoti MRR filtri piemēroti viļņa garuma filtru un optisko komutatoru izveidei [14]. Viens no primārajiem pielietojumiem ir OADM viļņgarumdales blīvēšanas

sistēmās, izmantojot MRR struktūru, kura parādīta 1.12. attēlā. Turklāt, pateicoties to kompaktajam izmēram, integrēšanas iespējām un saderībai ar standarta mikroelektronikas ražošanas procesiem, tie ir būtiski pamatarhitektūras bloki nākotnes optisko starpsavienotāju arhitektūrām [131], kas tikai nesen izpelnījušies pastiprinātu pētniecisko interesi. Lai gan šīs iekārtas paredzētas augsta ātruma tīklu starpsavienojumu izveidei, tomēr, līdz šim ļoti neliela daļa pētījumu veikta par MRR filtru ietekmi uz augsta ātruma optiski modulētiem signāliem. Viens no pirmajiem pētījumiem ir veltīts viena vai divu riņķu MRR filtra ietekmes novērtējumam uz 10 Gbit/s NRZ-OOK [76, 87]. Ļoti nesen tika demonstrēta 10 Gbit/s DPSK signālu pārraide caur MRR iekārtu [152]. Šajā pētījumā apskatīts divu riņķu MRR, jo tam ir platāka un plakanāka caurlaides josla, kas samazina iespēju, ka notiek fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveide, kā tas tika demonstrēts 3.28. attēlā. Veikti BER koeficienta mērījumi 10 Gbit/s NRZ-OOK modulācijas formātam pēc izplatīšanās caur vairāku riņķu MRR [36]. Tomēr, uz MRR balstītām optisko starpsavienotāju arhitektūrām vai OADM iekārtām noteikti jāpārbauda kaskādē saslēgšanas ietekme uz augstu datu pārraides ātrumu, kas līdz šim zināmā pasaulē nav paveikts. Darba apakšpunktā eksperimentāli novērtēta kaskādē saslēgta MRR filtra nomestā porta kompleksās pārvades funkcijas ietekme uz 40 Gbit/s nomāktas nesējfrekvences RZ (CSRZ)-OOK un CSRZ-DPSK [28, 119]. Lai veiktu šo pētījumu, tad tika izveidots recirkulācijas cilpas mērījumu makets, kas apskatīts 4.2.2. apakšpunktā.

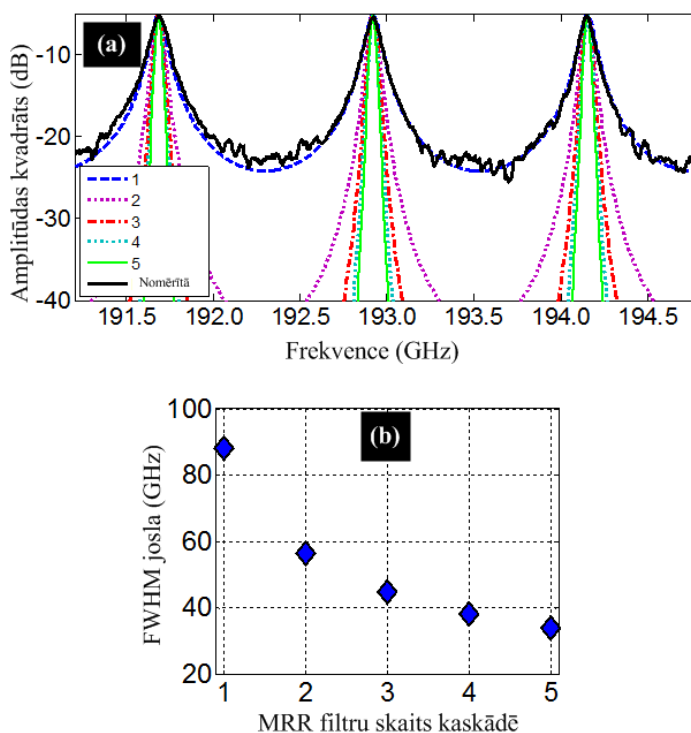
4.2.1. Izgatavotā MRR viļņa garuma filtra parametri

Silīcija MRR filtrs, kurš izmantots recirkulācijas cilpas ekperimetā parādīts 4.4.a. attēlā. Tas izveidots uz silīcijs uz izolatora (angļu val. silicon on insulator (SOI)) plāksnītes, kur silīcija biezums sasniedz 250 nm un tas ir izvietots uz 3 μm bieza silīcija dioksīda slāņa. Detalizēts iekārtas izgatavošanas procesa apraksts atrodams atsaucē [32]. Izveidota MRR filtra rādiuss ir 9 μm, atstarpe starp taisno viļņvadu un riņķa viļņvadu ir 80 nm, kā arī 435 nm viļņvada platums (skat. 4.4.b. attēlu). Visi MRR viļņa garuma filtra ieejas un izejas viļņvadi izveidoti apgriezti konusveida un pārklāti ar polimēru. Kā rezultātā, izveidojās nano-savienotājs, kas nodrošināja samērā mazus ienestos zudumus savienojumiem ar konusveida optisko šķiedru [32]. 4.5.a. attēlā parādīta viena riņķa MRR filtra nomestā porta pārvades funkcija. Nomērītais FSR ir 1235 GHz un Q_{MRR} faktors ($Q_{MRR} = \frac{f_0}{\Delta f_{FWHM}}$) ir 2192 un tas

atbilst 88 GHz FWHM joslai. Kopējie iekārtas ienestie zudumi ir 5 dB un augstā un zemā līmeņa attiecības (ER) vērtība ir 20 dB.



4.4. att. MRR filtra (a) skats no augšas un (b) taisnā viļņvada skats šķērs griezumā



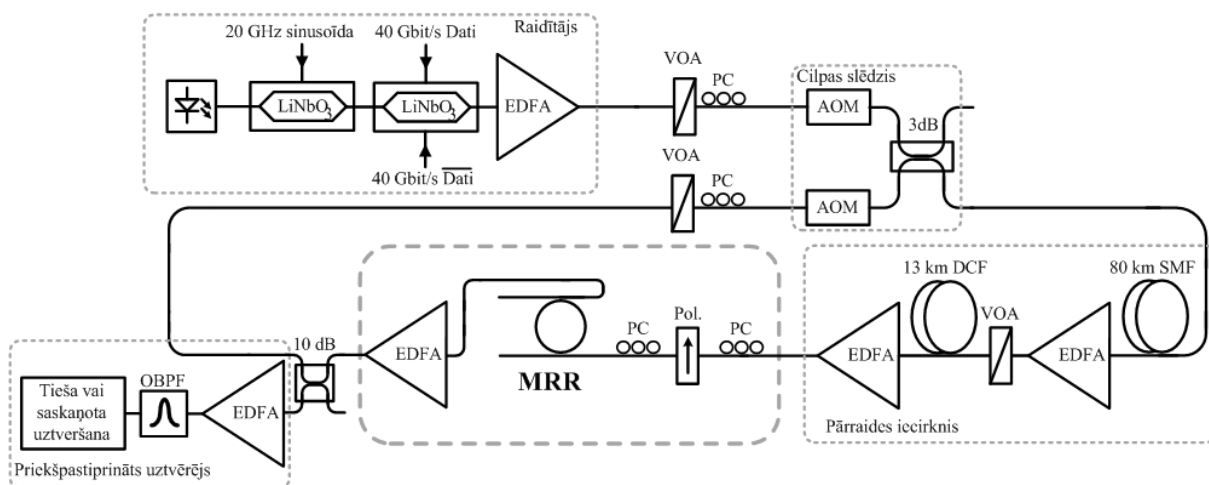
4.5. att. Izveidotā MRR filtra nomestā porta (a) nomērītā ATF, tās aproksimācija un kaskādē saslēgtās aproksimētās, ATF (b) FWHM joslas samazināšanās atkarībā no viena riņķa MRR skaita kaskādē

Savukārt, 4.5.b. attēlā parādīta FWHM joslas samazināšanās, kad viena riņķa MRR filtri saslēgti kaskādē. Kā redzams, tad pēc pieciem kaskādē saslēgtiem viena riņķa MRR filtriem FWHM josla ir 34 GHz, kas vērtējams aptuveni par 60 % mazāk, salīdzinot ar vienu

MRR filtru. Šāds FWHM joslas samazinājums var novest pie būtiskiem pārraidītā signāla kropļojumiem.

4.2.2. Recirkulācijas cilpas mērījumu maketa izveide

MRR filtru kaskādē saslēgšanas eksperimenta veikšanai tika izveidota recirkulācijas cilpas mērījumu shēma, kura redzama 4.6. attēlā. Shēmā izveidotais raidītājs sastāv no diviem LiNbO₃ MZM, kuri paredzēti 40 Gbit/s CSRZ-OOK vai CSRZ-DPSK optisko signālu ģenerēšanai (skat. 4.7. attēlu). Pirmā MZM augstfrekvenču ieejai pieslēgts sinhronizācijas signāls ar divreiz mazāku frekvenci kā datu signāls, savukārt, otrā MZM augstfrekvenču ieejai pieslēgta 40 Gbit/s pseido-gadījuma 2³¹-1 bitu secība. Kā gaismas avots tika izmantots nepārtraukta starojuma lāzers, kurš pēc modulācijas abos MZM tika pastiprināts ar EDFA, lai kompensētu to ienestos zudumus. Pēc raidītāja izvietots pārskāņojams optiskais vājinātājs (VOA) un polarizācijas kontrolieris (PC). Pēc tam signāls tiek padots uz cilpas slēdži. Cilpas slēdzis sastāv no diviem akustiski-optiskiem modulatoriem (AOM) un 3 dB sazaratāja. Katrs no šiem modulatoriem ieslēgts savā sazaratāja zarā un tiem pieslēgts vadības signāls, kurš nodrošina slēdžu ieslēgtu un izslēgtu stāvokli. Pārraides līnija izveidota no 80 km SSMF un 13 km dispersijas kompensējošās šķiedras (DCF), kā arī no diviem EDFA ienestā vājinājuma kompensēšanai. Pārraides līnija izpilda optiskā bufera lomu, lai varētu veikt kaskādē saslēgšanas eksperimentu [28, 74].

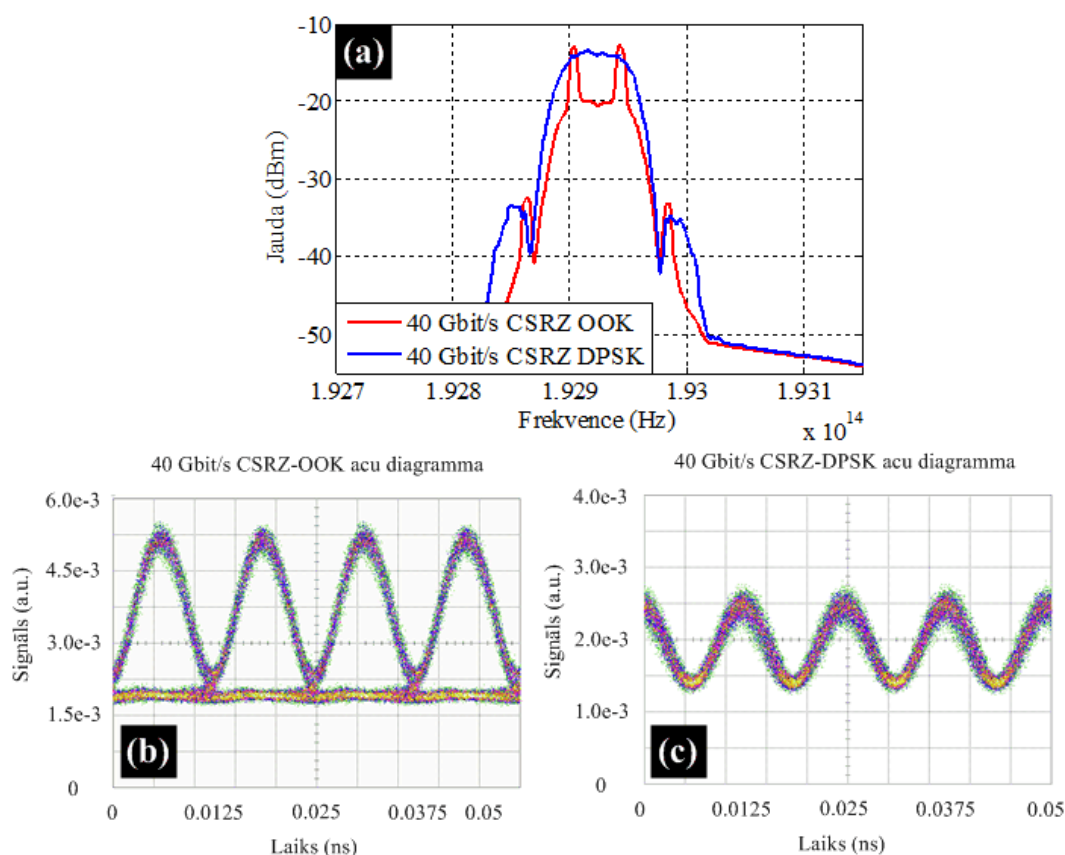


4.6. att. Recirkulācijas cilpas mērījumu shēma MRR novērtēšanai

Pēc pārraides pa līniju optiskais signāls tika ievadīts un izvadīts no MRR filtra ar konusveida (angļu val. tapered) šķiedrām, kas nodrošināja minimālu ienesto vājinājumu. EDFA pēc MRR tika izmantots, lai kompensētu cilpas slēdža un MRR filtra ienesto

vājinājumu. Pēc EDFA tika izvietots 10 dB optiskais sazarotājs, lai veiktu cirkulējošā optiskā signāla uztveršanu. Pieslēdzot cilpas slēdža vadības signālu pie BER mērītāja un pie augstfrekvenču osciloskopa, tika veikti signāla kvalitātes mērījumi pie dažāda optiskā signāla recirkulācijas skaita. Signāls tika uztverts priekšpastiprinātā uztvērējā, kurā izmantota tieša vai arī saskaņota uztveršana. OOK gadījumā izmantota viena 45 GHz PIN fotodiode un DPSK gadījumā 1 bita aiztures MZI, kuram pievienots saskaņotais uztvērējs arī ar 45 GHz joslu. Veicot mērījumus jāņem vērā fakts, ka MRR filtrs ir no polarizācijas atkarīga iekārta. Tas nozīmē, ka katras cilpas beigās jānodrošina, ka optiskā signāla polarizācijas stāvoklis ir tāds pats kā cilpas sākumā. Tāpēc tika izmantots polarizators (Pol), kas ieslēgts starp diviem PC un nodrošināja stabilu optiskā signāla galveno polarizācijas stāvokli recirkulācijas cilpā.

4.2.3. MRR filtra ietekme uz 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK signāliem

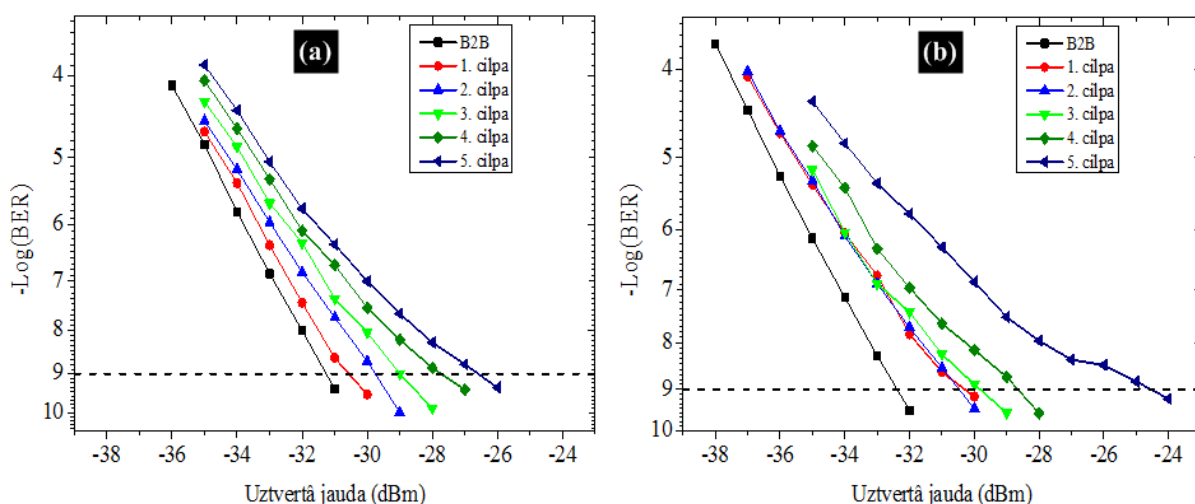


4.7. att. 40 Gbit/s CSRZ-OOK un 40 Gbit/s CSRZ-DPSK (a) jaudas spektri un (b, c) acu diagrammas

4.7. attēlā redzami 40 Gbit/s CSRZ-OOK un 40 Gbit/s CSRZ-DPSK jaudas spektri un acu diagrammas. CSRZ-DPSK gadījumā acs atvērums nav redzams, jo informācija ir iekodēta signāla fāzē, ko tiešā veidā uz augstfrekvenču osciloskopa nav iespējams konstatēt.

Salīdzinot abu modulācijas formātu jaudas spektros redzams, ka CSRZ-DPSK modulācijas formātam jaudas spektrs ir platāks, kas norāda uz to mazāku noturību pret filtrēšanas efektiem (īpaši izteikti pie kaskādē saslēgšanas, kad samazinās filtra FWHM josla).

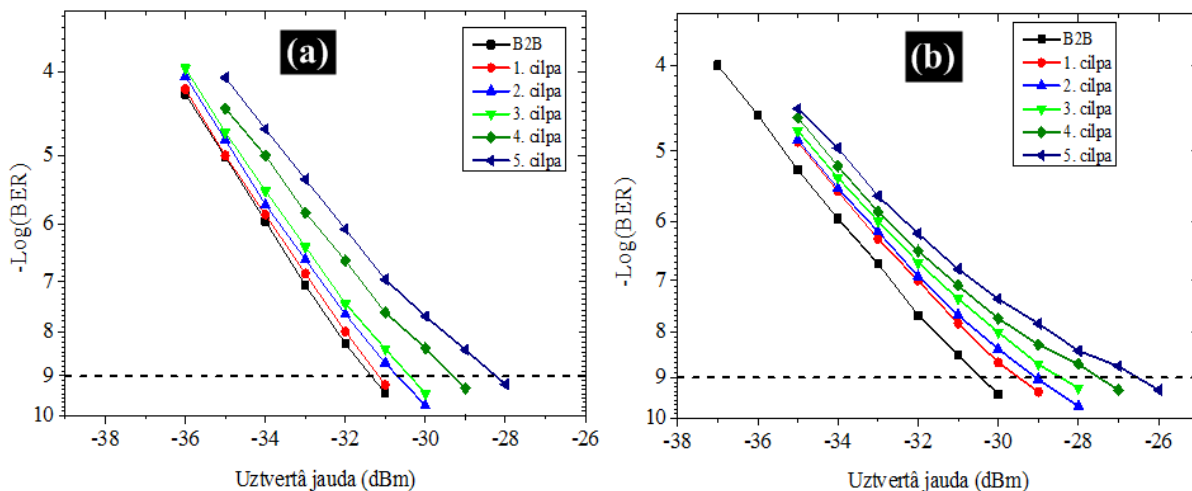
MRR filtra kaskādē saslēgšanas eksperiments tika veikts ar 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK modulācijas formātiem. BER abiem optiskajiem signāliem uztvērējā novērtēts kā primārais parametrs.



