

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte  
Telekomunikāciju institūts

**Sandis SPOLĪTIS**

Doktora studiju programmas «Telekomunikācijas» doktorants

**ĀTRDARBĪGU OPTISKO PIEKĻUVES  
SAKARU SISTĒMU IZSTRĀDE UN NOVĒRTĒJUMS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. sc. ing.*  
**Ģ. IVANOVŠ**

**RTU izdevniecība**  
**Rīga 2015**

Spolītis S. Ātrdarbīgu optisko piekļuves sakaru sistēmu izstrāde un novērtējums.

Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU, 2015, 40 lpp.

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

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes «RTU P-08» 2015. gada 19. marta lēmumu, protokols Nr. 27.



**Eiropas sociālais fonds**



**Eiropas savienība**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 30. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 16/20.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

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

Vadošais pētnieks *Dr. phys.* Mārtiņš Rutkis  
Latvijas Universitāte, Cietvielu fizikas institūts

Profesors *Dr. phys.* Edmunds Tamanis  
Daugavpils Universitāte, Dabaszinātņu un matemātikas fakultāte

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Sandis Spolītis ..... (Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads un 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 5 pielikumi, 88 zīmējumi un ilustrācijas, kopā 163 lappuses. Literatūras sarakstā ir 174 nosaukumi.

## PATEICĪBA

Izsaku pateicību promocijas darba vadītājam profesoram Ģirtam Ivanovam, par vērtīgajiem padomiem promocijas darba izstrādes gaitā. Paldies arī profesoriem Vjačeslavam Bobrovam un Jurgim Poriņam par palīdzību darba sākšanai gan ar simulācijas programmām, gan ar laboratorijas iekārtām. Tas man deva nozīmīgu atbalstu. Doktorantūras laikā man bija tas gods strādāt kopā ar telpas biedriem Alekseju Udaļcovu, Oskaru Ozoliņu, Andi Supi un Sergeju Olonkinu. Paldies jums par draudzīgo atmosfēru, padomiem un atbalstu!

Nozīmīga daļa no promocijas darbā iekļautajiem pētījumiem ir veikti Dānijas Tehniskajā universitātē (DTU), Fotonikas institūtā, Metro piekļuves un tuvas darbības sistēmu grupā, Dānijā. Tas bija liels pagodinājums un iespēja veikt savus pētījumus profesora *Idelfonso Tafur Monroy* un asociētā profesora *Juan José Vegas Olmos* vadībā. Manas uzturēšanās laikā DTU man bija iespēja satikt daudz brīnišķīgu cilvēku – *Christoph Wagner*, *Xiaodan Pang*, *Alexander Lebedev*, *Robert Borkowski*, *Jesper Bevensen Jensen* un citus.

No sirds pateicos savai ģimenei: tēvam Guntim, mātei Initai, māsai Elīnai un maniemiņiem mīļajiem vecvecākiem. Bez jūsu palīdzības, atbalsta un mīlestības man tas nebūtu izdevies. Paldies Zanei, ka esi bijusi manas dzīves nozīmīga daļa doktorantūras laikā.

Paldies visiem, ar kuriem kopā esmu strādājis vai kuri mani ir atbalstījuši, bet kuru vārds šeit nav pieminēts.

## ACKNOWLEDGMENTS

I would first like to thank my supervisor Professor Ģirts Ivanovs for supporting me and giving valuable advice during these past four years in which I have developed my Doctoral Thesis. I also thank Professors Vjačeslavs Bobrovs and Jurgis Poriņš who helped me to start my research with simulation programs and laboratory equipment. It gave me significant support. During my Doctoral studies, I had the pleasure to work together with my room colleagues Aleksejs Udaļcovs, Oskars Ozoliņš, Andis Supe and Sergejs Olonkins. Thank you guys for the friendly atmosphere, advice and support!

An important part of my Doctoral Thesis was elaborated at the Technical University of Denmark, Department of Photonics Engineering (DTU Fotonik), Metro-Access and Short Range Systems Group, Denmark. It was a great opportunity and privilege to work under the supervision of Professor Idelfonso Tafur Monroy and Associate Professor Juan José Vegas Olmos. During my stay at DTU I had the opportunity to meet many wonderful people – Christoph Wagner, Xiaodan Pang, Alexander Lebedev, Robert Borkowski, Jesper Bevensen Jensen and others.

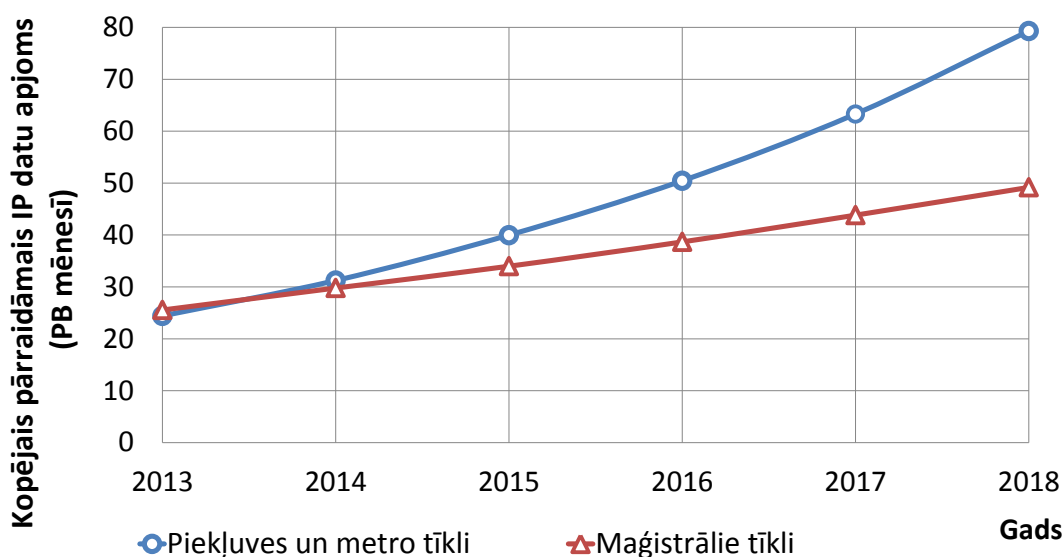
I would like to thank my entire family, in particular my father Guntis, mother Inita, sister Elīna and my dear grandparents. I could not have done it without your help, support and love. Special thanks to Zane for being a very important part in my life during elaboration of my Doctoral Thesis.

Thanks to everyone with whom I have worked together, or who has supported me, but whose name is not mentioned here.

## DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Mūsdienās informācijas pārraides tehnoloģijām, kas izmanto optisko šķiedru kā informācijas pārraides vidi, ir liela nozīme telekomunikāciju nozarē. Strauji pieaugošais pārraidāmais datu plūsmas apjoms pieprasa ātrāku tehnoloģiju ienākšanu telekomunikāciju sektorā. Pakalpojumi, piemēram, ātrgaitas internets un 3D televīzija, kas tiek nodrošināti, izmantojot vienu un to pašu klienta pieslēgumu, pieprasa arvien lielākus datu pārraides ātrumus [26]. Kompānijas *Cisco* veiktā analīze [8] rāda, ka piekļuves un metro tīklos pārraidāmais datu apjoms ir piedzīvojis strauju pieaugumu un jau 2013. gadā ir pārsniedzis maģistrālajos tīklos pārraidāmās datu plūsmas apjomu (skat 1. att.). Šāds pieauguma temps saglabāsies arī turpmāk, tiek paredzēts, ka 2018. gadā piekļuves un metro tīklos pārraidāmais datu apjoms sasniegs 62 % no kopējā pārraidāmā datu apjoma [8].



1. att. Kompānijas *Cisco* prognozes kopējam pārraidām datu apjomam laika posmā no 2013. līdz 2018. gadam [8]

Ņemot vērā faktu, ka vislielākais pārraidāmo datu apjoma pieaugums ir novērojams piekļuves līmenī, īpašu uzmanību ir jāpievērš tieši optiskajiem piekļuves tīkliem. Visbiežāk šajās optiskajās piekļuves līnijās informācijas pārraide līdz pat klienta dzīvoklim vai mājai tiek nodrošināta, izmantojot vienu optisko šķiedru (OŠ) [13, 14].

Promocijas darbā aplūkotā tēma ir aktuāla, jo šobrīd Latvijā norit strauja sakaru nozares attīstība [14, 49, 50]. Šobrīd esošajās optiskajās piekļuves sakaru sistēmās tiek izmantota laukdales blīvā pasīvā optiskā tīkla (TDM-PON) tehnoloģija, bet tuvāko piecu gadu laikā, augot vajadzībai pēc lielākiem datu pārraides ātrumiem, būs nepieciešams modernizēt esošo tīkla infrastruktūru un ieviest ātrdarbīgu viļņgarumdales blīvā pasīvo optisko tīklu (WDM-PON) tehnoloģiju, kas spēj nodrošināt lielākus datu pārraides ātrumus (virs 2.5 un 10 Gbit/s) lielākā attālumā (vismaz 20 km) nekā to spēj esošā TDM-PON tehnoloģija (ar pārraides ātrumiem līdz 2.5 Gbit/s) [2, 37, 38, 46, 51].

Augošais interneta lietotāju un datu plūsmas apjoms (no tādiem servisiem kā tiešsaistes videospēles, augstas izšķirtspējas video straumēšana, telemedicīnas pakalpojumi, videokonferences, datorizētas tirdzniecības sistēmas un citi) sakaru tīkla operatoriem izvirza vairākus izaicinājumus, un tie ir spiesti uzlabot šķiedru optiskā tīkla infrastruktūru [6, 28]. Līdz ar to optiskajiem piekļuves tīkliem ir jābūt spējīgiem nodrošināt augstākus un augstākus datu pārraides ātrumus (2.5 un 10 Gbit/s) ar zemu signāla latentumu, maksimāli izmantojot esošās elektriskās un optoelektriskās komponentes. Jāuzsver, ka no 2012. gada Latvijā tiek

realizēts ERAF projekts «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos», kura mērķis ir attīstīt nākamās paaudzes tīklus (NGN) Latvijas attālinātās lauku teritorijās un veicināt stratēģijas «Eiropa 2020» izvirzīto mērķu (līdz 2020. gadam nodrošināt visām māsaimniecībām iespēju saņemt pieeju internetam ar minimālo ātrumu 30 Mbit/s un 50 % māsaimniecību 2020. gadā nodrošināt internetu ar piekļuves ātrumu vismaz 100 Mbit/s) sasniegšanu [52]. Projekts paredz izvērst 7000 km garas optiskās līnijas, kas nodrošinātu optiskā tīkla piekļuvi 500 pieslēgumu punktos. Tādējādi būs nepieciešams nodrošināt piekļuves tehnoloģijas, kas veic datu pārraidi «pēdējā jūdzē», kas ir tīkls no pakalpojumu sniedzēja piekļuves punkta līdz individuālam telekomunikāciju pakalpojumu lietotājam [52]. Līdz ar to darbā izstrādātās tehnoloģijas un risinājumi, pilnībā var tikt izmantoti tālākai minētā projekta sekmīgai realizācijai un sakaru pakalpojumu nodrošināšanai no pakalpojumu sniedzēja līdz galalietotājam.

### Darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot minētos faktus, tika izvirzīts šāds promocijas **darba mērķis**: novērtēt *WDM* optisko piekļuves sakaru sistēmu veiktspējas uzlabošanas paņēmienus ar teorētiskiem un eksperimentāliem pētījumiem.

Lai sasniegtu šo mērķi, bija nepieciešams veikt šādus **pamatuzdevumus**.

1. Novērtēt laikdales (*TDM*) un viļņgarumdales blīvētu (*WDM*) optisko piekļuves sakaru sistēmu tehnoloģiskos risinājumus un to galvenos elementus.
2. Novērtēt hromatiskās dispersijas kompensācijas metožu pielietojumu datu pārraides kvalitātes uzlabošanai un maksimālā pārraides attāluma palielināšanai, izveidojot līdz 16 kanālu *WDM-PON* un *SS-WDM PON* sakaru sistēmu simulācijas modeļus ar pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā.
3. Izstrādāt jaudīga platjoslas *ASE* gaismas avota modeli ar līdzenu izejas optiskā signāla frekvenču raksturlīkni, ko var izmantot līdz 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas realizācijai *C* joslā (1530–1565 nm).
4. Izveidot *WDM-PON* un *SS-WDM PON* sakaru sistēmu eksperimentālo maketu ar dispersijas kompensāciju un veikt praktiski iegūto rezultātu iespējamo salīdzinošo analīzi ar simulācijas datiem.
5. Izstrādāt elektrooptiska spektrāli sagriezta raiduztvērēja prototipu ātrdarbīgu optisko signālu pārraidei un uztveršanai, kā arī novērtēt tā darbību, realizējot 1 Gbit/s NRZ elektriskā signāla sagriešanu, pārraidi caur 25 km garu standarta vienmodas optiskās šķiedras posmu, un atjaunošanu, izmantojot ierobežotu līdz 500 MHz elektrisko komponentu frekvenču caurlaides joslu.
6. Novērtēt pārraidāmā signāla latentuma cēloņus ātrdarbīgās optiskajās piekļuves sakaru sistēmās un izveidot modeli šo sistēmu iespējami zemākās laika aiztures iegūšanai.

### Pētījumu metode

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentāli mērījumi. *WDM-PON* un *SS-WDM PON* sistēmu realizācijai, skaitliskajās simulācijās izmantots nelineārais Šrēdingera vienādojums, tiešā un inversā ātrā Furjē transformācija, kā arī Monte Karlo metode bitu kļūdu attiecības (BER) novērtēšanai.

Spektrāli sagriezta raiduztvērēja ciparu signālu apstrādē (*DSP*) ir izmantota tiešā un inversā ātrā Furjē transformācija, lai veiktu vairākkārtēju signāla apstrādi gan laika, gan arī frekvenču telpā. Optiskā signāla kvalitātes novērtēšanai gan simulatīvā vidē, gan arī reālos eksperimentos tika izmantoti jaudas, spektra, acu diagrammu un bitu kļūdu attiecības mērījumi. Darbā aprakstītie zinātniskie eksperimenti ir realizēti gan RTU Telekomunikāciju

institūta Šķiedru optikas pārraides sistēmu laboratorijā (Latvija), gan arī DTU Fotonikas institūta Metro piekļuves un tuvas darbības sistēmu grupas laboratorijā (Dānija).

## Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

### Promocijas darba jaunieguvumi

1. Izstrādāti 8 un 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmu ar pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā tehnoloģiskie risinājumi, kas ļauj tās pilnībā integrēt jau eksistējošos optiskajos piekļuves tīklos, balstītos uz ITU-T G.694.1 frekvenču plānu;
2. Izstrādāts jaudīga platjoslas *ASE* gaismas avota skaitlisks modelis, kas nodrošina +23 dBm (200 mW) vidējo izejas jaudu ar praktiski līdzenu frekvenču pārvades raksturlielni diapazonā no 192.3 THz līdz 194.0 THz (no 1545.32 nm līdz 1558.98 nm);
3. Novērtēts pusvadītāju optiskā pastiprinātāja pielietojums datu pārraides ātruma palielināšanai no 2.5 līdz 10 Gbit/s 16 kanālu spektrāli sagrieztās *WDM-PON* sistēmās;
4. Izveidots spektrāli sagriezta raiduztvērēja modelis, kas, pielietojot ciparu signālu apstrādi (*DSP*), ļauj pārraidīt 1 Gbit/s *NRZ* sagriezto platjoslas elektrisko signālu, izmantojot elektriskās un optoelektriskās sistēmas komponentes ar 500 MHz joslas platumu, tādā veidā ļaujot realizēt ātrdarbīgāku datu pārraidi ar jau esošas pārraides sistēmas infrastruktūru;
5. Novērtēti galvenie latentuma cēloņi optiskajās *TDM* un *WDM* piekļuves sistēmās, atrasti veidi, kā kopējo tipiskas pārraides līnijas latentumu iespējams samazināt vairāk par 20 %.

### Promocijas darba izstrādes laikā tika iegūti šādi galvenie secinājumi

1. Pielietojot hromatiskās dispersijas kompensācijas metodes (*DCF* un *FBG*), 16 kanālu *WDM-PON* piekļuves sistēmas ar pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā, maksimālo pārraides attālumu iespējams palielināt vairāk par 25 % (līdz 70 km robežās);
2. Dispersijas kompensācijas realizācijas gadījumā zemāku uztvertā signāla BER ir iespējams iegūt, pielietojot šķiedras Brega režģi (*FBG*) nevis dispersijas kompensējošu šķiedru (*DCF*). Tas izskaidrojams ar to, ka *FBG* var tikt izmantots pie augstākām optiskajām pārraides jaudām, jo tas mazāk izraisa nelineāros optiskos efektus, kas var kropļot pārraidāmo optisko signālu, kā arī tā ienesto zudumu lielums (ap 3.5 dB vienam *FBG DCM* modulim) tipiski ir mazāks nekā *DCF* šķiedrai (ap 0.6 dB/km);
3. 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas realizācijai nepieciešamo platjoslas *ASE* gaismas avotu ar izejas jaudu vismaz +23 dBm (200 mW) un līdzenu izejas optiskā signāla frekvenču raksturlielni sistēmas darbības diapazonā (*C* joslā) var izveidot no diviem kaskādē savienotiem *EDFA* pastiprinātājiem, piemeklējot to parametrus (erbijs leģētās šķiedras garumu, pumpējošo gaismas avotu jaudu un viļņa garumu);
4. Sagriezto elektrisko 1 Gbit/s *NRZ* signālu var pārraidīt caur līdz 25 km garām *SMF*, *DSF* un *NZ-DSF* šķiedrām, uztvert un pilnībā atjaunot tā 1 GHz frekvenču pamatjoslas formu, pārraidot un apvienojot 500 MHz platas frekvenču joslas šķēles elektrisko komponentu pamatjoslas platumā;
5. Optiskajās piekļuves metro sakaru sistēmās ir iespējams samazināt latentuma parametru vismaz par 20 %, pielietojot darbā piedāvāto risinājumu, kas paredz aizstāt esošos optiskos un optoelektriskos sistēmas elementus ar zemākas aiztures elementiem.

### Darba praktiskā vērtība

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti 3 starptautisko un 5 Latvijas zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.
2. Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas gan ekspluatācijā esošu optisko piekļuves tīklu uzlabošanai, gan arī jaunu ieviešanai. Darba iegūtie rezultāti tika izmantoti SIA «Telvia Latvija» šķiedru optikas pārraides sistēmu pilnveidošanai un *LVRTC* realizēta

ERAF projekta «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos» izstrādē, kā arī valsts pētījumu programmā (VPP) «Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai» (VPP *SOPHIS*).

