

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Oskars OZOLIŅŠ

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

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2013

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Oskars OZOLIŅŠ
Doktora studiju programmas „Telekomunikācijas” doktorants

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

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU izdevniecība
Rīga 2013

UDK 621.372.852(043.2)

Oz 640 v

Ozoliņš O. Viļņa garuma filtru analīze un realizācija šķiedru optikas pārraides sistēmās. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2013.-41 lpp.

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

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2013.gada 21.februāra lēmumu, protokols Nr.14.



Eiropas sociālais fonds



Eiropas savienība

ISBN 978-9934-10-410-7

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.gada 23. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 auditorijā, plkst. 16:30.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.sc.ing. Guntars Balodis
Rīgas Tehniskā universitāte, Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Profesors, Dr.habil.phys. Jānis Spīgulis
Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte

Vadošais pētnieks, Dr.phys. Juris Zvirgzds
Latvijas Universitāte, Cietvielu Fizikas Institūts

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Oskars Ozoliņš(Paraksts)

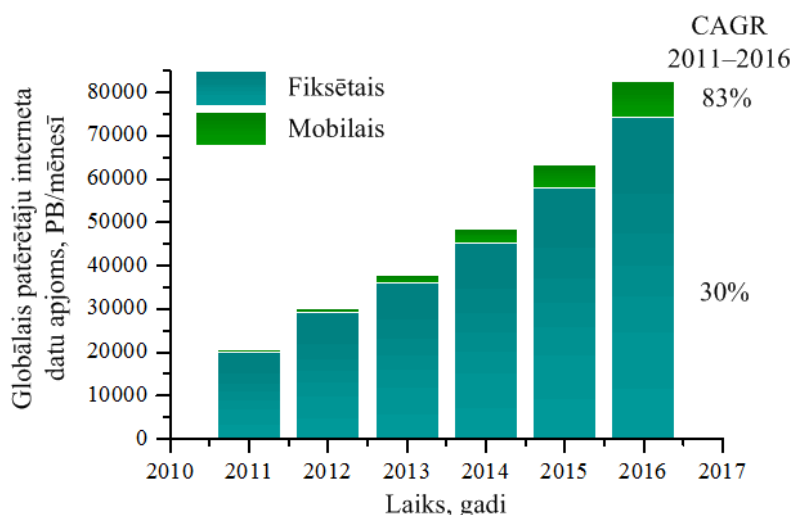
Datums: 23.05.2013

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, slēdzienu, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 84 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 143 lappuses. Literatūras sarakstā ir 164 nosaukumi.

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Nemot 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 (skat. 1.att.) [16], tāpēc nepieciešams meklēt jaunus risinājumus optisko sakaru sistēmu parametru uzlabošanai. Pasaulē novērojama tendence, ka no 10 Gbit/s datu pārraides ātruma vienā kanālā viļņgarumdales blīvēšanas (WDM) sistēmā notiek pakāpeniska pāreja uz 40 Gbit/s un 100 Gbit/s datu pārraides ātruma vienā kanālā [30]. Pamata elementi viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās ir viļņa garuma filtri, kuri nodrošina noteiktu funkciju izpildi: viļņa garuma diapazona izdalīšanu, pievienošanu, nomešanu un virzīšanu. Viļņa garuma filtri ir gan pielāgojumi no labi pazīstamiem optiskiem elementiem (piemēram, difrakcijas režģi (DG) vai plāno kārtiņu filtri (TFF)), gan specifiskas iekārtas no planārās integrētās optikas (piemēram, viļņvadu masīva režģi (AWG), mikroriņķa rezonatori (MRR)), kā arī tie var būt cieši saistīti ar optiskās šķiedras struktūru (piemēram, šķiedras Brega režģi (FBG)).



1.att. „Cisco” prognozētais globālais patērētāju interneta datu apjoms [16]

Sakarā ar straujo pārraides ātruma pieaugumu liela nozīme viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās jāpievērš viļņa garuma filtru parametru izvēlei, jo to fāzes pārvades funkcija var radīt būtiskus traucējumus augsta ātruma optiskajiem signāliem [12, 35, 41]. Sakarā ar 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, tādējādi, paaugstinot signāla apstrādes efektivitāti un sekmējot kopējo sistēmas elastīgumu.

Darba mērķis un uzdevumi

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 blokshēmā;
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 bez atgriešanās pie nulles-intensitātes modulētam (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 nomāktas nesējfrekvences ar atgriešanos pie nulles (CSRZ)-OOK un CSRZ-fāzes modulēta (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 (vācu val. Schrödinger) 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 pārskatājama 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.

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

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 **praktiskā 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 „Latvenego” 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.

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 $BER < 10^{-9}$.

Rezultātu aprobācija

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

Ziņojumi starptautiskās konferencēs:

1. Ļašuks I., Ščemeļevs A., **Ozoliņš O.** Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // „Electronics 2008”, Lietuva, Kauņa, 19.-23. Maijs, 2008.
2. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V. Investigation Of Flat-Top Bpf Usability In Amplified Fiber Optical Systems // „Development in Optics and Communication 2009”, Latvija, Rīga, 24.-26. Aprīlis, 2009.
3. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Realization of optimal FBG band-pass filters for high speed HDWDM // „Electronics 2009”, Lietuva, Kauņa, 12.-13. Maijs, 2009.
4. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Evaluation of optimal FBG filter apodization function for HDWDM // „50th RTU Scientific Conference”, Latvija, Rīga, 14.-16. Oktobris, 2009.
5. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Estimation of optical filter narrowing in high speed WDM systems // „Developments in optics and communications 2010”, Latvija, Rīga, 23.-25. Aprīlis, 2010.
6. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Evaluation of Band-Pass Filters Influence on NRZ Signal in HDWDM Systems // „Electronics 2010”, Lietuva, Kauņa, 18.-20. Maijs, 2010.
7. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V. Research of Fiber Bragg Gratings in WDM Technologies for Broadband Access // „Optics & High Technology Material Science 2010”, Ukraina, Kijeva, 21.-24. Oktobris, 2010.
8. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Research of thin film filter for broadband access systems // „Developments in Optics and Communications 2011”, Latvija, Rīga, 28.-30. Aprīlis, 2011.
9. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Estimation of DWDM transmission for broadband access with FBG technology // „Electronics 2011”, Lietuva, Kauņa, 17.-19. Maijs, 2011.
10. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient Bandwidth Measurements of Thin Film Filters for Next-Generation Optical Access // „The 12th Annual Post Graduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting 2011”, Lielbritānija, Liverpūle, 27.-28. Jūnijs, 2011.
11. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Investigation of Efficient Bandwidth of FBG filters for Next-Generation Optical Access // „52th RTU Scientific Conference”, Latvija, Rīga, 13.-14. Oktobris, 2011.
12. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. DWDM-Direct System with 50 GHz FBG for New-Generation Optical Access // „IEEE Swedish Communication Technologies Workshop Proceedings”, Zviedrija, Stokholma, 19.-21. Oktobris, 2011.
13. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient bandwidth measurements of fiber Bragg gratings for next-generation optical access // „Optics & High Technology Material Science 2011”, Ukraina, Kijeva, 27.-30. Oktobris, 2011.
14. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient Bandwidth of 50 GHz Fiber Bragg Grating for New-Generation Optical Access // „19th Telecommunications Forum 2011”, Serbija, Belgrada, 22.-24. Novembris, 2011.
15. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. New Generation Access System Based On DWDM-Direct With 55 GHz Fiber Bragg Grating // Developments in Optics and Communications 2012, Latvija, Rīga, 12.-14. Aprīlis, 2012.
16. **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 2012, Polija, Poznaņa, 18.-20. Jūlijs, 2012.

17. 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 OptoElectronics and Communications Conference 2012, Korejas republika, Pusana, 2.-6. Jūlijs, 2012.
18. 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 2012, Nīderlande, Amsterdama, 16.-20. Septembris, 2012.
19. **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 2012, Ķīna, Guangzhou, 7.-10. Novembris, 2012.
20. **[Invited]** 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. Linear Signal Processing Using Silicon Micro-Ring Resonators // International Photonics and OptoElectronics Meetings 2012, Ķīna, Wuhan, 1.-2. Novembris, 2012.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos:

1. Ļašuks I., Ščemeļevs A., **Ozoliņš O.** Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // Electronics and Electrical Engineering. - 5. (2008) 45.-48. p.
2. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Realization of Optimal FBG Band-Pass Filters for High Speed HDWDM // Electronics and Electrical Engineering. - 4. (2009) 41.-44. p.
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. p.
4. Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Ozoliņš O.**, Poriņš J. Realization of HDWDM Transmission System // International Journal of Physical Sciences. - 5. (2010) -452.-458. p.
5. **Ozoliņš O.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Efficient Wavelength Filters for DWDM Systems // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 6. (2010) 47.-58. p.
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. p.
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. p.
8. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Estimation of DWDM Transmission for Broadband Access with FBG Technology // Electronics and Electrical Engineering. - 5. (2011) 11.-14. p.
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. p.
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. p.

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. p.
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. p.

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. p.
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. p.
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. p.
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. p.

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.p.
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.p.
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. p.
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. p.
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. p.
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. p.
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. p.
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.p.

Latvijas patenti:

1. Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma, LV-14557, 2012;
2. Viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma ar šaurjoslas filtru, LV-14107, 2009;

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;

Darba apjoms un struktūra

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. Formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvamās tēzes, apkopoti galvenie rezultāti un definēti turpmākie pētījumu virzieni.

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

Ceturtajā nodaļā apskatīts jauna veida viļņa garuma filtrs: mikroriņķa rezonators, kas šobrīd vēl netiek pielietots komerciālās WDM 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. Novērtēta MRR filtra kaskādes slēguma ietekme uz 40 Gbit/s OOK un DPSK modulācijas formātiem un veikta sekmīga 41.6

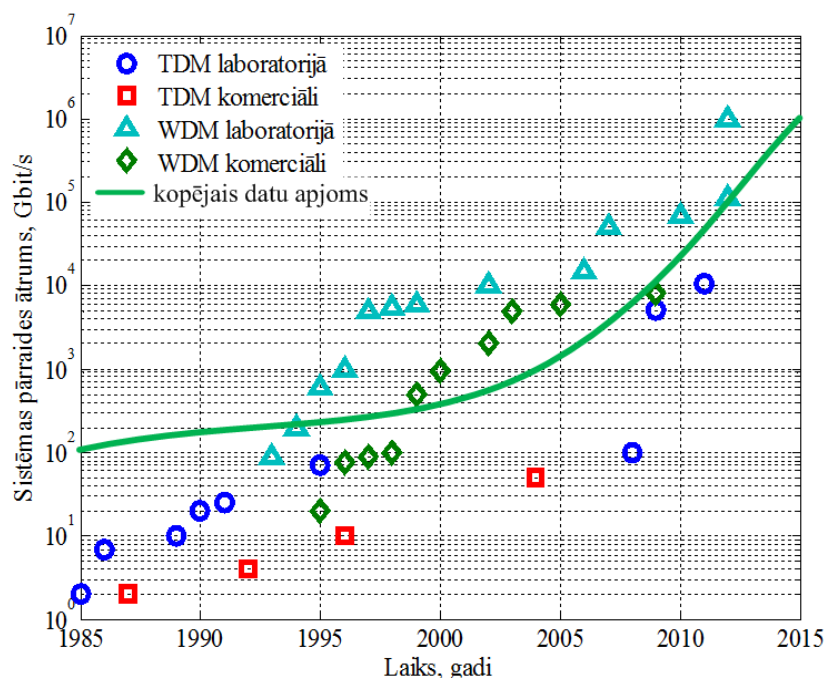
Gbit/s fāzes modulētu optisko signālu pārveidei no RZ uz NRZ, kā arī vienlaicīga 41.6 Gbit/s intensitātes un fāzes modulētu optisko signālu pārveide no RZ uz NRZ.