4.8. att. BER kā funkcija no uztvertās jaudas pie dažāda recirkulācijas cilpu skaita ar 88 GHz MRR filtru (a) 40 Gbit/s CSRZ-OOK un (b) CSRZ-DPSK optiskajam signālam

BER atkarībā no uztvertās jaudas pie dažāda recirkulācijas cilpu skaita ar 88 GHz MRR filtru 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajam signālam redzams 4.8.attēlā. Pēc iegūtajiem rezultātiem secinām: ar katru recirkulācijas cilpu ir nepieciešams vairāk jaudas uztvērējā $BER=10^{-9}$ līmeņa sasniegšanai. Tas nozīmē, ka derīgā signāla josla samazinās, kas skaidrojams ar MRR filtra FWHM joslas samazināšanos (kā redzams 4.5.b. attēlā), kā rezultātā pieaug starpsimbolu interference un degradējas acu diagramma. No 4.8.b. attēla redzams, ka vairāk tiek degradēts 40 Gbit/s CSRZ-DPSK modulācijas formāts, kas ir skaidrojams ar fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveidi, samazinoties MRR filtra FWHM joslai [136] un sinhronais detektors šajā gadījumā nav piemērots. Lai gan, jāņem vērā fakts, ka 40 Gbit/s pārraides ātrumam dispersijas ietekme un trokšņa uzkrāšanās ir kritiska. Liela daļa no degradācijas varētu būt saistīta ar pārraides vidi. Lai novērstu ietekmi, kas rodas no pārraides vides un novērtētu tikai 88 GHz MRR filtra ietekmi, tika veikti atkārtoti BER mērījumi, MRR filtru aizstājot ar 375 GHz platu TFF ar atbilstošu ienestā vājinājuma lielumu (tika panākts ar VOA). Rezultātā, radās iespēja atsevišķi novērtēt optiskā signāla degradāciju,

kas rodas pārraides vidē. 375 GHz TFF ir pietiekoši plats, lai to saslēdzot piecas reizes kaskādē, tas neatstātu būtisku iespaidu uz pārraidītā optiskā signāla kvalitāti.



4.9. att. BER kā funkcija no uztvertās jaudas pie dažāda recirkulācijas cilpu skaita ar 375 GHz TFF filtru (a) 40 Gbit/s CSRZ-OOK un (b) CSRZ-DPSK optiskajam signālam

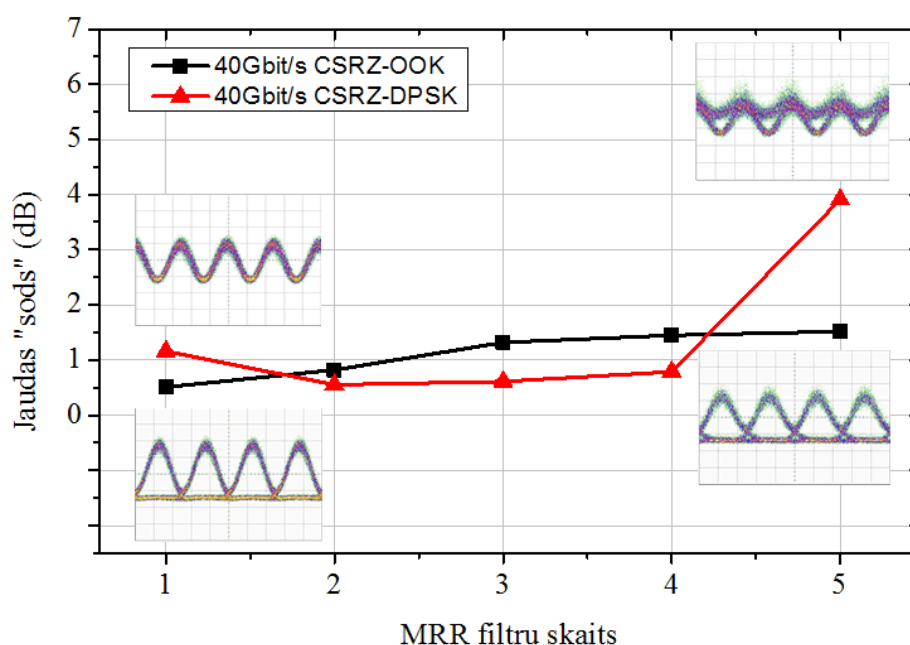
BER atkarībā no uztvertās jaudas pie dažāda recirkulācijas cilpu skaita ar 375 GHz MRR filtru 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajam signālam redzams 4.9.attēlā. No iegūtajiem rezultātiem secinām, ka samērā liela ietekme vērojama uz optiskā signāla kvalitātes parametriem no dispersijas ietekmes un trokšņa uzkrāšanās. Lai novērtētu tikai MRR filtra ietekmi uz pārraidīto optisko signālu iegūtās BER raksturlīknes apstrādātas, izvēloties BER līmeni, kurš vienāds ar 10^{-9} . Kā redzams no 4.9. attēlā iegūtajām BER raksturlīknēm, tad šī līmeņa sasniegšanai nepieciešams arvien lielāks jaudas līmenis. Nepieciešams uzlabot optisko signālu trokšnis attiecību (OSNR), palielinot signāla jaudu. Atšķirību starp šīm jaudām sauc par jaudas „sodu” (angļu val. power penalty). Matemātiski to var pierakstīt šādā veidā:

$$P_{sods}|_{BER=10^{-9}}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_1|_{BER=10^{-9}}(mW)}{P_2|_{BER=10^{-9}}(mW)} = P_1|_{BER=10^{-9}}(dBm) - P_2|_{BER=10^{-9}}(dBm) \quad (4.5)$$

kur $P_1|_{BER=10^{-9}}$ - jauda, kura nepieciešama BER= 10^{-9} līmeņa sasniegšanai uztvērēja ieejā un $P_2|_{BER=10^{-9}}$ - jauda kura nepieciešama BER= 10^{-9} līmeņa sasniegšanai raidītāja izejā.

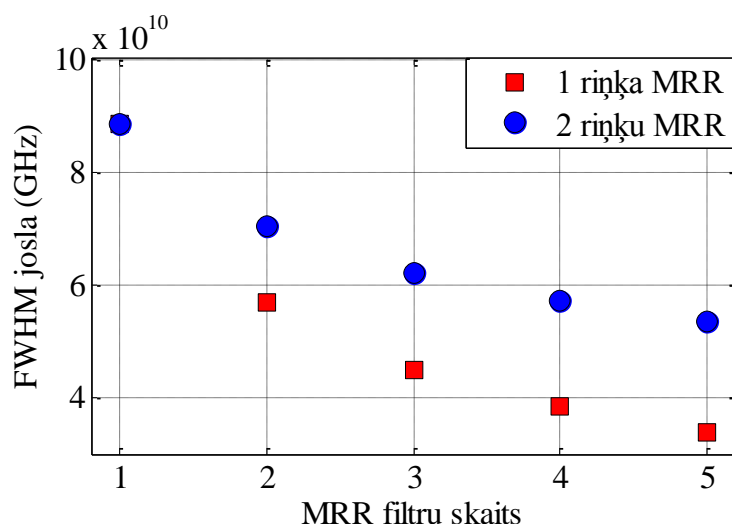
Izmantojot 4.5 izteiksmi $P_{sods}|_{BER=10^{-9}}$ aprēķināts gan 4.8.attēlā, gan 4.9. attēlā redzamajiem BER mērījumiem. Tad šie $P_{sods}|_{BER=10^{-9}}$ tika atņemti viens no otra (tiek izolēti pārraides vides ienestie kropļojumi signālam), lai iegūtu tikai to jaudas „soda” vērtību, kas

rodas no 88 GHz MRR filtra ietekmes. Iegūtās jaudas „soda” vērtības (pie $BER=10^{-9}$) atkarībā no viena riņķa MRR filtra skaita kaskādē 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajiem signāliem parādītas 4.10. attēlā. Tikai 1 dB liels jaudas „sods” novērojams pēc katras MRR filtra kaskādes līdz pat ceturtajam filtram. Savukārt, pēc pieciem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem efektīvā josla samazinājusies līdz 34 GHz (kā redzams no 3.28. attēla), kas radīja daļēju fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveidi [33] un līdz ar to, arī pieaugošo jaudas „sodu” CSRZ-DPSK gadījumā, salīdzinot ar CSRZ-OOK. Tas ir novērojams arī 4.10. attēlā redzamajās acu diagrammās.



4.10. att. Jaudas „sods” (pie $BER=10^{-9}$) atkarībā no viena riņķa MRR filtra skaita kaskādē 40 Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK optiskajiem signāliem. Parādītas arī acu diagrammas pēc vienas un piecām recirkulācijas cilpām

Pētījumā, cik autoram zināms, pirmo reizi novērtēta silīcija viena riņķa MRR filtra kaskādē saslēgšanas ietekme uz 40-Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK modulācijas formātiem. $BER=10^{-9}$ līmenis sasniegts pēc pieciem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem. CSRZ-OOK modulācijas formāts ir noturīgāks pret filtrēšanas efektiem (efektīvās joslas samazināšanos), salīdzinot ar CSRZ-DPSK, kas skaidrojams ar tā daļēju demodulāciju, samazinoties MRR efektīvajai joslai pie lielāka skaita kaskādē saslēgto MRR filtru.



4.11. att. FWHM joslas samazināšanās atkarībā no MRR skaita kaskādē

Augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās piemērotāka ir divu riņķu MRR struktūra, jo saslēdzot kaskādē divu riņķu MRR filtra FWHM joslas sašaurināšanās notiek lēnāk, kā tas redzams 4.11. attēlā. Tas nozīmē, ka kaskādē iespējams saslēgt lielāku skaitu iekārtu, kas būs aktuāli nākotnes optisko starpsavienotāju arhitektūrās.

4.3. Modulācijas formāta pārveide ar viena riņķa MRR

Pilnīgi optiska modulācijas formātu pārveide nepieciešama, lai uzlabotu nākotnes optisko tīklu elastīgumu. RZ uz NRZ signālu pārveide ir būtisks piemērs, lai parādītu dažādu nākotnes optisko tīklu daļu mijiedarbi, kas aktuāli starp transporta un piekļuves optiskajiem tīkliem. Līdz šim, būtiski atklājumi RZ-OOK uz NRZ-OOK modulācijas formātu pārveidē veikti ar nelineārās optiskās cilpas spoguļiem (NOLMs) [9], ar aktīviem injekcijas bloķētiem lāzeriem [25], vai SOA [7, 153] ar samērā sarežģītu izpildījumu. Viena kanāla un daudzkanālu modulācijas formātu pārveides, kas balstītas uz pasīviem lineāriem filtriem [34, 157, 159] arī jau ir demonstrētas OOK signāliem. Jāņem vērā fakts, ka DPSK modulācijas formāts ir ieguvis pastiprinātu uzmanību pēdējā desmitgadē uzlabotās uztvērēja jūtības un labāko pārraides īpašību dēļ [45, 91]. Pavisam nesen tika demonstrēta eksperimentāla viena kanāla [47] un daudzkanālu [160] RZ-DPSK uz NRZ-DPSK formātu pārveide ar viena bita aiztures MZI. Protams, jāņem vērā šādas iekārtas izmēri, kas ir samērā lieli un samazina piedāvātā risinājuma integrēšanas potenciālu.

Silīcija MRR filtri ir daudz piemērotāki, kas saistīts ar to kompakto izmēru un saderību ar mikroelektronikas ražošanas procesiem. Pētījumos šīs iekārtas pielietotas pilnīgi

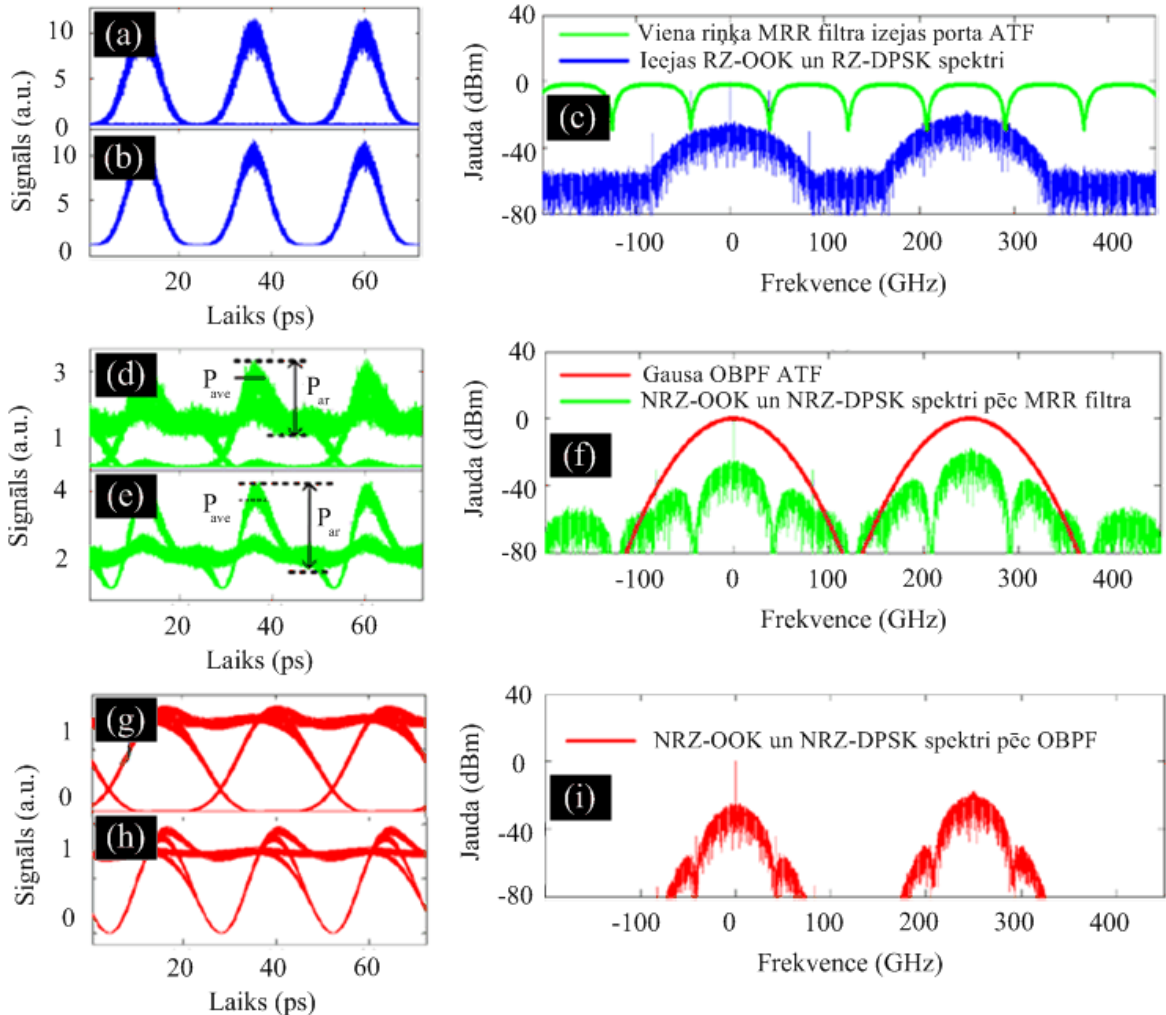
optiskai signālu apstrādei [81, 148]. Daudzkanālu RZ-OOK uz NRZ-OOK formātu pārveide veiksmīgi demonstrēta ar viena riņķa MRR filtru [34]. Šajā pētījumā pirmo reizi demonstrēta vienlaicīga RZ-OOK uz NRZ-OOK un RZ-DPSK uz NRZ-DPSK formātu pārveide pie 41.6 Gbit/s pāraides ātruma ar piemērotu viena riņķa MRR filtru. Pētījumā pirmo reizi parādīts, ka ir iespējama RZ-DPSK uz NRZ-DPSK formātu pārveide ar MRR filtru [149]. Sākumā pastiprināta uzmanība pievērsta viena riņķa MRR filtra saites koeficienta un pēc tam sekojošā optiskā OBPF FWHM joslas ietekmei uz pārveidotā optiskā signāla kvalitāti. Tālāk demonstrēta eksperimentāla vienlaicīga RZ-OOK uz NRZ-OOK un RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveide [119, 150].

4.3.1. Matemātiska modelēšana un pārvades funkcijas izvēle

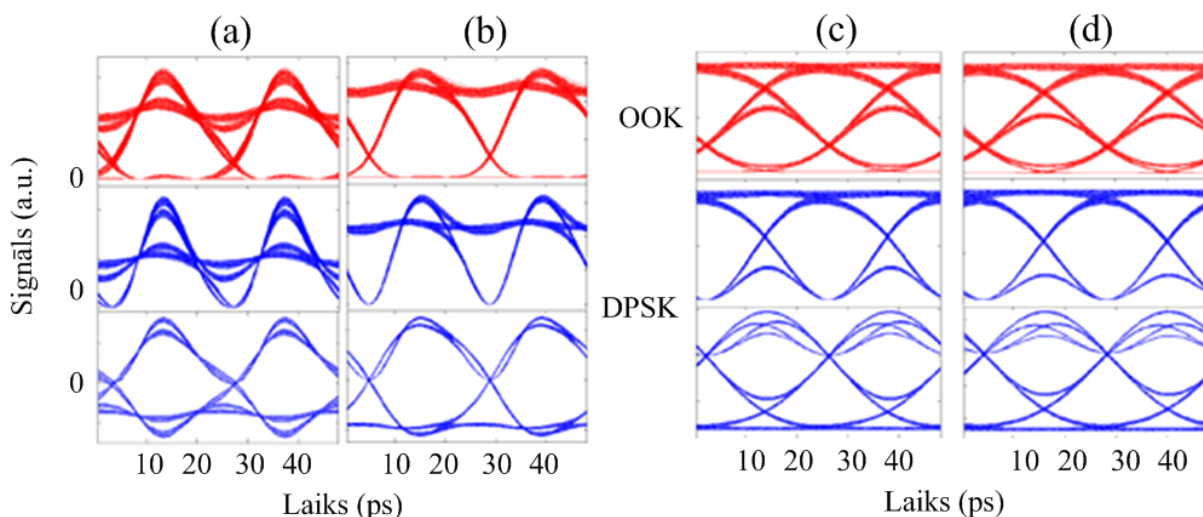
4.3.1.apakšpunktā apskatītas viena riņķa MRR filtra izejas porta pārvades funkcijas pielietojuma iespējas modulācijas formāta pārveidē. Modulācijas formātu pārveides pamatā ir lineārs filtrēšanas process [34, 157]. Lai noskaidrotu atbilstošos viena riņķa MRR filtra parametrus, tika veiktas apjomīgas simulācijas Matlab vidē. Modulācijas formāta pārveides process pa etapiem parādīts 4.12.attēlā. Simulācijās izmantotā RZ-OOK un RZ-DPSK signālu acu diagrammas un spektri parādīti 4.12.a-c. attēlos. Tika veikta signāla divkārtēja filtrēšana: no sākuma RZ-OOK un RZ-DPSK signāli pārraidīti caur viena riņķa MRR filtru uz tā izejas portu (NRZ-OOK un NRZ-DPSK signālu acu diagrammas un spektri pirms Gausa formas OBPF parādīti 4.12.d-f. attēlos), tad pielietots papildus OBPF, lai samazinātu pulsācijas (angļu val. ripple) pārveidotajiem signāliem (NRZ-OOK un NRZ-DPSK signālu acu diagrammas un spektri pēc Gausa formas OBPF parādīti 4.12.g-i. attēlos). Viena riņķa MRR filtra izejas filtra pārvades funkcija aprakstīta 4.1 izteiksmē [122, 154].

Galvenais nosacījums RZ-OOK uz NRZ-OOK un RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveidei ir izvēlēties atbilstošu FSR viena riņķa MRR filtram. Šim parametram jābūt divas reizes lielākam kā datu pāraides ātrumam, kas konkrētajā gadījumā ir 83.2 GHz. MRR filtra izejas portā nonākušais pārveidotais NRZ-OOK un NRZ-DPSK optiskais signāls ir ar samērā lielu pulsāciju (skat.4.12.d-f. attēlos), kuru efektīvi var novērst ar papildus Gausa formas OBPF (skat. 4.12.g-i. attēlos). Aprakstītā metode jau veiksmīgi pielietota, lai pārveidotu RZ-OOK uz NRZ-OOK modulācijas formātu [34], tomēr, līdz šim nav pārbaudīta tās veikspēja RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveidošanā. Pateicoties viena riņķa MRR filtra izejas porta ATF periodiskajam raksturam, iespējams veikt vairāku kanālu OOK un DPSK modulācijas formātu vienlaicīgu pārveidi no RZ uz NRZ, ja

nodrošināts kanālu intervāls, kurš ir vienāds ar vesela skaitļa (≥ 2) reizinājumu ar MRR filtra FSR.