3. Izstrādāta Latvijā patentēta viļņgarumdales blīvēta optiskā piekļuves sistēma ar hromatiskās dispersijas kompensāciju, kas ir realizēta uz čirpota šķiedras Brega režģa (*FBG*) bāzes.
4. Izstrādāts eksperimentāls *SS-WDM PON* sakaru sistēmas makets, kuru var pilnveidot ar jauniem elementiem un paplašināt līdz pat 10 Gbit/s pārraides ātrumam kanālā, kas paredzēts tālākiem eksperimentāliem pētījumiem.
5. Izstrādāts eksperimentāls spektrāli sagriezta raiduztvērēja makets, kas spēj pārraidīt, uztvert un atjaunot 1 Gbit/s NRZ elektrisko signālu, sagriežot to divās frekvenču šķēlēs, kur katra aizņem līdz 500 MHz frekvenču pamatjoslu.

Darbā tika izvirzītas šādas **aizstāvamās tēzes**

1. Viļņgarumdales blīvētās *PON* piekļuves sistēmās ar kanālu skaitu līdz 16 un pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā ir iespējams realizēt maksimālā pārraides attāluma palielināšanu pat virs 25 %, pielietojot dispersijas kompensāciju ar *FBG* režģi.
2. Optiskajās piekļuves sakaru sistēmās, pielietojot spektrālās sagriešanas tehnoloģiju, ir iespējams pārraidīt, uztvert un atjaunot spektrāli vismaz divas reizes platāku signālu, nekā to atļauj esošo elektrisko elementu frekvenču caurlaides josla.
3. Darbā ir pierādīts, ka šķiedru optiskajās piekļuves sakaru sistēmās uzkrāto signāla latentumu ir iespējams samazināt pat virs 20 %, nomainot eksistējošās optiskā tīkla komponentes ar autora piedāvātajām zemāka ienestā latentuma komponentēm.

## Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti 21 starptautiskajā zinātniskajā konferencē, kā arī atspoguļoti 4 publikācijās zinātniskajos žurnālos, 16 rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, 1 nodaļā zinātniskā monogrāfijā, 2 Latvijas patentos un 1 Latvijas patenta pieteikumā.

Ziņojumi **starptautiskajās konferencēs**

1. Wagner C., Madsen P., **Spolitis S.**, Vegas Olmos J.J., Monroy I.T. Sliceable transponders for metro-access transmission links// SPIE Photonics West 2015 – Optical Metro Networks and Short-Haul Systems (OPTO). **Amerikas Savienotās Valstis**, Sanfrancisko, 10.–12. februāris, 2015 (**Invited**).
2. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Ivanovs G. Latency Causes and Reduction in Optical Metro Networks// SPIE Photonics West 2014 – Optical Metro Networks and Short-Haul Systems (OPTO). **Amerikas Savienotās Valstis**, Sanfrancisko, 1.–6. februāris, 2014 (**Invited**).
3. **Spolitis S.**, Wagner C., Vegas Olmos J.J., Bobrovs V., Ivanovs G., Monroy I.T. Experimental Demonstration of a Scalable Sliceable Transceiver for Optical Access Networks// Asia Communications and Photonics Conference 2014, **Kīna**, Pekina, 11.–14. novembris, 2014.
4. **Spolitis S.**, Vegas Olmos J.J., Bobrovs V., Ivanovs G., Monroy I.T. A Novel Approach for Transmission of 56 Gbit/s NRZ Signal in Access Network Using Spectrum Slicing Technique// Asia Communications and Photonics Conference 2013, **Kīna**, Pekina, 12.–15. decembris, 2013.
5. **Spolitis S.**, Ivanovs G. Realization of up to 10 Gbit/s Spectrum Sliced Optical Access System// 8<sup>th</sup> International Conference «Advanced Optical Materials and Devices» (AOMD-8), Rīga, **Latvija**, 25.–27. augusts, 2014.



6. **Spolitis S.**, Olonkins S., Porins J. Realization of Dense Bidirectional Spectrum Sliced WDM-PON Access System// 9<sup>th</sup> International Symposium on Communications Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2014), **Anglija**, Mančestera, 23.–25. jūlijs, 2014.
7. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Trifonovs I., Ivanovs G. Spectrum Sliced WDM-PON System as Energy Efficient Solution for Optical Access Systems// 5<sup>th</sup> IEEE Latin America Conference on Communications (LATINCOM 2013), **Čīle**, Santjago, 24.–26. novembris, 2013.
8. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Comparison of 8-Channel and 16-Channel Energy Efficient Spectrum Sliced WDM-PON Systems// Riga Technical University 54<sup>th</sup> International Scientific Conference, **Latvija**, Rīga, 14.–16. oktobris, 2013.
9. Ivanovs G., **Spolitis S.**, Parts R., Bobrovs V. Performance Improvement of Spectrum-Sliced Passive Optical Network// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), **Taivāna**, Taipeja, 25.–28. marts, 2013.
10. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Ivanovs G., Gavars P. Performance Improvement of High Speed Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// IX International Symposium on Telecommunications (BIHTEL 2012), **Bosnija un Hercegovina**, Sarajeva, 25.–27. oktobris, 2012.
11. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Reach Improvement of Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Seventh International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012), **Kanāda**, Viktorija, 12.–14. novembris, 2012.
12. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. New Generation Energy Efficient WDM-PON System Using Spectrum Slicing Technology// 4<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2012), **Krievija**, Sanktpēterburga, 3.–5. oktobris, 2012.
13. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of High-Speed AWG Filtered Spectrum-Sliced WDM PON System// 8<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012), **Polija**, Poznaņa, 18.–20. jūlijs, 2012.
14. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Berezins S., Ivanovs G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System// 15<sup>th</sup> International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2012), **Itālija**, Roma, 15.–18. oktobris, 2012.
15. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Ivanovs G. Comparison of Chromatic Dispersion Compensation Techniques for WDM-PON Solution// 2<sup>nd</sup> Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC 2012), **Lietuva**, Viļņa, 25.–27. aprīlis, 2012.
16. **Spolitis S.**, Ivanovs G. A Study of High Bit Rate Spectrum-Sliced DWDM PON System// International Young Scientist Conference – Developments in Optics and Communications (DOC 2012), **Latvija**, Rīga, 12.–14. aprīlis, 2012.
17. **Spolitis S.**, Ivanovs G. Performance Evaluation of WDM and TDM Passive Optical Networks// 12<sup>th</sup> International Young Scientists Conference, Optics and High Technology Material Science (SPO 2011), **Ukraina**, Kijeva, 27.–30. oktobris, 2011.
18. **Spolitis S.**, Ivanovs G., Extending the Reach of DWDM-PON Access Network Using Chromatic Dispersion Compensation// IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2011), **Zviedrija**, Stokholma, 19.–21. oktobris, 2011.
19. **Spolitis S.**, Lasuks I. Investigation of DWDM System Based on Cascaded Four-Wave Mixing// IEEE Swedish Communication Technologies Workshop Conference Proceedings 2011, **Zviedrija**, Stokholma, 19.–21. oktobris, 2011.
20. **Spolitis S.**, Ivanovs G. Investigation of Future Perspectives and Technology of Passive Optical Network// 52<sup>nd</sup> International Conference of Riga Technical University, **Latvija**, Rīga, 13.–14. oktobris, 2011.

21. Bobrovs V., Ivanovs G., Udalcovs A., **Spolitis S.**, Ozolins O. Mixed Chromatic Dispersion Compensation Methods for Combined HDWDM Systems// 6<sup>th</sup> International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2011), **Spānija**, Barselona, 26.–28. oktobris, 2011.
22. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Evaluation of Combined Chromatic Dispersion Compensation Methods in Fiber Optical Transmission Systems// Developments in Optics and Communications (DOC 2011), **Latvija**, Rīga, 28.–30. aprīlis, 2011.

#### Nodaļa zinātniskajā monogrāfijā

1. Bobrovs V., Porins J., **Spolitis S.**, Ivanovs G. Design and Implementation of WDM-PON Solutions (Advances in Optical Communication). – Rijeka: Intech, 2014. – pp. 3.–34.

#### Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Ivanovs G. Extended Reach Spectrum-Sliced Passive Optical Access Network// International Journal of Physical Sciences (IJPS). – 2013. – Vol. 8, No. 13. – pp. 537–548.
2. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Gavars P., Ivanovs G. Comparison of Passive Chromatic Dispersion Compensation Techniques for Long Reach Dense WDM-PON System// Journal of Electronics and Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 122, No. 6 – pp. 65–70.
3. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Udalcovs A., Ivanovs G. Schemes for Compensation of Chromatic Dispersion in Combined HDWDM Systems// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2011. – Vol. 48, No. 5. – pp. 13–27.
4. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Realization of Combined Chromatic Dispersion Compensation Methods in High Speed WDM Optical Transmission Systems// Electronics and Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 116, No. 10. – pp. 33–38.

#### Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. Wagner C., Madsen P., **Spolitis S.**, Vegas Olmos J. J., Monroy I. T. Sliceable transponders for metro-access transmission links// Proceedings of SPIE Photonics West 2015, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems (OPTO). – San Francisco, USA, February 10–12. – 2015. – pp. 1–11, **(Invited)**.
2. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Ivanovs G. Latency Causes and Reduction in Optical Metro Networks// Proceedings of SPIE Photonics West 2014 OPTO. – USA, San Francisco, February 1.–6. 2014. – pp. 1–11, **(Invited)**.
3. **Spolitis S.**, Wagner C., Vegas Olmos J. J., Bobrovs V., Ivanovs G., Monroy I. T. Experimental Demonstration of a Scalable Sliceable Transceiver for Optical Access Networks// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2014). – Beijing, China, November 11–14. 2014. – pp. 1–3.
4. **Spolitis S.**, Vegas Olmos J. J., Bobrovs V., Ivanovs G., Monroy, I. T. A Novel Approach for Transmission of 56 Gbit/s NRZ Signal in Access Network Using Spectrum Slicing Technique// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2013). – Beijing, China, December 12–15. 2013. – pp. 1–3.
5. **Spolitis S.**, Olonkins S., Porins J. Realization of Dense Bidirectional Spectrum Sliced WDM-PON Access System// Proceedings of 9<sup>th</sup> International Symposium on Communications Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2014). – Manchester, England, July 23–25. 2014. – pp. 552–557.
6. Olonkins S., **Spolitis S.**, Lasuks I., Bobrovs V. Cost Effective WDM-AON with Multicarrier Source Based on Dual-Pump FOPA// Proceedings of 6<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – St. Petersburg, Russia, October 6–8. 2014. – pp. 23–28.

7. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Trifonovs I., Ivanovs G. Spectrum Sliced WDM-PON System as Energy Efficient Solution for Optical Access Systems// Proceedings of 5<sup>th</sup> IEEE Latin America Conference on Communications (LATINCOM 2013). – Santiago, Chile, November 24–26. 2013. – pp. 1–6.
8. Ivanovs G., **Spolitis S.**, Parts R., Bobrovs V. Performance Improvement of Spectrum-sliced Passive Optical Network// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Taipei, Taiwan, March 25–28. 2013. – pp. 308–311.
9. Bobrovs V., **Spolitis S.**, Ivanovs G. and Gavars P. Performance Improvement of High Speed Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Proceedings of IX International Symposium on Telecommunications (BIHTEL 2012). – Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, October 25.–27. 2012. – pp. 1–6.
10. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Reach Improvement of Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Proceedings of Seventh International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012). – Victoria, Canada, November 12–14. 2012. – pp. 296–301.
11. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. New Generation Energy Efficient WDM-PON System Using Spectrum Slicing Technology// Proceedings of 4<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2012). – St. Petersburg, Russia, October 3–5 October. 2012. – pp. 586–590.
12. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of High-Speed AWG Filtered Spectrum-Sliced WDM PON System// Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012). – Poznan, Poland, July18–20. 2012. – pp. 21–24.
13. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Berezins S., Ivanovs G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System// Proceedings of 15<sup>th</sup> International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2012). – Rome, Italy, October 15–18. 2012. – pp. 195–199.
14. Bobrovs V., **Spolitis S.** and Ivanovs G. Comparison of chromatic dispersion compensation techniques for WDM-PON solution// Proceedings of 2<sup>nd</sup> Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC). – Vilnius, Lithuania, April 25–27. 2012. – pp. 64–67.
15. **Spolitis S.**, Ivanovs G. Extending the Reach of DWDM-PON Access Network Using Chromatic Dispersion Compensation// Proceedings of IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2011). – Stockholm, Sweden, October 19–21. 2011. – pp. 29–33.
16. Bobrovs V., Udalcovs A., **Spolitis S.**, Ozolins O., Ivanovs G. Mixed Chromatic Dispersion Compensation Methods for Combined HDWDM Systems// Proceedings of International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA). – Spain, Barcelona, October 26–28. 2011. – pp. 313–319.

#### Raksti konferenču tēžu krājumos

1. **Spolitis S.**, Ivanovs G. Realization of up to 10 Gbit/s Spectrum Sliced Optical Access System// 8<sup>th</sup> International Conference «Advanced Optical Materials and Devices» (AOMD-8). – Riga, Latvia, August 25–27. 2014. – pp. 26.
2. **Spolitis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Comparison of 8-Channel and 16-Channel Energy Efficient Spectrum Sliced WDM-PON Systems// Riga Technical University 54<sup>th</sup> International Scientific Conference. – Riga, Latvia, October 14–16. 2013. – pp. 68.
3. **Spolitis S.**, Ivanovs G. A Study of High Bit Rate Spectrum-Sliced DWDM PON System// Developments in Optics and Communications (DOC 2012). – Riga, Latvia, April 12–14. 2012. – pp. 90–91.

4. **Spolītis S.**, Ivanovs G. Investigation of Future Perspectives and Technology of Passive Optical Network// Proceedings of Riga Technical University 52<sup>nd</sup> International Conference. – Riga, Latvia, October 13–14. 2011. – pp. 21.
5. **Spolītis S.**, Lasuks I. Investigation of DWDM System Based on Cascaded Four-Wave Mixing// IEEE Swedish Communication Technologies Workshop. – Stockholm, Sweden, October 19–21. 2011. – pp. 39.
6. **Spolītis S.**, Ivanovs G. Performance Evaluation of WDM and TDM Passive Optical Networks// Proceedings of 12<sup>th</sup> International Young Scientists Conference «Optics and High Technology Material Science (SPO 2011)». – Kyiv, Ukraine, October 27–30. 2011. – pp. 215–216.
7. **Spolītis S.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Evaluation of Combined Chromatic Dispersion Compensation Methods in Fiber Optical Transmission Systems// Developments in Optics and Communications (DOC 2011). – Riga, Latvia, 28–30. 2011. – pp. 44–45.

### Latvijas patenti

1. Bobrovs V., **Spolītis S.**, Udaļcovs A., Parts R., Ivanovs G. Šķiedru optiskā piekļuves sistēma WDM-PON ar dispersijas kompensāciju, LV-14628, 2012.
2. Bobrovs V., Ozoliņš O., **Spolītis S.**, Udaļcovs A., Ivanovs G. Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma, LV-14557, 2012.
3. Udaļcovs A., Ozoliņš O., **Spolītis S.**, Parts R., Bobrovs V. Kombinēta pārraides ātruma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma, patenta pieteikuma numurs P-12-15, 2014.

Promocijas darba rezultāti izmantoti 3 starptautisko un 5 Latvijas zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.

### Starptautiskie zinātniskās pētniecības projekti

1. ERAF projekts: «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos». Nr. 3DP/3.2.2.3.0/12/IPIA/SM/001
2. EU FP7 Research Project: «FENDOI» – Flexible Edge Nodes for Dynamic Optical Interconnection of Access and Core Networks, Project ref. nr. 322328.
3. EU FP7 Research Project: «IPHOBAC-NG» – Integrated Photonic Broadband Radio Access Units for Next Generation Optical Access Networks, Project ref. nr. 619870.

### Latvijas zinātniskās pētniecības projekti

1. Valsts pētījumu programma «Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai» (VPP SOPHIS), Nr.10-4/VPP-4/11.
2. ESF projekts: «Starpdisciplinārās IKT zinātniskās grupas izveide liela apjoma datu pārraidei, apstrādei un pārvaldīšanai». Nr.2013/0012/1DP/1.1.1.2.0/13/ APIA/VIAA/051.
3. ERAF projekts: «Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde». Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/002.
4. ESF projekts: «Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai». Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016.
5. ESF projekts: «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai». Vienošanās Nr. 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005.

### Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 164 lappuses. Darbā ir ievads, četras nodaļas, literatūras saraksts un pielikums.

Darba pirmajā nodaļā ir formulēts promocijas darba mērķis, tā uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvamās tēzes, apkopoti galvenie rezultāti un definēti turpmākie pētījumu virzieni.

Darba otrajā nodaļā ir realizēta *WDM-PON* un spektrāli sagriezta *WDM-PON* jeb *SS-WDM PON* sistēmu izpēte un novērtēšana gan simulatīvā *OptSim* programmas vidē, gan arī eksperimentāli RTU Telekomunikāciju institūta šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) laboratorijā. Šajā nodaļā ir novērtēta *WDM-PON* un *SS-WDM PON* sistēmu realizācija, kā arī signāla kvalitātes, sistēmas veiktspējas un maksimālā pārraides attāluma palielināšana, pielietojot hromatiskās dispersijas kompensācijas metodes – dispersijas kompensējošu šķiedru (*DCF*) un šķiedras Brega režģi (*FBG*). Atšķirībā no citiem iepriekš veiktajiem pētījumiem šķiedru optikas piekļuves sistēmu jomā promocijas darbā ir veikts *DCF* un *FBG* dispersijas kompensācijas metožu savstarpējs skaitlisks salīdzinājums. Nodaļā izstrādātā *WDM-PON* sistēmas shēma ar dispersijas kompensāciju ir Latvijā patentēta (apliecības nr. LV-14628).

Trešajā nodaļā apskatīta jauna veida spektrāli sagriezta raiduztvērēja izveide, kur pārraidāmā pamatjoslas signāla sagriešana un apvienošana tiek realizēta raiduztvērēju elektriskajā vidē, pielietojot ciparu signālu apstrādi (*DSP*). Šie pētījumi ir veikti doktorantūras prakses laikā Dānijas Tehniskās universitātes Metro piekļuves un tuvas darbības sistēmu grupas (*The Metro-Access & Short Range Systems Group*) laboratorijā, sadarbojoties ar DTU *Fotonik* (Dānija) un Henriha Herca institūta (Vācija) zinātniekiem profesora *Idelfonso Tafur Monroy* un asoc. profesora *Juan Jose Vegas Olmos* vadībā. Šajā sadarbībā sekmīgi izstrādāts elektrooptiska spektrāli sagriezta raiduztvērēja prototips ātrdarbīgu optisko signālu pārraidei un uztveršanai, kā arī, novērtēta tā darbība, realizējot 1 Gbit/s NRZ elektriskā signāla sagriešanu, pārraidi caur 25 km garu standarta vienmodas optiskās šķiedras posmu un atjaunošanu, izmantojot ierobežotu līdz 500 MHz elektrisko komponentu frekvenču caurlaides joslu.

Darba ceturtajā nodaļā ir novērtēti galvenie latentuma cēloņi optiskajās piekļuves sistēmās. Analīzes rezultātā konstatēts, ka kopējo piekļuves sistēmas latentumu ir iespējams samazināt vismaz par 20 %, aizvietojo tipiskas optiskās un elektriskās komponentes ar citām — zema latentuma komponentēm, neizmainot piekļuves tīkla topoloģiju.