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.

DARBA ATSEVIŠĀ NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Informācijas un sakaru tehnoloģijas attīstās nepārtraukti [27]. Īpaši straujš pieaugums novērots dažu pēdējo desmitgažu laikā. Pašreizējā datu pārraidē dominē optisko šķiedru sakaru sistēmas [6]. Galvenais iemesls ir lielā vienmodu optiskās šķiedras (SMF) caurlaides josla, kas sasniedz 50 THz un vairāk viļņa garuma diapazonā no 1200 nm līdz 1600 nm [47]. 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 [75].



2.att. Sistēmas pārraides ātrums un kopējais pieprasījums pēc datu apjoma [32]

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 [4]. 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 [69]. 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 [88]. 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 [72]. Kā redzams no 2. attēla, tad kopējais vidējais pieprasījums pēc datu apjoma pieaug arvien straujāk. Neapšaubāms fakts ir tas, ka WDM komerciālie risinājumi ir spējuši nodrošināt atbilstošu kopējo sistēmas datu apjomu [32]. No iepriekš minētajiem faktiem secināms, ka WDM šobrīd ir galvenā tehnoloģija, ar kuras palīdzību optiskās šķiedras caurlaides josla tiek izmantota arvien efektīvāk.

1.tabula

DWDM sistēmu viļņa garuma filtru parametru salīdzinājums

Šķiedras Brega režģu filtri	Plāno kārtiņu filtri
- 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.	- 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
- 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.	- 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.

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 [75]. Bieži tas ir kompromiss starp ienestiem zudumiem, blakus kanālu izolācijas vērtību un ienesto dispersiju. Viļņa garuma filtru parametriem jābūt noturīgiem arī pret klimatiskām un konstruktīvām ietekmēm: paaugstinātu mitrumu, mainīgu darba temperatūru un dažādām mehāniskām iedarbēm [23]. Plašāk pielietotās tehnoloģijas WDM sistēmās viļņa garuma filtru realizācijai ir TFF, FBG, AWG un difrakcijas režģi [23,

71, 75]. TFF, FBG un AWG plašāk pielietotas komerciālās un ekspluatācijā esošās optiskās blīvēšanas sistēmās [26, 71, 74]. Savukārt, difrakcijas režģu filtru fiziskās realizācijas var tikt veidotas ar pārskatāmajiem parametriem pēc viļņa garumiem un plašāku pielietojumu pagaidām ieguvušas tikai zinātniskos pētījumos [2, 75]. 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 [38]. Šīs divas tehnoloģijas izmanto WDM sistēmās ar kanālu skaitu mazāku par sešpadsmit. Savukārt, AWG tehnoloģija paredzēta lielākam kanālu skaitam (skat. 1. tabulu). Šo viļņa garuma 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 garuma 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 garuma filtru komplekso pārvades funkciju radītos ierobežojumus augsta datu pārraides ātruma un liela abonētu skaita gadījumā gan pašreizējās, gan nākotnes optisko šķiedru sakaru sistēmās. Viļņa garuma filtra fāzes pārvades funkcija var radīt būtiskus traucējumus augsta ātruma WDM sistēmās [12, 35, 41]. Fāzes pārvades funkcija kļūst arvien nozīmīgāka pieaugot datu pārraides ātrumam, kas notiek tehnoloģiju attīstības gaitā. Pirmkārt, pārraides ātrums vienā kanālā komerciālās sistēmās tiek strauji palielināts. Līdzīga tendence ātruma pieaugumam novērojama arī piekļuves tīklos ar WDM tehnoloģiju [45]. Otrkārt, palielinot spektrālo efektivitāti WDM sistēmās kanālu intervālu vērtības tiek samazinātas līdz minimumam, pielietojot viļņa garuma filtru 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 viļņa garuma filtra kompleksās pārvades funkcijas „stūrs”, 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 [26, 40, 41]. Tāpēc arvien būtiskāk zināt viļņa garuma filtra ienestās dispersijas lielumu, lai novērstu iespējamo signāla degradāciju sistēmās ar strauji pieaugošu pārraides ātrumu.

Interese par viļņa garuma filtra dispersijas raksturlīkņu iegūšanu parādījās deviņdesmito gadu vidū un atbilstošas mērījumu metodes tika izstrādātas balstoties uz optisko šķiedru mērīšanas metodēm [17, 19, 49]. 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 Krāmersa – Kroniga (angļu val. Kramers – Kronig) relācijām [75]. Treškārt, dispersijas vērtības viļņa garuma filtriem ir relatīvi nelielas, salīdzinājumā ar optiskajām šķiedrām.

Ne tikai dispersija ietekmē nepieciešamo viļņa garuma filtra caurlaides joslu optiskā signāla izdalīšanai no kopējā WDM sistēmas spektra. Šī caurlaides josla 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 [77]. 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 [4, 13, 36]. Viļņa garuma filtra izstrādes procesā lielāka uzmanība pievērsta amplitūdas kvadrāta un fāzes pārvades funkciju formai. Saglabājot vēlamo fāzes pārvades funkciju, kas nodrošina

minimālus signāla kropļojumus, tiek meklēta piemērota filtra amplitūdas kvadrāda pārvades funkcija. Ņemot vērā iepriekš minēto nosacījumu, viļņa garuma filtru gadījumā amplitūdas kvadrāda 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 [66]. Tāpēc svarīgi ir izveidot metodiku, pēc kuras noteikt viļņa garuma filtru efektīvo caurlaides joslu un noskaidrot viļņa garuma filtru ietemi uz caur to pārraidīto augsta ātruma optisko signālu.

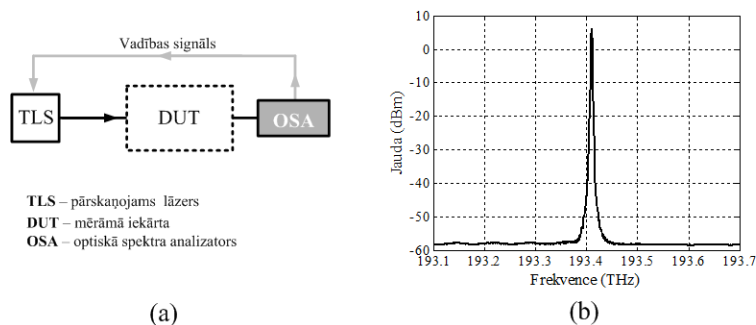
Pilnīgi optisku sakaru sistēmu izveidei nepieciešams meklēt jaunus viļņa garuma filtru pielietojuma veidus, kā arī izstrādāt jauna veida viļņa garuma filtrus, kas būtu paredzēti integrēšanai ar pusvadītāju iekārtām un līdz ar to būtu nepieciešams sasniegt nanometru izmērus. Viens no jauniem pielietojuma veidiem būtu pilnīgi optiska modulācijas formāta pārveide ar MRR filtriem, kura nepieciešama nākotnes optisko sistēmu elastīgumu palielināšanai [51, 79, 86]. RZ uz NRZ signālu pārveide ir būtisks piemērs, lai parādītu dažādu nākotnes optisko sakaru sistēmu mijiedarbi, kas ir aktuāli starp transporta un piekļuves optiskajiem tīkliem. Tas paaugstinātu optisko signāla apstrādes efektivitāti un līdz ar to sekmētu kopējo nākotnes optisko tīklu elastīgumu.

Otrā nodaļa

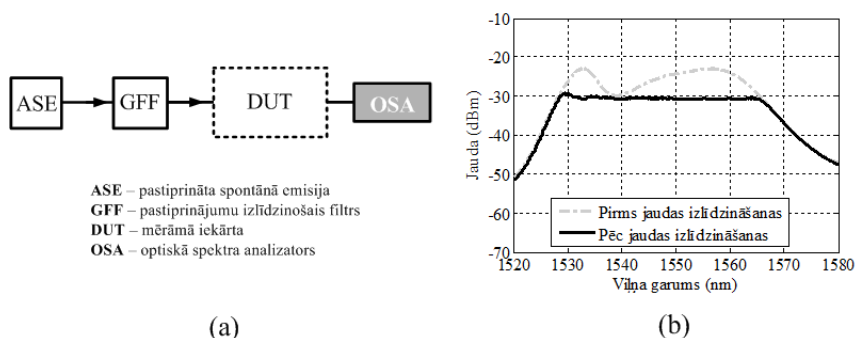
Signālus un fiziskās komponentes matemātiski iespējams aprakstīt ar kompleksām funkcijām. Laika apgabalā fiziskas komponentes iespaidu uz pārraidāmo signālu var novērtēt ar konvolūciju starp funkciju, kas apraksta komponenti, un funkciju, kura raksturo ieejas signālu. Balstoties uz Furjē transformācijas teoriju šo iespaidu ekvivalenti var novērtēt frekvenču diapazonā, izmantojot Furjē transformāciju no ieejas signāla un Furjē transformāciju no izteiksmes, kura apraksta fizisko komponenti [25].

Komplekso pārvades funkciju iegūšana darbā sadalīta divās daļās. No sākuma tiek iegūtas amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas (ATF), savukārt, pēc tam tiek iegūtas fāzes pārvades funkcijas (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.

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 pārskatājams lāzers (TLS) kopā ar optiskā spektra analizatoru (OSA). Liela nozīme ir abu šo iekārtu sinhronizācijā, kā arī lāzera viļņa garuma un pīķa jaudas stabilitātē izmantotajā mērījumu diapazonā. Šādos risinājumos parasti tiek izmantoti viena ražotāja mērinstrumenti, kas savā starpā tiek kontrolēti ar vadības shēmu. Shēmas realizācija redzama 3.attēlā. Mērījumu veikšanai tika izmantots Agilent 86038B pārskatājams lāzers, kas „sajūgts” ar optiskā spektra analizatoru. Turpmākajās darba nodaļās šo metodi dēvēsim par TLS metodi.



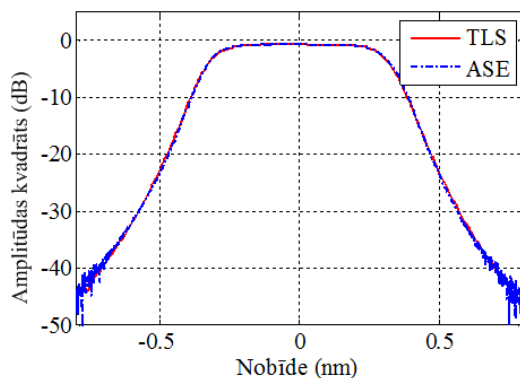
3. att. Amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas mērījumu shēma ar TLS (a) un pārskatājama nepārtraukta starojuma lāzera (b) jaudas spektrs



4. 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 4.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 leģētas šķiedras). Gaismas avota jaudas spektra izlīdzināšanai izmantots pastiprinājumu izlīdzinošais filtrs (GFF). Papildus izmantots ADVANTEST Q8384 OSA. Turpmākajās darba nodaļās šo metodi dēvēsim par pastiprinātās spontānās emisijas (ASE) metodi, kas saistīts ar izmantoto gaismas avotu.