4.12. att. Vienlaicīgas modulācijas formāta pārveides princips. Ieejas 41.6 Gbit/s (a) RZ-OOK acu diagramma, (b) RZ-DPSK acu diagramma un (c) RZ-OOK, RZ-DPSK jaudas spektri (zilā krāsā) un MRR izejas porta ATF (zaļā krāsā) ar FSR = 83.2 GHz. 41.6 Gbit/s pēc MRR filtra (d) NRZ-OOK acu diagramma, (e) NRZ-DPSK acu diagramma un (f) NRZ-OOK, NRZ-DPSK jaudas spektri (zaļā krāsā) un Gausa formas OBPf ATF (sarkanā krāsā). 41.6 Gbit/s pēc OBPf (g) NRZ-OOK acu diagramma, (h) NRZ-DPSK acu diagramma un (i) NRZ-OOK, NRZ-DPSK jaudas spektri (sarkanā krāsā). Šajā simulācijas tika izmantots 0.72 jaudas saites koeficients un 60 GHz Gausa formas OBPf FWHM joslas platums

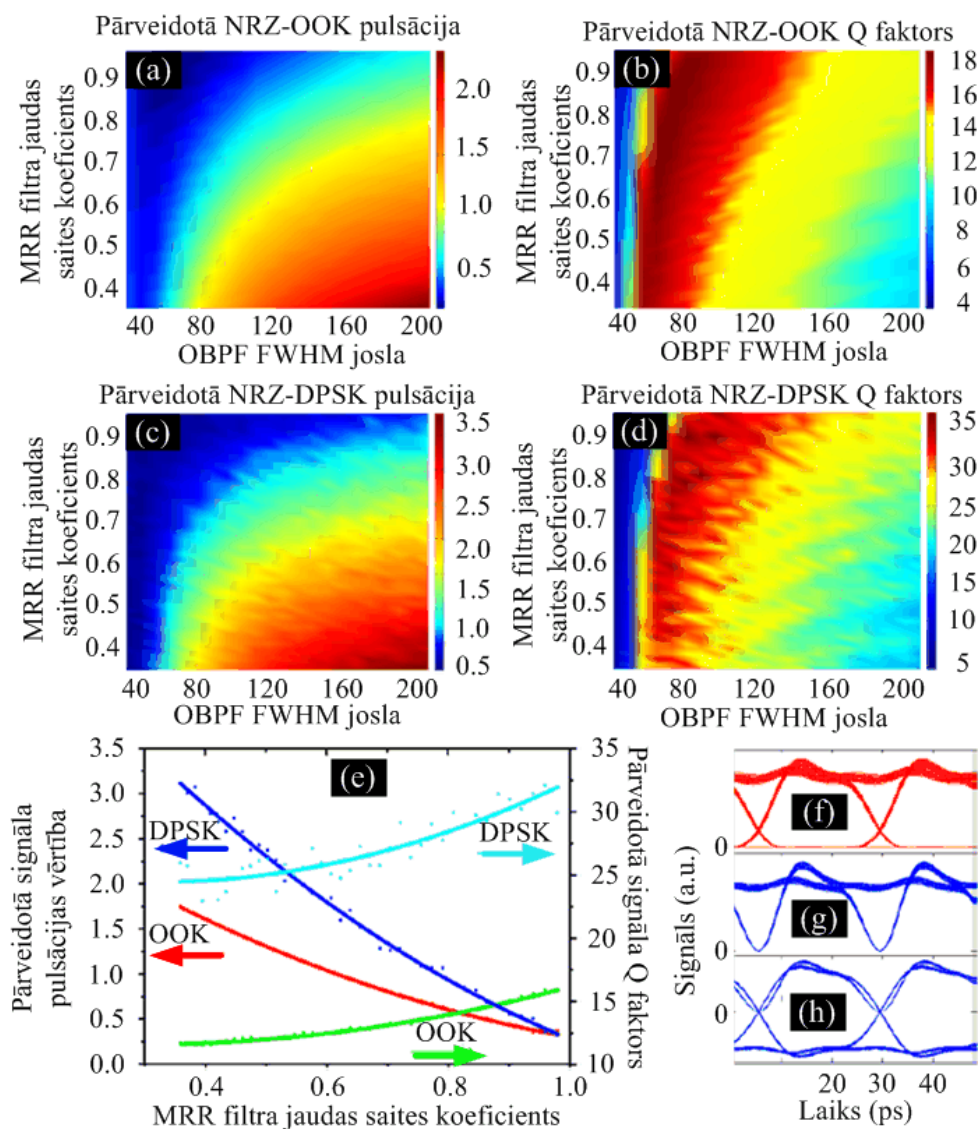


4.13. Acu diagrammas pārveidotajiem NRZ-OOK (sarkanā krāsā augšā), NRZ-DPSK (zilā krāsā pa vidu), un demodulētajam NRZ-DPSK (zilā krāsā apakšā) pie šādiem parametriem (a) $k^2=0.7$ un FWHM=80 GHz, (b) $k^2=0.9$ un FWHM=80 GHz, (c) $k^2=0.7$ un FWHM=32 GHz un (d) $k^2=0.9$ un FWHM=32 GHz

Pārveidotā NRZ signāla kvalitāte (pēc interferometriskas demodulācijas un saskaņotas uztveršanas DPSK gadījumā) ir ļoti atkarīga no MRR filtra jaudas saites koeficienta un OBPF FWHM joslas platuma. Kā tas redzams no 4.13.a,b. attēla, tad pie konstantas OBPF FWHM joslas vērtības 80 GHz uztvertajam signālam iespējams samazināt amplitūdas pulsācijas, izvēloties lielāku jaudas saites koeficientu. Savukārt, 4.13.c,d. attēlā redzams, ka pie 32 GHz FWHM joslas OBPF pārveidotā signāla Q faktors nav atkarīgs no MRR filtra saites koeficienta.

Lai vispārinātu līdz šim iegūtos priekšstatus par formāta pārveidotāja parametru izvēli, tika veiktas simulācijas un novērtētas pārveidoto optisko signālu pulsācijas vērtības un Q faktors, atkarībā no MRR jaudas saites koeficienta un OBPF FWHM joslas platuma (skat. 4.14.a-d. attēlu). Signāla pulsācijas definētas kā P_{ar}/P_{ave} , kur P_{ar} ir „1” līmeņa jaudas deviācija pārveidotajā acu diagrammā un P_{ave} ir vidējā jauda (skat. 4.12.d-e. attēlus). Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem 4.14a-d. attēlā, tad pārveidotā optiskā signāla pulsācijas vērtības un Q faktors atkarībā no MRR jaudas saites koeficienta un OBPF FWHM joslas platuma ir ar līdzīgu raksturu gan OOK, gan DPSK modulācijas formātiem. Lai modulācijas formāta pārveidi veiktu efektīvi, ir nepieciešams sasniegt nelielas pulsācijas vērtības un augstu Q faktora vērtību. Pie fiksētas OBPF FWHM joslas vērtības 125GHz pārveidoto optisko signālu pulsācijas vērtības un Q faktors tika aprēķināts atkarībā no MRR filtra jaudas saites koeficienta (skat. 4.14.e. attēlu). Palielinot MRR filtra jaudas saites koeficientu, pārveidotā

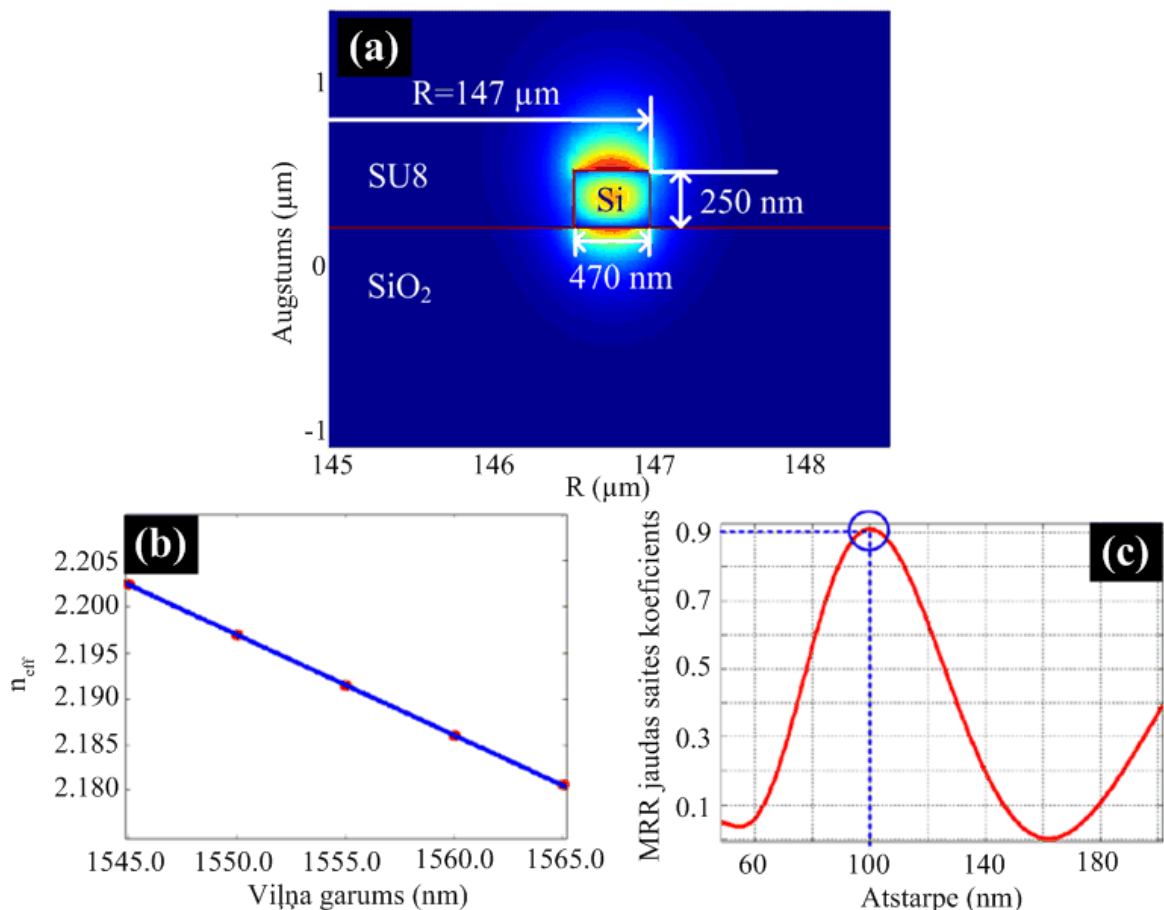
optiskā signāla pulsācijas vērtība samazinās un Q faktora vērtība pieaug. Pārveidotajiem NRZ-OOK un NRZ-DPSK optiskajiem signāliem pie $k^2=0.9$ pulsācijas attiecīgi ir zemākas par 0.8 un 0.5, savukārt, Q faktora vērtības attiecīgi ir augstākas par 15 un 30 (acu diagrammas ir parādītas 4.14.f-h. attēlos).



4.14. att. Aprēķinātās pārveidotā 41.6 Gbit/s NRZ-OOK modulācijas formāta (a) pulsācijas un (b) Q faktors atkarībā no MRR jaudas saites koeficienta un OBPF FWHM joslas. Aprēķinātās pārveidotā 41.6 Gbit/s NRZ-DPSK modulācijas formāta (c) pulsācijas un (d) Q faktors atkarībā no MRR jaudas saites koeficienta un OBPF FWHM joslas. Pulsācijas un Q faktors (e) atkarībā no MRR jaudas saites koeficienta pie 125 GHz OBPF FWHM joslas un aprēķinātā signāla acu diagrammas pie $k^2=0.9$ (f) pārveidotajam NRZ-OOK, (g) pārveidotajam NRZ-DPSK un (h) demodulētajam NRZ-DPSK signālam pēc saskaņotas uztveršanas un OBPF ar 125 GHz FWHM joslu

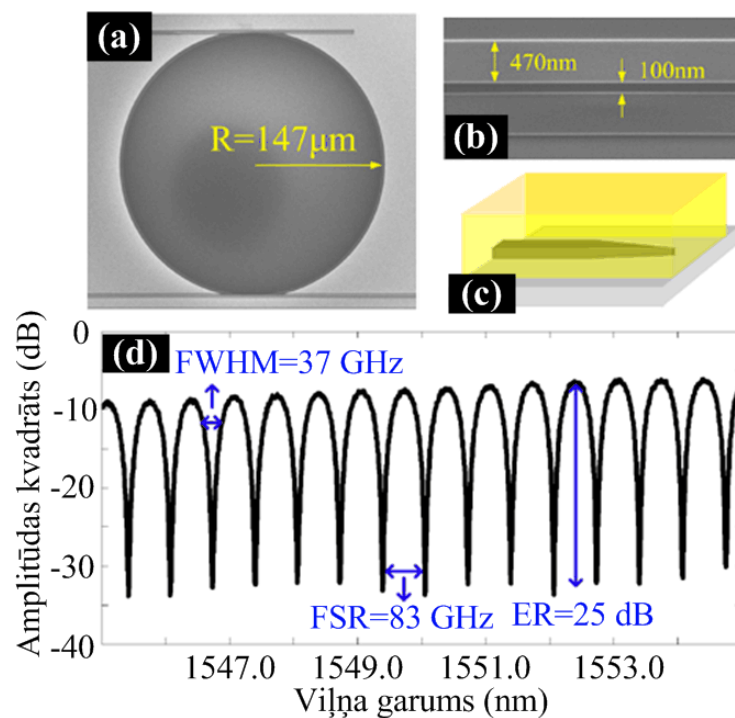
4.3.2. MRR rezonatora izgatavošana un iekārtas parametri

4.3.1. apakšpunktā tika noskaidroti viena riņķa MRR filtra parametri, lai veiktu efektīvu RZ-NRZ pārveidi abiem modulācijas formātiem: OOK un DPSK, savukārt, šajā apakšpunktā aprakstīta veiktā prototipa izstrāde un parametru analīze. Pilnā 3D vektorālā plāno kārtiņu modu saskaņošanas metode (angļu val. 3-D full vectorial film mode matching method) un saistīto modu teorija [17] izmantotas, lai izstrādātu atbilstošu viena riņķa MRR. Izvēlēti šādi parametri: FSR=83.2 GHz un augsts jaudas saites koeficients. Viena riņķa MRR izgatavots uz SOI plāksnītes, kur silīcija biezums sasniedz 250 nm un tas ir izvietots uz 3 μm bieža silīcija dioksīda slāņa, kā redzams 4.15.a. attēlā. Taisno un liekto viļņvadu augstums un platums ir attiecīgi 250 nm un 470 nm. Kā pārklājošais slānis izvēlēts polimērs (SU8-2005). Kopējie izplatīšanās zudumi viļņvadā ir 8.2 dB/cm [34].



4.15. att. Izveidotā viena riņķa MRR filtra (a) taisnā viļņvada skats šķērsgriezumā, (b) efektīvais laušanas koeficients kā funkcija no viļņa garuma TM_0 modai un (c) aprēķinātais jaudas saites koeficients TM_0 modai atkarībā no atstarpes starp taisno un liekto viļņvadiem

4.15.b. attēlā redzams efektīvais laušanas koeficients kā funkcija no viļņa garuma TM_0 modai, savukārt, 4.15.c. attēlā parādīts aprēķinātais jaudas saites koeficients TM_0 modai atkarībā no atstarpes starp taisno un liekto viļņvadiem. Aprēķinātais grupveida laušanas koeficients ir 3.9005 pie 1550.0 nm viļņa garuma. MRR filtra rādiuss ir 147 μm , kas atbilst FSR vērtībai 83.2 GHz, kā arī izvēlēts $k^2=0.9$, kas ir sasniedzams ar 100 nm atstarpi starp taisno un liekto viļņvadiem, lai veiktu efektīvu formātu pārveidi.

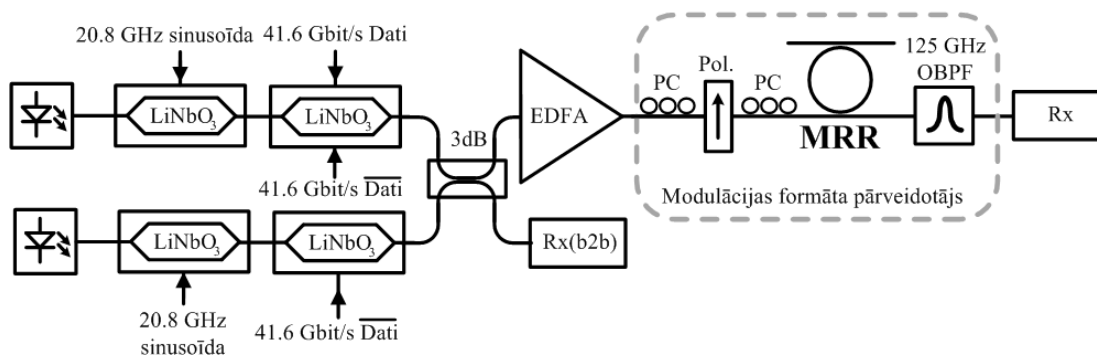


4.16. att. Skanējošā elektronu mikroskopa attēli: (a) skats no augšas, (b) saites reģions ar 100 nm atstarpi starp taisno un liekto viļņvadiem un (c) silīcija apgriezti konusveida viļņvadi gaismas ievadam un izvadam ar samazinātu vājinājumu. (d) Nomērīta ATF viena riņķa MRR filtra izejas portam

MRR filtrs tika izstrādāts uz SOI plāksnītes. Detalizēts izgatavošanas process aprakstīts [32]. 4.16. a-c. attēlos parādīta izstrādātās iekārtas struktūra ar rādiusu 147 μm , viļņvada platumu 470 nm un atstarpi starp taisno un liekto viļņvadiem 100 nm. Lai samazinātu iekārtas savienošanas zudumus ar optisko šķiedru ar konusveida galu visu portu viļņvadu sākumdaļa izveidota apgriezti konusveida un pārklāta ar polimēru, kas veido nano-savienotāju, kurš redzams 4.16.c. attēlā. Savukārt, 4.16.d. attēlā redzama nomērīta viena riņķa MRR filtra izejas porta ATF. Ienestie zudumi ir vienādi ar 8 dB, FSR = 83GHz un ER ir 25 dB, kas atbilst izvēlētajam $k^2=0.9$.