Promocijas darba nobeigumā ir apkopoti un pamatoti darba galvenie secinājumi. Pielikumos ir pievienoti konferenču, publikāciju un projektu saraksti, Latvijas patentu apliecības un doktorantūras prakses rekomendācijas.

## DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

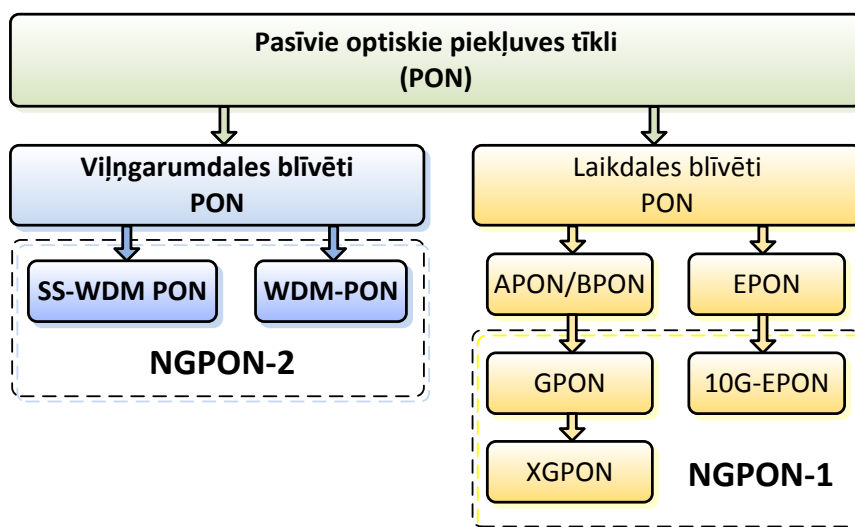
### Pirmā nodaļa

Darba pirmajā nodaļā ir novērtēta šķiedru optisko pārraides sistēmu attīstība un veikta salīdzinoša analīze starp laikdales blīvētiem pasīvajiem optiskajiem tīkliem (*TDM-PON*) un viļņgarumdales blīvētiem pasīvajiem optiskajiem tīkliem (*WDM-PON*). Optiskajos piekļuves un metro tīklos pārraidāmais datu apjoms ir piedzīvojis strauju pieaugumu, un šāds pieauguma temps saglabāsies arī turpmāk, tādēļ īpašu uzmanību ir jāpievērš tieši šiem tīkliem [8].

Šobrīd Latvijā norit strauja datu pārraides sistēmu un interneta attīstība [14, 49, 50], kur tiek izmantota *TDM-PON* tehnoloģija, bet tuvāko piecu gadu laikā, augot vajadzībai pēc lielākiem datu pārraides ātrumiem, būs nepieciešams modernizēt esošo tīkla infrastruktūru un ieviest ātrdarbīgu *WDM-PON* tehnoloģiju, kas spēj nodrošināt lielākus datu pārraides ātrumus (2.5 un 10 Gbit/s kanālā) lielākā attālumā (virs 20 km) nekā to spēj esošā *TDM-PON* tehnoloģija, kurā pienākošā datu plūsma tiek dalīta uz visām optiskā tīkla galiekārtām (*ONT*) [37, 38, 46].

Nākamās paaudzes *PON* sistēmas (*NGPON*) var tikt realizētas uz eksistējošas infrastruktūras, piemēram, *GPON* sistēmas bāzes, to papildinot (*NGPONI* risinājums), vai arī uz pilnīgi jaunas šķiedru optiskā tīkla infrastruktūras bāzes (var tikt veikta arī daļēja tīkla infrastruktūras nomaina), kur optisko jaudas sazarotāju nomaina optiskā signāla sazarotājs pēc gaismas viļņa garumiem (*NGPON2* risinājums) [47, 48]. Apskatot pieejamās šķiedru optiskās

pārraides sistēmu tehnoloģijas, tika secināts, ka ātrdarbīgākam *NGPON2* tehnoloģiskajam risinājumam pilnībā atbilst *WDM-PON* un spektrāli sagrieztas *WDM-PON* sistēmas, kuru izpēte ir veikta promocijas darbā, skatīt 2. attēlu [5, 7, 12, 20, 32–35, 40]. Viļņgarumdales blīvēšanas lietojums optiskajos piekļuves tīklos sniedz iespēju katram lietotājam izdalīt atsevišķu gaismas viļņa garumu.



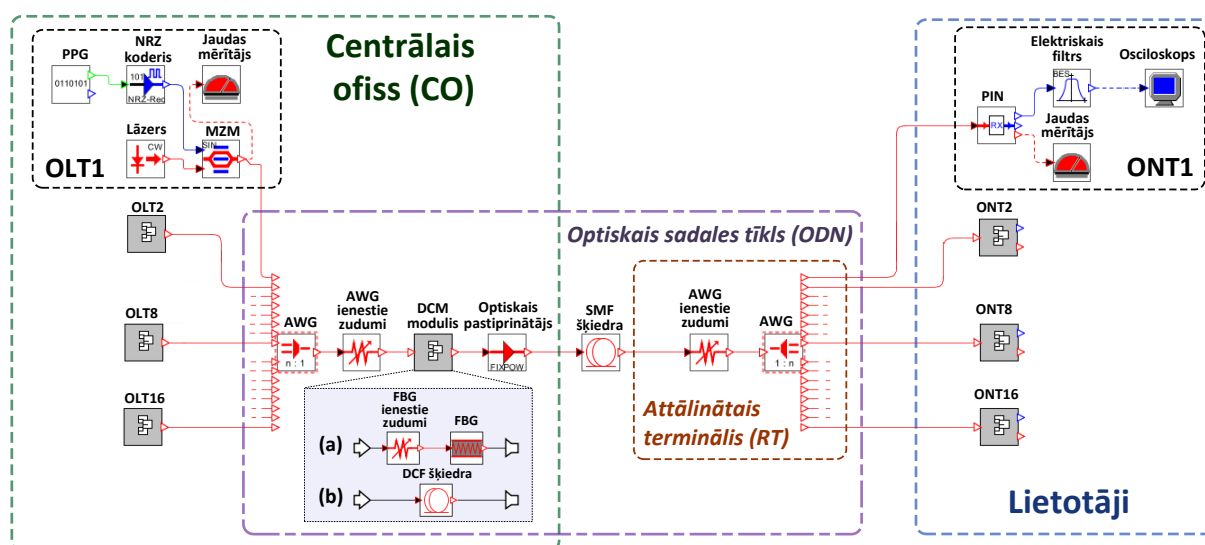
2. att. Pasīvo optisko piekļuves tīklu (*PON*) iedalījums

Lai *NGPON* sistēmās nodrošinātu datu pārraides ātrumus 2,5 un 10 Gbit/s katram lietotājam, ļoti svarīgs aspekts ir uzkrātās hromatiskās dispersijas kompensācija [3, 4, 36]. Neizmantojot hromatiskās dispersijas kompensāciju, maksimāli sasniedzamais pārraides attālums (tipiski 20 km) un ātrums (2.5 Gbit/s) ir ievērojami ierobežots, jo tās ietekmē pārraidītā impulsu secība tiek kropļota un zaudē savu formu. Nākamās paaudzes pasīvo optisko tīklu (*NGPON*) infrastruktūru ietekmē divas galvenās prasības: tiem ir jāspēj nodrošināt pietiekami lielu frekvenču caurlaides joslu un datu pārraides ātrumu, kā arī pietiekami zemu tīkla aizturi jeb latentumu, pēc iespējas saglabājot vienkāršāku tīkla arhitektūru [27, 48]. Elektriskās un optoelektriskās komponentes, kas atrodas ātrdarbīgā šķiedru optikas piekļuves pārraides sistēmas raidītāja un uztvērēja blokā (raiduztvērējā), tiek uzskatītas par tās vājo posmu, jo tām ir ierobežota frekvenču caurlaides josla (optiskajos piekļuves tīklos tipiski no 2.5 līdz 10 GHz), un attiecīgi arī pārraides ātrums (2.5 vai 10 Gbit/s) [28, 39]. Līdz ar to ir nepieciešams meklēt risinājumus, kā palielināt šo frekvenču caurlaides joslu esošajos raiduztvērējos [39, 41]. Jāņem vērā, ka palielinot datu pārraides ātrumu un attālumu, atkarībā no pārraidāmās informācijas satura aizvien nozīmīgāks kļūst optiskās pārraides sistēmas latentuma parametrs. Latentums ir laiks starp ziņojuma nosūtīšanu un saņemšanu. Latentums palielinās, optiskajam signālam izplatoties caur šķiedru vai caur citiem elementiem, ietekmējot kopējo datu pārraides laiku [29, 31]. Pretēji frekvenču caurlaides joslas platumam latentums un trīce ir atkarīgi no pārraides sistēmas tīkla topoloģijas (izmantoto elementu skaita, līnijas garuma u. c.) un datu plūsmas parametriem (pārraides ātrums, datu pakešu garums u. c.) [24]. Tas it īpaši svarīgs ir *NGPON* piekļuves tīklos, kur lielu daļu no pārraidāmo datu apjoma aizņem augstas izšķirtspējas televīzija, tiešsaistes videospēles, augstas kvalitātes video straumēšana, datorizētas tirdzniecības sistēmas, video konferences un citi tiešsaistes pakalpojumi [15].

## Otrā nodaļa

Promocijas darba otrajā nodaļā ir veikta *WDM-PON* un spektrāli sagrieztu *WDM-PON* jeb *SS-WDM PON* sistēmu izveide un izpēte gan *OptSim* simulācijas programmas vidē, gan arī eksperimentāli RTU Telekomunikāciju institūta šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) laboratorijā. Izveidojot līdz 16 kanālu *WDM-PON* un *SS-WDM PON* sakaru sistēmu simulācijas modeļus ar pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā, ir novērtēta signāla kvalitātes, sistēmas veiktspējas un maksimālā pārraides attāluma palielināšana, pielietojot hromatiskās dispersijas (*CD*) kompensācijas metodes – dispersijas kompensējošu šķiedru (*DCF*) vai šķiedras Brega režģi (*FBG*). Lai novērtētu izveidoto sistēmu darbības kvalitāti, *WDM-PON* pārraides sistēmām *OptSim* simulācijas programmā ir izvēlēts BER sliekšnis  $BER < 1 \cdot 10^{-9}$  [1], savukārt *SS-WDM PON* sistēmā tas ir izvēlēts  $BER < 1 \cdot 10^{-10}$  [19]. Izmantojot iegūtos simulatīvos un eksperimentālos rezultātus, ir izstrādāta, kā arī patentēta *WDM-PON* šķiedru optiskā piekļuves sakaru sistēma ar dispersijas kompensāciju, kas ir realizēta uz čirpota šķiedras Brega režģa bāzes un kurai ir piešķirts Latvijas patents nr. LV-14628. Hromatiskās dispersijas kompensācija viļņgarumdales blīvētās piekļuves sistēmās ar pārraides ātrumu 2,5 un 10 Gbit/s kanālā ir ļoti svarīga, jo optiskais impulss, izplatoties šķiedrā, dispersijas dēļ zaudē savu formu un tiek kroplots. Līdz ar gaismas impulsa izplešanos tas interferē laikā ar impulsiem, kas izplatās tam līdzās, tādā veidā ierobežojot maksimālo šķiedru optiskās piekļuves sistēmas datu pārraides ātrumu un maksimālo nodrošināmo pārraides attālumu [1, 25]. Šī impulsu izplešanās ir starpsimbolu interferences (*ISI*) cēlonis, kā rezultātā uztvertais signāls var būt ar kļūdām, jo uztvērēja pusē nav iespējams precīzi atšķirt pārraidīto bitu secību. Nodaļā gan simulatīvi, gan arī eksperimentāli tika izveidotas ātrdarbīgas daudzkanālu *WDM-PON* un *SS-WDM PON* piekļuves sakaru sistēmas ar dispersijas kompensāciju, kas atbilst *NGPON2* tehnoloģiskajam risinājumam ar daļēju esošās tīkla infrastruktūras nomainīšanu.

Sākotnēji *OptSim* simulācijas programmā tika realizēta 16 kanālu *WDM-PON* sistēma ar datu pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā (skatīt 3. att.).

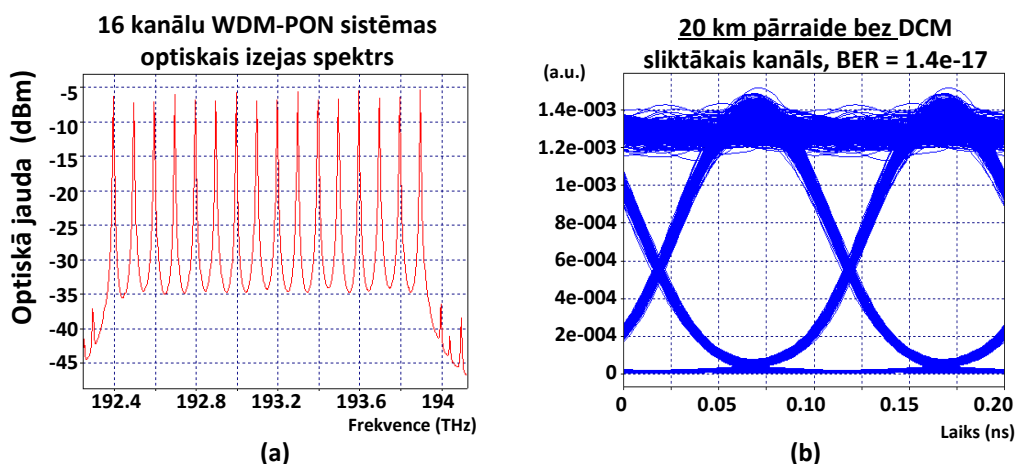


**AWG** – optisko signālu sadalītājs pēc viļņa garuma  
**DCF** – dispersiju kompensējoša šķiedra  
**DCM** – dispersijas kompensācijas modulis  
**FBG** – šķiedras Brega režģis  
**MZM** – optiskā signāla modulators

**NRZ** – bez atgriešanās pie nulles koda formētājs  
**OLT** – optiskās līnijas terminālis  
**ONT** – optiskā tīkla galiekārta  
**PIN** – PIN fotodiode  
**PPG** – elektriskā signāla ģenerators  
**SMF** – standarta vienmodas optiskās šķiedras posms

3. att. Augsta blīvuma 16 kanālu *WDM-PON* sistēmas simulācijas shēma ar NRZ kodēšanu, 10 Gbit/s pārraides ātrumu kanālā un *DCF* moduli, novietotu centrālajā ofisā (*CO*)

16 kanālu *WDM-PON* sistēmas izejas spektrs pirms *AWG* demultipleksora, kas sadala no *OLT* (raidītāja puses) pienākošo optisko signālu uz visām *ONT* galiekārtām ir redzams 4.a. attēlā.



4. att. Realizētās *WDM-PON* sistēmas (a) 16 kanālu izejas spektrs aiz *AWG* demultipleksora un (b) sliktākā kanāla acu diagramma, nepielietojot *CD* kompensāciju.

Attēlā 4.b. ir redzams, ka pēc pārraides caur 20 km garu optiskās līnijas posmu sistēmas veiktspēja vēl ir ļoti augsta ( $BER=1.4 \cdot 10^{-17}$ ), līdz ar to, palielinot līnijas garumu, tika iegūts, ka maksimālais nodrošināmais datu pārraides attālums starp raidītāju (*OLT*) un uztvērēju (*ONT*) ir 57 km, nepielietojot *CD* kompensāciju, pie  $BER < 10^{-9}$ .

Lai uzlabotu *WDM-PON* sistēmas veiktspēju, tika pielietota *CD* kompensācija ar *DCF* šķiedru un *FBG* režģi. Dispersijas kompensācijas modulim (*DCM*), kas sastāv no dispersijas kompensējošas optiskās šķiedras, tipiski ir samērā liels vājinājums (līdz 0,6 dB/km pie  $\lambda=1550$  nm) un negatīva dispersija (parasti  $D \approx -80$  ps/nm/km), kas kompensē šķiedru optikas pārraides līnijā uzkrāto pozitīvo hromatisko dispersiju (tās apjoms tipiski ir  $D \approx 16$  ps/nm/km) vai arī veic hromatiskās dispersijas prekompensāciju [1, 4]. Šāda negatīva dispersija *DCF* šķiedrai tiek iegūta ražošanas procesā, izveidojot kompleksu šķiedras gaismas laušanas profilu [1, 11].

*DCM* modulī izmantotajam Brega režģim, kas ir labi piemērots daudzkanālu *WDM* sistēmām, šķiedras laušanas koeficientam ir periodiska struktūra ar periodiem, kas nav konstanti, bet lineāri mainās līdz ar tā šķiedras garumu. Režģa periods  $A$  ir attālums starp diviem blakus esošiem gaismas laušanas koeficienta maksimumiem [1, 25]. Savas mainīgās struktūras dēļ čirpots Brega režģis atstaro noteikta garuma gaismas viļņus  $\lambda_B$  no noteiktiem optiskās šķiedras punktiem, bet neietekmē cita garuma gaismas viļņu izplatību režģī. Gaismas viļņa garumu, kas tiks atstarots Brega režģī, izsaka šāda formula:

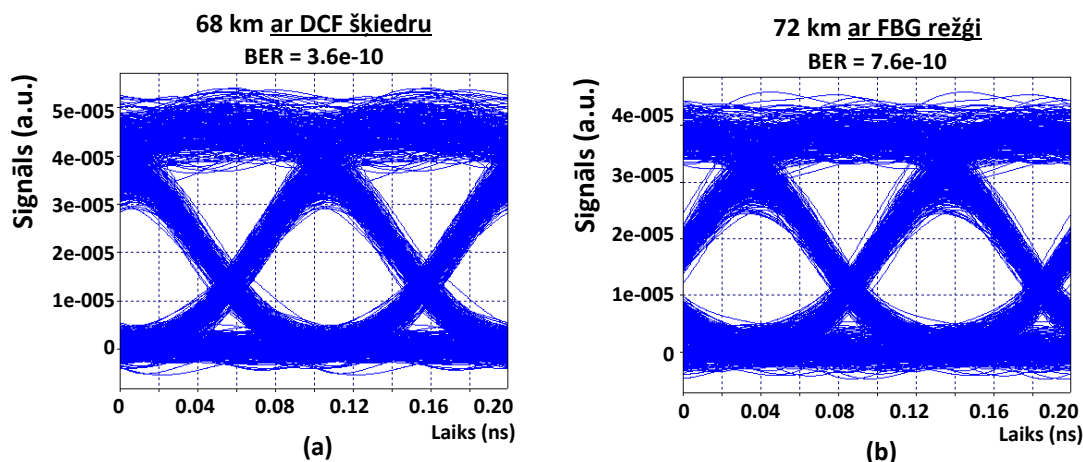
$$\lambda_B = 2An_g, \quad (1)$$

kur  $\lambda_B$  — atstarotais gaismas viļņa garums, nm;  
 $A$  — režģa periods, nm;  
 $n_g$  — šķiedras efektīvais grupveida gaismas laušanas koeficients.