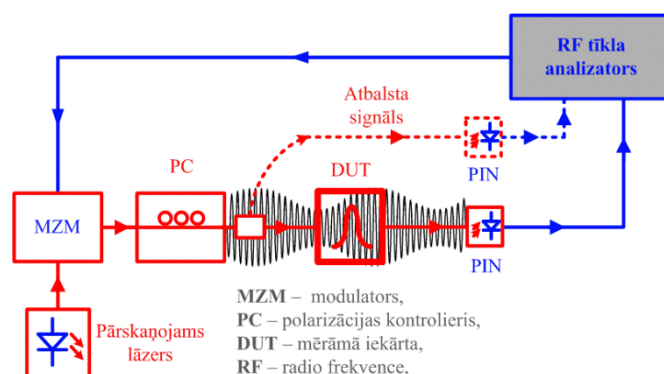
Darbā tika veikti ATF mērījumi vairākiem viļņa garuma filtriem: TFF, FBG, AWG un DG, kas tiek izmatoti komerciālos blīvās WDM (DWDM) sistēmu risinājumos. Pēdējais no minētajiem viļņa garuma filtriem vairāk ir piemērots zinātniskiem pētījumiem, jo tas veidots ar pārskatājamu viļņa garumu un caurlaides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



5. att. 100 GHz TFF amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas logaritmiskajā mērogā iegūtas ar TLS un ASE metodēm

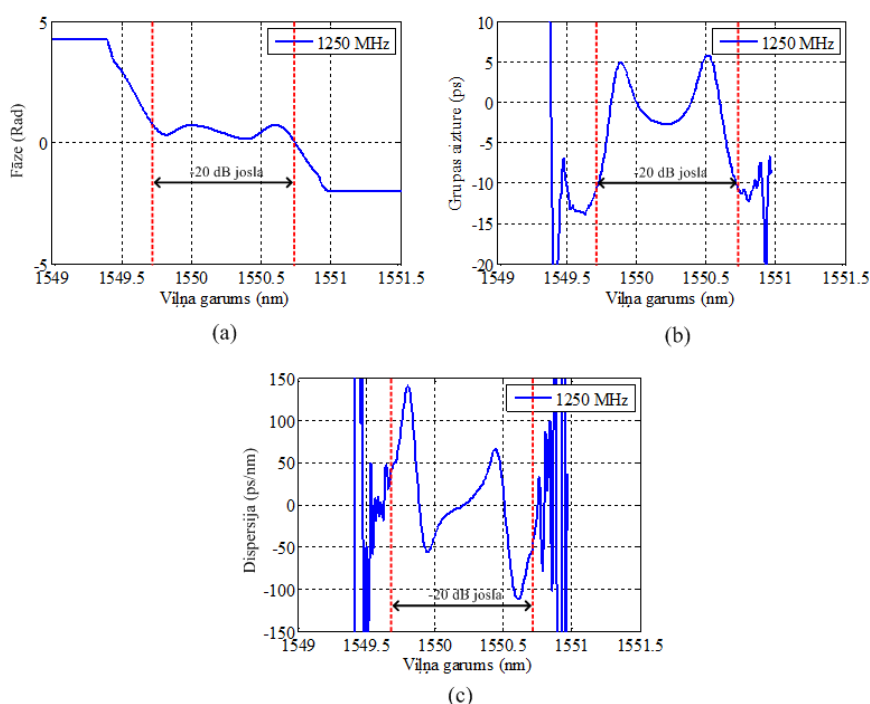
5.attēlā redzamas amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija 100 GHz TFF viļņa garuma filtram. 100 GHz TFF viļņa garuma filtra ienestais vājinājums ir 1.2 dB, caurlaides joslas platums -1 dB, -3 dB un -20 dB vājinājumu līmeņos ir attiecīgi 68.8 GHz, 81.3 GHz un 118.8 GHz.

Fāzes pārvades funkciju iegūšanai tika pielietota Agilent 86038B mēriekārta, kas deva iespēju novērtēt tādu 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.



6. att. Fāzes pārvades funkcijas mērījumu shēma

MPS metodes blokshēma redzama 6.attēlā. Gaisma no pārskāņojama lāzera tiek modulēta ar sinusoidālu signālu (tipiski no 100 MHz līdz 1.25 GHz) ārējā Maha-Cendera (vācu val. Mach Zehnder) modulatorā (MZM). Polarizācijas kontrolieris iekārtā tiek izmantots, lai izveidotu dažādus gaismas polarizācijas stāvokļus, kas nepieciešams diferenciālās grupas aiztures mērījumos. Pēc izplatīšanās caur mēramo iekārtu (DUT) tas tiek detektēts ar PIN fotodiodei. Radio frekvenču (RF) tīkla analizators tiek izmantots, lai nomērītu elektriskās fāzes starpību starp ieejas un izejas signāliem. Jāmin, ka šī ir līdz šim precīzākā metode fāzes pārvades funkcijas iegūšanai no reālas iekārtas [1, 18, 66].



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

100 GHz TFF fāzes pārvades funkcija, grupas aizture un dispersija, kas iegūtas ar MPS metodi redzama 7. attēlā. 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 šajā 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. 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.

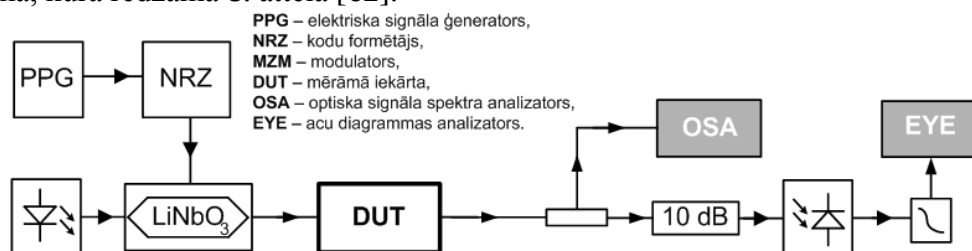
Apskatīta ir relatīvā grupas aizture, jo tās ietekme uz optisko signālu, kas izplatās caur iekārtu, ir daudz lielāka nekā absolūtajai aizturei. Jāņem vērā fakts, ka samazinot caurlaides joslu viļņa garuma filtram, tiek palielināta tā ienestā dispersija, kas, paaugstinot pārraides ātrumu vienā kanālā, var novest pie optiskā signāla kvalitātes degradācijas. Vēl lielāku iespaidu šis efekts rada, kad šādi filtri tiek saslēgti kaskādē un ienestā dispersija uzkrājas [66].

Šajā 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. Tika 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 reāli mērījumu dati, kas nereti ir samērā trokšņaini [66]. 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 fāzes pārvades funkcijas mērījumi. Šis ir precīzākais veids kā iegūt viļņa garuma filtra fiziskās realizācijas ienestās dispersijas lielumu [66].

Trešā nodaļa

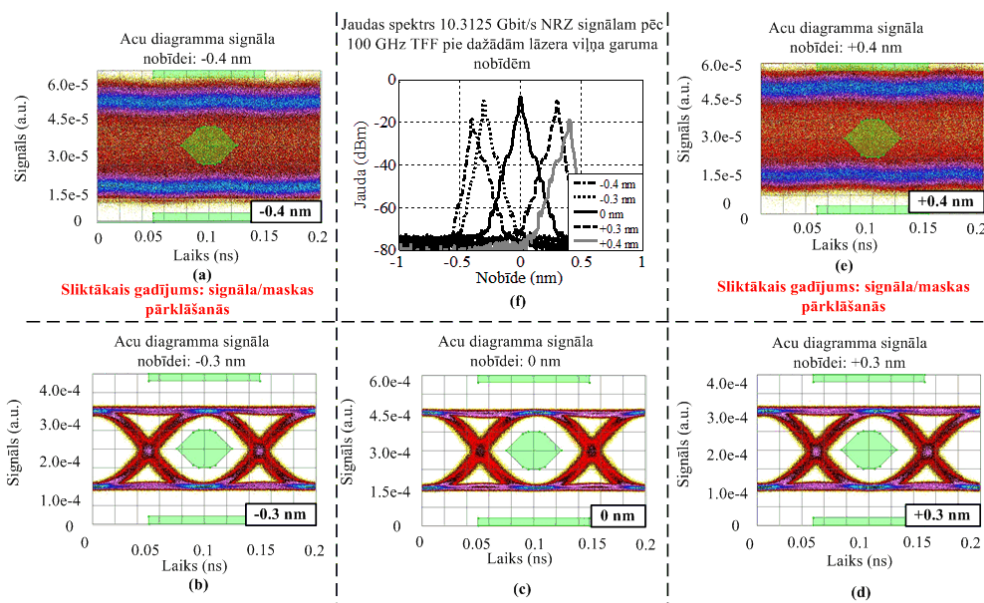
Nodaļa strukturēta trīs daļās: pirmajā daļā analizēta izstrādātā jaunā mērījumu metode viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas noteikšanai, otrajā daļā izveidota mērījumu shēma un noskaidrotas iespējas palielināt sistēmas kopējo spektrālo efektivitāti ar tām pašām viļņa garuma filtrēšanas tehnoloģijām, trešajā daļā noskaidrotas efektīvākās pilns platums līmenī viena puse (FWHM) joslas dažādiem viļņa garuma filtriem un sniegti ieteikumi DPSK optiskā signāla pārveidei uz Duobinary optisko signālu ar Lorencu, Pacelta-kosinusa un Super-Gausa filtriem.

Pārsvārā viļņa garuma filtru ražotāji lieto FWHM kritēriju. 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 [52, 54, 55, 60, 61]. Tajās var pakāpeniski palielināt datu pārraides ātrumu un kanālu skaitu. Katra nepilnība viļņa garuma filtra parametros var radīt būtiskus pārraidītā signāla kvalitātes kropļojumus. Nepieciešams izveidot tādu metodi caurlaides joslas platuma noteikšanai, kas ņemtu vērā gan signāla kvalitātes mērījumus, gan iespējamu datu pārraides ātruma pieaugumu [34]. Rodas efektīvās caurlaides joslas platuma definēšanas nepieciešamība. Tāpēc tika definēta efektīvā caurlaides josla, kuras robežās, nobīdot optiskā signāla centrālo viļņa garumu, signāls netiek degradēts, kas nozīmē, ka kļūdu koeficients ir $< 10^{-9}$ [57, 58]. Sakarā ar to, darbā izstrādāta un Latvijā patentēta efektīvās caurlaides platuma noteikšanas blokshēma, kura redzama 8. attēlā [62].



8. att. Efektīvās caurlaides joslas platuma noteikšanas mērījumu shēma [62]

9. attēlā ir parādītas 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. Signāla kropļojumi ir novērojami pie nobīdes, kad signāls tiek nobīdīts uz ATF „stūriem”. Efektīvā caurlaides josla 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 [17, 75].