4.3.3. Mērījumu shēmas izveide un pētījumu metode

Eksperimentālā mērījumu shēma vienlaicīgai RZ-NRZ pārveidei abiem modulācijas formātiem: OOK un DPSK, redzama 4.17. attēlā. Shēmā izveidotā raidītāja katrs kanāls sastāv no diviem LiNbO₃ MZM, kuri paredzēti 41.6 Gbit/s RZ-OOK vai RZ-DPSK optisko signālu ģenerēšanai. Pirmā MZM augstfrekvenču ieejai ir pieslēgts sinhronizācijas signāls ar divreiz mazāku frekvenci kā datu signāls, savukārt, otrā MZM augstfrekvenču ieejai ir pieslēgts 41.6 Gbit/s pseido-gadījuma 2³¹-1 bitu secību. Kā gaismas avoti tika izmantoti nepārtraukta starojuma lāzeri ar 1551.36 nm un 1549.35 nm viļņa garumiem. Modulētie un apvienotie 33% RZ-OOK un 33% RZ-DPSK signāli tika pastiprināti EDFA, lai kompensētu MZM ienesto vājinājumu. Pirms optisko signālu ievadīt MRR filtrā ir jānodrošina noteikts polarizācijas stāvoklis ieejas optiskajam signālam. Tas panākts ar polarizatoru (izveido TM polarizāciju), kurš izvietots starp diviem polarizācijas kontrolieriem. NRZ-OOK un NRZ-DPSK signālus pēc pārveides MRR filtrā papildus nofiltrē ar OBPF ar 1 nm jeb 125 GHz FWHM joslu. Signāli tika uztverti priekšpastiprinātā optiskajā uztvērējā. Viena bita aiztures MZI un saskaņotais detektors ar divām 45 GHz fotodiodēm izmantots DPSK modulācijas formāta gadījumā, savukārt, viena fotodiode ar 45 GHz joslu izmantota OOK modulācijas formāta gadījumā. Signāla kvalitātes mērījumi veikti ar OSA, 70 GHz elektrisko augstfrekvenču osciloskopu un BER testerī.

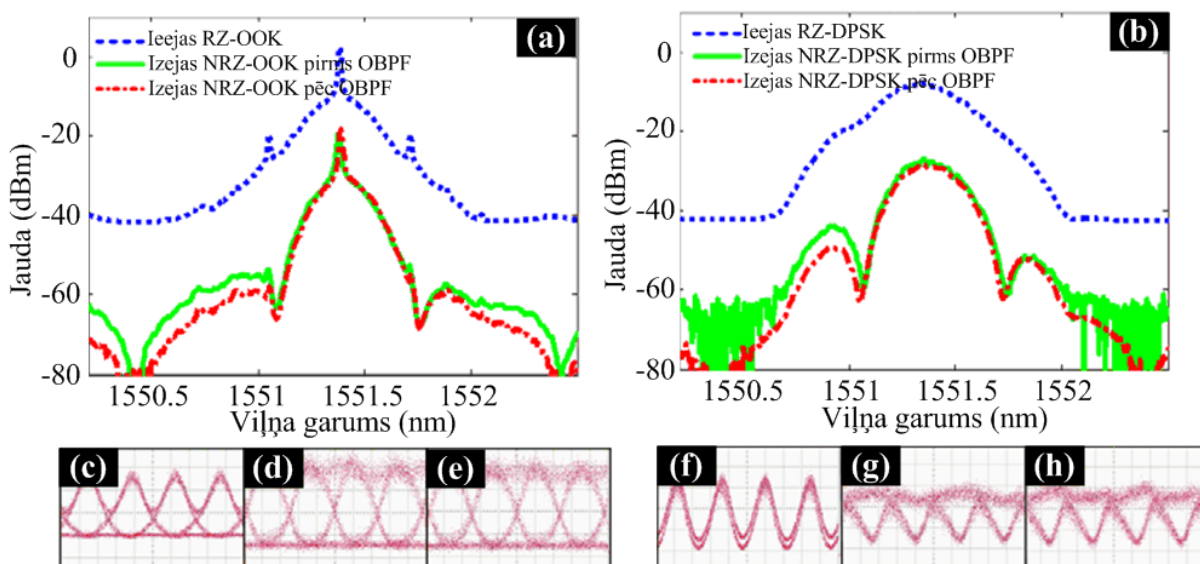


4.17. att. Eksperimentālā mērījumu shēma modulācijas formātu pārveidei

4.3.4. 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ

Pirms veikt vienlaicīgu modulācijas formātu pārveidi ir jāpārlicinās, ka katrs no modulācijas formātiem tiek efektīvi pārveidots. Tas izdarīts pēc kārtas izslēdzot vienu no diviem nepārtraukta starojuma lāzeriem. DPSK gadījumā šāds pētījums ar viena riņķa MRR līdz šim nav veikts. Ieejas RZ signāla centrālā frekvence tika noskaņota pa vidu starp diviem

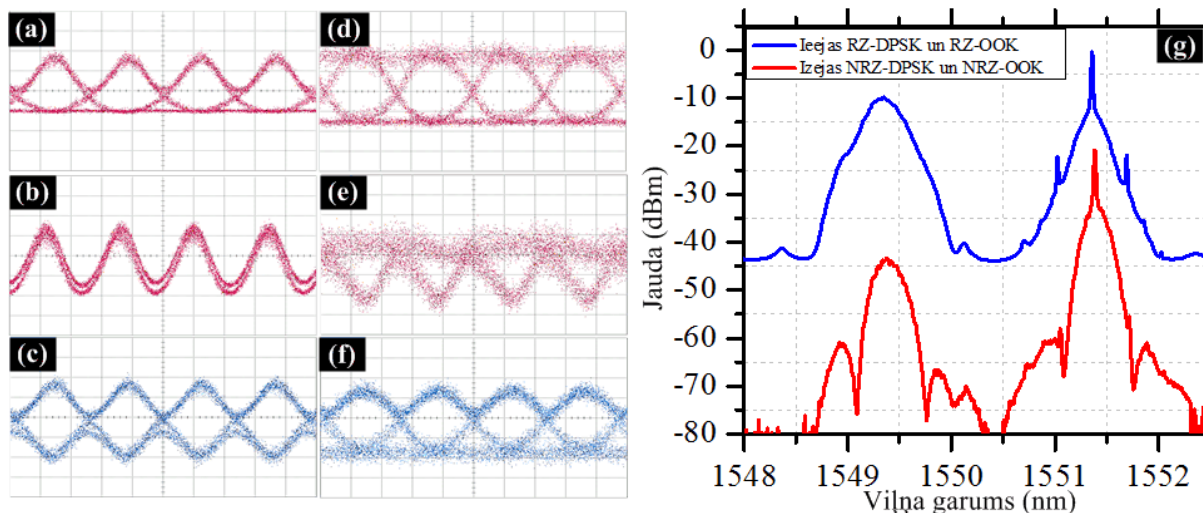
iegriezuma filtriem MRR filtra izejas porta ATF. 4.18.a-b. attēlos ir redzamas OOK un DPSK modulācijas formātu spektra izmaiņas to pārveides no RZ uz NRZ laikā. Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, tad RZ-OOK un RZ-DPSK modulācijas formātu spektra komponentes ir efektīvi izfiltrētas pēc MRR filtra un veiksmīgi iegūti NRZ-OOK un NRZ-DPSK modulācijas formāti. Turklāt iegūtie spektri nav būtiski izmainījušies pēc 1nm OBPF, kas redzams arī 4.18.c-h. attēlā atspoguļotajās acu diagrammās. Amplitūdas pulsācijas pārveidotajiem signāliem nav efektīvi samazinātas ar OBPF, kas ir saistīts ar tā samērā lielo caurlaides joslu. Tomēr, amplitūdas pulsācijas nav tik izteikti lielas, pateicoties augstajam MRR filtra jaudas saites koeficientam. Iegūtie rezultāti atbilst skaitliski aprēķinātajiem (skat. 4.14.a un 4.14.c. attēlus).



4.18. att. Nomērītie jaudas spektri (a) ieejas RZ-OOK, pārveidotajam NRZ-OOK pirms un pēc 1nm OBPF, (b) ieejas RZ-DPSK, pārveidotajam NRZ-DPSK pirms un pēc 1 nm OBPF pie 0.2 nm izšķirtspējas un atbilstošās acu diagrammas (c) ieejas RZ-OOK, (d) pārveidotajam NRZ-OOK pēc MRR, (e) pārveidotajam NRZ-OOK pēc OBPF, (f) ieejas RZ-DPSK, (g) pārveidotajam NRZ-DPSK pēc MRR un (h) pārveidotajam NRZ-DPSK pēc OBPF

Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, tad viena kanāla gadījumā, gan OOK modulācijas formātam, gan DPSK modulācijas formātam ir veikta veiksmīga pārveide no RZ uz NRZ. Lai veiktu vienlaicīgu modulācijas formātu pārveidi, tad tika ieslēgti abi nepārtraukta starojuma lāzери. No sākuma OBPF tika pārskatīts uz OOK modulācijas formāta centrālo viļņa garumu, bet pēc tam uz DPSK modulācijas formāta centrālo viļņa garumu.

Praksē šādā gadījumā tiktu izmantots periodisks OBPF (viens no piemērotiem risinājumiem varētu būt MRR filtra nomestais ports).

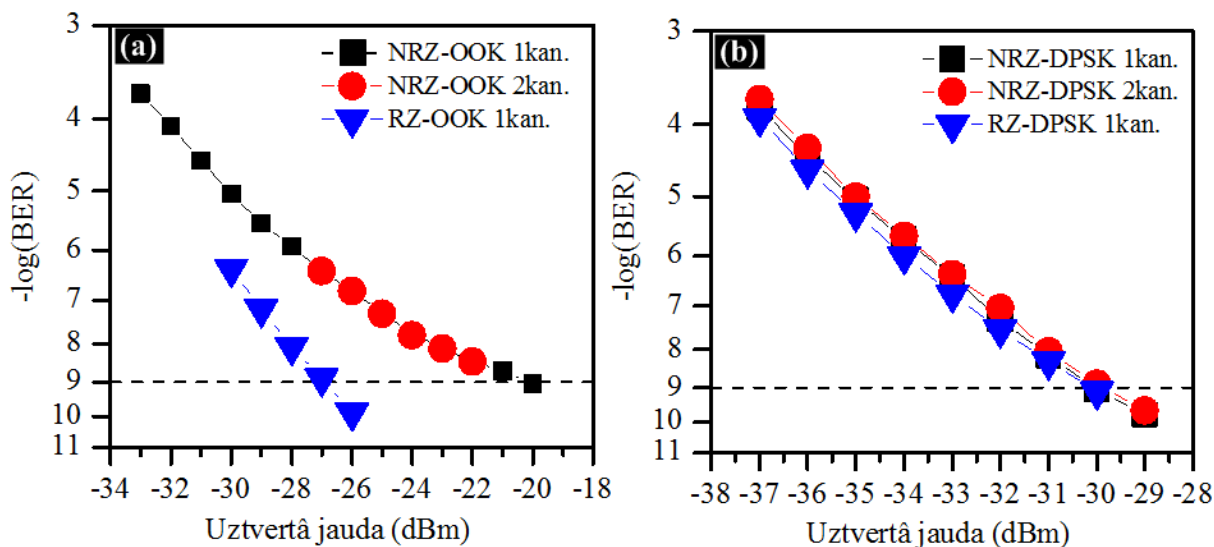


4.19. att. Nomērītās acu diagrammas (a) ieejas RZ-OOK (viens kanāls ieslēgts), (b) ieejas RZ-DPSK (viens kanāls ieslēgts), (c) demodulētajam ieejas RZ-DPSK pēc saskaņotas uztveršanas, (d) pārveidotajam NRZ-OOK (divi kanāli ieslēgti), (e) pārveidotajam NRZ-DPSK (divi kanāli ieslēgti) un (f) demodulētajam pārveidotais NRZ-DPSK pēc saskaņotas uztveršanas. (g) Nomērītie jaudas spektri abiem ieejas RZ signāliem un pārveidotajiem NRZ signāliem pie 0.2 nm izšķirtspējas

Nomērītās acu diagrammas ieejas RZ-OOK (viens kanāls ieslēgts), ieejas RZ-DPSK (viens kanāls ieslēgts), demodulētajam ieejas RZ-DPSK pēc saskaņotas uztveršanas, pārveidotajam NRZ-OOK (divi kanāli ieslēgti), pārveidotajam NRZ-DPSK (divi kanāli ieslēgti) un demodulētajam pārveidotais NRZ-DPSK pēc saskaņotas uztveršanas un nomērītie jaudas spektri abiem ieejas RZ signāliem un pārveidotajiem NRZ signāliem pie 0.2 nm izšķirtspējas ir redzami 4.19. attēlā. Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, tad vienlaicīga modulācijas formātu pārveide ir veiksmīga abiem kanāliem, kā arī novērotas tikai nelielas pārveidotā signāla amplitūdas pulsācijas, pateicoties augstajam MRR filtra jaudas saites koeficientam.

Savukārt, 4.20. attēlā parādīti BER mērījumi viena kanāla un vienlaicīgai divu kanālu modulācijas formāta pārveidei. Kā redzams, tad BER līmenis 10^{-9} ir sasniegts abiem modulācijas formātiem. Turklāt nav novērojama šķērsrunas ietekme divu kanālu vienlaicīgas modulācijas formātu pārveidē. Mazāka papildus optiskā jauda ir nepieciešama DPSK modulācijas formāta pārveidē, kas nodrošina nelielu jaudas „soda” vērtību, savukārt, OOK

modulācijas formāta pārveides gadījumā jaudas „soda” vērtība sasniedz 7 dB, kas ir sastopama vērtība arī iepriekšējos pētījumos [34].



4.20. att. BER mērijumi (a) ieejas RZ-OOK, pārveidotajam NRZ-OOK (viens kanāls ieslēgts), pārveidotajam NRZ-OOK (divi kanāli ieslēgti) un (b) ieejas RZ-DPSK, pārveidotajam NRZ-DPSK (viens kanāls ieslēgts), pārveidotajam NRZ-DPSK (divi kanāli ieslēgti)

No iegūtajiem rezultātiem secinām, ka realizēta veiksmīga OOK un DPSK modulācijas formātu pārveide no RZ uz NRZ. Jāuzsver fakts, ka pirmo reizi tika demonstrēta DPSK modulācijas formāta pārveide no RZ uz NRZ ar viena riņķa MRR filtru un vienlaicīga OOK un DPSK modulācijas formātu pārveide no RZ uz NRZ ar viena riņķa MRR filtru.

4.4. Kopsavilkums

Darba 4. nodaļā tika apskatīts jauna veida viļņa garuma filtrs: MRR, kas pagaidām netiek izmantots komerciālās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. No silīcija veidoti MRR filtri piemēroti viļņa garuma filtru un optisko komutatoru izveidei. Viens no primārajiem pielietojumiem ir OADM viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Turklāt, pateicoties to kompaktajam izmēram, integrēšanas iespējām un saderībai ar standarta mikroelektronikas ražošanas procesiem, tie ir būtiski pamatarhitektūras bloki nākotnes optisko starpsavienotāju arhitektūrām, kas tikai nesen izpelnījušies pastiprinātu pētniecisko interesi. Tas ir saistīts ar lielu atkarību no optiskā signāla ieejas polarizācijas stāvokļa. Vairāki risinājumi šai problēmai ir iespējami. Apkopotie pētījumi ir veikti doktorantūras prakses laikā Dānijas Tehniskajā

universitātē sadarbojoties ar Fotonikas institūta un Wuhan Nacionālās Optoelektronikas laboratorijas zinātniekiem profesora Christophe Peucheret vadībā, ETDM laboratorijā (skat. rekomendāciju 4. pielikumā). Nodaļa sadalīta divās daļās, kurās nomestā porta un izejas porta pārvades funkciju pielietojuma ierobežojumi un iespējas apskatītas atsevišķi. Sākumā apskatīti nomestā porta kompleksās pārvades funkcijas pielietojuma ierobežojumi. Pētījumā izstrādāts MRR prototips kaskādes slēguma pārbaudei un, cik autoram zināms, pirmo reizi eksperimentāli novērtēta silīcija viena riņķa MRR filtra kaskādē saslēgšanas ietekme uz 40-Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK modulācijas formātiem. Lai noskaidrotu kaskādes slēguma ietekmi, tika izmantota recirkulācijas cilpas konfigurācija [74]. BER 10^{-9} līmenis tika sasniegts pēc pieciem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem. CSRZ-OOK modulācijas formāts ir noturīgāks pret filtrēšanas efektiem (efektīvās joslas samazināšanos) salīdzinot ar CSRZ-DPSK, kas ir skaidrojams ar tā daļēju demodulāciju, samazinoties MRR FWHM joslai pie lielāka skaita kaskādē saslēgto iekārtu, kas detaļās izklāstīts vairākās autora zinātniskajās publikācijās [98, 119]. Savukārt, pēc tam tika apskatīta MRR filtra izejas porta ATF pielietojuma iespējas jaunas funkcionalitātes: modulācijas formāta pārveides, radīšanai nākotnes optiskajiem tīkliem. Pētījumā izveidots mikroriņķa rezonatora prototips vienlaicīgai 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveidei no RZ uz NRZ. Pirmo reizi demonstrēta sekmīga 41.6 Gbit/s DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ, kā arī vienlaicīga 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ ar viena riņķa MRR filtru, kas detaļās izklāstīts vairākās autora zinātniskajās publikācijās [119, 149, 150].

NOBEIGUMS

Nemot vērā straujo kopējā patērētāju datu apjoma pieaugumu, kas pēc Cisco pētījumu prognozēm pieaugs par 32% katru gadu un 2016. gadā sasniegs 82 560 PB mēnesī [27], nepieciešams meklēt risinājumus optisko sakaru sistēmu parametru uzlabošanai. Pasaulē novērojama tendence, ka no 10 Gbit/s datu pārraides ātruma vienā kanālā WDM sistēmā notiek pakāpeniska pāreja uz 40 Gbit/s un 100 Gbit/s datu pārraides ātrumu vienā kanālā [47]. Sakarā ar straujo pieprasījuma un pieauguma ātrumu, nepieciešams noskaidrot ekspluatācijā lietoto WF pielietojumu ierobežojumus, kā arī meklēt jaunus risinājumus, lai WDM sistēmas padarītu elastīgākas.

Augstāk minēto iemeslu rezultātā, promocijas darba pirmajā nodaļā apskatītas viļņa garuma filtru attīstības tendences un veikta salīdzinošā analīze starp WDM sistēmās plašāk pielietotajām fiziskajām realizācijām.

Savukārt, 2. nodaļā tika apskatītas viļņa garuma filtru kompleksās pārvades funkcijas un to iegūšanas veidi. Viena no iespējām ir aprēķināt filtra teorētisko pārvades funkciju, kas praksē noder, kad nav pieejamas mēriekārtas šo parametru iegūšanai. Tas noveda pie nepieciešamības izveidot algoritmu, kas dod iespēju ievietot iegūtās kompleksās pārvades funkcijas OptSim simulācijas programmā un veikt skaitliskus pētījumus tādās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās, kurus nav iespējams izveidot Šķiedru optikas pārraides sistēmu laboratorijā, sakarā ar iekārtu augstajām izmaksām.

Promocijas darba 3. nodaļā lielāka uzmanība pievērsta viļņa garuma filtru komplekso pārvades funkciju piemērotības un pielietojuma ierobežojumu novērtēšanai. Apskatīti praksē pielietoti viļņa garuma filtri, kuru parametri un veiktspēja WDM sistēmās novērtēta ar jaunām un Latvijā patentētām mērījumu shēmām (skat. pielikums 2. un 3. pielikumos), gan izstrādāti vispārīnāti ieteikumi kompleksās pārvades funkcijas izvēlei dažādu modulācijas formātu gadījumā DWDM sistēmās. Parādīts, ka ar Pacelta-kosinusa filtru ir iespējama DPSK signāla demodulācija.

Savukārt, 4. nodaļā tika apskatīts jauna veida viļņa garuma filtrs: MRR, kas netiek izmantots komerciālās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Apkopotie pētījumi veikti doktorantūras prakses laikā Dānijas Tehniskajā universitātē, sadarbojoties ar Fotonikas institūta un Wuhan Nacionālās Optoelektronikas laboratorijas zinātniekiem profesora Christophe Peucheret vadībā, ETDM laboratorijā (skat. rekomendāciju 4. pielikumā). Nomestā porta un izejas porta pārvades funkciju pielietojuma ierobežojumi un iespējas apskatītas atsevišķi. Pētījumā, cik autoram zināms, pirmo reizi novērtēta silīcija viena riņķa

MRR filtra kaskādē saslēgšanas ietekme uz 40-Gbit/s CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK modulācijas formātiem. BER 10^{-9} līmenis tika sasniegts pēc pieciem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem. Savukārt, pēc tam tika apskatīta MRR filtra izejas porta ATF pielietojuma iespējas jaunas funkcionalitātes: modulācijas formāta pārveides, radīšanai nākotnes optiskajiem tīkliem. Pētījumā pirmo reizi demonstrēta 41.6 Gbit/s RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveide ar MRR filtru, kā arī vienlaicīga 41.6 Gbit/s RZ-OOK uz NRZ-OOK un 41.6 Gbit/s RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveide ar MRR filtru.