Šāds režģis ar mainīgu struktūru tiek iegūts uz silīcija optiskās šķiedras ar germānija piejaukumiem bāzes nelielā optiskās šķiedras serdeņa segmentā, kas tiek apstarots ar ultravioleto gaismu. Brega režģa sākumā režģa periods ir mazāks, bet līdz ar režģa garuma pieaugumu perioda platums lineāri pieaug. Līdz ar to optiskais signāls ar mazāku gaismas viļņa garumu tiek atstarots ātrāk, un tas Brega režģī pavada vismazāko laika sprīdi, bet signāls ar lielāku gaismas viļņa garumu režģī pavada lielāku laika sprīdi un izplatās dziļāk, pirms atstarošanās, kā rezultātā dispersijas ietekmēta gaismas impulsa forma tiek atjaunota [11].



Sākotnēji *WDM-PON* sistēmā tika realizēta *CD* kompensācija, izmantojot 7 km garu *DCF* šķiedru dispersijas kompensācijas (*DCM*) modulī, kas ļāva palielināt sistēmas darbības attālumu no 57 km līdz 68 km, saglabājot  $BER < 10^{-9}$ , skatīt 5.a. att. Savukārt, izmantojot pārskatāmu *FBG DCM* moduli (skat. 5.b. att.), nepieciešamais kompensējams *CD* apjoms pie  $\lambda=1550$  nm tika atrasts  $-1100$  ps/nm, kas ļāva palielināt *WDM-PON* sistēmas darbības attālumu no 57 km līdz 72 km ar  $BER < 10^{-9}$ .



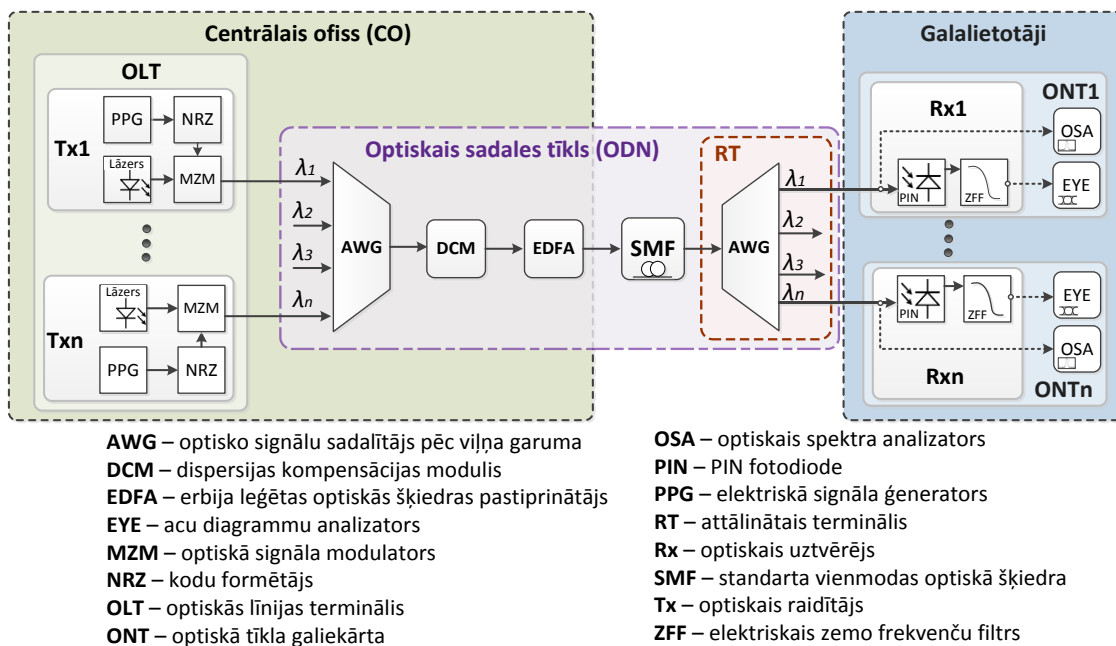
5. att. *WDM-PON* sistēmas maksimālais nodrošināmais pārraides attālums un uztvertā signāla acu diagrammas, realizējot *CD* kompensāciju ar (a) *DCF DCM* moduli un (b) *FBG DCM* moduli

Kā redzams no rezultātiem, *DCF* pielietošana *CD* kompensācijai ļāva uzlabot sistēmas darbības attālumu par 19 %, savukārt *FBG* pielietošana — par 26 %. Šajā gadījumā *FBG DCM* uzrādīja labākus rezultātus nekā *DCF DCM*, jo *FBG* ir salīdzinoši mazāki ienestie zudumi (līdz 4 dB uz iekārtu neatkarīgi no nepieciešamā kompensējamā dispersijas apjoma), salīdzinot ar *DCF* (līdz 0,6 dB/km pie  $\lambda=1550$  nm), kā arī tas var tikt izmantots pie augstākām optiskajām pārraides jaudām (piemēram, ražotāja *Teraxion FBG DCM* var tikt izmantots pie jaudām līdz +27 dBm [42]), jo tam ir mazāk izteiktas nelineārās īpašības.

*WDM-PON* piekļuves sakaru sistēmas simulācijas shēmas aprobācijai un matemātiski iegūto rezultātu pārbaudei, izmantojot RTU TI ŠOPS laboratorijā pieejamās optiskās, elektrooptiskās un elektriskās iekārtas, tika izveidots eksperimentāls līdz 16 kanālu *WDM-PON* pārraides sistēmas makets ar pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā, centrālo frekvenci 193,1 THz un pārraides attālumu 20 km, skatīt 6. attēlu.

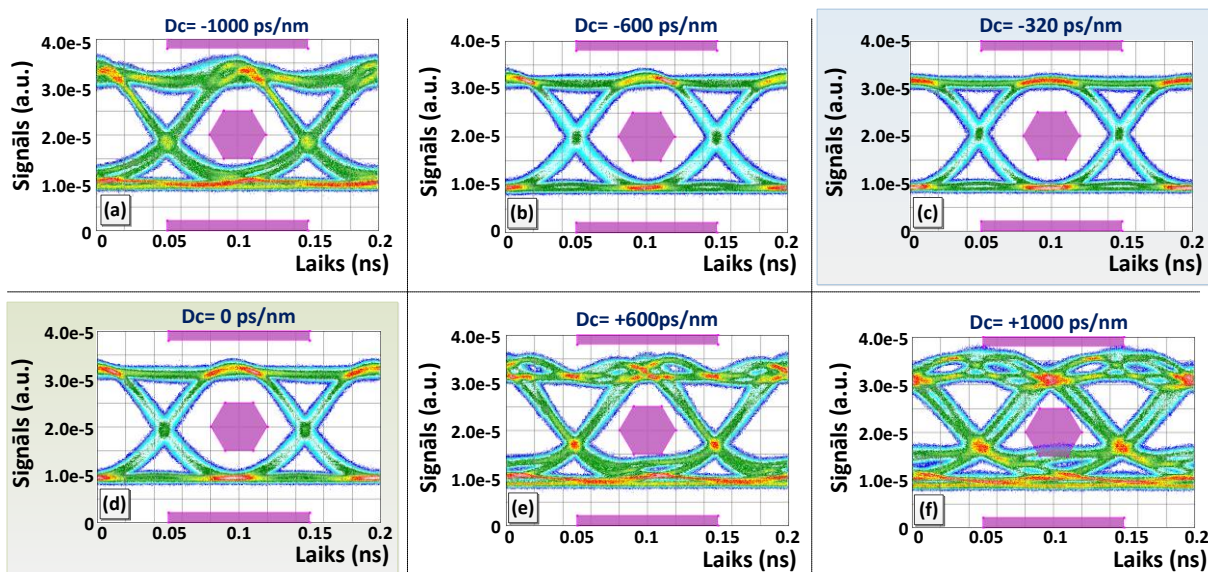
Izveidotā *WDM-PON* sistēma satur 3 galvenās pamatdaļas: *OLT* jeb raidošo daļu, *ODN* jeb optisko līnijas daļu ar attālināto termināli (*RT*) un vairākus *ONT* jeb uztvērēja daļu. Atbilstoši iepriekš izveidotajam simulācijas modelim *OLT* ietver elektriskā signāla ģeneratoru ar *NRZ* koderi, optiskā signāla ārējo *MZM* modulatoru un nepārtraukta starojuma lāzeru. Izveidotajā *WDM-PON* sistēmā optiskais signāls no vairākiem raidītājiem tiek apvienots ar *AWG* multiplexoru. Aiz šā *AWG* multiplexora atrodas pārskatājamais *FBG DCM* modulis, lai realizētu hromatiskās dispersijas pirmskompensāciju un *EDFA* optiskais pastiprinātājs, lai kompensētu *AWG* un *DCM* ienestos zudumus. Optiskais signāls *EDFA* pastiprinātājā tiek pastiprināts un tālāk ievadīts 20 km garā ITU G.652 standarta vienmodas optiskajā šķiedrā.

Attālinātajā terminālī (*RT*) pienākošais signāls tiek demultipleksēts, un katrs kanāls tiek novirzīts uz konkrēto *ONT*, kur, izmantojot *PIN* fotodiodes, tas tiek detektēts un pārvērsts elektriskajā signālā [4, 36]. Uztverošajā daļā atrodas acu diagrammu analizators (*EYE*), kas ļauj novērtēt tā kvalitāti, izmantojot acu diagrammas, kā arī optiskā spektra analizators (*OSA*), kas attēlo uztvertā optiskā signāla spektru.



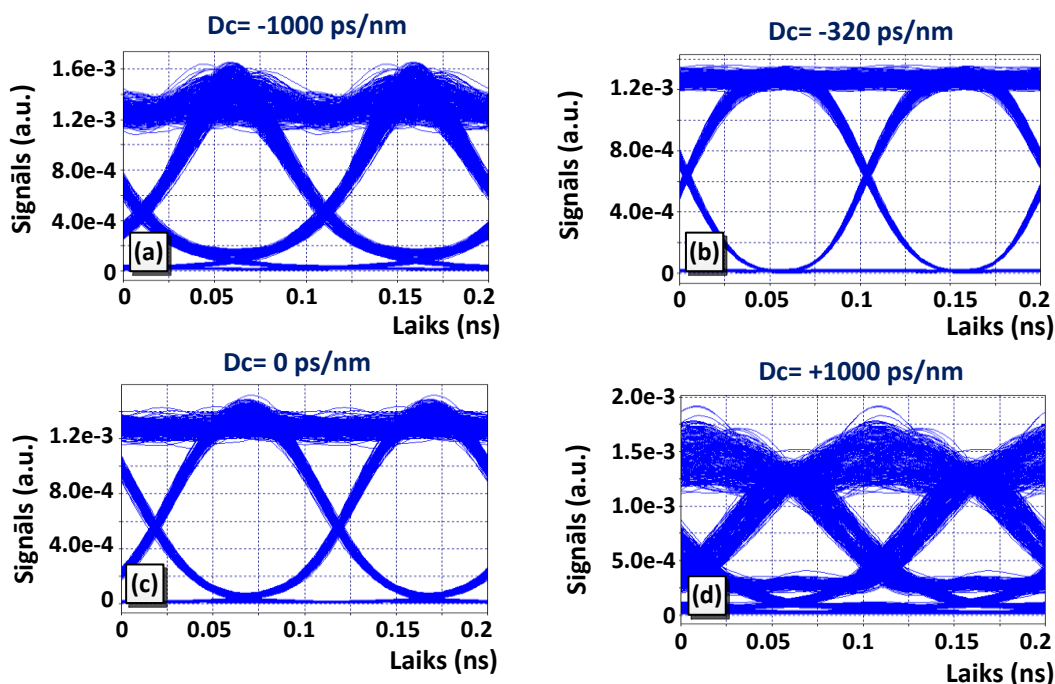
6. att. Eksperimentāls WDM-PON optiskās piekļuves sistēmas makets ar pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā

Hromatiskās dispersijas ietekmes novērtēšanai un kompensācijai izveidotajā WDM-PON sistēmā tika izmantots ražotāja TeraXion FBG DCM modulis, kas nodrošina pārskatāmu CD kompensācijas apjomu robežās no  $-1200$  līdz  $+1200$  ps/nm pie  $\lambda = 1550$  nm. Līdz ar to, mainot ienestās CD apjomu robežās no  $-1000$  līdz  $+1000$  ps/nm, tika novērtēta CD pārkompensācijas, kompensācijas un papildus ienestās dispersijas ietekme uz pārraidīto signālu, skatīt 7. un 8. attēlu. Šāds dispersijas kompensācijas diapazons robežās no  $-1000$  ps/nm līdz  $+1000$  ps/nm tika izvēlēts, lai pilnībā novērtētu nepietiekamu CD kompensācija kā arī pārkompensāciju, kas uzskatāmi eksperimentāli simulē CD ietekmi uz pārraidāmo optisko impulsu. Dispersijas līmenis « $+1000$  ps/nm» (skat. 7.f. att.) simulē papildus 62 km optiskās līnijas garumu pie nosacījuma, ka optisko signālu neietekmē zudumi optiskajā šķiedrā un nelineārie optiskie efekti.



7. att. Eksperimentālās 10 Gbit/s WDM-PON sistēmas slīktākā kanāla acu diagrammas pie dažādiem FBG DCM hromatiskās dispersijas kompensācijas līmeņiem (Dc): (a–b) dispersijas pārkompensēšana, (c) dispersijas kompensācija, (d) dispersija netiek kompensēta un (e–f) optiskajā līnijā tiek ienests papildu dispersijas apjoms

Kā redzams 7.d. attēlā, bez dispersijas kompensācijas pielietošanas ( $D_c = 0$  ps/nm) uztvertā pārraidītā signāla kvalitāti dispersija ir ietekmēju nedaudz — ir novērojami nelieli signāla kropļojumi loģiskā «1» līmenī. Realizējot pilnu dispersijas kompensāciju ( $D_c = -320$  ps/nm), balstoties uz iepriekš nomērīto hromatiskās dispersijas līmeni (skat. 7.c. att.), ir novērojama uztvertā signāla kvalitātes uzlabošanās. Veicot *CD* pārkompensāciju jeb realizējot pārkompensāciju (redzama 7.a. un 7.b. attēlā), kā arī optiskajā līnijā ienesot papildu dispersijas apjomu (redzama 7.e. un 7.f. attēlā), ir novērojami būtiski optiskā signāla kvalitātes kropļojumi loģiskā «1» un «0» līmenī. Attēlos 7.e. un 7.f. ir redzams, ka 20 km garā optiskajā līnijā, ienesot vismaz 600 ps/nm papildu dispersiju, ir novērojama signāla un maskas pārklāšanās, līdz ar to definētā *BER* vērtība tiek pārsniegta, un uztvērējā pienākošais signāls satur bitu kļūdas.

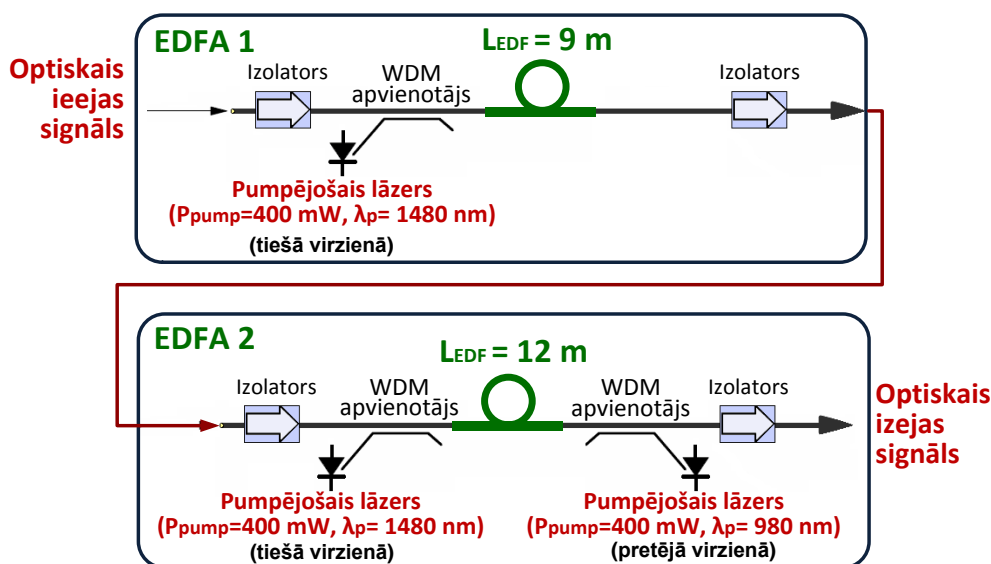


8. att. Simulatīvi iegūtās acu diagrammas pēc 20 km pārraides 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmā pie dažādiem *FBG DCM* hromatiskās dispersijas kompensācijas līmeņiem

No iegūtajiem rezultātiem (7. un 8. att.) var secināt, ka maksimālas sistēmas veiktspējas nodrošināšanai ir ļoti svarīgi iepriekš aprēķināt un nomērīt optiskajā pārraides līnijā ienestās *CD* apjomu, pirms realizēt tās kompensāciju. Salīdzinot iegūtos eksperimentālos rezultātus ar simulatīvajiem rezultātiem (iegūtiem no 3. attēlā redzamās *WDM-PON* pārraides sistēmas simulācijas shēmas), kā arī izmantojot acu maskas, tika secināts, ka tie praktiski sakrīt.

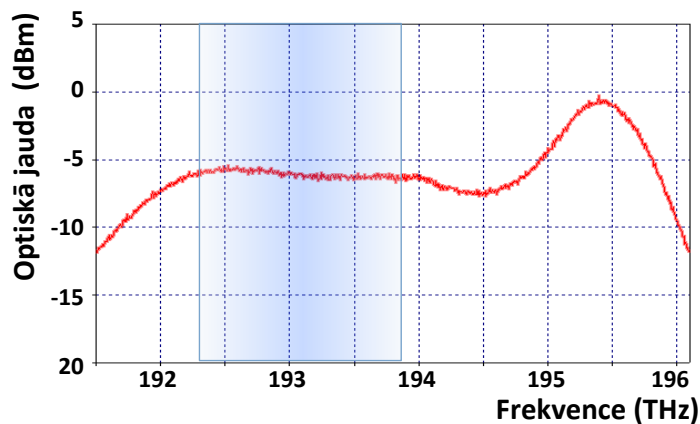
Nākamais pētījumu etaps aiz *WDM-PON* sistēmas izveides un izpētes bija vienkāršākas arhitektūras līdz 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas ar pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā izveide, kurā uz visiem abonentiem tiek izmantots tikai viens nekoherents trokšņveida platjoslas gaismas avots, kas tiek sagriezts spektrālās «šķēlēs», pielietojot *AWG* demultipleksoru, kas pēc uzbūves ir optiskais filtrs [5, 12, 20, 32–35, 40]. Jāpiemin, ka *WDM-PON* sistēmu ir iespējams aizvietot ar *SS-WDM PON* sistēmu, neveicot visu tīkla elementu nomaiņu, bet uzlabojot tikai raidītāju (*OLT*) un visu pārējo tīkla arhitektūru ar uztvērēja galiekārtām (*ONT*) saglabājot tādu pašu. Par nekoherentu platjoslas gaismas avotu spektrālās sagriešanas tehnoloģijas trūkumu var uzskatīt ierobežoto datu pārraides attālumu un datu pārraides ātrumu (tipiski līdz 25 Gbit/s kanālā), kura cēlonis ir hromatiskā dispersija, šķērsruna starp kanāliem, kā arī raidītāja pusē izmantotā *ASE* gaismas avota intensitātes fluktuācijas, kas ievērojami samazina acu diagrammas acs atvēršanu.