9. 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

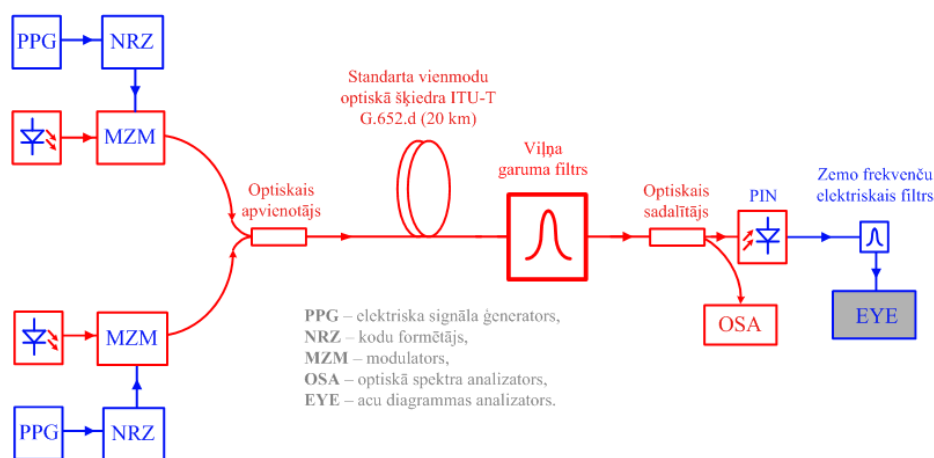
TFF viļņa garuma filtru gadījumā atšķirībā, no FBG viļņa garuma filtriem, efektīvā caurlaides josla iegūtajos mērījumu rezultātos nav atkarīga no pārraides ātruma. Tas saistīts ar to, ka šiem filtriem ir mazāka ienestās dispersijas vērtība. Uzskatāmi tas ir redzams 2. tabulā, kurā ir apkopoti ATF (iegūtas ar ASE metodi) caurlaides joslas platumi apskatītajiem viļņa garuma filtriem, kuri iegūti ar praksē pielietotajiem caurlaides joslas platuma noteikšanas kritērijiem, un ar darba gaitā izstrādāto un patentēto mērījumu shēmu. 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 [12, 75].

2. tabula

DWDM sistēmu viļņa garuma filtru caurlaides joslas platumu salīdzinājums

Filtra nosaukums	Caurlaides joslas platums			
	-1 dB līmenī	-3 dB līmenī	-20 dB līmenī	Efektīvā josla
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

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 [54, 61]. Izstrādātas dažādas viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas [7, 14, 50, 88] 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 [31, 68]. Alternatīvs risinājums ir samazināt frekvenču intervālu starp blakus esošajiem kanāliem līdz minimumam, saglabājot tos pašus viļņa garuma filtrus [33, 54, 60, 61]. Izgudrojuma mērķis ir palielināt viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas spektrālo efektivitāti, saglabājot esošās viļņa garuma filtru tehnoloģijas. Darba gaitā izstrādātā un patentēta mērījumu blokshēma, kura izmantota šo pētījumu veikšanai atspoguļota 10. attēlā [8].



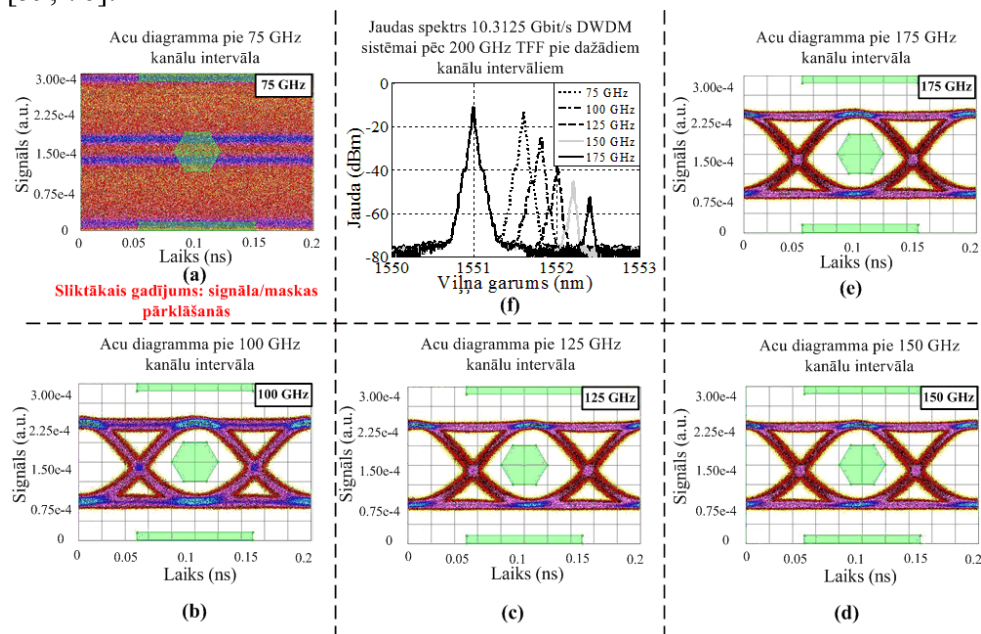
10. att. Spektrālās efektivitātes paaugstināšanas mērījumu shēma [8]

Apskatīsim 200 GHz TFF viļņa garuma filtru. 11. attēlā ir parādītas 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas sliekšņa 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 11.a. attēlā, 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 11.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 10.3125 Gbit/s DWDM sistēmas stabilitāti izmantotajā viļņa garuma diapazonā. Kā rezultātā spektrālā efektivitāte izveidotajai DWDM jaunās paaudzes sistēmai ar 200 GHz TFF tika palielināta divas reizes (pie 10.3125 Gbit/s pārraides ātruma no 0.05 bit/s/Hz līdz 0.1 bit/s/Hz).

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

Savukārt, tālākajā nodaļas izklāstā noskaidrota piemērotākā kompleksā pārvades funkcija viļņa garuma filtram DWDM sistēmās. Tā kā noteicošie faktori šādai piemērotākajai kompleksajai pārvades funkcijai ir datu pārraides ātrums un modulācijas formāts, tad pētījumā

izmantoti plašāk pielietotie datu pārraides ātrumi kanālos un modulācijas formāti DWDM sistēmās [59, 76].



11. 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

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 [63, 64, 66, 75]. 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 [59]. Daudzkanālu DWDM sistēmās iepriekšminētie faktori var būt galvenie pārraidītā signāla degradācijas iemesli [38, 53, 88]. 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 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 [56, 59, 66, 75].

Sakarā ar vairāku modulācijas formātu esamību ir nepieciešama pamatīga piemērotāko viļņa garuma filtru parametru izpēte DWDM sistēmās, jo jaudas spektri būtiski atšķiras [44, 76]. Pētījumā tika novērtēts uztvertā signāla Q faktors no acu diagrammas, kas tiek noteikts pēc 1. izteiksmes:

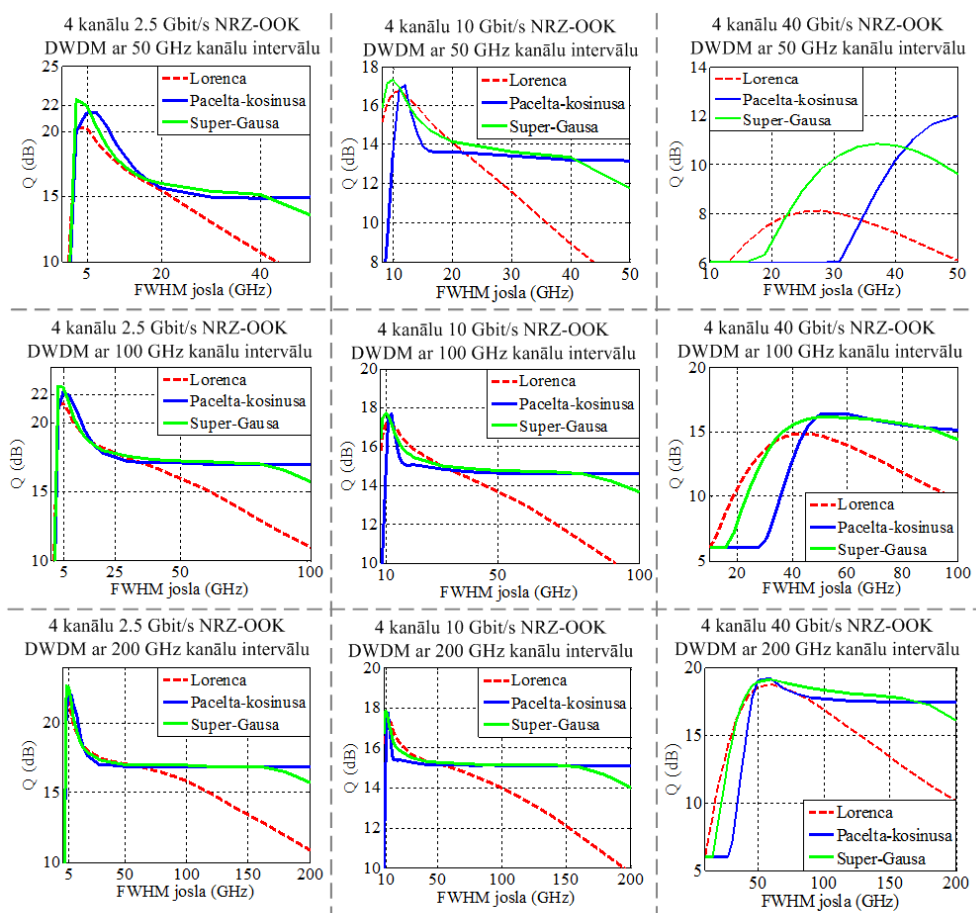
$$Q = \frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (1)$$

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) – $\sim 10^{-12}$ [28].

Pētījumā noskaidrotas sakarības starp Q faktoru un viļņa garuma filtra 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 šajās 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 nelineāro optisko efektu (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 12. 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.

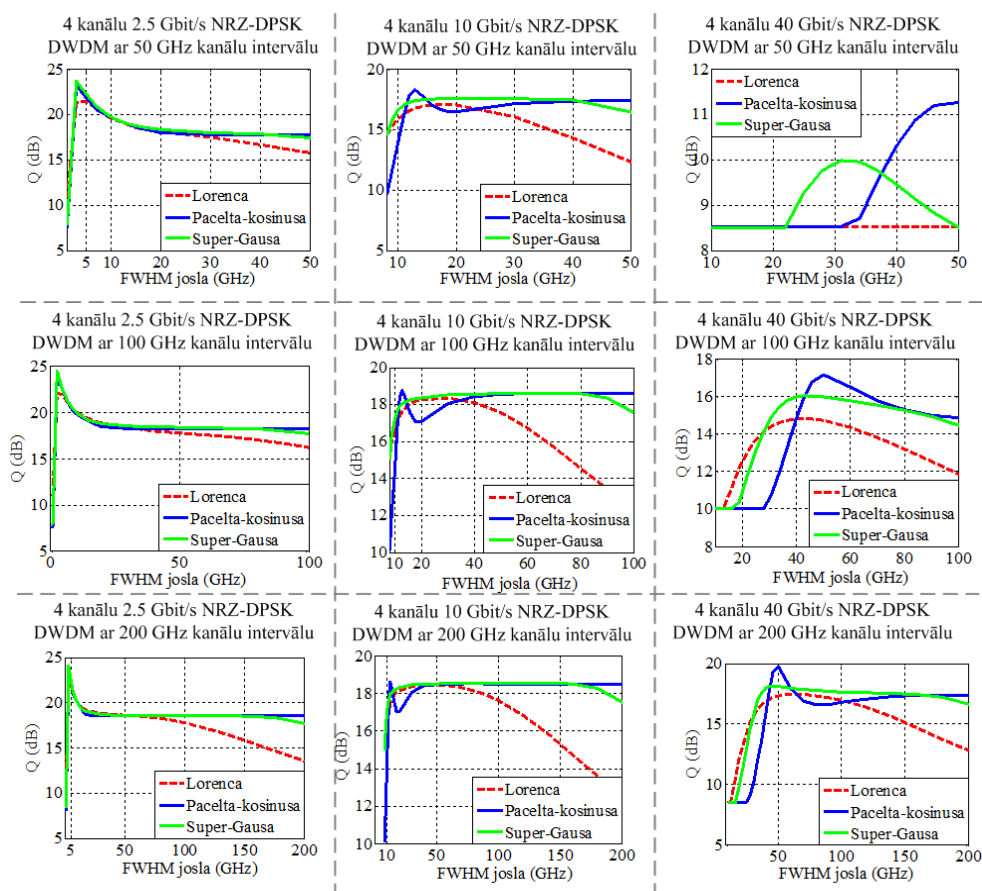


12. att. Q faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-OOK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem

Palielinoties datu pārraides ātrumam FWHM josla palielinās, kas ir skaidrojams ar platāko jaudas spektru šaurāku impulsu gadījumā. Labākie rezultāti iegūti Super-Gausa un Pacelta-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 $BER > 10^{-9}$).