Veicot darba pirmajā nodaļā definēto uzdevumu izpildi iegūti šādi **galvenie promocijas darba rezultāti un secinājumi**:

1. Ar izstrādāto algoritmu var apstrādāt teorētiski un eksperimentāli iegūtās viļņa garuma filtru kompleksās pārvades funkcijas (FBG, TFF, DG, AWG un MRR) un izveidot lietotāja definētu filtru modeļus, kā rezultātā pilnveidot viļņa garuma filtru modeļu klāstu simulācijas programmās.
2. Izveidota mērījumu metode viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas pārbaudei. Noskaidrots, ka FBG filtru gadījumā efektīvā caurlaides josla samazinās uz pusi no 50 GHz 2.5 Gbit/s NRZ-OOK gadījumā uz 25GHz pie 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK gadījumā, kas saistīts ar lielu ienestās dispersijas vērtību -20 dB joslā: no -514 ps/nm līdz 390 ps/nm.
3. 100 GHz un 200 GHz TFF iekārtām efektīvās caurlaides joslas attiecīgi ir 75 GHz un 175GHz, kā arī tā ir nemainīga pie 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma, kas ir skaidrojams ar samērā mazu ienestās dispersijas lielumu (100 GHz TFF no -111 ps/nm līdz 141 ps/nm un 200 GHz TFF no -49 ps/nm līdz 45 ps/nm. Vērtības iegūtas – 20 dB joslā);
4. Izstrādāta mērījumu shēma WDM sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanas iespēju novērtēšanai. 200 GHz TFF iekārtas gadījumā 2.5 Gbit/s NRZ-OOK WDM sistēmas spektrālā tika palielināta no 0.05 bit/s/Hz līdz 0.1 bit/s/Hz un pie 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma no 0.0125 bit/s/Hz līdz 0.025 bit/s/Hz.
5. Noskaidrota efektīvākā viļņa garuma filtra kompleksā pārvades funkcija optiskā signāla atdalīšanai blīvās viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Labāko signāla kvalitāti iespējams iegūt ar Super-Gausa un Pacelta-kosinusa filtriem. Pacelta-kosinusa filtra gadījumā labāka signāla kvalitāte ir novērojama pie mazāka pārraides ātruma, kas saistīts ar lielāko ienesto grupas aizturi nekā Super-Gausa filtra gadījumā.

6. Parādīts, ka ar Pacelta-kosinusa filtru arī ir iespējams veikt fāzes modulācijas formāta pārveidi uz intensitātes modulācijas formātu un uztvert kvadrātiskajā detektorā. Citu autoru aprakstītajos pētījumos fāzes modulācijas formāta pārveide uz intensitātes modulācijas formātu veikta ar Lorenca un Super-Gausa filtriem. Šāds risinājums, salīdzinājumā ar Super-Gausa un Lorenca filtriem, ir ar labāku noturību pret kaskādes slēguma radīto caurlaides joslas samazināšanos. 40 Gbit/s NRZ-DPSK optiskā signāla gadījumā Pacelta-kosinusa filtra FWHM caurlaides joslas vērtībai ir jābūt robežās no 30 GHz līdz 40 GHz.
7. Izstrādāts mikroriņķa rezonatora prototips kanālu atdalīšanai un noskaidrota tā kaskādē saslēgšanas ietekme uz 40 Gbit/s nomāktas nesējfrekvences ar atgriešanos pie nulles intensitātes un fāzes modulācijas optiskajiem signāliem. Bitu kļūdu attiecība 10^{-9} sasniegta pēc pieciem kaskādē saslēgtiem mikroriņķa rezonatoru filtriem. CSRZ-OOK modulācijas formāts ir noturīgāks pret filtrēšanas efektiem salīdzinot ar CSRZ-DPSK modulācijas formātu, kas skaidrojams ar tā daļēju demodulāciju samazinoties mikroriņķa caurlaides joslai pie pieciem kaskādē saslēgtiem filtriem.
8. Izveidots mikroriņķa rezonatora prototips vienlaicīgai 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveidei no RZ uz NRZ. Veikta sekmīga 41.6 Gbit/s DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ, kā arī vienlaicīga 41.6 Gbit/s OOK un DPSK optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ.

Nobeigumā jāuzsver, ka iegūtie rezultāti var tikt pielietoti spektrālās efektivitātes palielināšanai gan komerciāli izmantotās, gan jaunās WDM sistēmās. Izstrādāta jauna funkcionalitāte: modulācijas formāta pārveide ar MRR filtru, kas ļauj veidot elastīgākas jaunās WDM sistēmas. Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas gan ekspluatācijā esošo viļņgarumdales blīvēšanas sistēmu uzlabošanai, gan jaunu ieviešanai. Sadarbības līguma ietvaros rekomendācijas praktiski realizētas AS „Latvenergo”, SIA „Telia Latvia” un SIA „TELE2” viļņgarumdales blīvēšanas sistēmu izpētei un pilnveidošanai. Izstrādāta Latvijā patentēta mērījumu shēma viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas pārbaudei ar 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK optisko signālu (skat. pieliecību 2. pielikumā) un izveidota Latvijā patentēta divu kanālu mērījumu shēma ar 2.5 Gbit/s un 10.3125 Gbit/s NRZ-OOK optisko signālu WDM sistēmas spektrālās efektivitātes paaugstināšanai, saglabājot ekspluatācijā esošo viļņa garuma filtru (skat. pieliecību 3. pielikumā).

LITERATŪRA

1. *Agilent Technologies. Agilent 86038B Photonic Dispersion and Loss Analyzer. - Germany: Agilent Technologies Manufacturing GmbH, 2006. – 350.p.*
2. *Agrawal G. Fiber-Optic Communication Systems. – USA: John Wiley and Sons, 2002. - 561 p.*
3. *Agrawal G. Lighthwave technology. Components and devices. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004. - 427 p.*
4. *Agrawal G. Nonlinear Fiber Optics. – USA: Academic press, 2001. - 481 p.*
5. *Agrawal G.P. Applications of Nonlinear Fiber Optics. - USA: Academic Press, 2001. – 458.p.*
6. *Alferov Z. I., Andreev V. M., Garbuzov D. Z., Zhilyaev Y. V., Morozov E. P., Portnoi E. L., Trofim V.G. Investigation of the influence of the AlAs-GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous emission at the room temperature// Sov. Phys.-Semicond.- 1971. - Vol.4(9). - 1573.-1575. p.*
7. *Banchi L., Presi M., D'Errico A., Contestabile G., Ciaramella E. All-optical 10 and 40 Gbit/s RZ-to-NRZ format and wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers// J. Lightwave Technol. – 2010. – Vol.28. – 32.-38.p.*
8. *Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R., Erbium-Doped Fiber Amplifiers. Fundamentals and Technology. – USA: Academic Press, 1999. - 481.p.*
9. *Bigo S., Desurvire E., Desruelle B. All-optical RZ-to-NRZ format conversion at 10 Gbit/s with nonlinear optical loop mirror// Electron. Lett. – 1994. – Vol.30. – 1868.-1869.p.*
10. *Binh N. Photonic Signal Processing. Techniques and Applications. – USA: CRC Press, 2008. - 382.p.*
11. *Bob Chomycz. Planning Fiber Optic Networks. – USA:The McGraw-Hill Companies Inc., 2009, 401.p.*
12. *Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Investigation of Minimal Channel Spacing in HDWDM Systems// Electronics and Electrical Engineering, - 2009. – Vol. 4(92) – 53.-56.p.*
13. *Bobrovs V., Ozoliņš O., Ivanovs Ģ., Poriņš J. Viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma ar šaurjoslas filtru// Latvijas patents. - 20.02.2010. - LV-14107. – 1.-8.p.*
14. *Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Selvaraja S. K., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R. Silicon microring resonators// Laser Photonics Rev. – 2012. - Vol.6, - 47.-73.p.*

15. Bragg W.L. *The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal* // *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Magazine.* – 1912. – November. – 43.–57.p.
16. Bulow H. *Electronic equalization of transmission impairments*// *Optical Fiber Communication Conference Proceedings.* - Anaheim, USA, 2002. – 24.-25.p.
17. Cai X.L., Huang D.X., Zhang X.L. *Numerical analysis of polarization splitter based on vertically coupled microring resonator*// *Opt. Exp.* – 2006. – Vol.14. – 11304.–11311.p.
18. Calabretta N., Presi M., Contestabile G., Ghiggino P., Ciaramella E., Cavaliere F., Proietti R. *Optical PON Network Using Passive DPSK Demodulation*// *US Patent Application Publication.* - 09/23/2010. - US 2010/0239258 A1. – 1.-9.p.
19. California Eastern Laboratories NEC Inc. *1550 nm InGaAsP MQW-DFB laser diode module CW light source for DWDM applications*// *Data Sheet.* - 2002. – Vol.1. - 1.-5.p.
20. Caspar C., Foisel H.M., Helmolt C.V., Strebel B., Sugaya Y. *Comparison of cascadability performance of different types of commercially available wavelength (de)multiplexers* // *Electron. Lett.* – 1997. – Vol.33. – 1624.–1626.p.
21. Cerutti I., Fumagalli A., Rajagopalan R., Barros R., Rossi S. *Impact of Polarization Mode Dispersion in Multi-Hop and Multi-Rate WDM Rings*// *Photonic Network Communications.* - 2003. - Vol.5. - 259.-271.p.
22. Chen D.Z., Xia T.J., Wellbrock G., Mamyshev P., Penticost S., Grosso G., Puc A., Perrier P., Fevrier H. *New Field Trial Distance Record of 3040 km on Wide Reach WDM With 10 and 40 Gb/s Transmission Including OC-768 Traffic Without Regeneration*// *J. Lightwave Technol.* – 2007. – Vol.25. – 28.-37.p.
23. Chen W. *Circuit Analysis and Feedback Amplifier Theory.* - USA: CRC Press, 2006. – 365.p.
24. Chen W. *Passive, Active and Digital Filters.* - USA: CRC Press, 2009. – 829.p.
25. Chow C.W., Wong C.S., Tsang H.K. *All-optical RZ to NRZ data format and wavelength conversion using an injection locked laser*// *Opt. Commun.* – 2003. – Vol.223. – 309.-313.p.
26. Chraplyvy A., Gnauck A., Tkach R. W., Derosier R. M. *8×10 Gb/s transmission through 280 km of dispersion-managed fiber*// *IEEE Photonics Technology Letters.* - 1993. - Vol.5. - 1233.-1235.p.
27. Cisco Systems. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2011–2016*// *White paper.* – 2012. – Vol.1. – 1.-16.p.

28. Cohen L.G. *Comparison of single-mode fiber dispersion measurement techniques //J. Lightwave Technol.* – 1985. – Vol.3. – 958.-966.p.
29. Connelly M.J. *Semiconductor Optical Amplifiers.* – USA: Boston, Springer-Verlag, 2002. – 169.p.
30. Dennis T., Williams P.A. *Achieving High Absolute Accuracy for Group-Delay Measurements Using the Modulation Phase-Shift Technique// J. Lightwave Technol.* – 2005. Vol.23(11). - 3748.-3754.p.
31. Derickson D. *Fiber Optic Test and Measurement.* – USA: Prentice Hall, 1998. – 642.p.
32. Ding Y., Hu H., Galili M., Xu J., Liu L., Pu M., Hansen Mulvad H.C., Katsuo Oxenløwe L., Peucheret C., Jeppesen P., Zhang X., Huang D., Ou H. *Generation of a 640 Gbit/s NRZ OTDM signal using a silicon microring resonator// Opt. Express.* – 2011. – Vol.19. – 6471.-6477.p.
33. Ding Y., Xu J., Peucheret C., Pu M., Liu L., Seoane J., Ou H., Zhang X., Huang D. *Multi-Channel 40 Gbit/s NRZ-DPSK Demodulation Using a Single Silicon Microring Resonator// J. Lightwave Technol.* – 2011. – Vol.29. – 677.-684.p.
34. Ding Y.H., Peucheret C., Pu M.H., Zsigri B., Seoane J., Liu L., Xu J., Ou H.Y., Zhang X.L., Huang D.X. *Multi-channel WDM RZ-to-NRZ format conversion at 50 Gbit/s based on single silicon microring resonator// Opt. Express.* – 2010. – Vol.18. – 21121.– 21130.p.
35. Dutta A.K., Dutta N.K., Fujiwara M. *WDM Technologies: Passive Optical Components.* – USA: Academic Press. 2003. – 551.p.
36. Ferrari C., Canciamilla A., Morichetti F., Sorel M., Melloni A. *“Penalty-free transmission in a silicon coupled resonator optical waveguide over the full C-band// Opt. Lett.* - 2011. – Vol.36. – 3948.-3950.p.
37. Folland G. B. *The Fourier analysis and its applications.* – USA: Wadsworth, 1992. - 441.p.
38. Funabashi M., Hiraiwa K., Koizumi S., Yamanaka N., Kusakawa A. *Low operating current 40 mW PM fiber coupled DFB laser modules for externally modulated 1550 nm WDM sources// European Conference on Optical Communications Proceedings.* - Amsterdam, Netherlands, 2001. – 122.-123.p.
39. G. Lenz, B. J. Eggleton, C.K. Madsen, C. R. Giles, and G.Nykolak *Optimal dispersion of optical filters for WDM systems // IEEE Photon. Technol. Lett.* – 1998 – Vol.10. – 567.– 569.p.

40. Ghafouri–Shiraz H. *Distributed Feedback Laser Diodes and Optical Tunable Filters.* – Great Britain: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 317.p.
41. Ghatak A., Thyagarajan K. *Introduction to fiber optics.* – UK: Cambridge University Press. 2008. - 565.p.
42. Ghosh B., Mukhopadhyay S. *All-Optical Wavelength encoded NAND and NOR Operations exploiting Semiconductor Optical Amplifier based Mach Zehnder Interferometer Wavelength Converter and Phase Conjugation System// Optics and Photonics Letters.* – 2011. - Vol.4(2). – 1.–9.p.
43. Giles C. R., Desurvire E. *Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber amplifiers// IEEE Journal of Lightwave Technology.* - 1991. - Vol.9. - 271.-283.p.
44. Gnauck A., Korotky K., Veselka J., Nagel J., Kemmerer T., Minford J., Moser T. *Dispersion penalty reduction using an optical modulator with adjustable chirp// IEEE Photonics Technology Letters.* - 1991. - Vol.3. - 916.-918.p.
45. Gnauck A.H., Chandrasekhar S., Leuthold J., Stulz L. *Demonstration of 42.7 Gb/s DPSK receiver with 45 photons/bit sensitivity// IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2003. – Vol.15. – 99.–101.p.
46. Gonzalo J.A., López C.A. *Great Solid State Physicists of the 20th Century.* – USA: World Scientific. 2003. - 394.p.
47. Groumas P., Katopodis V., Kouloumentas C., Bougioukos M., Avramopoulos H. *All-optical RZ-to-NRZ conversion of advanced modulated signals// IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2012. – Vol.24. – 179.-181.p.
48. Guizani M., Battou A. *Optical Switching/Networking and Computing for Multimedia Systems - USA: Marcel Dekker, Inc., 2002.* – 519.p.
49. Guy M., Trepanier F. *Chirped fiber Bragg gratings equalize gain// Optoelectronics World.* – 2001. – March. – 77.-82.p.
50. Haken H. *Laser light dynamics.* – Amsterdam: North-Holland physics publishing, 1985. – 336.p.
51. Hansen Mulvad H.C., Galili M., Oxenløwe L.K., Hu H., Clausen A., Jensen J.B., Peucheret C., Jeppesen P. *Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single-wavelength channel// Optics Express.* - 2010. – Vol.18(2). – 1438.-1443.p.
52. Hayashi I., Panish M.B., P.W. Foy, Sumski S. *Junction lasers which operate continuously at room temperature//Appl. Phys. Lett.* - 1970. - Vol.17. - 109.-111.p.

53. Hecht J. *Recycled Fiber Optics, How Old Ideas Drove New Technology*// *Optics and Photonics News*. – 2012. - Vol.23(2). – 22.-29.p.
54. Henmi N., Saito T., Ishida T. *Prechirp technique as a linear dispersion compensation for ultrahigh speed long-span intensity modulation directed detection optical communication systems*// *Journal of Lightwave Technology*. - 1994. - Vol.12. – 1706.-1719.p.
55. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. *Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication* // *Appl. Phys. Lett.* – 1978. – Vol.32(10). – 647.-649.p.
56. Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. - London: Elsevier Academic Press, 2009. 630.p.
57. Ito T., Machida S., Ikegami T., Ohara S. *Optical-transmission experiment at 400 mb/s using a graded-index fibre* // *Electronics Letters*. – 1975. – Vol.11(16). – 375. -376.p.
58. ITU-T G.652 *Characteristics of a single-mode optical fibre cable*. - 2002. – 1.-24.p.
59. ITU-T G.694.1 *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. - 2002. – 1.-14.p.
60. Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Ozoliņš O.**, Poriņš J. *Realization of HDWDM Transmission System* // *International Journal of Physical Sciences*. - 5. (2010) -452.-458.p.
61. Jeruchim M.C., Balaban P., Shanmugan K.S. *Simulation of Communication Systems. Second Edition - USA: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 907.p.*
62. Juma S. *Bragg gratings boost data transmission rates* // *Laser Focus World*. – 1996. – November. – 5.-9.p.
63. Kaminow I. P., Li T., Willner A. E. *Optical Fiber Telecommunications VB. Systems and Networks*. – USA: Elsevier, 2008, - 915.p.
64. Kao K. C., Hockham G. A. *Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*// *Proceedings IEE*. - 1966. - Vol.113.- 1151.–1158.p.
65. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings - USA: Academic Press, 1999. – 458.p.*
66. Keiser G. *FTTX Concepts and Applications*. – USA: John Wiley & Sons, 2007, - 293.p.
67. Khosravani R., Willner A. *System Performance Evaluation in Terrestrial Systems with High Polarization Mode Dispersion and the Effect of Chirping*// *IEEE Photonics Technology Letters*. - 2001. - Vol.13. - 296.-298.p.

68. Khrais N.N., Elrefaie A.F., Wagner R.E. Performance degradations of WDM systems due to laser and optical filter misalignments// *Electronics Letters*. – 1995. - Vol.31(5). – 1179.-1180.p.
69. Khrais N.N., Shehadeh F., Chiao J.C., Vodhanel R.S., Wagner R.E. Multiplexer eye-closure penalties for 10 Gb/s signals in WDM networks // *Optical Fiber Communications Conference Proceedings*. - San Jose, California, USA, 1996. 1.-2.p.
70. Kogelnik H. High-capacity optical communications// *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. - 2000. - Vol.6. – 1279.-1286.p.
71. Kogelnik H. High-speed lightwaves transmission in optical fibers// *Science*. - 1985. - Vol.228, - 1043.-1048.p.
72. Kreiss J., Troppenz U., Rehbein W., Hutt B., Lenz E., Venghaus H. High single-mode-yield multiple-wavelength DFB-laser arrays in the 1.55 μm range// *European Conference on Optical Communications Proceedings*. - Amsterdam, Netherlands, 2001. – 118.-119.p.
73. Kuznetsov M., Froberg N.M., Henion S.R., Rauschenbach K.A. Power Penalty for Optical Signals Due to Dispersion Slope in WDM Filter Cascades// *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1999. - Vol.11(11). – 1411.-1413.p.
74. Lali-Dastjerdi Z., **Ozoliņš O.**, An Y., Cristofori V., Da Ros F., Kang N., Hu H., Hansen Mulvad H., Rottwitt K., Galili M., Peucheret C. Demonstration of Cascaded In-Line Single-Pump Fiber Optical Parametric Amplifiers in Recirculating Loop Transmission // *European Conference on Optical Communications (ECOC) 2012: Proceedings, Nīderlande, Amsterdam, 16.-20. septembris, 2012*. - 1.-3.p.
75. Laude J.P. *DWDM Fundamentals, Components, and Applications* - London: Artech House, 2002. – 282.p.
76. Lee B.G., Small B.A., Bergman K., Xu Q., Lipson M. Transmission of high-data-rate optical signals through a micrometer-scale silicon ring resonator// *Opt. Lett.* – 2006. – Vol.31. – 2701.-2703.p.
77. Lens G., Adams L.E. Dispersion and crosstalk of optical minimum phase filters in wavelength division multiplexed systems // *Optical Fiber Communication Conference Proceedings*. - San Diego, CA, 1999. – 168.-170.p.
78. Lenz G., Eggleton B.J., Giles C.R., Madsen C.K., Slusher R.E. Dispersive properties of optical filters for WDM systems // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1998. – Vol.34. – 1390.-1402.p.