Pārraides attālumu un pieejamo kanālu skaitu *SS-WDM PON* sistēmā ietekmē ASE avota optiskā izejas jauda un tā izejas spektra nevienādība. Līdz ar to, šīs nodaļas ietvaros, *OptSim* simulācijas programmā tika izstrādāts jaudīga platjoslas ASE gaismas avota skaitlisks modelis, kas nodrošina +23 dBm (200 mW) vidējo izejas jaudu ar praktiski līdzenu frekvenču pārvades raksturlīkni diapazonā no 192.3 THz līdz 194.0 THz (no 1545.32 nm līdz 1558.98 nm). Minētajā frekvenču diapazonā tiks izkārtoti līdz 16 *SS-WDM PON* sistēmas kanāli, kas atbilstoši ITU-T G.694.1 frekvenču plānam ir centrēti ap 193.1 THz frekvenci [16]. ASE avota modelis ir izveidots, izmantojot divus kaskādē slēgtus optiskos *EDFA* pastiprinātājus, piemēklējot to parametrus (pastiprināšanā izmantotās erbija leģētās šķiedras garumu ( $L_{EDF}$ ), pumpējošo avotu jaudu ( $P_{pump}$ ) un to viļņa garumu ( $\lambda_p$ )), skatīt 9. att.



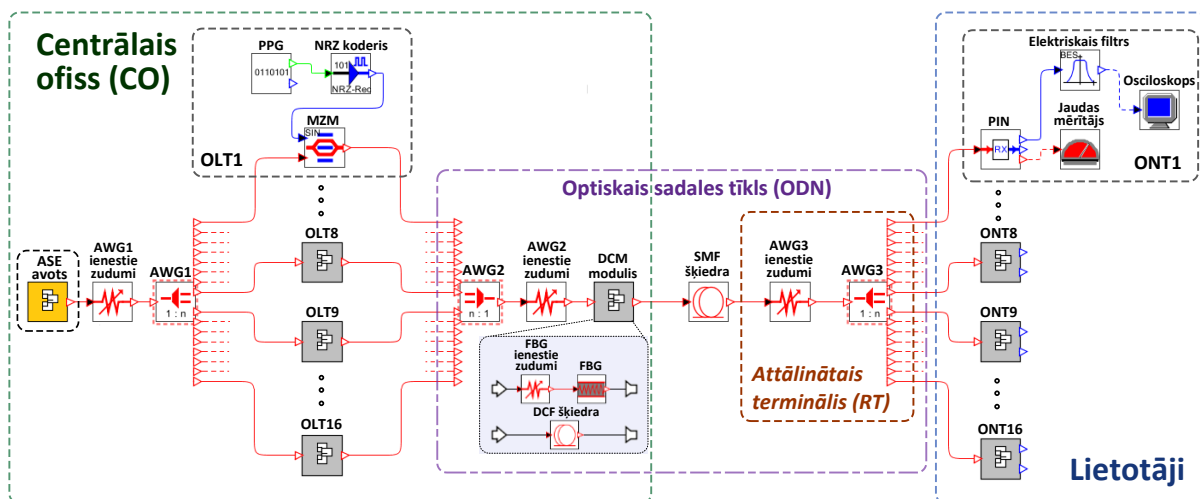
9. att. Divu *EDFA* pastiprinātāju kaskādes slēgums un to parametri jaudīga platjoslas trokšņveida ASE gaismas avota izveidei 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmā

Izejas spektrs ar visvienmērīgāko jaudas sadalījumu līdz 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas realizācijai tika iegūts pie nosacījuma, ka visu pumpējošo lāzeru izejas jauda ir 400 mW. Šajā gadījumā tiek realizēts ASE gaismas avots ar +23 dBm (200 mW) vidējo izejas jaudu. Šā avota jaudas līmeņa svārstības ir ne lielākas par 0.42 dBm, skatīt 10. attēlu. *OptSim* programmā izveidotais ASE gaismas avota modelis tika izmantots 8 un 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmu ar pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā tālākai realizācijai un izpētei.



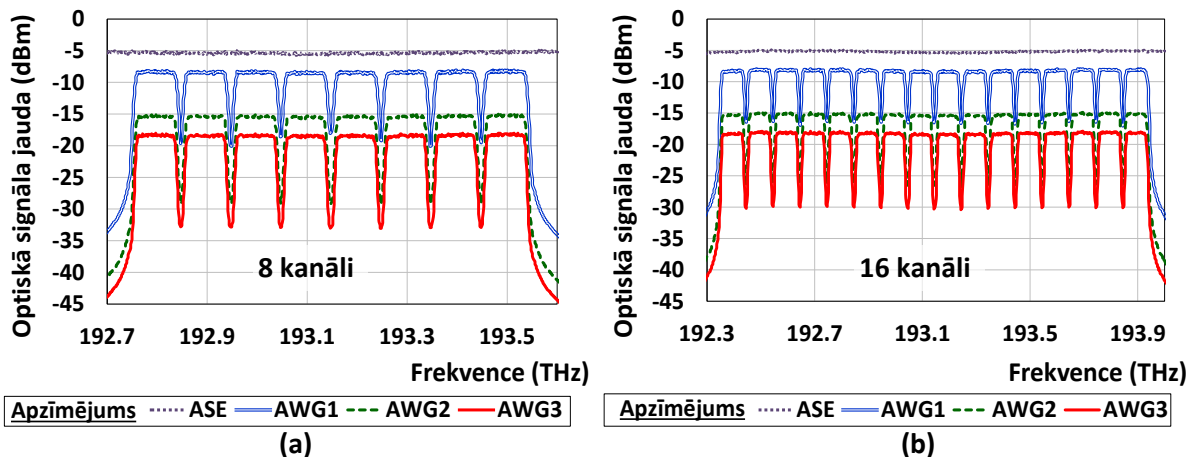
10. att. Optiskā signāla spektrs kaskādē slēgtas divu *EDFA* sistēmas izejā pie pumpējošo lāzeru izejas jaudas  $P_{pump} = 400$  mW

Līdz 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas simulācijas shēma ar izveidoto līdzena izejas spektra ASE platjoslas gaismas avotu ir attēlota 11. attēlā.



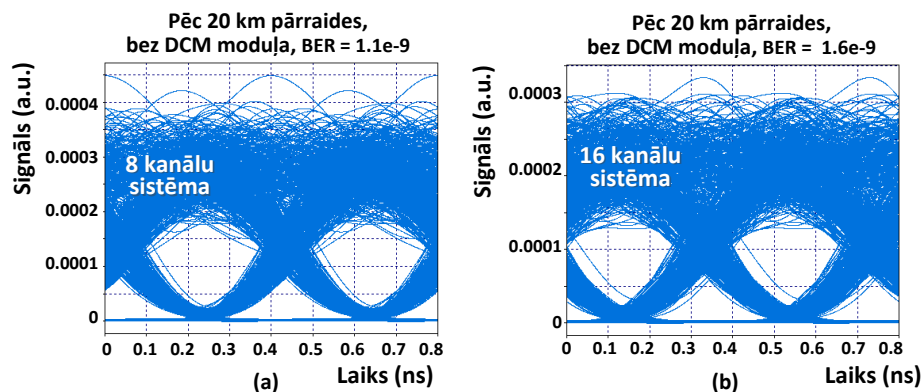
11. att. Līdz 16 kanālu SS-WDM PON sistēmas simulācijas shēma ar spektrāli sagrieztu platjoslas ASE gaismas avotu un dispersijas kompensācijas moduli (DCM)

Attēlā 12. ir redzams optiskā signāla spektrs ASE avota izejā, kā arī pēc katra AWG demultipleksora abām — 8 un 16 kanālu — SS-WDM PON sistēmām.



12. att. ASE platjoslas gaismas avota optiskais izejas spektrs un spektrs pēc AWG iekārtas (a) 8 kanālu un (b) 16 kanālu SS-WDM PON sistēmai ar līnijas garumu 10 km

Secīgi realizējot 8 un 16 kanālu SS-WDM PON piekļuves pārraides sistēmas ar pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s kanālā, tika secināts, ka 20 km pārraidi bez CD kompensācijas ar  $BER < 10^{-10}$  nevar nodrošināt, un maksimālais sasniedzamais datu pārraides attālums ir 10 km.



13. att. Uztvertā signāla acu diagrammas un BER vērtības pēc 20 km pārraides, bez DCM moduļa (a) 8 un (b) 16 kanālu SS-WDM PON sistēmā ar pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s kanālā

Attēlos 13.a. un 13.b. redzams, ka pēc pārraides caur 20 km garu optisko šķiedras līniju dispersijas ietekmes un gaismas avota spontānās emisijas trokšņu dēļ, uztvertā signāla acu diagrammas acs atvērums ir ievērojami samazinājies, kā rezultātā BER ir pārsniedzis nepieciešamo sliekšņa vērtību, kas ir definēta kā  $BER < 10^{-10}$ . Kā redzams 13., 14.a. un 15.a. attēlos, 20 km pārraidi bez *CD* kompensācijas ar  $BER < 10^{-10}$  nav iespējams nodrošināt abām (8 un 16 kanālu) *SS-WDM PON* sistēmām. Tas ir izskaidrojams ar *ASE* gaismas avota trokšņveida dabu, jo tā kā gaismas «šķēles» *FWHM* platums ir samērā liels ( $B_w=90$  GHz), arī hromatiskās dispersijas ietekme palielinās daudz straujāk līdz ar pārraides attāluma pieaugumu nekā tas ir uz lāzera gaismas avotiem balstītās viļņgarumdales blīvētās piekļuves sistēmās (piemēram, *WDM-PON* sistēmās ar *DFB* lāzeriem *OLT* iekārtās, raidītāja daļā, kur lāzera *FWHM*  $B_w=50$  MHz).

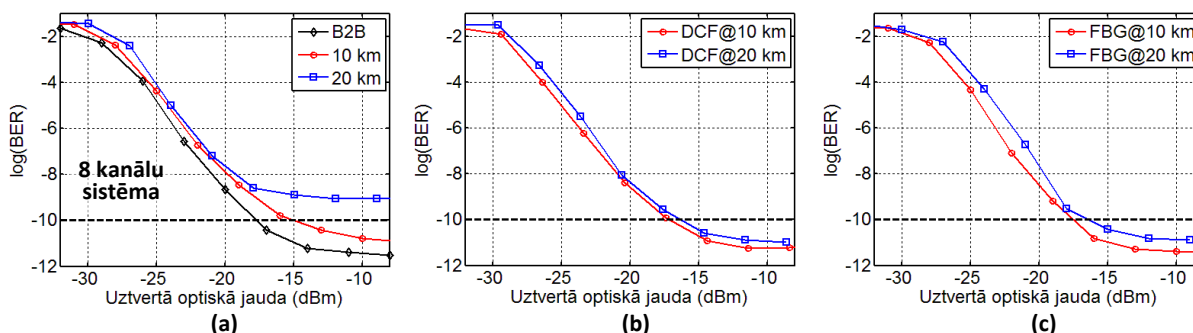
Līdz ar to abām — 8 un 16 kanālu — *SS-WDM PON* sistēmām tika realizēta *CD* kompensācija ar *DCF DCM* un *FBG DCM* moduļiem, un tā rezultātā uztvertā signāla BER pēc 20 km pārraides, nodrošinot vajadzīgo pienākošā signāla līmeni uztvērējā, atbilda robežvērtībai ( $BER < 10^{-10}$ ), kā tas ir redzams 14.b., 14.c. un 15.b., 15.c. attēlos. Kompensējamās dispersijas apjoms katras sistēmas gadījumā ir redzams 1. tabulā.

1. tabula

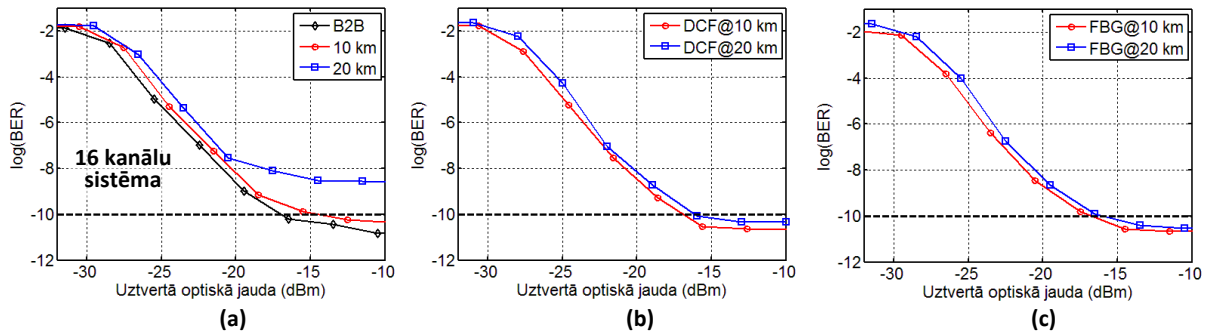
Kompensējamās dispersijas apjoms 8 un 16 kanālu 2.5 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmām pie pārraides attāluma līdz 20 km

<i>SS-WDM PON</i> pārraides sistēmas kanālu skaits			8 kanāli		16 kanāli	
Pārraides līnijas garums			10 km	20 km	10 km	20 km
Uzkrātās dispersijas apjoms			160 ps/nm	320 ps/nm	160 ps/nm	320 ps/nm
Kompensācijas metode un apjoms	DCF šķiedra	<i>L</i>	2.5 km	4.7 km	2 km	4.5 km
		<i>D<sub>c</sub></i>	-200 ps/nm	-376 ps/nm	-160 ps/nm	-360 ps/nm
	FBG režģis	<i>D<sub>c</sub></i>	-125 ps/nm	-290 ps/nm	-125 ps/nm	-280 ps/nm

No iegūtajiem rezultātiem tika secināts, ka visaugstāko 8 un 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmu veiktspēju nodrošina *FBG* pielietojums dispersijas kompensācijas modulī. Pielietojot *FBG DCM*, 20 km pārraide var tikt nodrošināta ar mazāku uztvertās optiskās jaudas līmeni ( $P = -16.4$  dBm 8 kanālu sistēmai un  $P = -16.0$  dBm 16 kanālu sistēmai) nekā *DCF* gadījumā ( $P = -15.9$  dBm 8 kanālu sistēmai un  $P = -15.2$  dBm 16 kanālu sistēmai), skatīt 14. un 15. att. Līdz ar to var tikt izmantots mazjaudīgāks *ASE* gaismas avots, lai sasniegtu tos pašus sistēmas veiktspējas rādītājus — pārraides ātrumu, attālumu un uztvertā signāla BER.

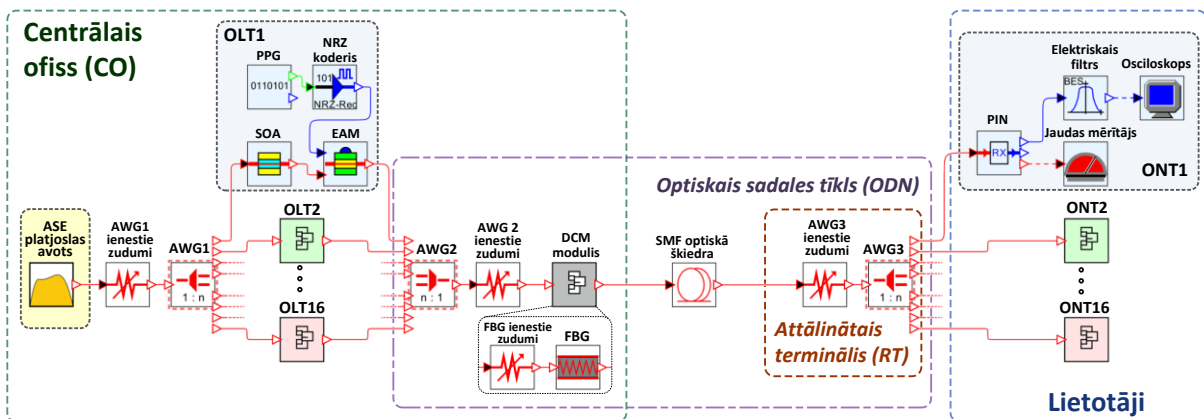


14. att. BER kā funkcija no uztvertās jaudas 8 kanālu *SS-WDM PON* sistēmā pie dažādiem pārraides attālumiem (a) bez *CD* kompensācijas un ar *CD* kompensāciju, pielietojot (b) *DCF* šķiedru vai (c) *FBG* režģi



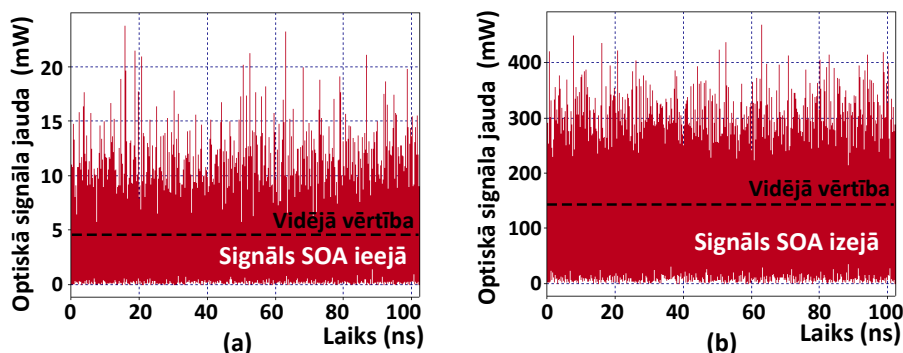
15. att. BER kā funkcija no uztvertās jaudas 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmā pie dažādiem pārraides attālumiem (a) bez *CD* kompensācijas un ar *CD* kompensāciju, pielietojot (b) *DCF* šķiedru vai (c) *FBG* režģi

ASE radītais intensitātes trokšnis ierobežo maksimālo datu pārraides ātrumu (2.5 Gbit/s kanālā), tāpēc tika meklēti risinājumi šā trokšņa samazināšanai. Tika izpētīts, ka, lietojot pusvadītāju optisko pastiprinātāju (*SOA*) piesātinājuma režīmā pirms optiskā modulatora, ir iespējams «nospiest» (noslāpēt) intensitātes trokšņus jeb intensitātes fluktuācijas un palielināt datu pārraides ātrumu no 2.5 Gbit/s līdz 10 Gbit/s kanālā. Lai novērtētu šo risinājumu, *OptSim* simulācijas programmā tika izveidota 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēma ar elektroabsorbcijas modulatoru (*EAM*), intensitātes trokšņu nospiešanu pielietojot *SOA* un dispersijas kompensācijas moduli ar šķiedras Brega režģi, skatīt 16. att.