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 13. attēlā. Šī modulācijas formāta gadījumā tika iegūti vislielākie pārraides attālumi

bez dispersijas kompensācijas un pastiprināšanas teknikām, 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.

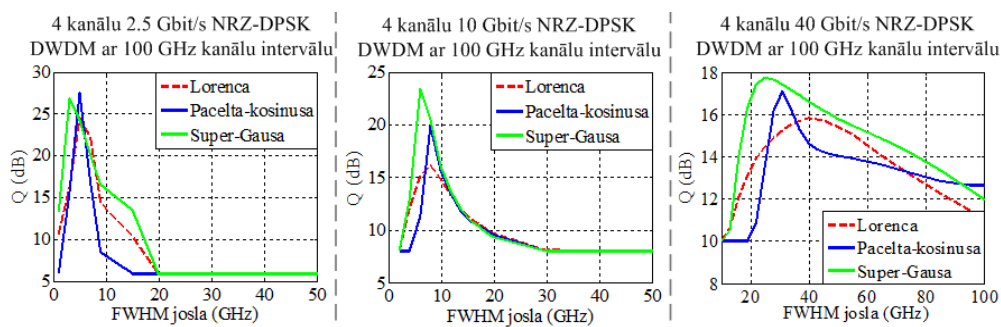


13. att. Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-DPSK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 50/100/200 GHz intervālu starp kanāliem realizēts ar sinhrono detektoru.

Šajā gadījumā Pachelta-kosinusa filtrs uzrādīja labāko rezultātu, jo tā amplitūdas kvadrāta pārvades funkcija ir vistuvākā ideāla optiskā joslas filtra (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 (Pachelta-kosinusa filtru) un kvadrātisko detektoru ir iespējams uztvert NRZ-DPSK modulācijas formātu.

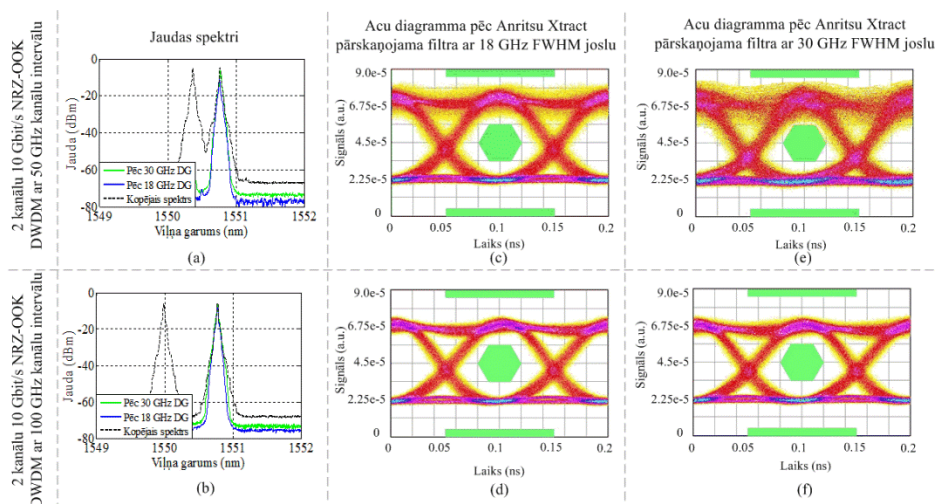
Iegūtie rezultāti redzami 14. attēlā, kurā atspoguļots Q-faktors atkarībā FWHM joslas dažādiem viļņa garuma filtriem četru kanālu NRZ-DPSK 2.5/10/40 Gbit/s DWDM sistēmai ar 100 GHz intervālu starp kanāliem, kura realizēta ar kvadrātisko detektoru. Šajā gadījumā notiek modulācijas formāta pārveide no fāzes uz intensitātes, samazinot viļņa garuma filtra FWHM joslas vērtību [21, 43, 85]. 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 13. att.) [59]. Savukārt, 14. 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 [11]. Līdzīgus rezultātus ir ieguvuši arī citu pētījumu autori (arī

eksperimentāli), kuri izmantojuši gan Super-Gausa, gan Lorencia filtrus [21, 43, 85]. Super-Gausa filtra gadījumā datu pārraides ātrums ir jāpārrēķina ar koeficientu 0.6, lai iegūtu atbilstošo FWHM joslu DSPK signāla demodulācijai. Šī pētījuma galvenā pienestā vērtībā ir NRZ-DPSK demodulācija ar Pacelta-kosinusa filtru un pēc tam veiksmīga detektēšana ar kvadrātisko detektoru.



14. 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

Lai pārlicinātos par iegūto rezultātu patiesumu, tika veikti papildus eksperimenti NRZ-OOK modulācijas formāta gadījumā. Papildus izveidota eksperimentāla divu kanālu 10 Gbit/s mērījumu shēma ar maināmu intervālu starp kanāliem un pārskatāmu viļņa garuma filtru. Pētījumā tika izmantots Anritsu „Xtract” DG viļņa garuma filtrs, kuram ir iespēja izmainīt FWHM joslu robežās no 18 GHz līdz 87.5 GHz. 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.



15. 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

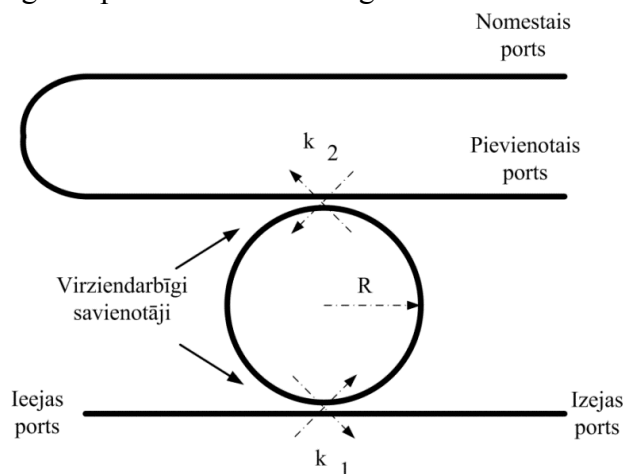
15. attēlā parādītas izveidotās eksperimentālās 10 Gbit/s DWDM sistēmas jaudas spektri (a, b) sliktākā kanāla acu diagrammas (c-f) un pēc Anritsu „Xtract” ar 18 GHz un 30 GHz FWHM joslu pie 50 GHz un 100 GHz kanālu intervāliem. Attēla augšējā līnijā parādīti rezultāti, kuri ir iegūti 50 GHz kanāla intervāla 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.

Šajā nodaļā apskatīti gan praksē pielietotie viļņa garuma filtri, kuru parametri un veiktspēja DWDM sistēmās novērtēta ar jaunām un Latvijā patentētām mērījumu shēmām, gan izstrādāti vispārināti ieteikumi komplekso pārvades funkciju izvēlei dažādu modulācijas formātu gadījumā. Parādīts, ka ar Pacelta-kosinusa filtru arī ir iespējama DPSK signāla demodulācija, kas nodrošina šāda risinājuma labāku noturību pret kaskādes slēguma radīto caurlaides joslas samazināšanos.

Ceturrtā nodaļa

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, ETDM laboratorijā. Vairāki pētījumi veikti ar MRR filtriem un to matemātiskais apraksts ir labi zināms [67]. 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.



16.att. Strukturāls viena riņķa MRR filtra modelis [9, 67]

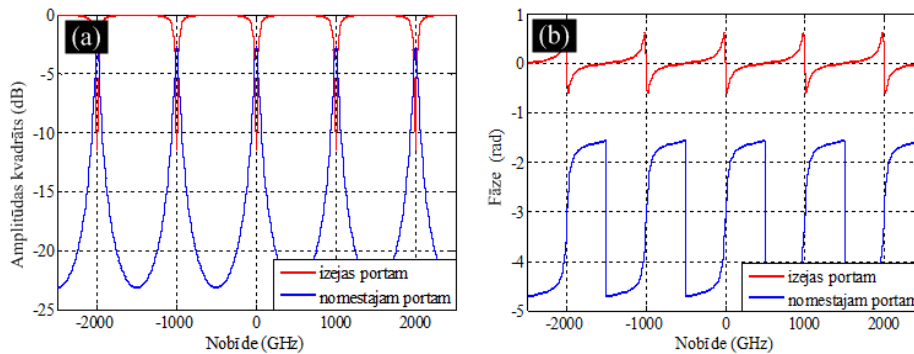
Lai iegūtu precīzu MRR viļņa garuma filtra matemātisko aprakstu, tad tika izmantotas matemātiskas izteiksmes, kurās ņemtas vērā arī materiāla īpašības. Lielāka uzmanība pievērsta viena riņķa MRR filtra arhitektūrai, kas skaidrojams ar tā uzbūves un izstrādes vienkāršību. Tomēr, viena riņķa MRR viļņa 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 [67]):

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

$$E_{\text{nomestais}} = \frac{-k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot e^{-\pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR} \right)}}{1 - t_1 \cdot t_2 \cdot \alpha \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot i \left(\frac{f-f_0}{FSR} \right)}} \quad (3)$$

kur $k_{1,2}$ - elektromagnētiskā lauka saites koeficients un apraksta virziendarbīgos savienotājus (skat. 16. attēlā), $t_{1,2} = 1 - k_{1,2}$ - izmantots pieraksta saīsināšanai, α - elektromagnētiskā lauka zudumu koeficients vienam riņķim, f_0 - MRR filtra centrālā frekvence, $FSR = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n_{\text{eff}}}$ - brīvā spektrālā josla (FSR), 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 [67, 75].

Kā redzams no 17. 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.