79. Lenz G., Nykolak G., Eggleton B.J. *Dispersion Of Optical Filters In WDM Systems: Theory And Experiment// European Conference on Optical Communications Proceedings.* - Madrid, Spain, 1998. – 271.-272.p.
80. Lin C., Kogelnik H., Cohen L. G. *Optical pulse equalization and low dispersion transmission in single-mode fibers in the 1.3-1.7 μm region// Optics letters.* - 1980. – 476.-478.p.
81. Liu F.F., Wang T., Qiang L., Ye T., Zhang Z.Y., Qiu M., Su Y.K. *Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator// Opt. Express.* – 2008. – Vol.16. – 15880.–15886.p.
82. Lyubomirsky I., Chien C.C. *DPSK Demodulator Based on Optical Discriminator Filter// Photonics Technology Letters.* – 2005. – Vol.17(2). – 492.–494.p.
83. Lyubomirsky, I. *Advanced modulation Formats for Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing// White paper.* - 2007. – Vol.1. – 1.–14.p.
84. Ľašuks I., Ščemeļevs A., **Ozoliņš O.** *Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // Electronics and Electrical Engineering.* - 5. (2008) 45.-48.p.
85. Macleod H.A.. *Thin-Film Optical Filters. Third edition.* - Bristol: J.W. Arrow-smith Ltd. Institute of Physics Publishing, 2001. – 641.p.
86. Madsen C.K., Zhao J.H. *Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach.* – USA: New York, 1999. – 432.p.
87. Melloni A., Martinelli M, Cusmai G., Siano R. *Experimental evaluation of ring resonator filters impact on the bit error rate in non-return to zero transmission systems// Opt. Commun.* – 2004. –Vol.234. – 211.-216.p.
88. Meltz G. Morey W.W., Glenn W.H. *Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method //Opt. Lett.* – 1989. – Vol.14(15). – 823.-825.p.
89. Mitra P.P., Stark J.B. *Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications// Letters to Nature.* – 2001. - Vol.411. – 1027.–1030.p.
90. Miya T., Terunuma Y., Hosaka T., Miyashita T. *Ultimate low-loss singlemode fibre at 1.55 μm // Electron. Lett.*- 1979. - Vol.15. - 106.-108.p.
91. Mizuochi T., Ishida K., Kobayashi T., Abe J., Kinjo K., Motoshima K., Kasahara K. *A comparative study of DPSK and OOK WDM transmission over transoceanic distances and their performance degradations due to nonlinear phase noise// J. Lightwave Technol.* – 2003. – Vol.21. – 1933.–1943.p.
92. Mukherjee B. *Optical WDM Networks.* – USA: Springer, 2006. – 973.p.

93. Niemi T., Uusimaa M., Ludvigsen H. Limitations of the phase shift method in measuring dense group delay ripple in fiber Bragg gratings// *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001. - Vol.13(12) – 1334.-1336.p.
94. Nykolak G., Eggleton B.J., Lenz G., Strasser T.A. Dispersion Penalty Measurements of Narrow Fiber Bragg Gratings at Gb/s// *IEEE Photon. Tech. Lett.* – 1998. – Vol.10. – 1319.-1321.p.
95. Oda S., Tanimura T., Cao Y., Hoshida T., Akiyama Y., Nakashima H., Ohshima C., Sone K., Aoki Y., Yan M., Tao Z., Rasmussen J.C., Yamamoto Y., Sasaki T., 80×224 Gb/s Unrepeated Transmission over 240 km of Large-Aeff Pure Silica Core Fibre without Remote Optical Pre-amplifier// *European Conference on Optical Communications Proceedings*. – Geneva, Switzerland, 2011. – 1.-3.p.
96. Othonos A., Kalli K., *Fiber Bragg Gratings*. – UK: Norwood, Artech House, 1999. - 422.p.
97. Otte S., Rosenkranz W. Performance of electronic compensator for chromatic dispersion and SPM// *European Conference on Optical Communications Proceedings*. - Munich, Germany, 2000. – 117.-118.p.
98. **Ozoliņš O.**, An Y., Lali-Dastjerdi Z., Ding Y., Bobrovs V., Ivanovs Ģ., Peucheret C. Cascadability of Silicon Microring Resonators for 40-Gbit/s OOK and DPSK Optical Signals// *Asia Communications and Photonics Conference Proceedings*. – Guangzhou (Canton), China, 2012. – 1.-3.p.
99. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V. Investigation of Flat-Top BPF Usability in Amplified Fiber Optical Systems // *Developments in Optics and Communications 2009 Book of Abstracts*, Latvia, Riga, April 24-26, 2009. - 24-24.p.
100. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V. Research of Fiber Bragg Gratings in WDM Technologies for Broadband Access// *Optics & High Technology Material Science Scientific works*, - Ukraine, Kiev, 2010. - 158.-159.p.
101. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. DWDM Transmission Based on the Thin-Film Filter Technology// *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2011. – Vol.3. – 55.-65.p.
102. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. DWDM-Direct Access System Based on the Fiber Bragg Grating Technology// *8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing Proceedings*. - Poland, Poznan, 2012. - 1.-4.p.

103. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ.** DWDM-Direct System with FBG Technology for New-Generation Optical Access// *IEEE Swedish Communication Technologies Workshop Proceedings*. - Sweden, Stockholm, 2011. - 10.-10.p.
104. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ.** Efficient Bandwidth Measurements of Fiber Bragg Gratings for Next-Generation Optical Access// *Optics & High Technology Material Science Scientific Works*. - Ukraine, Kiev, 2011. - 233.-234.p.
105. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ.** Efficient Bandwidth Measurements of Thin Film Filters for Next-Generation Optical Access// *PGNet2011 Conference Proceedings*. – Great Britain, Liverpool, 2011. - 275.-280.p.
106. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ.** Efficient Bandwidth of 50 GHz Fiber Bragg Grating for New-Generation Optical Access// *19th IEEE Telecommunications Forum*. - Serbia, Belgrade, 2011. - 816.-819.p.
107. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ.** Efficient Wavelength Filters for DWDM Systems// *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2010. – Vol.6. - 47.-58.p.
108. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ.** Evaluation of Optical Filters for DWDM-Direct in Next Generation Optical Access// *Developments in Optics and Communications Book of Abstracts*. - Latvia, Riga, 2011. - 42.-43.p.
109. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Ivanovs Ģ., Lasuks I.** New-Generation Optical Access System Based on the Thin Film Filter Technology// *International Journal of the Physical Sciences*. – 2011. – Vol.6(35). - 7926.-7934.p.
110. **Ozoliņš O., Bobrovs V., Spolītis S., Udaļcovs A., Ivanovs Ģ.** Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma// *Latvijas patenta pieteikums*. - 31.05.2012. - P-12-90. 1.-8.p.
111. **Ozoliņš O., Ivanovs Ģ.** Estimation of DWDM Transmission for Broadband Access with FBG Technology // *Electronics and Electrical Engineering*. - 5. (2011) 11.-14.p.
112. **Ozoliņš O., Ivanovs Ģ.** Estimation of Optical Filter Narrowing in High Speed WDM Systems // *Developments in Optics and Communications 2010 Book of Abstracts*, Latvia, Riga, April 23-25, 2010. - 41.-41.p.
113. **Ozoliņš O., Ivanovs Ģ.** Evaluation of Band-Pass Filters Influence on NRZ Signal in HDWDM Systems // *Electronics and Electrical Engineering*. - 4. (2010) 65.-68.p.
114. **Ozoliņš O., Ivanovs Ģ.** New Generation Access System Based On DWDM-Direct With 55 GHz Fiber Bragg Grating // *Developments in Optics and Communications 2012: Book of Abstracts*, Latvija, Rīga, 12.-14. aprīlis, 2012. - 80.-81.p.

115. **Ozoliņš O.**, Ivanovs G. *Realization of Optimal FBG Band-Pass Filters for High Speed HDWDM // Electronics and Electrical Engineering. - 4. (2009) 41.-44.p.*
116. **Ozoliņš O.**, Bobrovs, V., Ivanovs, G. *Investigation into the potentialities of quasi-rectangular optical filters in HDWDM systems// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2010. – Vol.1. – 17.-29.p.*
117. Pan J.J. *Thin films improve 50-GHz DWDM devices// Laser Focus World Magazine. – 2002. – May. – 111.-116.p.*
118. Pan J.J., Shi Y. *Combining gratings and filters reduces WDM channel spacing //Optoelectronics World. – 1998. – September. – 11.-17.p.*
119. Peucheret C., Ding Y., Ou H., Xiong M., An Y., Lorences Riesgo A., Xu J., **Ozoliņš O.**, Hu H., Galili M., Huang B., Pu M., Ji H., Seoane J., Liu L., Zhang X. [Invited] *Linear Signal Processing Using Silicon Micro-Ring Resonators // International Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM 2012-IONT): Proceedings, K̄ina, Wuhan, 1.-2. novembris, 2012. - 1.-1.p.*
120. Peucheret C., Palle J. *Fibre and component induced limitations in high capacity optical networks. Doctoral thesis. – Denmark: Technical University of Denmark, 2004. - 274.p.*
121. Pfennigbauer M., Winzer P. J. *Choice of MUX/DEMUX filter characteristics for NRZ, RZ, and CSRZ DWDM systems // Lightwave Technology. – 2006. –Vol.24(4). - 1689.-1696.p.*
122. Rabus D.G. *Integrated Ring Resonators: The Compendium. – USA:Springer, 2007. – 272.p.*
123. Reddy S., Taira L., Resso M. *Signal Integrity Concerns when Modulating Laser Transmitters at Gigabit Rates// Optical Design Conference Proceedings, 2002. - Vol.1. -1-15.p.*
124. Richter T. Palushani E., Schmidt-Langhorst C., Nolle M., Ludwig R., Schubert C., *Single Wavelength Channel 10.2 Tb/s TDM-Data Capacity using 16-QAM and Coherent Detection// National Fiber Optic Engineers Conference proceedings. - Los Angeles, California, USA, 2011. – 1.-3.p.*
125. Roudas I., Antoniadis N., Wagner R.E., Garrett L.D. *Influence of realistic optical filter characteristics on the performance of multiwavelength optical networks //IEEE Journal of Lightwave technology. - 1997. - Vol.97. – 542.-543.p.*
126. RSoft Design Group, Inc. *OptSim Sample mode. – USA, 2008. – 21.-26.p.*

127. Sanferrare R.S. *Terrestrial lightwave systems// AT&T Technology journal.* - 1987. - Vol.66. - 95.-107.p.
128. Sano A., Masuda H., Kobayashi T., Fujiwara M., Horikoshi, K., Yoshida, E., Miyamoto, Y., Matsui M., Mizoguchi M., Yamazaki H., Sakamaki Y., Ishii, H. *69.1-Tb/s (432 × 171-Gb/s) C- and extended L-band transmission over 240 km Using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection// Optical Fiber Communication Conference Proceedings.* - San Diego, CA, 2010. – 1.-3.p.
129. Sano A., Miyamoto Y., Kuwahara S., Tobo H. *A 40 Gb/s/ch WDM Transmission with SPM/XPM Suppression Through Prechirping and Dispersion Management// Journal of Lightwave Technology.* - 2000. - Vol.18. - 1519.-1527.p.
130. Singer W., Totzeck M., Gross H. *Handbook of Optical Systems.- Germany: Wiley-vch Verlag Gmbh & Co., 2005. – 690.p.*
131. Siracusa D., Linzalata V., Maier G., Pattavina A., Ye Y., Chen M. *Hybrid architecture for optical interconnection based on micro ring resonators// Global Telecommunications Conference Proceedings. – Huston, Texas, USA, 2011. – 1.-5.p.*
132. Sivarajan R., Ramaswami K.N. *Optical Networks: A Practical Perspective.* – USA: Elsevier. 2010. – 893.p.
133. Stenzel O. *The Physics of Thin Film Optical Spectra. An Introduction.* - Germany: Springer, 2005. – 275.p.
134. Takaki K., Kise T., Maruyama K., Hiraiwa K., Yamanaka N., Funabashi M., Kasukawa A. *High power CW-DFB LDs for optical communications// Furukawa review.* - 2003. - Vol.23. – 1.-5.p.
135. Takara H., Sano A., Kobayashi T., Kubota H., Kawakami H., Matsuura A., Miyamoto Y., Abe Y., Ono H., Shikama K., Goto Y., Tsujikawa K., Sasaki Y., Ishida I., Takenaga K., Matsuo S., Saitoh K., Koshiha M., and Morioka T. *1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency// European Conference on Optical Communications Postdeadline Papers.* - Amsterdam, Netherlands, 2012. – Th.3.C.1. - 1.-3.p.
136. Thyagarajan, K., Ghatak, A., *Fiber Optic Essentials – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 259.p.*
137. Tomkos I., Hesse R., Antoniadou N., Boskovic A. *Impact of filter concatenation on the performance of metropolitan area optical networks utilizing directly modulated lasers// Optical Fiber Communication Conference Proceedings.* - Anaheim, CA, 2001. – 1.-3.p.

138. Venghaus H. *Wavelength Filters in Fiber Optics*. – USA: Springer, 2006. – 472.p.
139. Voges E., Petermann K. *Optical communication technique*. – Germany: Springer, 2002. – 1144.p.
140. Wang Y.H., Lyubomirsky I. *Balanced Detection Schemes for Optical Duobinary Communication Systems*// *J. Lightwave Technol.* – 2011. - Vol.29. – 1739.-1745.p.
141. Weber H.G., Ferber S., Kroh M., Schmidt-Langhorst C., Ludwig R., Marembert V., Boerner C., Futami F., Watanabe S., Schubert C. *Single channel 1.28 Tbit/s and 2.56 Tbit/s DQPSK transmission*// *Electron. Lett.* - 2006. - Vol.42(3). – 178.–179.p.
142. Wedding B., Franz B. *Unregenerated optical transmission at 10 Gbit/s via 204 km of a standard single mode fiber using a directly modulated laser diode*// *Electronics Letters*. - 1993. - Vol.29. - 402.-403.p.
143. Wedding B., Franz B., Junginger B. *10-Gb/s optical transmission up to 253 km via standard single mode fiber using the method of dispersion-supported transmission*// *Journal of Lightwave Technology*. - 1994. - Vol.12. - 1720.-1727.p.
144. Wenke G, Klimmek M. *Consideration on the alpha-Factor of Nonideal, external optical Mach Zehnder Modulators*// *Journal of Optical Communications*. - 1996. - Vol.17. - 42.-48.p.
145. Winzer P.J., Essiambre R.J. *Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*// *J. Lightwave Technol.* – 2006. Vol.24. – 4711.-4728.p.
146. Winzer P.J., Pfennigbauer M., Strasser M.M., Leeb W.R. *Optimum Filter Bandwidths for Optically Preamplified NRZ Receivers*// *J. Lightwave Technol.* - 2001. – Vol.19(9), - 1263.–1273.p.
147. Won S., Lee J., Kim Y., Jeong J. *Performance limits of 10-Gb/s optical Duobinary transmission using reduced bandwidth single-arm Mach Zehnder modulators considering residual chirp and dc-Bias offset*// *IEEE Photonics Technology Letters*. - 2003. - Vol.15. -479.-481.p.
148. Xiong M., Ding Y.H., Zhang Q., Zhang X.L. *All-optical clock recovery from 40 Gbit/s RZ signal based on microring resonators*// *Appl. Opt.* – 2011. – Vol.50. – 5390.-5396.p.
149. Xiong M., **Ozoliņš O.**, Ding Y., Huang B., An Y., Ou H., Peucheret C., Zhang X. *41.6 Gb/s RZ-DPSK to NRZ-DPSK Format Conversion in a Microring Resonator*// *17th Opto-Electronics and Communications Conference Technical Digest*. - Busan, Korea Republic, 2012. - 891.-892.p.

150. Xiong M., **Ozoliņš O.**, Ding Y., Huang B., An Y., Ou H., Peucheret C., Zhang X. *Simultaneous RZ-OOK to NRZ-OOK and RZDPSK to NRZ-DPSK format conversion in a silicon microring resonator*// *Opt. Exp.* – 2012. – Vol. 20, No. 25 – 27263.– 27272.p.
151. Xu J., Ding Y., Peucheret C., Seoane J., Hansen Mulvad H.C., Galili M., Xue W., Mørk J., Jeppesen P. *Demultiplexing of OTDM-DPSK signals based on a single semiconductor optical amplifier and optical filtering*// *Opt. Lett.* – 2011. – Vol.36, - 1560.-1562.p.
152. Xu L., Chan J., Biberman A., Lira H.L.R., Lipson M., Bergman K. *DPSK transmission through silicon microring switch for photonic interconnection networks*// *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2011. – Vol.23. – 1103.-1105.p.
153. Xu L., Wang B.C., Baby V., Glesk I., Prucnal P.R. *All optical data format conversion between RZ and NRZ based on a Mach Zehnder interferometric wavelength converter*// *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2003. – Vol.5. – 308.-310.p.
154. Yariv A. *Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides*// *Electron. Lett.* – 2000. – Vol.36. 321.–322.p.
155. Yi L., Jaouën Y., Hu W., Zhou J., Su Y., Pincemin E. *Simultaneous demodulation and slow light of differential phase-shift keying signals using stimulated-Brillouin-scattering-based optical filtering in fiber*// *Opt. Lett.* – 2007. – Vol.32. – 3182.-3184.p.
156. Yonenaga K., Kuwano S. *Dispersion-tolerant optical transmission system using Duobinary transmitter and binary receiver*// *Journal of Lightwave Technology.* - 1997. - Vol.15. - 1530.-1537.p.
157. Yu Y., Zhang X. L., Huang D.X., Li L.J., Fu W. *20-Gb/s all-optical format conversions from RZ signals with different duty cycles to NRZ signals*// *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2007. – Vol.19. – 1027.–1029.p.
158. Zhang L., Yang J.Y., Song M., Li Y., Zhang B., Beausoleil R.G., Willner A.E. *Microring-based modulation and demodulation of DPSK signal*// *Opt. Express.* – 2007. – Vol.15. – 11564.-11569.p.
159. Zhang Y., Xu, E.M. Huang D.X., Zhang X.L. *All-optical format conversion from RZ to NRZ utilizing microfiber resonator*// *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2009. – Vol.21. – 1202.–1204.p.
160. Zhang Z., Yu Y., Zhang X.L. *Simultaneous all-optical demodulation and format conversion for multi-channel (CS)RZ-DPSK signals*// *Opt. Express* – 2011. – Vol.19. – 12427.-12433.p.