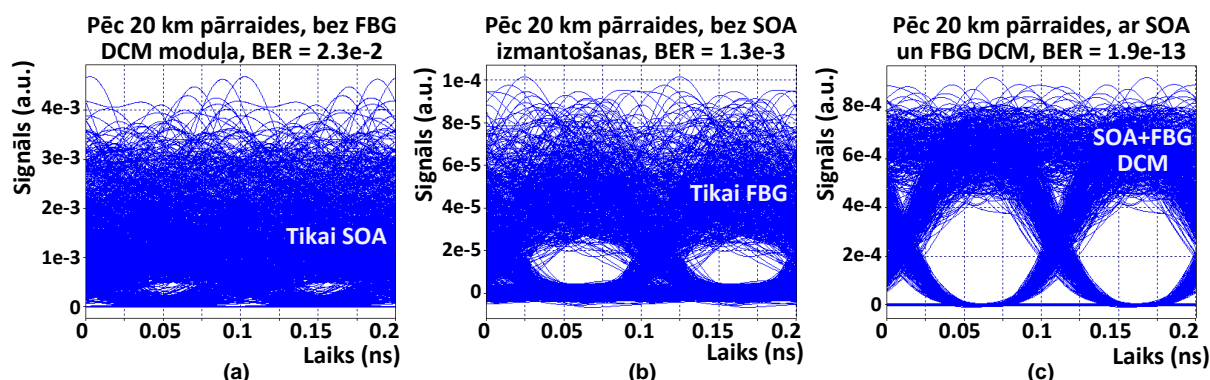
16. att. 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas ar *EAM* modulatoru, intensitātes trokšņu nospiešanu ar *SOA* un dispersijas kompensācijas moduli (*DCM*) simulācijas blokshēma

Kā redzams 17. attēlā, pēc optiskā signāla pastiprināšanas un apstrādes caur *SOA* intensitātes fluktuācijas ir ievērojami mazākas, salīdzinot ar aprēķināto signāla vidējo jaudas līmeni. *SOA* ieejā vidējā trokšņveida signāla vērtība ir 4.2 mW (+6.2 dBm), savukārt *SOA* izejā vidējā signāla vērtība ir 140.2 mW (+21.5 dBm), skatīt 17. att.



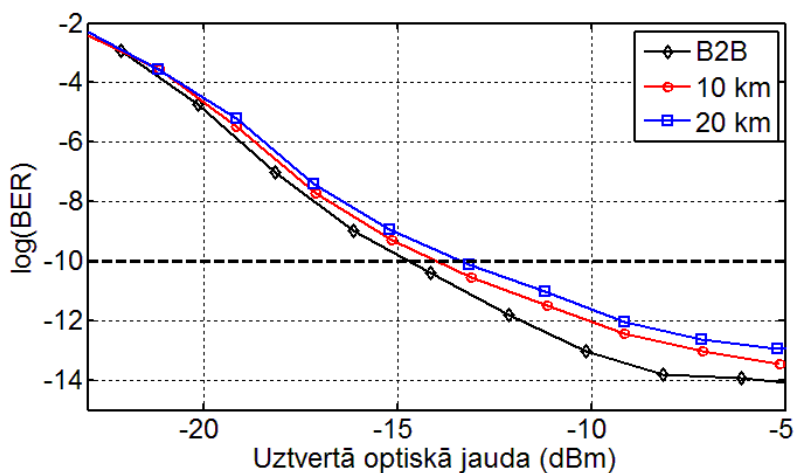
17. att. Signāls laika apgalā (a) *SOA* ieejā un (b) *SOA* izejā pēc tā pastiprināšanas un intensitātes trokšņu nospiešanas

Tika iegūts, ka, intensitātes trokšņu nospiešanai pielietojot gan *SOA*, kas darbojas piesātinājuma režīmā, gan arī realizējot dispersijas kompensāciju ar *FBG DCM*, ievērojami tiek uzlabota pārraidāmā un uztvertā signāla kvalitāte, kā rezultātā tiek iegūts, ka  $BER = 1.9 \cdot 10^{-13}$  kanālam ar zemāko veiktspēju pēc pārraides caur 20 km garu standarta vienmodas optisko šķiedru. Jāpiemin, ka bez vienlaicīgas *SOA* un *FBG DCM* pielietošanas pēc 20 km pārraides šajā kanālā uztvertā signāla BER ir virs robežvērtības, kas ir  $10^{-10}$ , skatīt 18. att.



18. att. Uztvertā signāla acu diagrammas 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmai pēc 20 km pārraides: (a) bez *CD* kompensācijas, (b) bez *SOA* pielietošanas *OLT* un (c) ar vienlaicīgu *SOA* un *FBG DCM* pielietošanu raidītāja pusē

Lai novērtētu izveidotās 16 kanālu *SS-WDM PON* piekļuves sistēmas ar pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā veiktspēju, tika uzņemtas BER raksturlīknes kā funkcija no uztvertās jaudas *B2B* konfigurācijā (bez optiskās pārraides līnijas) un pie līdz 20 km pārraides attālumiem, pielietojot *FBG* dispersijas kompensācijai un *SOA* optisko pastiprinātāju *ASE* radīto intensitātes trokšņu nospiešanai (skat. 19. att.).

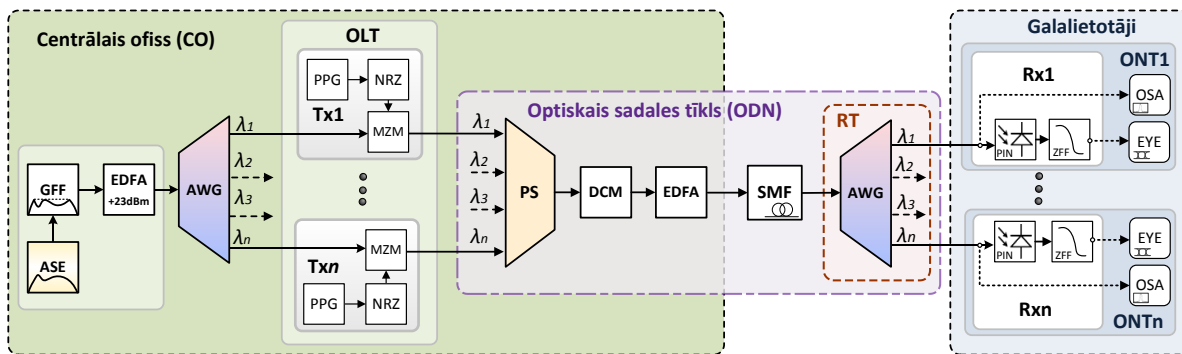


19. att. BER kā funkcija no uztvertās jaudas 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmā *B2B* konfigurācijā pēc pārraides caur 10 un 20 km garu optisko līniju

Apskatot 19. attēlu, redzams, ka 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmā, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla kvalitāti ( $BER < 10^{-10}$ ), *B2B* pārraides konfigurācijā minimālajam vidējam uztvertās jaudas līmenim ir jābūt vismaz  $P = -14.7$  dBm, pēc 10 km pārraides tam ir jābūt  $P = -14.0$  dBm, un pēc 20 km pārraides  $P = -13.4$  dBm.

*SS-WDM PON* piekļuves sakaru sistēmas simulācijas shēmas aprobācijai un matemātiski iegūto rezultātu pārbaudei RTU Telekomunikāciju institūta (TI) šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) laboratorijas tehnisko iespēju robežās tika izveidots eksperimentāls līdz 16 kanālu *SS-WDM PON* pārraides sistēmas makets ar pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s kanālā, centrālo frekvenci 193.1 THz un pārraides attālumu 10 km, skatīt 20. att.

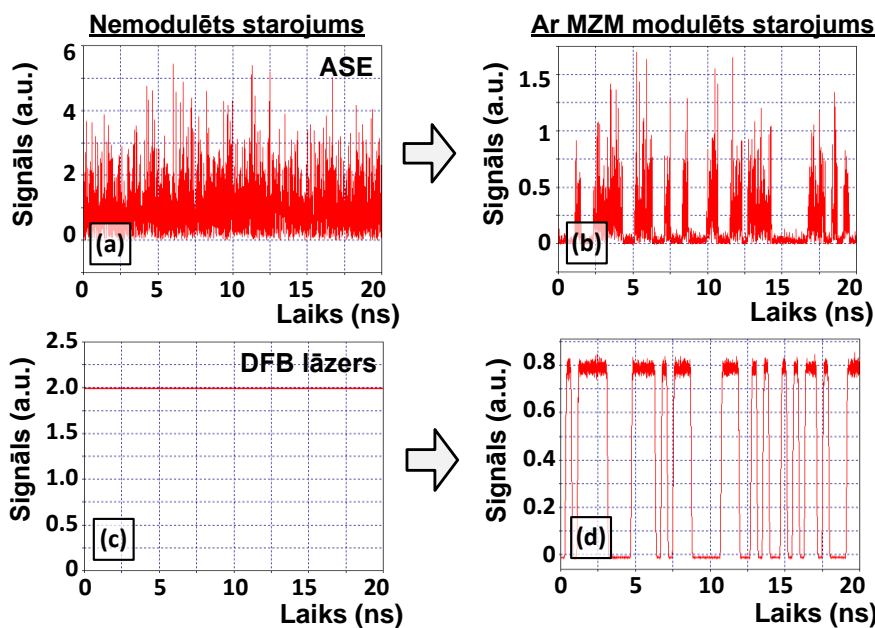




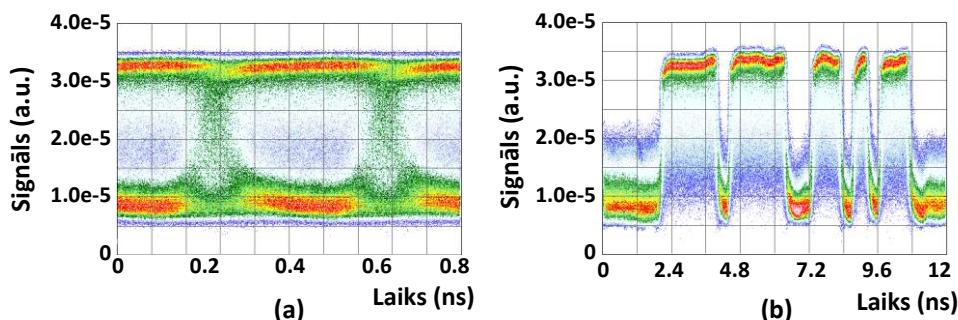
OLT – optiskās līnijas terminālis  
 ONT – optiskais tīkla elements  
 DCM – dispersijas kompensācijas modulis  
 EDFA – erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs  
 AWG – optisko signālu sadalītājs pēc viļņa garuma  
 PS – optiskā signāla sadalītājs pēc jaudas  
 ASE – pastiprinātas spontānās emisijas avots  
 SMF – standarta vienmodas optiskās šķiedras posms  
 PPG – elektriskā signāla ģenerators  
 GFF – ASE avota spektru izlīdzinošs filtrs  
 MZM – optiskā signāla modulators  
 NRZ – kodu formētājs

20. att. Eksperimentāla līdz 16 kanālu SS-WDM PON pārraides sistēmas shēma ar pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s kanālā

Eksperimentāli tika novērota uztverto bitu secības līmeņu fluktuācija jeb «patterning» efekts (angl. *pattern* — bitu secība), kas rodas MZM modulatora izejā dēļ ieejas optiskā signāla intensitātes fluktuācijām. Kā tas ir redzams 21.a. un 21.b. attēlā, ASE trokšņveida gaismas avota izejas signāla intensitāte laikā nav stabila kā tas, piemēram, ir DFB lāzera izejas signālam (skatīt 21.c. un 21.d. attēlu).



21. att. Optiskā signāla laiciskās diagrammas: (a) ASE sagrieztā optiskā signāla jeb gaismas šķēles laiciskā diagramma MZM modulatora ieejā un (b) MZM modulatora izejā pēc modulācijas; (c) DFB lāzera starojums un (d) informatīvs optiskais signāls pēc modulācijas

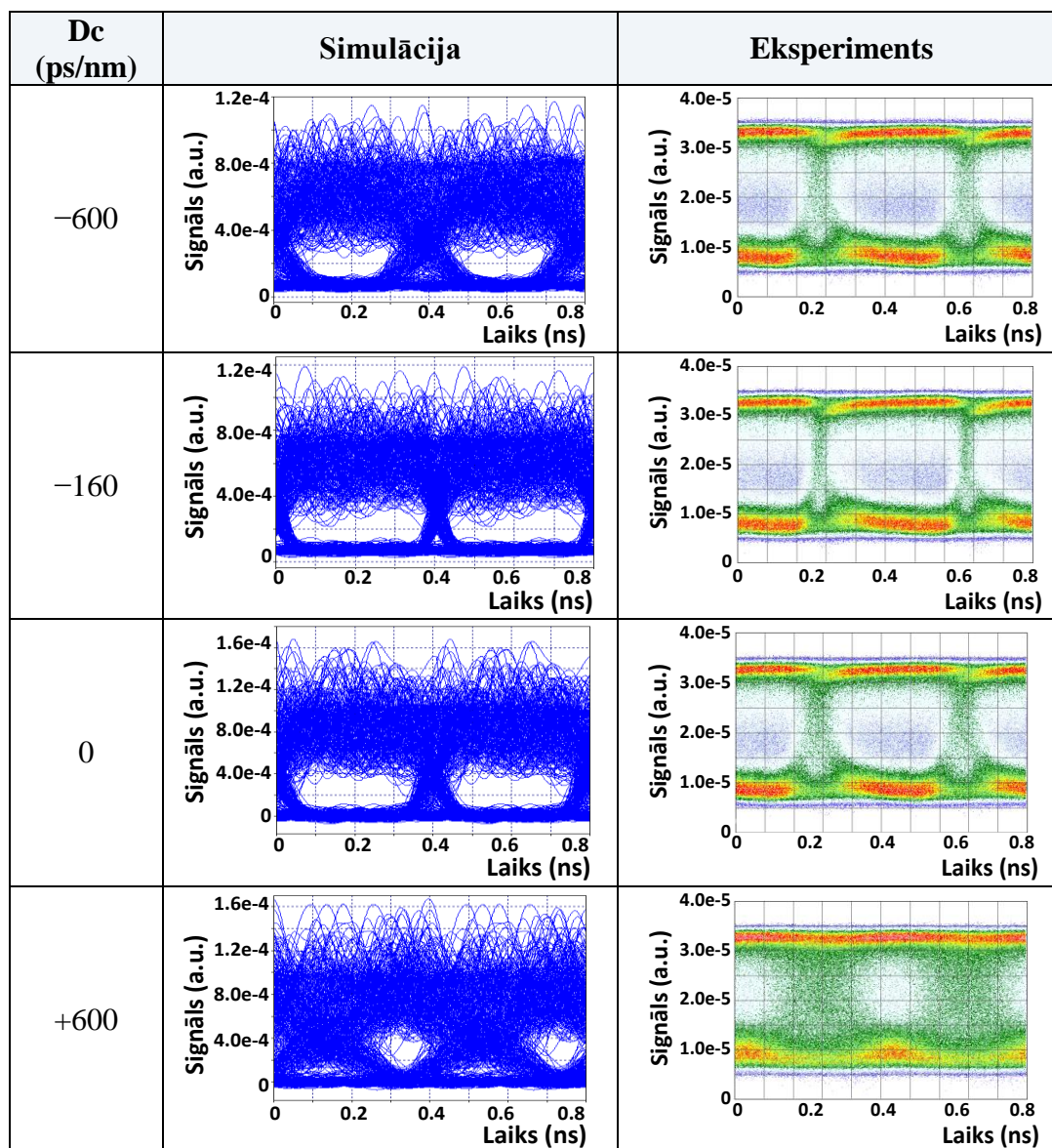


22. att. Eksperimentāli uztvertā signāla (a) acu diagramma un (b) tā diagramma laika apgabalā pēc pārraides caur 10 km garu optisko līniju

Eksperimentāli izmantotā *MZM* modulatora zemās izdzišanas attiecības ( $ER \leq 13$  dB), kā arī «*patterning*» efekta dēļ, redzams, ka acu diagrammas acs atvērumu klāj trokšņi (skatīt 22. att. un 2. tab). Ir redzama pārraidīto bitu secība, tomēr, tā kā ienākošā sagrieztā *ASE* signāla intensitāte fluktuē laikā, arī izejas optiskajā signālā ir novērojamas intensitātes fluktuācijas, kā rezultātā acs atvērumu zināmā mērā klāj trokšņi.

2. tabula

Simulatīvi un eksperimentāli iegūtās uztvertā signāla acu diagrammas pēc 10 km pārraides 2.5 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmā



Eksperimentāli izmantotajā ražotāja *Avanex* *MZM* modulatorā loģiskais «1» tiek formēts atbilstoši konkrētajā momentā ienākošā optiskā signāla intensitātei, kas noved pie tā, ka modulatora izejā esošā optiskā signāla loģiskā «1» intensitātes līmenis fluktuē laikā (skatīt 21.b. un 22.b. att.). Šīs intensitātes trokšņu fluktuācijas būtu iespējams nospīest, pielietojot *SOA*, kas darbojas piesātinājuma režīmā.

Tāpat kā *WDM-PON*, arī eksperimentāli izveidotajā *SS-WDM PON* sistēmā tika realizēta *CD* kompensācija, pielietojot *FBG DCM*, kur dispersijas kompensācijas apjoms tika mainīts robežās no  $-600$  ps/nm līdz  $+600$  ps/nm, lai pilnībā novērtētu *CD* ietekmi uz uztverto signālu. Tika novērots, ka, pieaugot dispersijas daudzumam, uztvertā impulsa forma kropļojas un paplašinās daudz straujāk nekā tas ir novērojams *WDM-PON* sistēmas gadījumā. To var izskaidrot ar to, ka *SS-WDM PON* sistēmā gaismas šķēles platums pirms modulācijas

( $B_w=90$  GHz) ir lielāks par signāla aizņemto frekvenču pamatjoslu ( $B_w = 2.5$  GHz), savukārt *WDM-PON* sistēmā lāzera joslas platums (līnijas platums) ir 50 MHz. Līdz ar to dispersijas ietekme *SS-WDM PON* sistēmās ir novērojama lielāka nekā *WDM-PON* sistēmās.