17. 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 $\alpha = 0.95$)

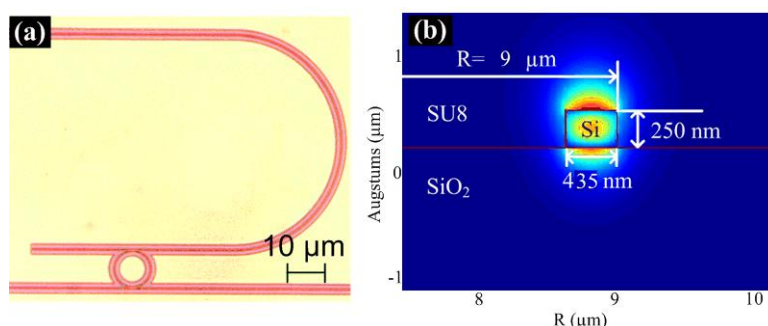
Pētījums tika veikts, lai noskaidrotu optiskā signāla degradācijas pakāpi, izplatoties caur vairākiem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem. Pētījumā izmantotas gan aprēķinu metodes, gan eksperimentālās metodes.

No silīcija veidoti MRR filtri piemēroti viļņa garuma filtru un optisko komutatoru izveidei [9]. Viens no primārajiem pielietojumiem ir optiskie ievades-izdales blīvētāji WDM sistēmās, izmantojot MRR struktūru, kura parādīta 16. attēlā. Turklāt, pateicoties to kompaktajam izmēram, integrēšanas iespējām un saderībai ar standarta mikroelektronikas ražošanas procesiem, tie ir būtiski pamatarhitektūras bloki nākotnes optisko starpsavienotāju arhitektūrām [70], 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 [39, 46]. Ļoti nesen tika demonstrēta 10 Gbit/s DPSK signālu pārraide caur MRR iekārtu [81]. 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 14. attēlā. Veikti BER koeficienta mērījumi 10 Gbit/s NRZ-OOK modulācijas formātam pēc izplatīšanās caur vairāku riņķu MRR [24]. 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 CSRZ-OOK un CSRZ-DPSK [17, 65].

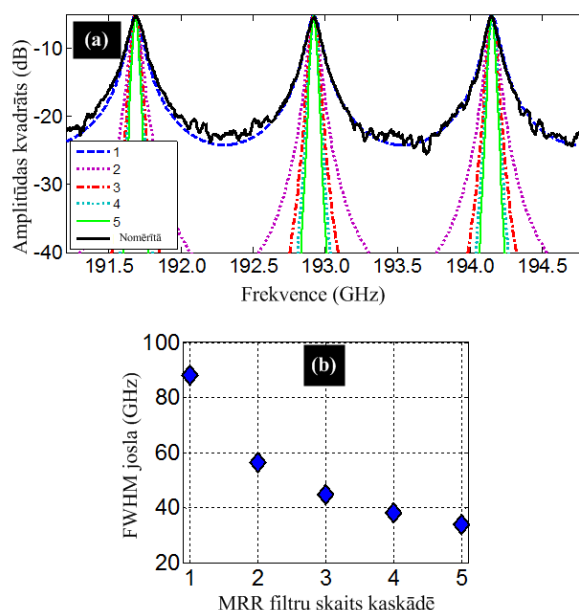
Silīcija MRR filtrs, kurš izmantots recirkulācijas cilpas ekperimetā parādīts 18.a. attēlā. Tas izveidots uz silīcijs uz izolatora (angļu val. silicon on insulator (SOI)) plāksnītes, kur silīcija biezums sasniedz 250 nm un tas ir izvietots uz 3 μm bieza silīcija dioksīda slāņa. Detalizēts iekārtas izgatavošanas procesa apraksts atrodams atsaucē [20]. Izveidota MRR filtra rādiuss ir 9 μm, atstarpe starp taisno viļņvadu un riņķa viļņvadu ir 80 nm, kā arī 435 nm viļņvada platums. 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 [20]. 19.a. attēlā parādīta viena riņķa MRR filtra nomestā porta pārvades funkcija. Nomērītais FSR ir 1235 GHz un Q_{MRR} parametrs ($Q_{MRR} = \frac{f_0}{\Delta f_{FWHM}}$) 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.



18. att. MRR filtra (a) skats no augšas un (b) taisnā viļņvada skats šķēsgriezumā

Savukārt, 19.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.

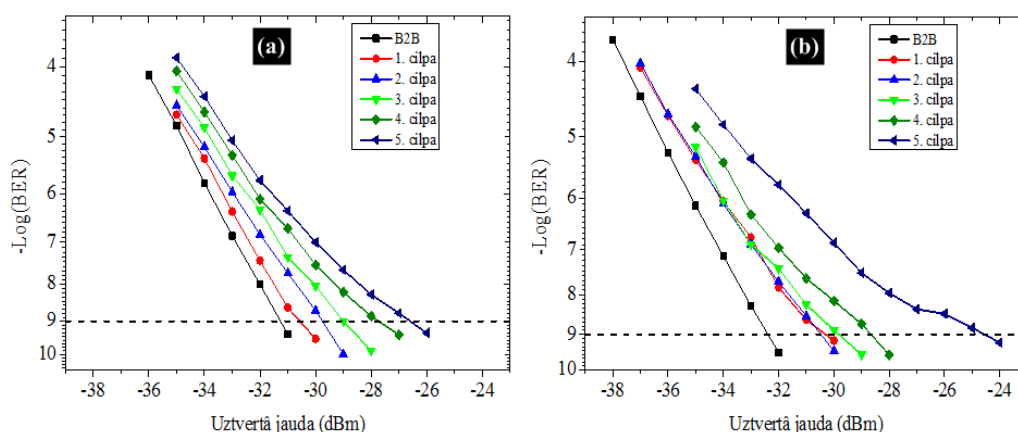


19. att. Izveidotā MRR filtra nomestā porta (a) nomērītā ATF, tās aproksimācija un kaskādē saslēgtās aproksimētās, ATF (b) FWHM joslas samazināšanās atkarībā no viena riņķa MRR skaita kaskādē

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. 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.

27

skaidrojams ar MRR filtra FWHM joslas samazināšanos (kā redzams 19.b. attēlā), kā rezultātā pieaug starpsimbolu interference un degradējas acu diagramma. No 21.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 [73] 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.



21. 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

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 21. attēlā iegūtajām BER raksturlīknēm, tad šī līmeņa sasniegšanai nepieciešams arvien lielāks jaudas līmenis. Atšķirību starp šīm jaudām sauc par jaudas „sodu” (angļu val. „power penalty”). Matemātiski to var pierakstīt šādā veidā:

$$P_{sods}|_{BER=10^{-9}}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_1|_{BER=10^{-9}}(mW)}{P_2|_{BER=10^{-9}}(mW)} = P_1|_{BER=10^{-9}}(dBm) - P_2|_{BER=10^{-9}}(dBm) \quad (4)$$

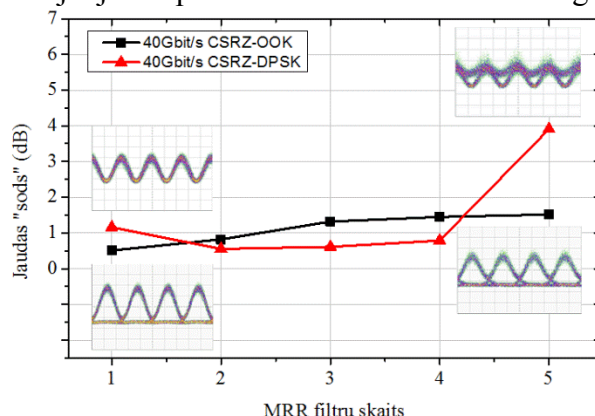
kur $P_1|_{BER=10^{-9}}$ - jauda, kura nepieciešama BER= 10^{-9} līmeņa sasniegšanai uztvērēja ieejā un

$P_2|_{BER=10^{-9}}$ - jauda kura nepieciešama BER= 10^{-9} līmeņa sasniegšanai raidītāja izejā.

Izmantojot 4. izteiksmi $P_{sods}|_{BER=10^{-9}}$ aprēķināts BER mērījumiem. Tad šie $P_{sods}|_{BER=10^{-9}}$ tika apstrādāti, 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 22. attēlā. Tikai 1 dB liels jaudas „sods” novērojams pēc katras MRR filtra kaskādes līdz pat ceturtajam filteram. Savukārt, pēc pieciem kaskādē saslēgtiem MRR filtriem efektīvā josla samazinājusies līdz 34 GHz (kā redzams no 14. attēla), kas radīja daļēju fāzes uz intensitātes modulācijas formātu pārveidi [21] un līdz ar to, arī pieaugošo jaudas „sodu” CSRZ-DPSK gadījumā, salīdzinot ar CSRZ-OOK. Tas ir novērojams arī 22. attēlā redzamajās acu diagrammās.

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.



22. 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

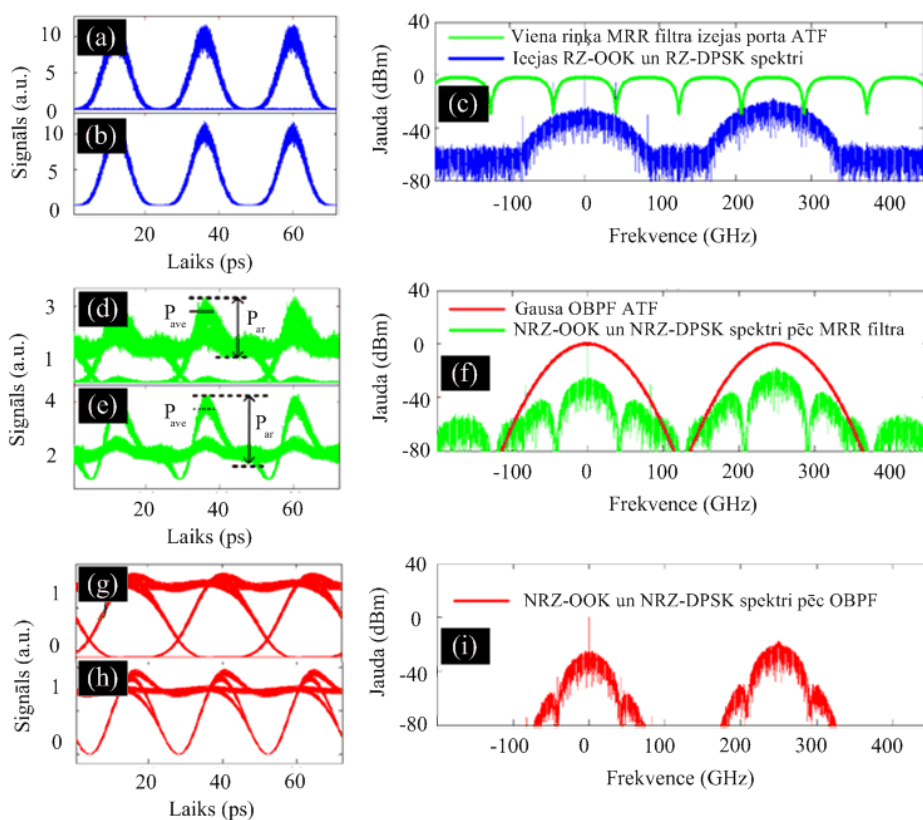
Pilnīgi optiska modulācijas formātu pārveide nepieciešama, lai uzlabotu nākotnes optisko tīklu elastīgumu. RZ uz NRZ signālu pārveide ir būtisks piemērs, lai parādītu dažādu nākotnes optisko tīklu daļu mijiedarbi, kas aktuāli starp transporta un piekļuves optiskajiem tīkliem. Līdz šim, būtiski atklājumi RZ-OOK uz NRZ-OOK modulācijas formātu pārveidē veikti ar nelineārās optiskās cilpas spoguļiem (NOLMs) [5], ar aktīviem injekcijas bloķētiem lāzeriem [15], vai pusvadītāju optiskais pastiprinātājs (SOA) [3, 82] ar samērā sarežģītu izpildījumu. Viena kanāla un daudzkanālu modulācijas formātu pārveides, kas balstītas uz pasīviem lineāriem filtriem [22, 84, 86] 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 [29, 48]. Pavisam nesen tika demonstrēta eksperimentāla viena kanāla [30] un daudzkanālu [87] 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 kompaktu izmēru un saderību ar mikroelektronikas ražošanas procesiem. Pētījumos šīs iekārtas pielietotas pilnīgi optiskai signālu apstrādei [42, 78]. Daudzkanālu RZ-OOK uz NRZ-OOK formātu pārveide veiksmīgi demonstrēta ar viena riņķa MRR filtru [22]. Pētījumā pirmo reizi demonstrēta vienlaicīga RZ-OOK uz NRZ-OOK un RZ-DPSK uz NRZ-DPSK formātu pārveide pie 41.6 Gbit/s pārraides ātruma ar piemērotu viena riņķa MRR filtru. Pētījumā pirmo reizi parādīts, ka ir iespējama RZ-DPSK uz NRZ-DPSK formātu pārveide ar MRR filtru [79]. 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 [65, 80].