161. Zhu B., Taunay T.F., Fishteyn M., Liu X., Chandrasekhar S., Yan M.F., Fini J.M., Monberg E.M., Dimarcello F.V. *112-Tbit/s Space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 76.8-km seven-core fiber // Optics Express. – 2011. - Vol.19(17). – 16665.-16671.p.*
162. Жирар, А. *Руководство по технологии и тестированию систем WDM – Москва: EXFO, 2001, 264 стр.*
163. Убайдуллаев Р.Р. *Волоконно-оптические сети – Москва: Эко-Трендз, 2001. - 267.стр.*
164. Фриман Р. *Волоконно оптические системы связи. – RU: Москва, 2003. – 590.стр.*

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums. Ziņojumu starptautiskās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos, rakstu konferenču tēžu krājumos, Latvijas patentu, Starptautisko un Latvijas zinātniski pētniecisko projektu saraksts.
2. pielikums. Latvijas patenta „Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma,” LV-14557 apliecības kopija.
3. pielikums. Latvijas patenta „Viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma ar šaurjoslas filtru,” LV-14107 apliecības kopija.
4. pielikums. Doktorantūras prakses rekomendācija no profesora Christophe Peucheret.
5. pielikums. Eksperimentos izmantoto iekārtu tehniskās specifikācijas.

Ziņojumu starptautiskās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos, rakstu konferenču tēžu krājumos, Latvijas patentu, Starptautisko un Latvijas zinātniski pētniecisko projektu saraksts.

Publikācijas **zinātniskajos žurnālos:**

1. Ļašuks I., Ščemeļevs A., **Ozoliņš O.** Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // Electronics and Electrical Engineering. - 5. (2008) 45.-48. lpp.
2. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Realization of Optimal FBG Band-Pass Filters for High Speed HDWDM // Electronics and Electrical Engineering. - 4. (2009) 41.-44. lpp.
3. Bobrovs V., **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Investigation into the Potentialities of Quasi-Rectangular Optical Filters in HDWDM Systems // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 1. (2010) 13.-25. lpp.
4. Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Ozoliņš O.**, Poriņš J. Realization of HDWDM Transmission System // International Journal of Physical Sciences. - 5. (2010) -452.-458. lpp.
5. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient Wavelength Filters for DWDM Systems // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 6. (2010) 47.-58. lpp.
6. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Evaluation of Band-Pass Filters Influence on NRZ Signal in HDWDM Systems // Electronics and Electrical Engineering. - 4. (2010) 65.-68. lpp.
7. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. DWDM Transmission Based on the Thin-Film Filter Technology // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 3. (2011) 55.-65. lpp.
8. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Estimation of DWDM Transmission for Broadband Access with FBG Technology // Electronics and Electrical Engineering. - 5. (2011) 11.-14. lpp.
9. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ., Ļašuks I. New-Generation Optical Access System Based on the Thin Film Filter Technology // International Journal of the Physical Sciences. - 6(35). (2011) 7926.-7934. lpp.
10. Xiong M., **Ozoliņš O.**, Ding Y., Huang B., An Y., Ou H., Peucheret C., Zhang X. Simultaneous RZ-OOK to NRZ-OOK and RZ-DPSK to NRZ-DPSK format conversion in a silicon microring resonator // Optics Express (**2011 ISI Ietekmes faktors: 3.587**). - Vol.20, No.5., (2012) 27263.-27272. lpp.

Raksti pilna teksta **konferenču rakstu krājumos:**

1. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient Bandwidth Measurements of Thin Film Filters for Next-Generation Optical Access // PGNet2011 Conference Proceedings, Lielbritānija, Liverpool, 27.-28. Jūnijs, 2011. - 275.-280. lpp.

2. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient Bandwidth of 50 GHz Fiber Bragg Grating for New-Generation Optical Access // 19th IEEE Telecommunications Forum TELFOR 2011 IEEE Catalog number: CFP1198P-CDR, Serbija, Belgrade, 22.-24. Novembris, 2011. - 816.-819. lpp.
3. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. DWDM-Direct Access System Based on the Fiber Bragg Grating Technology // 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP'12): Proceedings, Polija, Poznan, 18.-20. Jūlijs, 2012. - 1.-4. lpp.
4. Xiong M., **Ozoliņš O.**, Ding Y., Huang B., An Y., Ou H., Peucheret C., Zhang X. 41.6 Gb/s RZ-DPSK to NRZ-DPSK Format Conversion in a Microring Resonator // 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012): Technical Digest, Korejas republika, Busan, 2.-6. Jūlijs, 2012. - 891.-892. lpp.
5. Lali-Dastjerdi Z., **Ozoliņš O.**, An Y., Cristofori V., Da Ros F., Kang N., Hu H., Hansen Mulvad H., Rottwitt K., Galili M., Peucheret C. Demonstration of Cascaded In-Line Single-Pump Fiber Optical Parametric Amplifiers in Recirculating Loop Transmission // European Conference on Optical Communications (ECOC) 2012: Proceedings, Nīderlande, Amsterdam, 16.-20. Septembris, 2012. - 1.-3. lpp.
6. **Ozoliņš O.**, An Y., Lali-Dastjerdi Z., Ding Y., Bobrovs V., Ivanovs Ģ., Peucheret C. Cascadability of Silicon Microring Resonators for 40 Gbit/s OOK and DPSK Optical Signals // Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2012: Proceedings, Ķīna, Guangzhou (Canton), 7.-10. Novembris, 2012. - 1.-3. lpp.

Raksti konferenču tēžu krājumos:

1. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V. Investigation of Flat-Top BPF Usability in Amplified Fiber Optical Systems // Developments in Optics and Communications 2009 Book of Abstracts, Latvija, Rīga, 24.-26. Aprīlis, 2009. - 24.-24.lpp.
2. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Estimation of Optical Filter Narrowing in High Speed WDM Systems // Developments in Optics and Communications 2010 Book of Abstracts, Latvija, Rīga, 23.-25. Aprīlis, 2010. - 41.-41.lpp.
3. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V. Research of Fiber Bragg Gratings in WDM Technologies for Broadband Access // Optics & High Technology Material Science SPO 2010 Scientific works, Ukraina, Kijeva, 21.-24. Oktobris, 2010. - 158.-159. lpp.
4. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Evaluation of Optical Filters for DWDM-Direct in Next Generation Optical Access // Developments in Optics and Communications 2011 Book of Abstracts, Latvia, Riga, April 28-30, 2011. - 42.-43. lpp.

5. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient bandwidth measurements of fiber Bragg gratings for next-generation optical access // Optics & High Technology Material Science SPO 2011 Scientific works, Ukraina, Kijeva, 27.-30. Oktobris, 2011. - 233.-234. lpp.
6. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. DWDM-Direct System with 50 GHz FBG for New-Generation Optical Access // IEEE Swedish Communication Technologies Workshop Conference Proceedings, Zviedrija, Stokholma, 19.-21. Oktobris 2011. - 10.-10. lpp.
7. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. New Generation Access System Based On DWDM-Direct With 55 GHz Fiber Bragg Grating // Developments in Optics and Communications 2012: Book of Abstracts, Latvija, Rīga, 12.-14. Aprīlis, 2012. - 80.-81. lpp.
8. Peucheret C., Ding Y., Ou H., Xiong M., An Y., Lorences Riesgo A., Xu J., **Ozoliņš O.**, Hu H., Galili M., Huang B., Pu M., Ji H., Seoane J., Liu L., Zhang X. **[Invited]** Linear Signal Processing Using Silicon Micro-Ring Resonators // International Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM 2012-IONT): Proceedings, Ķīna, Wuhan, 1.-2. Novembris, 2012. - 1.lpp.

Latvijas **patenti**:

1. Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma, LV-14557;
2. Viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma ar šaurjoslas filtru, LV-14107;

Promocijas darba rezultāti izmantoti 5 Starptautisko un 8 Latvijas zinātniski pētniecisko projektu realizācijai:

Starptautiskie zinātniski pētnieciskie projekti:

1. „Next generation mixed optical wavelength division multiplexing system enforcement.”, Nr. EEZ09AP-42/09, EEZ grant.
2. National Basic Research Program of China, Grant No. 2011CB301704.
3. National Natural Science Foundation of China, Grant No. 61007042.
4. 7th framework program of the European Commission DAPHNE project, ref. 233709.
5. 7th framework program of the European Commission Network of excellence EURO-FOS project, ref. 224402.

Latvijas zinātniski pētnieciskie projekti:

1. „Kombinēto viļņgarumdales blīvēto šķiedru optisko sakaru sistēmu izstrāde”, Nr. FLPP-2011/15, RTU;
2. „Nelineārā optiskā koeficienta mērīšanas metožu izpēte ŠOPS”. Nr. ZP 2010, RTU;
3. „Optiskā signāla polarizācijas stāvokļa noteikšanas metodes ŠOPS”, Nr. ZP2009/6, RTU;

4. „Jaunas elektronisko sakaru tehnoloģijas”, Valsts pētījumu programmas novirziens - elektrosakaru sistēmu drošums un drošība, Nr. V7408.1, RTU;
5. „Trafika apvienošanas izpēte „IP virs WDM tīklos”, Nr. ZP 2008/16, RTU;
6. „Trafika vadības izpēte „dzīsla līdz mājai” optiskajā sakaru sistēmā”, Nr. ZP 2007/13, RTU;
7. „Ātrdarbīgo optisko blīvēšanas sakaru sistēmu izstrāde un novērtējums” Projekta Nr. R7365, RTU;
8. „Spektrāli blīvēto platjoslas pasīvo optisko tīklu realizāciju izpēte” Projekta Nr. ZP-2009/L-27, RTU;

2. pielikums.

Latvijas patenta „Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma,” LV-14557
apliecības kopija.



LATVIJAS REPUBLIKA

Latvijas Republikas Patentu valde apliecina, ka

PATENTS

Nr. 14557

ir piešķirts saskaņā ar Latvijas Republikas Patentu likumu, pamatojoties uz ierakstu Valsts patentu reģistrā un ar šajā dokumentā uzrādītajiem izgudrojuma nosaukumu, autoru, īpašnieku, izgudrojuma aprakstu, zīmējumiem, pretenzijām un kopsavilkumu. Patents ir spēkā Latvijā 20 gadus no 31.05.2012., ja šis termiņš likumā paredzētā gadījumā nebeidzas agrāk.

Rīga

20.12.2012.

Patentu valdes
direktors

R. Berziņš

Latvijas patenta „Viņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma ar šaurjoslas filtru,” LV-14107
apliecības kopija.



LATVIJAS REPUBLIKA

Latvijas Republikas Patentu valde apliecina, ka

PATENTS

Nr. 14107

ir piešķirts saskaņā ar Latvijas Republikas Patentu likumu, pamatojoties uz ierakstu Valsts patentu reģistrā un ar šajā dokumentā uzrādītajiem izgudrojuma nosaukumu, autoru, īpašnieku, izgudrojuma aprakstu, zīmējumiem, pretenzijām un kopsavilkumu. Patents ir spēkā Latvijā 20 gadus no 28.12.2009., ja šis termiņš likumā paredzētā gadījumā nebeidzas agrāk.

Rīga

20.06.2010.

Patentu valdes
direktors

Z. Aumeisters

Doktarantūras prakses rekomendācija no profesora Christophe Peucheret.

DTU Fotonik



03 Mai 2012

Support letter for Oskars Ozolins

It is my great pleasure to hereby express my warm support to Oskars Ozolins from Telecommunications Institute, Riga Technical University. I have been supervising Oskars during his training programme held within the High-speed Optical Communications group, Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, between 15 January and 15 April 2012.

Here, Oskars joined our research activities on the use of silicon micro-ring resonators for high-speed all-optical signal processing. He has been involved in both numerical and experimental studies on the use of such devices for filtering and modulation format conversion. Furthermore, he also contributed to experimental efforts on the use of fibre-optical parametric amplifiers for long-haul transmission applications.

Oskars' background was highly adequate for the research performed in our group. He has a broad knowledge of optical communication principles and measurement techniques, and could easily adapt to our work. He has displayed capacities for both independent simulation work and team-based experimental activities.

Throughout his training, Oskars has shown a very high level of motivation and dedication and is particularly enthusiastic about experimental work. He is always eager to learn new skills and techniques. Furthermore, he is a friendly person to interact with and could seamlessly integrate into our small research team.

His contributions to our research has so far led to the submission of four manuscripts to leading international conferences (one to the OptoElectronics and Communications Conference and three to the European Conference on Optical Communications), including one as first author.

Altogether, his training programme in Denmark can be judged highly successful and it is hoped it will enable us to establish a solid connection with Riga Technical University.

I am convinced Oskars has the background, skills and motivation to perform well in the very demanding world of research and engineering.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'cpeu', written over a horizontal line.

Christophe Peucheret
Associate Professor

REG-no. DK 30 08 09 46

Technical University of Denmark
Department of
Photonics Engineering

Ørsteds Plads
Building 343
DK-2800 Kgs. Lyngby
Denmark

Tel +45 45 25 63 52
Dir. +45 45 25 38 40
Fax +45 45 93 65 81

cpeu@fotonik.dtu.dk
www.fotonik.dtu.dk

Eksperimentos izmantoto iekārtu tehniskās specifikācijas.



Agilent PDLA

Specifications^[a]

Specifications apply to swept mode (if not stated otherwise)

| Group Delay and Differential Group Delay ^[b] | | | |
|--|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| loss ≤ 4 dB | loss ≤ 10 dB | loss ≤ 20 dB, typ. | loss ≤ 30 dB, typ. |
| Relative Group Delay (rGD) Uncertainty ^{[c],[d]} | | | |
| ± 50 fs | ± 100 fs | ± 350 fs | ± 4 ps |
| Relative Group Delay (rGD) Repeatability ^{[c],[d]} | | | |
| ± 30 fs | ± 50 fs | ± 300 fs | ± 3.5 ps |
| Differential Group Delay (DGD) Uncertainty ^{[e],[f]} | | | |
| ± 100 fs ± 2.5% of DGD | ± 150 fs ± 3% of DGD | ± 500 fs ± 2% of DGD | ± 5 ps ± 12% of DGD |
| Differential Group Delay (DGD) Repeatability ^{[e],[f]} | | | |
| ± 50 fs ± 1% of DGD | ± 100 fs ± 2% of DGD | ± 350 fs ± 1.5% of DGD | ± 3.5 ps ± 12% of DGD |
| PMD Uncertainty (typical) ^{[e],[f],[h]} | | | |
| ± 70 fs ± 2% of PMD | ± 100 fs ± 2% of PMD | ± 300 fs ± 2% of PMD | ± 3 ps ± 4% of PMD |
| Modulation Frequency Range | | 5 MHz to 2.5 GHz | |

[a] Ambient temperature change max. ± 0.5°C since normalization. TLS maximum power set to 0 dBm. Sweep over specified wavelength range. Specification does not include instability in test device. Specified loss ranges include loss of test device and any additional switches or connections in the optical path. Specification valid on day of calibration.

[b] Modulation frequency $f_{\text{mod}} = 2$ GHz. IFBW = 70 Hz, wavelength increment = 1 nm, PDA correction ON.
Note: for modulation frequencies, f_{mod} different from 2 GHz, uncertainties typically scale by the factor "2 GHz/ f_{mod} ".

[c] GD/CD Swept Mode.

[d] Based on phase measurement uncertainties and modulation frequency uncertainty.
For rGD $\gg 1000$ ps add ± 10⁻⁶ of rGD (contribution from modulation frequency uncertainty).

[e] DGD/PDL Swept Mode using 6 polarization states.

[f] Tested with a set of fibers (SMF and PMF) covering a range of DGD values. Specification is typical for DGD > 50ps.

[h] Averaged over 50 nm wavelength span with wavelength increment ≤ 1 nm.



ANDO 6317B OSA

| | |
|--------------------------------|---|
| Applicable fibers | SMF GI (50/125 Nm) |
| Measurement wavelength range ① | 600 to 1750 nm |
| Wavelength accuracy ①, ② | ±0.02nm (1520 to 1580nm, after calibration with build-in reference light source) ±0.04 nm 91580 to 1620nm, after calibration with build-in reference light source) ±0.5 nm (600 to 1750nm) |
| Wavelength linearity ①, ② | ±0.01nm (1520 to 1580nm) ±0.02nm (1580 to 1620nm) |
| Wavelength repeatability ①, ② | ±0.005 nm (1 min) |
| Wavelength resolution ①, ② | Max. resolution: 0.015nm or better 91520 to 1620nm, resolution setting: 0.01nm Resolution setting: 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0nm |
| Resolution accuracy ①, ② | ±5 % (1300 to 1650nm, resolution: 0.05nm or more, resolution correction: ON) |
| Measurement level range ①, ② | -90 to +20dBm (1200 to 1650nm, sensitivity: HIGH3) -80 to +20 dBm (1000 to 1200nm, sensitivity: HIGH3) -60 to +20 dBm (600 to 1000nm, sensitivity: HIGH3) |
| Level accuracy ①, ② | ±0.3 dB (1310/1550nm, input: -30dBm, sensitivity: HIGH 1-3) |
| Level linearity ①, ② | ±0.05 dB (input: +10 to -50 dBm, sensitivity: HIGH1-3) |
| Level flatness ①, ② | ±0.1 dB (1520 to 1580 nm), ±0.2 dB (1580 to 1620nm) |
| Polarization dependency ①, ② | ±0.05 dB (1550/1600nm), ±0.05 dB typ. (1310nm) |
| Dynamic range ① | 60 dB (1523nm, peak ±0.2nm, resolution: 0.01nm) 70 dB (1523nm, peak ±0.4nm, resolution: 0.01nm) 45 dB (1523nm, peak ±0.2nm, resolution: 0.1nm) |
| Sweep time | Approx. 500 ms (Span: 100nm or less, sensitivity: NORM, HOLD, ave.: 1, 501 samples, resolution correction: OFF) Approx. 0.5 min (Span: 100nm or less, sensitivity: HIGH2, ave.: 1, 501 samples, NO signal) |
| Function | Automatic measurement function Setting of measurement conditions Program function (920 program, 200 steps), Long term measurement function Span setting: 0 to 1200nm Measuring sensitivity setting: NORMAL HOLD/AUTO, MID, HIGH 1/2/3 Number of averaging setting: 1 to 1000 times Sample number setting: 11 to 20001, AUTO Automatic setting function of measurement conditions 0nm sweep function Pulse light measurement function TLS synchronized measurement function |

Notes:

- ① Horizontal scale: wavelength display mode
- ② Vertical scale: absolute power display mode, resolution: 0.05nm or more,

| | | |
|--------------------------|---------------------------------|---|
| Function | Trace display | Level scale setting: 0.1 to 10 dB/div, linear Simultaneous display of 3 independent traces Max./Min. hold display Roll averaging display Calculation-between-traces display Normalized display Curve-fit display 3D display Split display Power density display, % display, dB/km display Frequency display of horizontal axis scale |
| | Data analysis | WDM waveform analysis (Wavelength/Level/SNR list display), Optical fiber amplifier analysis (GAIN/NF, Single/Multi channel), PMD analysis, Optical filter analysis, DFB-LD analysis, FP-LD analysis, SMSR analysis, Peak search, spectral width search, notch width search Delta marker (max. 200), line marker (analysis range specification) Graph display of long-term measurement result |
| Memory | Others | Self-wavelength calibration function using built-in reference light source Wavelength/Level compensation function, label function, help function |
| | Build-in FDD Internal memory | 3.5-inch 2HD 32 traces, 20 programs |
| | File format | Trace file, program file, measuring condition file, Text file (trace, analysis data, etc.), Graphics file (BMP, TIFF) |
| Data output | Printer | Built-in high speed printer |
| Interface | Remote control | GP-IB (2 ports) TLS control interfaces (TTL) |
| | Others | Sweep trigger input (TTL) Sample enable input (TTL) Sample trigger input (TTL) Analog output (0 to 5 V) Video output (VGA) |
| Display | | 9.4-inch color LCD (Resolution: 640×480 dots) |
| Optical connector | | FC (Standard) |
| Power requirements | | AC 100 to 120/200 to 240 V, 50/60 Hz |
| Environmental conditions | | Operating temperatures: 5 to 40°C Storage temperature: -10 to +50°C Humidity: 80%RH or less (No condensation) |
| Dimensions and mass | | Approx. 425 (W) × 222 (H) × 450 (D) mm, approx. 30 kg |



Advantest Q8384 optiska spektra analizators

Main Features Advantest Q8384:

- Wavelength measurement range: 600 to 1700 nm;
- Wavelength measurement accuracy: ≤ 20 pm;
- Wavelength measurement linearity: ≤ 10 pm;
- Wavelength measurement repeatability: ≤ 3 pm;
- Power measurement range: - 87 to + 23 dBm;
- Power measurement accuracy: ≤ 0.4 dB;
- Power measurement linearity: ≤ 0.05 dB;
- Power measurement repeatability: ≤ 0.2 dB;
- Flatness: ≤ 0.2 dB;
- Polarization dependency: ≤ 0.05 dB;
- Dynamic range: > 60 dB;
- Measurement time: ≤ 500 ms;
- Internal adapting fiber: 9.5/125 μ m SM fiber;
- Reflective attenuation: > 35 dB;
- Connector: FC;
- Option: Light source for wavelength calibration with EE-LED, $> - 45$ dBm/nm;
- Operating temperature: + 10° to +40° C;
- Power supply: AC 220-240 V, 50/60 Hz;
- Dimensions: 424x221x500;
- Mass: ≤ 29 kg.