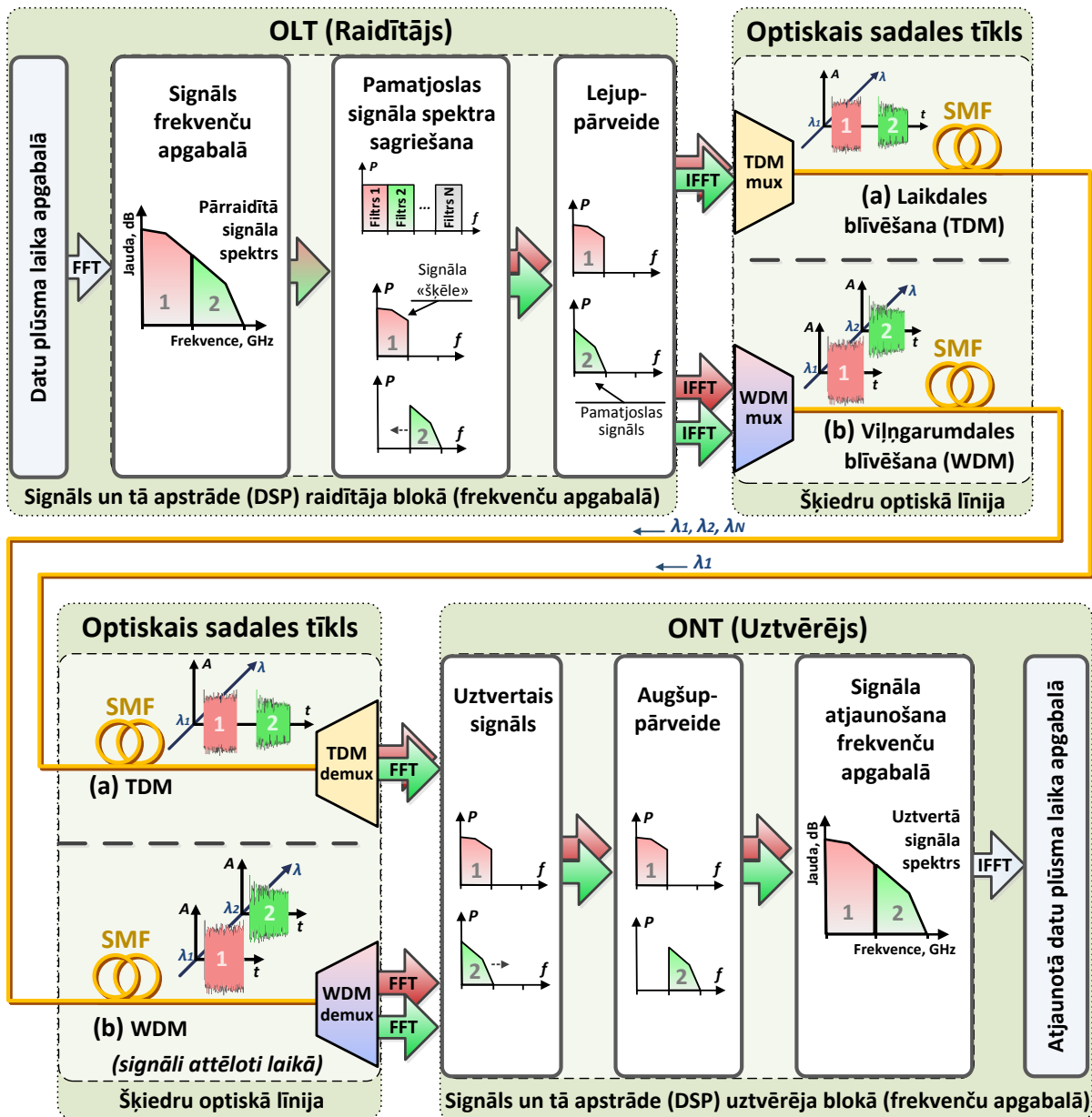
Kā redzams 2. tabulā, uztvertās bitu secības pārejas no loģiskās «0» līmeņa uz loģisko «1» līmeni vizuāli sakrīt un ir skaidri saskatāmas līdzības starp eksperimentāli iegūtajiem mērījumu rezultātiem un simulatīvajiem rezultātiem. Pie  $D_c = 600$  ps/nm ienestās dispersijas daudzuma ir novērojama izteikta uztvertā signāla trīce (angl. *jitter*), ir redzams, ka optiskais impulss ir kroplots un interferē ar blakus esošajiem pārraidītajiem impulsiem. Līdz ar to simulatīvos rezultātus varam uzskatīt par ticamiem. Jāpiemin, ka simulatīvi un eksperimentāli iegūto acu diagrammu atainojums vizuāli atšķiras, jo *OptSim* simulācijas rīkā iegūtās uztvertā signāla acu diagrammas ir attēlotas ar līnijām, savienojot nolašu punktus, savukārt eksperimentāli (ar kompānijas *Anritsu* acu diagrammas analizatoru) iegūtās acu diagrammas ir attēlotas kā nolašu punktu kopums. RTU TI ŠOPS laboratorijā eksperimentāli izstrādātais *SS-WDM PON* sakaru sistēmas makets ir pilnveidojams ar jauniem elementiem (*EAM* modulatoru, *SOA* u. c.) un paplašināms līdz 10 Gbit/s pārraides ātrumam kanālā.

### Trešā nodaļa

Darba trešajā nodaļā ir atrasts risinājums kā, izmantojot optiskajos piekļuves tīklos esošās elektriskās un optoelektriskās komponentes ar ierobežotu frekvenču caurlaides joslu, pārraidīt ātrdarbīgākus signālus, kam salīdzinoši ir nepieciešama vismaz divreiz platāka frekvenču josla. Elektriskās un optoelektriskās komponentes, kas atrodas ātrdarbīgā šķiedru optikas piekļuves pārraides sistēmas raidītāja un uztvērēja blokā (raiduztvērējā), tiek uzskatītas par tās vājo posmu, jo tām ir ierobežota frekvenču caurlaides josla un pārraides ātrums [28, 39]. Elektrisko komponentu pārraides ātrumu un attiecīgi arī caurlaides joslu ierobežo tajos esošo tranzistoru pārslēgšanās ātrums, kā arī siltums, kas rodas tās rezultātā un kuru ir nepieciešams novadīt [22]. Ierobežotās caurlaides joslas problēmas risinājums, kas neprasa pilnīgu raiduztvērēju nomaiņu ir elektrooptisks spektrāli sagriezts raiduztvērējs ātrdarbīgu optisko signālu pārraidei un uztveršanai piekļuves tīklos, kur, lietojot ciparu signālu apstrādi (*DSP*), tiek sagriezts elektriskais pamatjoslas (angl. *baseband*) signāls, kas satur pārraidāmo informāciju. Atsevišķas sagrieztā signāla daļas tiek pārraidītas caur šķiedru optisko piekļuves tīklu, un uztvērējā tiek atjaunots sākotnējais signāls. Šāds spektrāli sagriezts raiduztvērējs spēj nodrošināt lielākus pārraides ātrumus, izmantojot jau esošos raiduztvērējus ar ierobežotu frekvenču caurlaides joslu [39, 41, 44, 45]. Šādā veidā telekomunikāciju pakalpojumu sniedzējs var daudzkārt palielināt optiskā piekļuves tīkla aparatūras frekvenču caurlaides joslas platumu un attiecīgi – arī pārraides ātrumu. Nākamās paaudzes optiskajiem piekļuves tīkliem ir jābūt adaptīviem attiecībā uz nodrošināmo datu pārraides frekvenču joslu, kas spēj dinamiski mainīties atkarībā no lietotāja pieprasījuma. Līdz ar to spektrāli sagriezta raiduztvērēja tehnoloģija, lietojot *DSP*, tuvākajā nākotnē būs potenciāls risinājums, lai pārvarētu ierobežojumu, ko uzstāda elektronisko iekārtu ierobežotā frekvenču josla.

Šie pētījumi ir veikti doktorantūras prakses laikā Dānijas Tehniskās universitātes Metro piekļuves un tuvas darbības sistēmu grupas laboratorijā, sadarbojoties ar DTU *Fotonik* (Dānija) un Henriha Herca institūta (Vācija) zinātniekiem profesora *Idelfonso Tafur Monroy* un asoc. profesora *Juan Jose Vegas Olmos* vadībā. Izmantojot darbā izpētīto pamatjoslas elektriskā signālā spektrālās sagriešanas metodi, ir iespējams ar jau esošajiem optiskajos piekļuves tīklos izmantotajiem elektrooptiskiem raiduztvērējiem pārraidīt vismaz divreiz vai četrreiz spektrāli platāku signālu nekā to atļauj tajos izmantotā augstfrekvenču elektronika, nenomainot esošās elektriskās un elektrooptiskās komponentes ar citām [44]. Spektrālās sagriešanas tehnika ir mērogojama, kas nozīmē to, ka elektriskais signāls ar  $N$  GHz frekvenču pamatjoslas platumu var tikt sagriezts ne tikai divās signāla šķēlēs, kur katra aizņem  $\Delta f_{sk} = N/2$  GHz frekvenču pamatjoslu, vai četrās šķēlēs (katra aizņem  $\Delta f_{sk} = N/4$  GHz frekvenču pamatjoslu) bet pat 10 šķēlēs ( $\Delta f_{sk} = N/10$  GHz) [44, 45]. Signāla apstrāde frekvenču vai laika apgabalā tiek veikta *DSP* blokā, kas būtībā ir *Matlab* skaitļošanas vide,

kur tiek realizēta pārraidāmā signāla ātrā Furjē transformācija *FFT* (angl. *fast Fourier transform*) vai arī inversā Furjē transformācija *IFFT* (angl. *inverse fast Fourier transform*), skatīt 23. att.

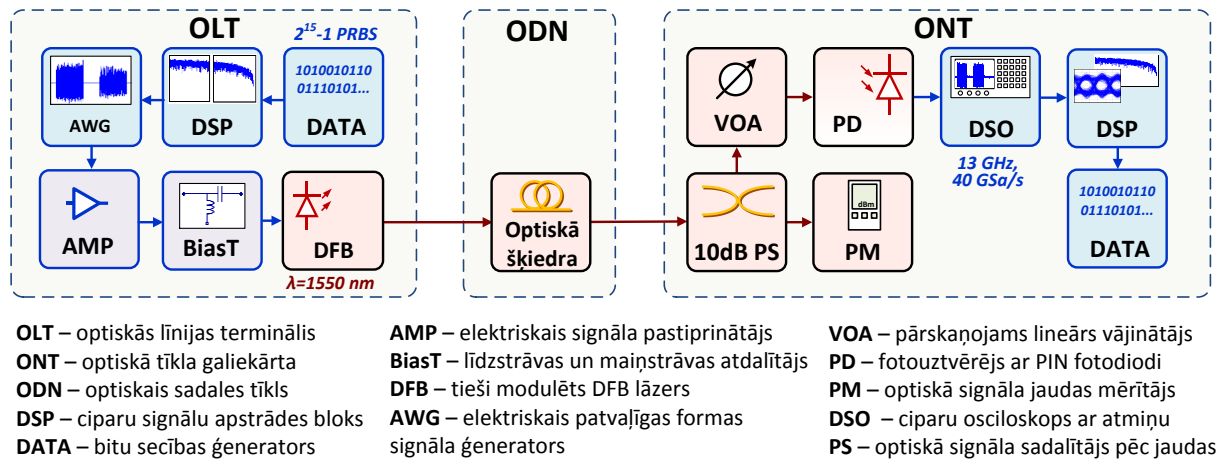


23. att. Elektriskā pamatjoslas signāla sagriešanas princips divās vienāda frekvenču platuma joslās, pārraide, uztveršana un signāla atjaunošana *ONT*, pielietojot: (a) *TDM* vai (b) *WDM* blīvēšanas tehnikas

Spektrāli sagrieztās signāla šķēles var tikt pārraidītas, cita pēc citas izmantojot laikdales blīvēšanu (*TDM*) (skatīt 23.a. att.) vai paralēli, pielietojot viļņgarumdales blīvēšanu (*WDM*) (skatīt 23.b. att.). Abos gadījumos raiduztvērēja elektrooptisko un elektrisko komponentu caurlaides joslas platums ir mērogojams, un šī aparātūras nepieciešamā elektriskā augstfrekvenču caurlaides josla ir vismaz divas reizes mazāka nekā sākotnējam elektriskajam signālam pirms sagriešanas.

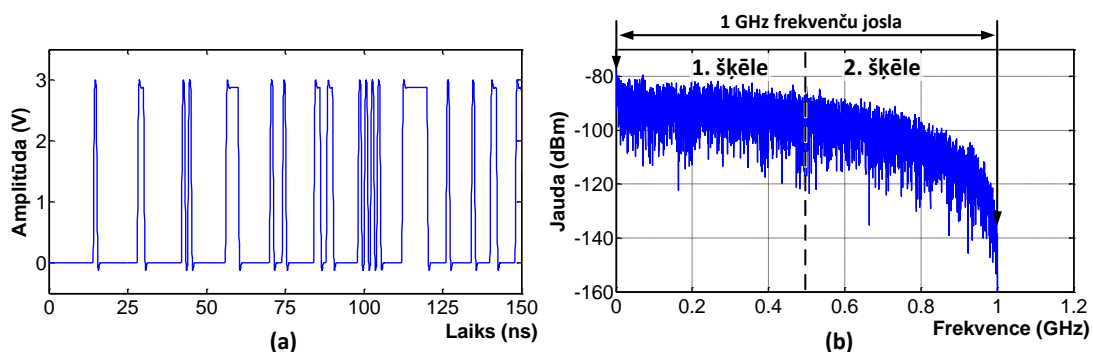
Lai pierādītu šīs spektrālās sagriešanas tehnoloģijas principu un novērtētu tās veiktspēju, tika izstrādāts spektrāli sagriezta raiduztvērēja eksperimentāls prototips un novērtēta tā darbība. Izveidotais prototips realizē 1 Gbit/s *NRZ* elektriskā datu signāla sagriešanu divās ierobežota platuma frekvenču šķēlēs, modulē tās optiskajā vidē vienu aiz

otras laikā, pārraida pa līdz 25 km garu vienmodas optiskās šķiedras (*SMF*) posmu, uztver un atjauno šā signāla sākotnējo formu, izmantojot divreiz mazāku — 500 MHz — elektrisko elementu caurlaides joslu. Eksperimentālā spektrāli sagriezta raiduztvērēja shēma ir parādīta 24. attēlā. Jāpiemin, ka pirms apstrādes elektriskais *NRZ* signāls ar pārraides ātrumu 1 Gbit/s aizņem 1 GHz frekvenču pamatjoslu, savukārt pēc apstrādes ar *DSP* — ne vairāk kā 500 MHz.



24. att. Spektrāli sagriezta raiduztvērēja shēma pamatjoslas elektriskā signāla sagriešanai divās spektrālās šķēlēs, pārraidei un sākotnējā signāla atjaunošanai uztvērējā

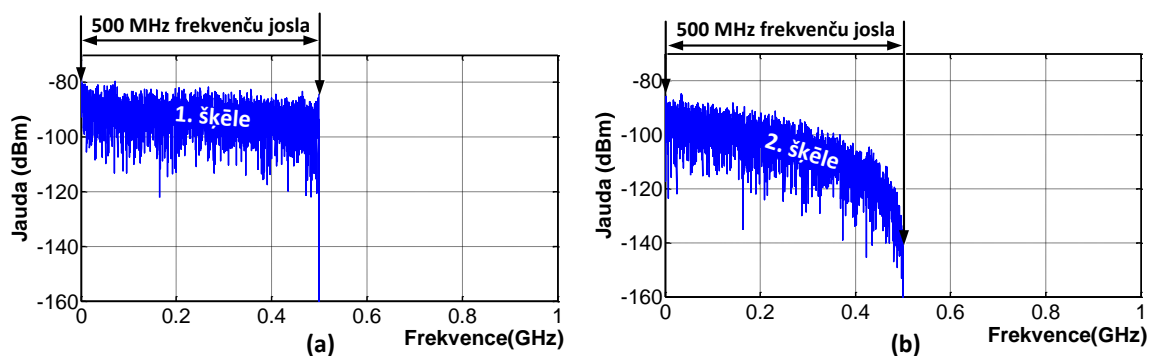
Sākotnēji elektriskā signāla ģenerators veido pseido — gadījuma  $2^{15}-1$  bitu secību ar darbības frekvenci 1 GHz, kas tiek padota uz kodu formētāju, un tiek veidots *NRZ* kodēts elektriskais signāls ar pārraides ātrumu 1 Gbit/s (skatīt 25.a. att.). Šis elektriskais signāls satur informāciju, kas tika pārraidīta izveidotajā optiskajā sakaru sistēmā. Pārraidāmā elektriskā signāla spektrs ar 1 GHz aizņemtās pamatjoslas platumu ir redzams 25.b. attēlā.



25. att. (a) Ģenerētā 1 Gbit/s *NRZ* elektriskā signāla laika diagramma un (b) tā spektrs

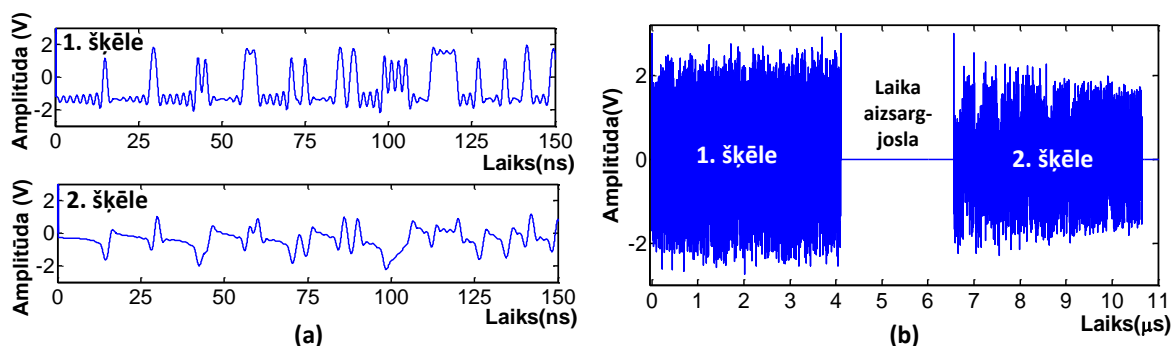
*DSP* blokā, pielietojot ciparu signālu apstrādi *Matlab* vidē, elektriskais datu signāls, kas aizņem 1 GHz frekvenču joslu (skat. 25.b. att.) tika sadalīts divās vienāda platuma ( $\Delta f_{\text{šķ}} = 500$  MHz) frekvenču šķēlēs (skatīt 26. att.). Pēc sagriešanas operācijas veikšanas signāla šķēle ar augstāku frekvenču joslu (2. šķēle) tika nobīdīta uz pamatjoslu (skatīt 26.b. att.), pielietojot *DSP*. Pēc tam, kad abas frekvenču šķēles atrodas pamatjoslā no 0 līdz 500 MHz, tās tiek sagatavotas pārraidei caur šķiedru optisko pārraides līniju.

Lai realizētu abu frekvenču šķēļu pārraidi, tās kopā ar 2.45  $\mu\text{s}$  laika aizsargjoslu tika apvienotas laikā vienā signālā, kas rezultātā aizņēma ne vairāk kā 500 MHz frekvenču joslu. Šī josla ir divreiz mazāka nekā josla, ko aizņēma signāls pirms sagriešanas operācijas. Signāla, kas satur katras šķēles viļņa formu (signāla amplitūdas izmaiņas laikā), ilgums ir 4.1  $\mu\text{s}$ . Attēlā 27.a. atsevišķi ir attēlotas abas šķēles laika apgabalā (uzskatāmības pēc ir attēlots laika sprādis no 0 ns līdz 150 ns), kā arī abas šķēles apvienotas laika apgabalā (skat. 27.b. att.).