Tālāk apskatītas viena riņķa MRR filtra izejas porta pārvades funkcijas pielietojuma iespējas modulācijas formātu pārveidē. Modulācijas formātu pārveides pamatā ir lineārs filtrēšanas process [22, 84]. Lai noskaidrotu atbilstošos viena riņķa MRR filtra parametrus, tika veiktas apjomīgas simulācijas Matlab vidē. Modulācijas formātu pārveides process pa etapiem parādīts 23.attēlā. Simulācijās izmantotā RZ-OOK un RZ-DPSK signālu acu diagrammas un spektri parādīti 23.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 23.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 23.g-i. attēlos). Viena riņķa MRR filtra izejas filtra pārvades funkcija aprakstīta 2. izteiksmē [67, 83].

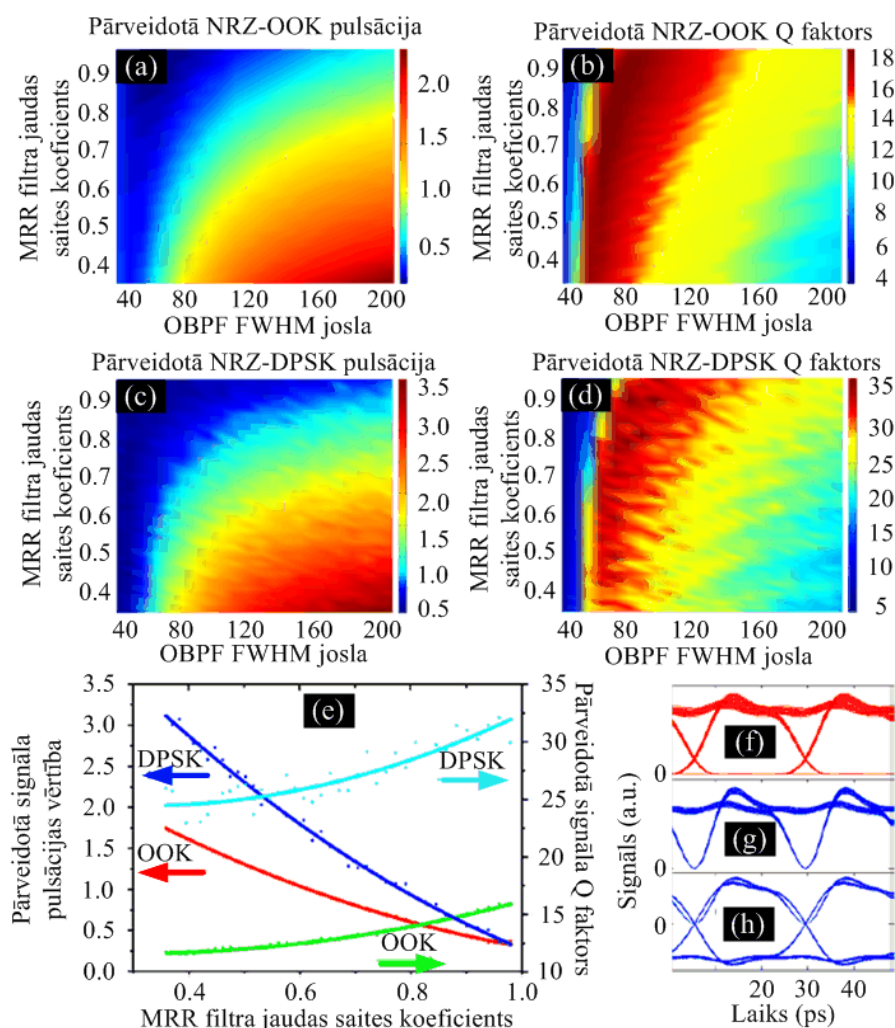
Galvenais nosacījums RZ-OOK uz NRZ-OOK un RZ-DPSK uz NRZ-DPSK modulācijas formātu pārveidei ir izvēlēties atbilstošu FSR viena riņķa MRR filtram. Šim parametram jābūt divas reizes lielākam kā datu pārraides ātrumam, kas konkrētajā gadījumā ir 83.2 GHz. MRR filtra izejas fortā nonākušais pārveidotais NRZ-OOK un NRZ-DPSK optiskais signāls ir ar samērā lielu pulsāciju (skat.23.d-f. attēlos), kuru efektīvi var novērst ar papildus Gausa formas OBPF (skat. 23.g-i. attēlos). Aprakstītā metode jau veiksmīgi pielietota, lai pārveidotu RZ-OOK uz NRZ-OOK modulācijas formātu [22], 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.



23. 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

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. 24.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. 23.d-e. attēlus). Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem 24.a-d. attēlā, tad pārveidotā optiskā signāla pulsācijas vērtības un Q

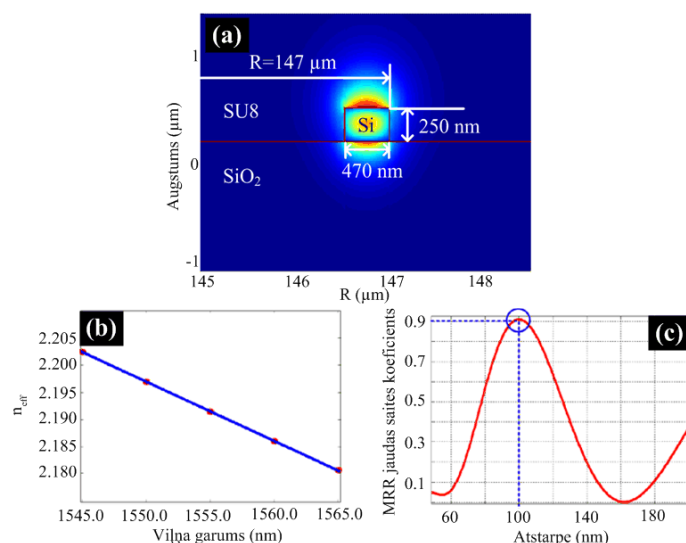
faktors atkarībā no MRR jaudas saites koeficienta un OBPF FWHM joslas platuma ir ar līdzīgu raksturu gan OOK, gan DPSK modulācijas formātiem. Lai modulācijas formāta pārveidi veiktu efektīvi, ir nepieciešams sasniegt nelielas pulsācijas vērtības un augstu Q faktora vērtību. Pie fiksētas OBPF FWHM joslas vērtības 125GHz pārveidoto optisko signālu pulsācijas vērtības un Q faktors tika aprēķināts atkarībā no MRR filtra jaudas saites koeficienta (skat. 24.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 24.f-h. attēlos).



24. 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

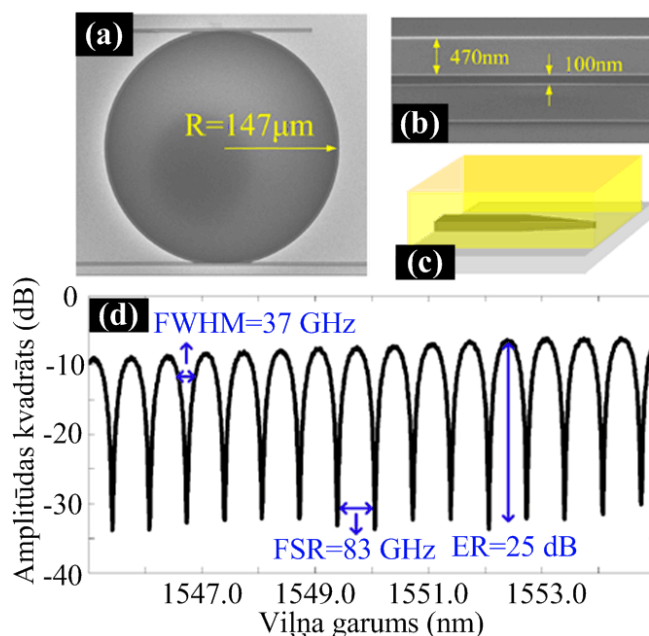
Pilnā 3D vektoriālā plāno kārtiņu modu saskaņošanas metode (angļu val. 3-D full vectorial film mode matching method) un saistīto modu teorija [10] izmantotas, lai izstrādātu atbilstošu viena riņķa MRR. Izvēlēti šādi parametri: FSR=83.2 GHz un augsts jaudas saites koeficients. Viena riņķa MRR izgatavots uz SOI plāksnītes, kur silīcija biezums sasniedz 250

nm un tas ir izvietots uz 3 μm bieza silīcija dioksīda slāņa, kā redzams 25.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 [22].



25. att. Izveidotā viena riņķa MRR filtra (a) taisnā viļņvada skats šķēsgriezumā, (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

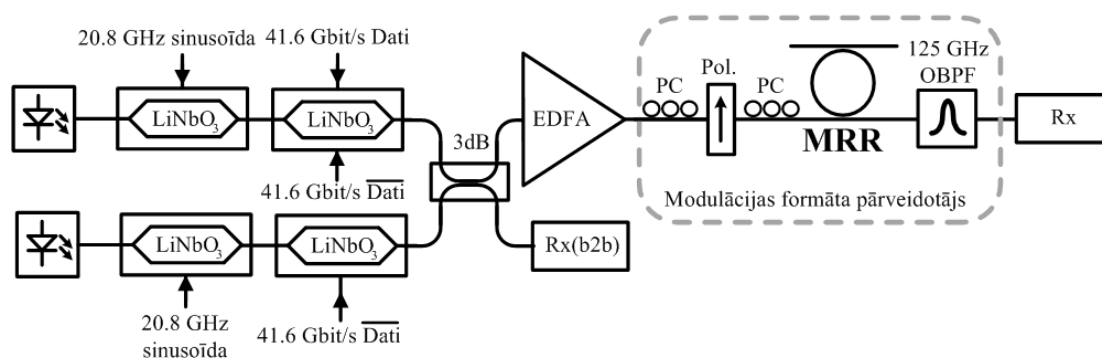
25.b. attēlā redzams efektīvais laušanas koeficients kā funkcija no viļņa garuma TM_0 modai, savukārt, 25.c. attēlā parādīts aprēķinātais jaudas saites koeficients TM_0 modai atkarībā no atstarpes starp taisno un liekto viļņvadiem. Aprēķinātais grupveida laušanas koeficients ir 3.9005 pie 1550.0 nm viļņa garuma. MRR filtra rādiuss ir 147 μm , kas atbilst FSR vērtībai 83.2 GHz. Izvēlēts $k^2=0.9$, kas ir sasniedzams ar 100 nm atstarpi starp taisno un liekto viļņvadiem, lai veiktu efektīvu formātu pārveidi.