Agilent 8163 VCSEL nepārtrauktā starojuma lāzeris

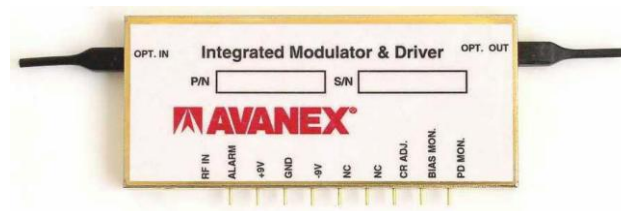
Main Features Agilent 8163 VCSEL:

- Wavelength range: 1465 nm to 1630 nm;
- Wavelength resolution: 5 pm, 625 MHz at 1550 nm;
- Tuning time: (typ.) 3 s for 100 nm;
- Absolute wavelength accuracy: ± 100 pm;
- Relative wavelength accuracy: ± 50 pm;
- Wavelength repeatability: ± 5 pm;
- Wavelength stability: (typ., over 24 h) ± 5 pm;
- Effective linewidth: (typ.) > 50 MHz;
- Maximum output power: +14.5 dBm peak;
- Power linearity ± 0.1 dB;
- Power stability: ± 0.03 dB over 24 hour;
- Side-mode suppression ratio: (typ.) ≥ 50 dB;
- Relative intensity noise (RIN): (typ.) 145 dB/Hz (0.1 GHz to 6 GHz);
- Dimensions: (H x W x D) 75 mm x 32 mm x 335 mm;
- Weight: 0.95 kg.



ANDO VCSEL laser AQ4321D

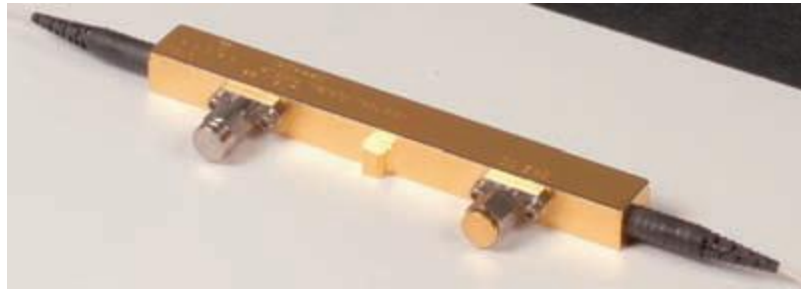
| Model | AQ4321A | AQ4321D |
|--------------------------------|--|---|
| Wavelength range | 1480 to 1580 nm | 1520 to 1620 nm |
| Wavelength set resolution | 0.001 nm | |
| Wavelength stability | ± 100 MHz/h (± 0.8 pm/h) (typ.) ^{2,3)} | |
| Absolute wavelength accuracy | ± 0.01 nm ^{2,3,4,8)} | |
| Relative wavelength accuracy | ± 0.015 nm, ± 0.01 nm (typ.) ^{2,3,4,7)} | |
| Spectral width | Narrow | 200 kHz (typ.) (1 MHz or less) |
| | Wide | 200 MHz (typ.) (100 MHz or more) |
| SMSR | 50 dB or more (optical output: +7 dBm, 1550 nm) | 50 dB or more (optical output: +6 dBm, 1590 nm) |
| Optical output | +10 dBm (typ.) peak +7 dBm or more, 1520 to 1570 nm +5 dBm or more, 1500 to 1580 nm +3 dBm or more, 1480 to 1580 nm | +7 dBm (typ.) peak +6 dBm or more, 1560 to 1600 nm +5 dBm or more, 1540 to 1620 nm +3 dBm or more, 1520 to 1620 nm |
| Settable optical output range | 20 dB or more (0.1 dB steps, at peak wavelength) | |
| Optical output stability | 5 min | ± 0.01 dB or less ^{2,9)} |
| | 1 h | ± 0.05 dB or less ^{5,9)} |
| | 8 h | ± 0.3 dB or less ^{5,9)} |
| Optical output accuracy | ± 1 dB or less ^{4,9)} | |
| Optical output reproducibility | ± 0.04 dB, optical output fixed ^{4,5,9)} | |
| Optical output level flatness | ± 0.1 dB ^{4,9)} (1500 to 1580 nm) | ± 0.1 dB ^{4,9)} (1540 to 1600 nm) |
| RIN | -145 dB/Hz (typ.) | |
| Internal modulation (CHOP) | Set frequency | 0.2 to 300 kHz ¹⁰⁾ |
| | Set resolution | 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz ¹⁰⁾ |
| External modulation (CHOP) | Set frequency | 0.2 to 300kHz ¹⁰⁾ |
| | Set resolution | - |
| Direct modulation | Modulation rate | 5% or less (Modulation frequency: 100 kHz to 300 MHz, modulation input level: 0 dBm or less) |
| Wavelength sweep speed | 100 nm/sec (max.) | |
| Applicable optical fiber | SMF (10/125 μ m) | |
| Applicable connector | FC/PC (Standard), optical return loss: 50 dB or more | |
| Environmental conditions | Operating temperature: 10 to 35 °C, storage temperature: -10 to +50 °C, humidity: 80 % RH or less (no condensation) | |
| Power requirements | AC100 to 120 V/200 to 240 V, 50/60 Hz, approx. 150 VA | |
| Dimensions and mass | Approx. 425 (W) x 177 (H) x 450 (D) mm, approx. 20 kg | |
| Accessories | Power cord: 1, AQ9441 (FC) connector adapter: 1, 50 Ω terminal: 1, FD: 2, instruction manual: 1 | |



AVANEX MZM modulators

Main Features AVANEX MZM:

- Operative Wavelength: C+L band;
- Optical Insertion Loss: (10.7Gb/s) ≤ 5 dB;
- Optical Extinction Ratio: ≥ 13 dB;
- Optical Return Loss: ≥ 50 dB;
- Electrical Return Loss: ≥ 12 dB;
- Rise & Fall Times: ≤ 30 ps;
- RF p-p Input: 0.4÷0.75 V;
- Modulator/Driver Polarity: Non-inverting and inverting;
- Power Dissipation: ≤ 5 W;
- RF Connector: Flush GPO + SMA converter;
- Power and Monitor Connectors: LEAD Pins;
- Input Fiber: Corning/Fujikura SM-15-P-8/125 UV/UV 250;
- Modulator Output Fiber: Corning SMF-28;



40 Gbit/s Fāzes un intensitātes MZM

| ITEM # | LN05S | | | LN27S / LN66S | | |
|--|-----------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|
| | Min | Typical | Max | Min | Typical | Max |
| Operating Wavelength ^a | 1525 nm | – | 1605 nm | 1525 nm | – | 1605 nm |
| Optical Insertion Loss (Connectorized) | – | 4.0 dB | 5.0 dB | – | 4.0 dB | 5.0 dB |
| E/O Bandwidth (-3 dB ref. 130 MHz) | 30 GHz | 35 GHz | – | 30 GHz | 35 GHz | – |
| RF Drive Voltage of RF Port (PRBS ^b) | – | 5.5 V | – | – | 7.0 V | – |
| 1 GHz V_{π} RF Port | – | 5.0 V | 5.5 V | – | – | 7.0 V |
| Optical On/Off Extinction Ratio | – | 20 dB | – | NA | NA | NA |
| Optical Return Loss | 40 dB | – | – | 40 dB | – | – |
| S11 (DC to 30 GHz) | – | -12 dB | -10 dB | – | -12 dB | -10 dB |
| S11 (30 GHz to 40 GHz) | – | -10 dB | -8 dB | – | -10 dB | -8 dB |
| Digital Comm. Bit Rate Frequency | – | 40 Gb/s | – | – | 40 Gb/s | – |
| Dynamic Extinction Ratio (PRBS ^b) | – | 13 dB | – | NA | NA | NA |
| Insertion Loss Variation (EOL ^c) | -0.5 dB | – | 0.5 dB | -0.5 dB | – | 0.5 dB |
| Operating Case Temperature | 0 °C | – | 70 °C | 0 °C | – | 70 °C |
| Storage Temperature | -40 °C | – | 85 °C | -40 °C | – | 85 °C |
| V-Connector | RF Signal | | | RF Signal | | |
| SMA Connector | DC Bias Voltage | | | Not Used / No Connect | | |



P5.9.att. Anritsu MP 1026A acu diagrammas analizators

Main Features MP 1026A:

- Displays: EYE and Pulse patterns;
- Measurements: Statistical, Histograms, Mask Compliance;
- Clock trigger frequency: 0.1 to 12.5 GHz;
- Max. clock trigger input before damage: 2 Vp-p;
- Clock recovery rates: 0.1-2.7 GHz, 9.8-12.5 GHz;
- Bandwidth (- 3 dB): to 25 GHz;
- Flatness: ± 1 dB;
- Sampling speed: 100 ksamples/sec;
- Interfaces: type K female;
- Operating temperature: - 10° to + 55° C;
- Size: 313x211x77;
- Weight: < 4 kg.



Anritsu PPG MP1800 elektriskā signāla ģenerators

Main Features Anritsu PPG MP1800:

- Both wideband and narrowband support;
- 0.1 to 12.5 Gbit/s wide frequency band (MU181020A-002, MU181040A-002);
- 10 Gbit/s band of 9.8 to 12.5 Gbit/s (MU181020A-001, MU181040A-001) MU181020A-001 built-in clock generator PPG divided-clock function (1/2: 4.9 to 6.25 Gbit/s, 1/4: 2.45 to 3.125 Gbit/s, 1/8: 1.225 to 1.5625 Gbit/s);
- MU181040A-001 built-in clock recovery;
- PRBS: Steps: $2^n - 1$ ($n = 7, 9, 10, 11, 15, 20, 23, 31$);
- Mark ratio: 1/2, 1/4, 1/8, 0/8; 1/2, 3/4, 7/8, 8/8 supported at reverse logic AND bit shift: 1 bit, 3 bits, (Prohibited at 1/2, 1/2, 0/8, 8/8 mark ratio);
- Screen-based operation using Windows® XP GUI or remote commands over GPIB or Ethernet;
- LCD Display 8.4-inch Color TFT 800 x 600;
- Peripheral I/Fs VGA out (SVGA), USB 1.1 (3 Ports);
- Power 100 to 120 Vac, 200 to 240 Vac (auto-switching between 100/200 Vac), 47.5 to 63 Hz;
- Power Consumption ≤ 600 VA;
- Operating Temperature $+5^\circ$ to $+40^\circ\text{C}$;
- Dimensions and Mass 320 mm (W) x 177 mm (H) x 450 mm (D), ≤ 13 kg max. (without modules).



SHF 10000 A ekstriskā signāla ģenerators un kļūdu skaitītājs

Specifications – SHF 10000 A BERT Mainframe

| Parameter | Unit | Min. | Typ. | Max. | Conditions |
|-----------------------|------|-----------|------------|------------|---|
| Power supply | V | 90 180 | 110 230 | 135 270 | 47...63 Hz |
| Dimensions (WxDxH) | mm | | | | 480x630x280 |
| Operating temperature | °C | 15 | | 35 | |
| Storage temperature | °C | 0 | | 70 | |
| Network connector | | | | | Ethernet |
| Power consumption | W | | 11 245 | | Mainframe alone with SHF11100 A and SHF 12100 A |

Specifications – SHF 12100 A

| Parameter | Unit | Min. | Typ. | Max. | Comment |
|------------------------------------|--------------|--------|-------------------------|----------|---|
| Data | | | | | |
| Bit rate | Gbps | 6 | | 50 | |
| Output level | mV | 350 | 400 500 | | adjustable by up to -3dB with DFF (not adjustable) |
| Jitter (rms) | fs | | 500 | 550 | on scope display, measured at 50Gbps with Agilent 86100A with 70GHz sampling head and precision timebase |
| Rise/fall time | ps | | | 10 | 20%...80% |
| Subrate data outputs (optional) | Gbps | 1.5 | | 12.5 | 1V _{pp} output level |
| Clock | | | | | |
| Clock input frequency | GHz | 3 6 | | 25 50 | half clock full clock |
| Input level | dBm | 0 | | 4 | |
| Output level | mV | 500 | 600 | | |
| S ₁₁ | dB | | | -10 | |
| Output frequency | | | clock clock/2 sel | | sel: can be switched between bitrate/N (N=16,32,64,128,256, 512) and wordframe |
| Patterns | | | | | |
| Data patterns | | | | | 2 ⁷ -1, 2 ⁹ -1, 2 ¹¹ -1, 2 ¹⁵ -1, 2 ²⁰ -1, 2 ²³ -1, 2 ³¹ -1 |
| User-programmable pattern | Mbit | | | 128 | |
| Back to back Q factor | linear dB | | 25 28 | | measured with SHF 11100 A |

Specifications – SHF 11100 A

| Parameter | Unit | Min. | Typ. | Max. | Comment |
|--------------------------------|--------------|--------|-------------------------|-----------|--|
| Data input | | | | | |
| Bit rate | Gbps | 6 | | 50 | input AC coupled; DC coupled on request (ground referenced CML, 0...-500mV) |
| S ₁₁ | dB | | | -10 | |
| Sensitivity | mV | | | 50 150 | standard with DFF value corresponds to the measured eye heights on an Agilent 86100 A |
| Clock phase margin | ° | 200 | | | |
| Threshold adjustment | mV | -300 | | 300 | 0.5mV steps |
| Subrate data inputs (optional) | Gbps | 1.5 | | 12.5 | sensitivity: 100mV |
| | | | | | |
| Clock | | | | | |
| Clock input frequency | GHz | 3 6 | | 25 50 | half clock full clock |
| Phase adjustment | ps | 0 | | 160 | 0.1ps resolution |
| Input level | dBm | 0 | | 4 | |
| Output level | mV | 500 | 600 | | |
| S ₁₁ | dB | | | -10 | |
| Output frequency | | | clock clock/2 sel | | sel: can be switched between bitrate/N (N=16,32,64,128,256, 512) and wordframe |
| | | | | | |
| Trigger (gating) | | | | | LV TTL |
| | | | | | |
| Patterns | | | | | |
| Data patterns | | | | | 2 ⁷ -1, 2 ⁹ -1, 2 ¹¹ -1, 2 ¹⁵ -1, 2 ²⁰ -1, 2 ²³ -1, 2 ³¹ -1 |
| User-programmable pattern | Mbit | | | 128 | |
| Back to back Q factor | linear dB | | 25 28 | | measured with SHF 12100 A |



Keopsys EDFA pastiprinātājs

Main Features Keopsys EDFA:

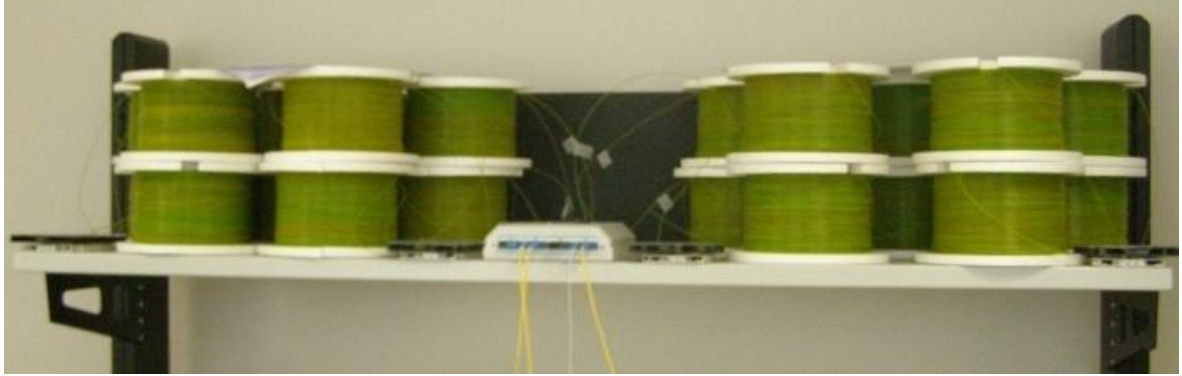
- Mode of operation: CW;
- Input power: + 5 dBm;
- Maximum output power: + 23 dBm;
- Bandwidth: 1535 – 1565 nm;
- Isolation: on output;
- Control mode: ACC, APC;
- Output pigtail: SMF28;
- Input pigtail: SMF28;
- AC Voltage: 85 to 264 VAC, 47-63Hz;
- Power consumption: < 200 W;
- Interface: GBIP;
- Operating temperature: from + 15° to +35°;
- Warm up time: approx. 30 min;
- Dimensions: 88x448x446;



Anritsu OEC10G-1A optiskā signāla pārveidotājs

Main Features Anritsu OEC10G-1A:

- Wavelength range: 750 to 1650 nm;
- Responsivity: at 850 nm 0.55 A/W, at 1310/1550 nm 0.95 A/W;
- Conversion gain: at 850 nm 200 V/W, at 1310/1550 nm 350 V/W;
- Optical noise: 15 μ W;
- Optical sensitivity: - 15 dBm;
- Overload: $\geq + 2$ dBm;
- Optical power measurement accuracy: 1 dB;
- Optical return loss: - 30 dB;
- Electrical filter: 4th order Bessel-Thomson;
- Electrical bandwidth (- 3 dB): (typ.) 7.5 GHz;
- Electrical return loss: - 10 dB;
- Input fiber: Multimode fiber 62.5 μ m;
- Connector: FC.



Ericsson SSMF optiska šķiedra

Main Features Ericsson SSMF:

- Attenuation at 1310 nm: Attenuation at 1310 nm: ≤ 0.36 dB/km;
- Zero-dispersion wavelength: 1302-1322 nm;
- Zero-dispersion slope: ≤ 0.092 ps/(nm²·km);
- Chromatic dispersion coefficient at 1310 nm: ≤ 2.8 ps/(nm·km);
- Mode field diameter at 1310 nm: 9.2 ± 0.4 μ m;
- Attenuation at 1550 nm: ≤ 0.21 dB/km;
- Chromatic dispersion coefficient at 1550 nm: ≤ 18 ps/(nm·km);
- Mode field diameter at 1310 nm: 10.5 ± 0.5 μ m;
- Cut-off wavelength: < 1260 nm;
- Polarization mode dispersion: ≤ 0.1 ps/ \sqrt{km} ;
- Cladding diameter: 125 ± 0.7 μ m;
- Cladding non-circularity: $\leq 0.7\%$;
- Core concentricity error: ≤ 0.5 μ m;
- Coating diameter: 245 ± 5 μ m;
- Proof test strain: $\geq 1\%$;
- Stress corrosion factor (n): ≥ 18 ;
- Reference: ITU Rec. G.652.D.