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

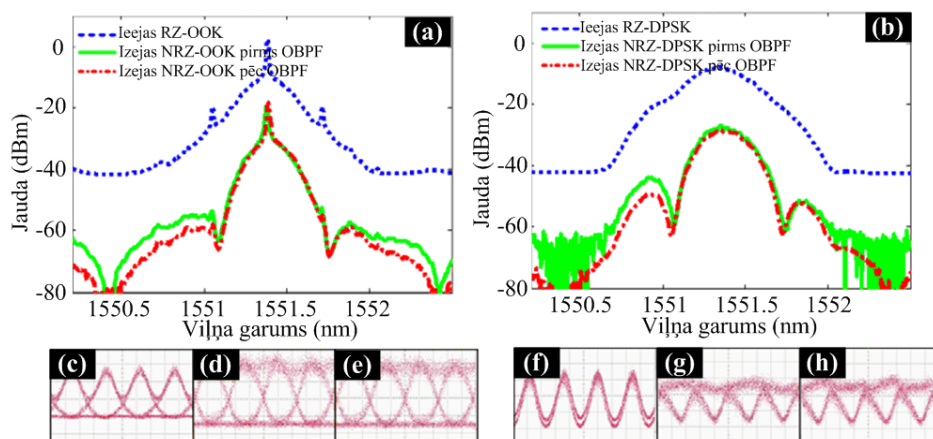
MRR filtrs tika izstrādāts uz SOI plāksnītes. Detalizēts izgatavošanas process aprakstīts [20]. 26. a-c. attēlos parādīta izstrādātās iekārtas struktūra ar rādiusu 147 μm , viļņvada platumu 470 nm un atstarpi starp taisno un liekto viļņvadiem 100 nm. Lai samazinātu iekārtas savienošanas zudumus ar optisko šķiedru ar konusveida galu visu portu viļņvadu sākumdaļa izveidota apgriezti konusveida un pārklāta ar polimēru, kas veido nano-savienotāju, kurš redzams 26.c. attēlā. Savukārt, 26.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 $k^2=0.9$.

Eksperimentālā mērījumu shēma vienlaicīgai RZ-NRZ pārveidei abiem modulācijas formātiem: OOK un DPSK, redzama 27. 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 $2^{31}-1$ 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.



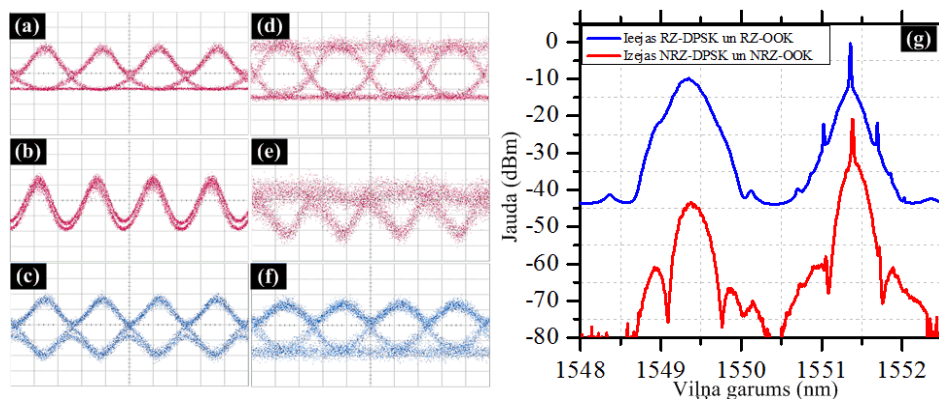
27. att. Eksperimentālā mērījumu shēma modulācijas formātu pārveidei

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. 28.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 28.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. 24.a un 24.c. attēlus).



28. att. Nomērtie 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 lāzeri. 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).

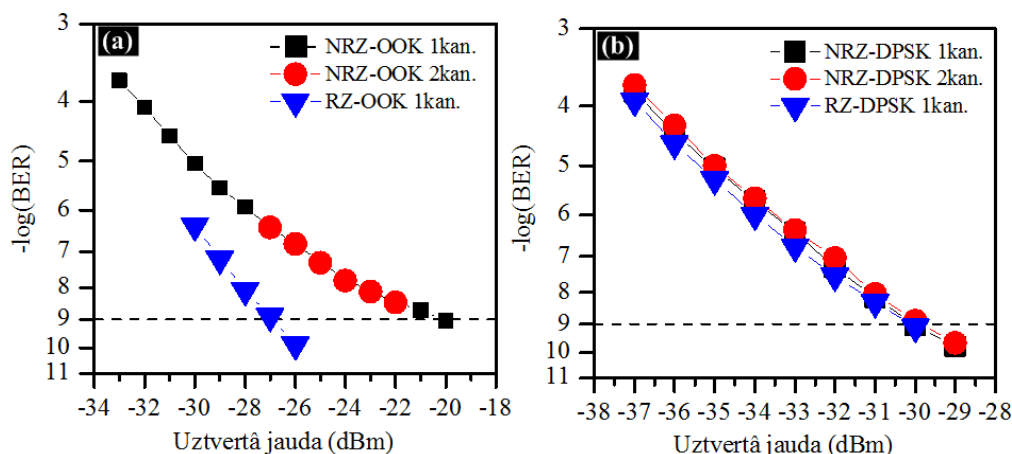


29. att. Nomērtās acu diagrammas (a) ieejas RZ-OOK (viens kanāls ieslēgts), (b) ieejas RZ-DPSK (viens kanāls ieslēgts), (c) demodulētajam ieejas RZ-DPSK pēc saskaņotas uztveršanas, (d) pārveidotajam NRZ-OOK (divi kanāli ieslēgti), (e) pārveidotajam NRZ-DPSK (divi kanāli ieslēgti) un (f) demodulētajam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

Nomērtās 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 nomērtie jaudas spektri abiem ieejas RZ signāliem un pārveidotajiem NRZ signāliem pie 0.2 nm izšķirtspējas ir redzami 29. attēlā. Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, tad vienlaicīga modulācijas formātu pārveide ir veiksmīga abiem kanāliem. Novērotas tikai nelielas

pārveidotā signāla amplitūdas pulsācijas, pateicoties augstajam MRR filtra jaudas saites koeficientam.

Savukārt, 30. 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 pārveides gadījumā. 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 [22].



30. att. BER mērījumi (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.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

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 viļņgarumdaļes 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 viļņgarumdaļes blīvēšanas sistēmu uzlabošanai, gan jaunu ieviešanai. Sadarbības līguma ietvaros rekomendācijas praktiski realizētas AS „Latvenergo”, SIA „Telia Latvia” un SIA „TELE2” viļņgarumdaļes 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 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.

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. 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.
4. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R., Erbium-Doped Fiber Amplifiers. Fundamentals and Technology. – USA: Academic Press, 1999. - 481.p.
5. 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.
6. Binh N. Photonic Signal Processing. Techniques and Applications. – USA: CRC Press, 2008. - 382.p.
7. Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Investigation of Minimal Channel Spacing in HDWDM Systems// Electronics and Electrical Engineering, - 2009. – Vol. 4(92) – 53.-56.p.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Cisco Systems. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2011–2016// White paper. – 2012. – Vol.1. – 1.-16.p.
17. Cohen L.G. Comparison of single-mode fiber dispersion measurement techniques //J. Lightwave Technol. – 1985. – Vol.3. – 958.-966.p.
18. 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.
19. Derickson D. Fiber Optic Test and Measurement. – USA: Prentice Hall, 1998. – 642.p.
20. 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.
21. 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.
 22. 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.
 23. Dutta A.K., Dutta N.K., Fujiwara M. WDM Technologies: Passive Optical Components. – USA: Academic Press. 2003. – 551.p.
 24. 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.
 25. Folland G. B. The Fourier analysis and its applications. – USA: Wadsworth, 1992. - 441.p.
 26. 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.
 27. Ghatak A., Thyagarajan K. Introduction to fiber optics. – UK: Cambridge University Press. 2008. - 565.p.
 28. 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.
 29. 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.
 30. 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.
 31. 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.
 32. Hecht J. Recycled Fiber Optics, How Old Ideas Drove New Technology// Optics and Photonics News. – 2012. - Vol.23(2). – 22.-29.p.
 33. Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Ozoliņš O.**, Poriņš J. Realization of HDWDM Transmission System // International Journal of Physical Sciences. - 5. (2010) -452.-458.p.
 34. 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.
 35. 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.
 36. 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.
 37. 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.
 38. Laude J.P. DWDM Fundamentals, Components, and Applications - London: Artech House, 2002. – 282.p.

39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. Lyubomirsky I., Chien C.C. DPSK Demodulator Based on Optical Discriminator Filter// Photonics Technology Letters. – 2005. – Vol.17(2). – 492.-494.p.
44. Lyubomirsky, I. Advanced modulation Formats for Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing// White paper. - 2007. – Vol.1. – 1.-14.p.
45. Ļašuks I., Ščemeļevs A., Ozoliņš O. Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // Electronics and Electrical Engineering. - 5. (2008) 45.-48.p.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. **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.
52. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Realization of Optimal FBG Band-Pass Filters for High Speed HDWDM // Electronics and Electrical Engineering. - 4. (2009) 41.-44. p.
53. **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.
54. **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.
55. **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.
56. **Ozoliņš O.**, Ivanovs Ģ. Estimation of DWDM Transmission for Broadband Access with FBG Technology // Electronics and Electrical Engineering. - 5. (2011) 11.-14. p.

57. **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.
58. **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.
59. **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.
60. **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. p.
61. **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.
62. 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.
63. **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.
64. **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.
65. 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.-1.p.
66. Peucheret C., Palle J. Fibre and component induced limitations in high capacity optical networks. Doctoral thesis. – Denmark: Technical University of Denmark, 2004. - 274.p.
67. Rabus D.G. Integrated Ring Resonators: The Compendium. – USA:Springer, 2007. – 272.p.
68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. Sivarajan R., Ramaswami K.N. Optical Networks: A Practical Perspective. – USA: Elsevier. 2010. – 893.p.
72. 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.

73. Thyagarajan, K., Ghatak, A., Fiber Optic Essentials – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 259.p.
74. Tomkos I., Hesse R., Antoniadis 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.
75. Venghaus H. Wavelength Filters in Fiber Optics. – USA: Springer, 2006. – 472.p.
76. Winzer P.J., Essiambre R.J. Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks// J. Lightwave Technol. – 2006. Vol.24. – 4711.-4728.p.
77. 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.
78. 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.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. Yariv A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides// Electron. Lett. – 2000. – Vol.36. 321.-322.p.
84. 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.
85. 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.
86. 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.
87. 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.
88. 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.