26. att. 1 GHz plata elektriskā signāla spektrs sagriezts divās 500 MHz frekvenču šķēlēs

Signāls ar 27.b. attēlā redzamo viļņa formu, kas satur abas šķēles, tiek nosūtīts uz 1.25 GS/s *Agilent* patvaļīgas formas signāla ģeneratoru (*AWG*), kura caurlaides josla ir 500 MHz. Tā izejā tiek ģenerēts noteiktas formas elektriskais signāls atkarībā no tā ciparu vadības signāla, kas ir redzams 27.b. attēlā.

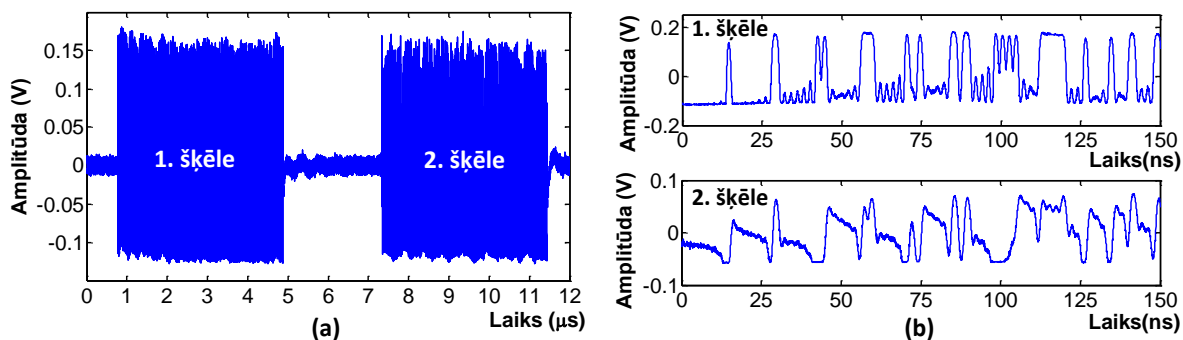


27. att. (a) Sagrieztā signāla abu 500 MHz šķēļu diagrammas laikā atsevišķi un (b) no abām šķēlēm laikā apvienotas signāls, kas tiek izmantots tiešai *DFB* lāzera modulācijai

*AWG* izejā izveidotais elektriskais signāls tika pastiprināts un caur *BiasT* (līdzstrāvas un maiņstrāvas atdalītāju) tika izmantots tiešai *DFB* lāzera modulācijai. Eksperimentā tika izmantots *DFB* lāzers ar centrālo viļņa garumu  $\lambda = 1550$  nm. Tika nomērīts, ka vidējā optiskā signāla izejas jauda tieši modulēta lāzera izejā ir 2.9 dBm. Tālāk modulētais optiskais signāls tika ievadīts optiskajā sadales tīklā (*ODN*), ko ataino optiskā vienmodas šķiedra. Uztvertā signāla kvalitāte un spektrāli sagriezta raiduztvērēja veiktspēja tika novērtēta izmantojot 3 dažādus vienmodas optisko šķiedru veidus ar garumu līdz 25 km: standarta vienmodas optiskā šķiedra (*SMF*), dispersijas nobīdīta šķiedra (*DSF*) un dispersijas nenobīdīta optiskā šķiedra (*NZ-DSF*). Uztvertais optiskais signāls sākotnēji tika sadalīts jaudas sadalītājā (*PS*), kur viena izeja ar 10 dB vājinājumu tiek izmantota sistēmas pārraudzībai, bet otra tiek padota tālāk uz pārskanojamu lineāru vājinātāju (*VOA*).

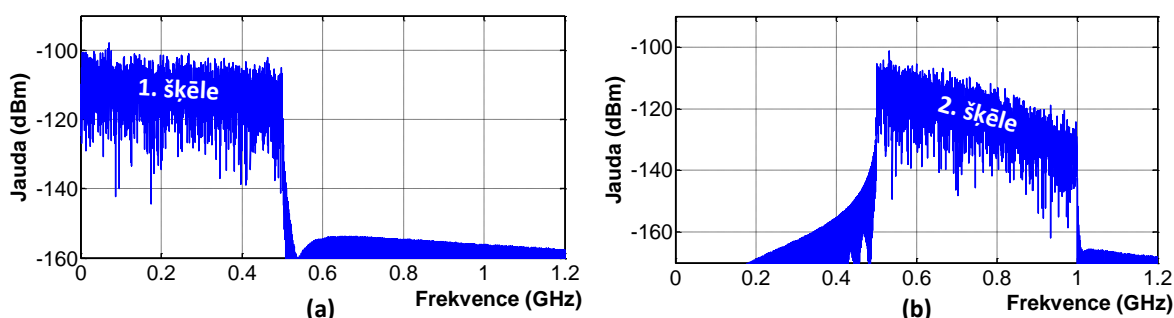
Optiskais signāls no *VOA* izejas tika padots uz fotouztvērēja bloku ar *PIN* fotodiode, kur tas tika pārvērsts elektriskajā signālā. *B2B* konfigurācijā (bez papildus optiskās pārraides līnijas) vidējā uztvertā signāla jauda ir -6.4 dBm. Fotouztvērēja izejā esošais elektriskais signāls (skatīt 28.a. att.) tika uztverts un saglabāts *Agilent* ciparu signālu osciloskopa (*DSO*) atmiņā. Eksperimentāli izmantojam *DSO* ir 13 GHz frekvenču caurlaides joslas platums, kā arī uztvertā elektriskā signāla ierakstīšanai tika pielietots 1.25 GSa/s nolašu ātrums.

*DSO* atmiņā saglabātais signāls tālāk tika apstrādāts *DSP* blokā, kā rezultātā no divām signāla šķēlēm, kas kopā aizņem 500 MHz frekvenču joslu, tika atjaunots sākotnējais 1 GHz signāls un novērtēts BER atkarībā no uztvertā optiskā signāla vidējās jaudas. Lai no uztvertā signāla (skatīt 28.a. att.), kas satur abas sagrieztā signāla šķēles, atjaunotu sākotnējo signālu, no tā tika izdalīta katra atsevišķā signāla šķēle (skatīt 28.b. att.).



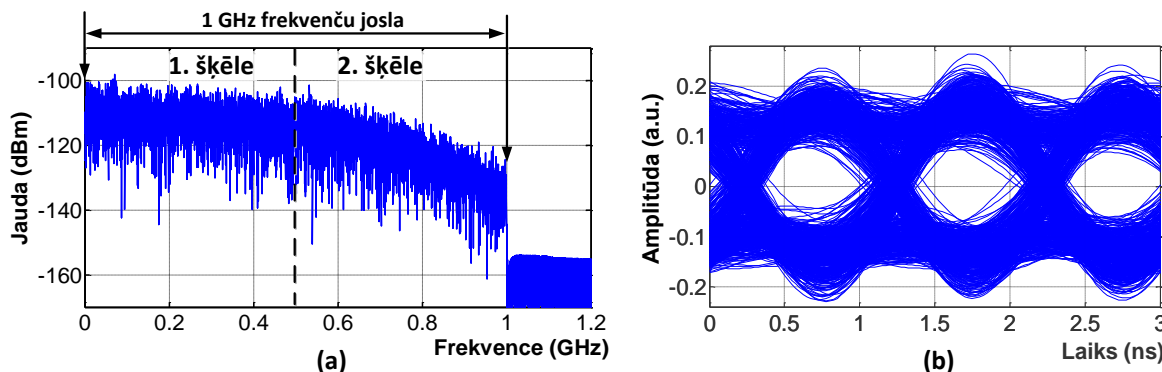
28. att. (a) Ar *DSO* saglabātā elektriskā signāla viļņa forma, kas tiek izmantota tālākai apstrādei *DSP* blokā un (b) abas uztvertā signāla šķēles atdalītas laikā, pielietojot *DSP*

Lai sekmīgi atjaunotu pārraidīto signālu, ir nepieciešams, lai otrā šķēle atrastos tās sākotnējā frekvenču joslā (sākot no 0.5 līdz 1 GHz). Līdz ar to, pielietojot *DSP*, otrā šķēle tika pārvirzīta tās sākotnējā pozīcijā, kas nozīmē, ka ir izpildīti visi priekšnoteikumi sagrieztā, pārraidītā un uztvertā signāla atjaunošanai (skatīt 29.a. un 29.b. att.).

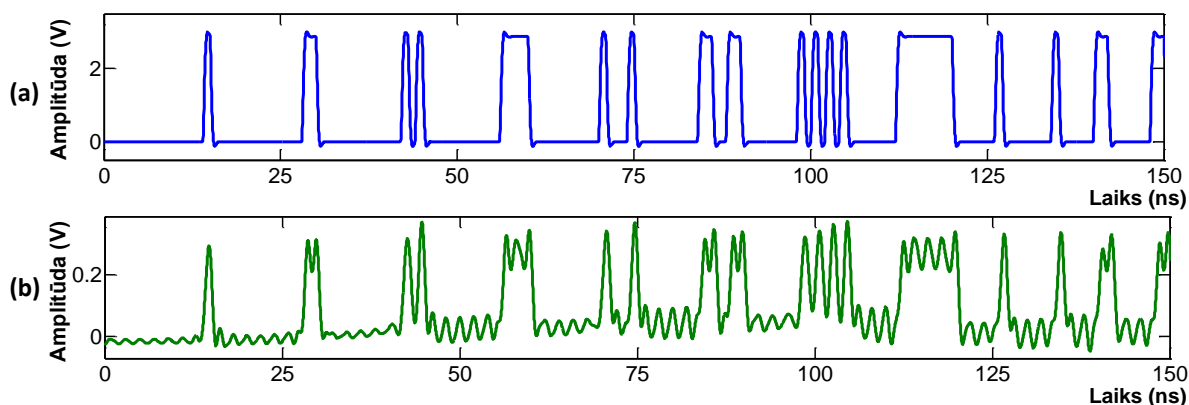


29. att. (a) No uztvertā signāla izdalītās pirmās šķēles spektrs un (b) otrās šķēles spektrs pirms signāla apvienošanas operācijas veikšanas *DSP* blokā

Otrā šķēle ir novietota tās sākotnējā frekvenču pozīcijā, tāpēc ir iespējams apvienot abas frekvenču šķēles vienā pamatjoslas signālā, kā tas ir redzams 30.a. attēlā. Kā redzams 30.b. attēlā, atjaunotā signāla acu diagrammas atvērums pēc uztveršanas *B2B* konfigurācijā (raidītājs ar uztvērēju savienots tikai ar šķiedru optisko slēgavklu) ir pietiekami liels, tomēr ir novērojami nelieli signāla kropļojumi, kā arī trīce. Šo kropļojumu cēlonis ir elektriskā pastiprinātāja izmantošana, kā arī vairākkārtēja ciparu signāla apstrāde (*FFT*, *IFFT*) gan laika, gan arī frekvenču apgabalā. Attēlā 31. ir salīdzināts sākotnējais 1 Gbit/s *NRZ* signāls ar atjaunoto 1 Gbit/s *NRZ* signālu, kas tika pārraidīts, uztverts un atjaunots, izmantojot 500 MHz elektrisko frekvenču joslu.

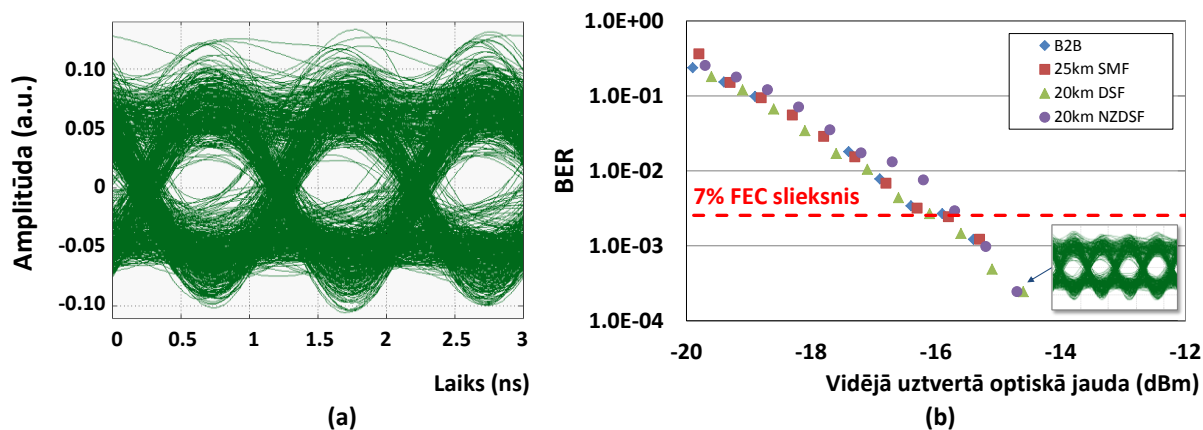


30. att. (a) Atjaunotā 1 Gbit/s elektriskā pamatjoslas signāla spektrs un (b) acu diagramma pēc uztveršanas *B2B* konfigurācijā (bez pārraides līnijas izmantošanas)



31. att. (a) Sākotnējā ieejas elektriskā signāla laika diagramma pirms sagriešanas operācijas veikšanas un (b) atjaunotā sagrieztā un pārraidītā signāla laika diagramma

Kā redzams 31.b. attēlā, izmantojot atjaunoto signālu, ir iespējams pilnībā restaurēt sākotnējo bitu secības virkni, kas tika pārraidīta un uztverta, pielietojot spektrāli sagriezta raiduztvērēja risinājumu. Attēlā 32.a. ir redzama uztvertā signāla acu diagramma pēc 25 km pārraides caur standarta vienmodas optiskās šķiedras (*SMF*) posmu. Kā redzams, acs ir pietiekami atvērta, un tas nozīmē, ka var tikt realizēta sekmīga informācijas pārraide attālumā līdz 25 km. BER atkarībā no uztvertā optiskā signāla vidējās jaudas, pārraidē pielietojot *SMF*, *DSF* un *NZDSF* optiskās šķiedras, ir redzams 32.b. attēlā. Šī diagramma attēlo spektrāli sagriezta raiduztvērēja ar datu pārraides ātrumu 1 Gbit/s darbības kvalitāti, realizējot elektriskā pamatjoslas signāla sagriešanu, pārraidi un apvienošanu uztvērējā, pielietojot *DSP*.



32. att. (a) Uztvertā signāla acu diagramma pēc 25 km pārraides caur standarta vienmodas optisko šķiedru, kā arī (b) BER atkarībā no uztvertā signāla vidējās jaudas, pārraidē izmantojot dažādus optisko šķiedru veidus

Kā redzams BER diagrammā, pielietojot turpvērsto kļūdu labošanu (*FEC*) ar 7 % datu virstēriņa (angl. *overhead*) izmantošanu, nodrošinot vismaz  $-15.8$  dBm fotouztvērēja vidējo uztvērto optiskā signāla jaudu, divu šķēļu spektrāli sagriezts raiduztvērējs var nodrošināt bezkļūdainu datu pārraidi ar  $BER < 10^{-10}$ , pārraides nodrošināšanai izmantojot līdz 25 km garu optisko līniju ar *SMF*, *DSF* vai *NZDSF* optisko šķiedru. Papildu 7 % virstēriņš nozīmē to, ka pārraidāmajai bitu secībai tiek pievienoti papildu 7 % bitu, kas ļauj veikt uztvertā signāla bitu secības kļūdu labošanu, ja tādas radušās. Pielietojot turpvērsto kļūdu labošanu, ir iespējams veikt uztvertā signāla BER labošanu no līmeņa  $BER < 2.55 \cdot 10^{-3}$  līdz līmenim  $BER < 1 \cdot 10^{-10}$  [18].



## Ceturrtā nodaļa

Darba 4. nodaļā ir izpētīti galvenie optiskā signāla latentuma cēloņi šķiedru optiskajās metro piekļuves sakaru sistēmās, kā arī sniegtas rekomendācijas optisko un elektrooptisko elementu ienestā latentuma samazināšanai [6, 15, 23, 24, 29].

Attīstoties tādiem pakalpojumiem un servisiem kā augstas izšķirtspējas video straumēšana, telemedicīnas pakalpojumi un veselības aprūpes sistēmas, tiešsaistes videospēles, virtuālā un paplašinātā realitāte, videonovērošana, mākoņdatošanas pakalpojumi, video konferences, finanšu transakcijas un datorizētas tirdzniecības sistēmas, ir nepieciešams uzlabot arī optisko piekļuves tīklu arhitektūru un tehnoloģiskos risinājumus, nodrošinot datu pārraides ātrumus 2.5 un 10 Gbit/s katram klientam ar iespējami zemu signāla aizturi jeb latentumu [6]. Latentuma parametrs raksturo laika periodu no pirmā datu bita pārraides uz sūtītāja komunikācijas saskarni līdz pēdējā bita saņemšanai no saņēmēja komunikācijas saskarnes. Šķiedru optikas tīklos kopējo latentumu veido trīs galvenās komponentes: pārraides vide jeb optiskā šķiedra, optiskās komponentes un elektrooptiskās komponentes. Līdz ar to telekomunikāciju pakalpojumu sniedzējam ir svarīgi rūpīgi izvēlēties optiskā tīkla komponentes un pārdomāt zema latentuma tīkla topoloģiju [15, 31]. Jau iepriekš ir veikti pētījumi par to, kā uzlabot pārraides ātrumu šķiedru optiskajās pārraides sistēmās, savukārt latentuma ietekme un tā cēloņi, kā arī samazināšanas iespējas, vēl nav pietiekami izpētītas un apkopotas [15, 24, 31]. Pieprasījums pēc ultrazema latentuma pakalpojumiem strauji pieaug, un tas paver vairākas iespējas, it īpaši šķiedru optikas piekļuves un metro pārraides sistēmās [30]. Šķiedru optikas pārraides sistēmās latentuma cēlonis ir optiskā signāla aizkave optiskajā šķiedrā, kas papildināta ar signāla aizkavi, ko ievieš optiskie un elektrooptiskie elementi, kā arī papildu signāla apstrādes laiks, kas ir nepieciešams sekmīgai sistēmas darbībai. Šie optiskie un elektrooptiskie elementi ir raiduztvērēji, optiskā signāla reģeneratori, optiskie pastiprināji ar erbija leģēto šķiedru (*EDFA*) un Ramana pastiprinātāji, hromatisko dispersiju kompensējošas optiskās šķiedras (*DCF*) un šķiedras Brega režģa (*FBG*) dispersijas kompensācijas moduļi (*DCM*), ciparu signālu apstrādes (*DSP*) bloki ar vai bez uztvertā signāla turpvērstās kļūdu labošanas (*FEC*) [29, 31].

Optiskajos piekļuves un arī metro tīklos ir nepieciešams rūpīgi izvēlēties datu pārraides ātrumu, jo tam var būt nozīmīga ietekme uz kopējo sistēmas latentumu. Veicot sistēmas datu pārraides ātruma palielināšanu no 2.5 līdz 10 Gbit/s, var būt nepieciešama *CD* kompensācija, kā arī optiskā signāla pastiprināšana, kas tīklā ienesīs papildus latentumu [6].

Standarta vienmodas optiskajā šķiedrā vismaz 80 % gaismas pārvietojas pa serdeni, savukārt ne vairāk kā 20 % gaismas pārvietotājas pa apvalku [11]. Zema latentuma optiskajos piekļuves tīklos priekšrocība ir optiskajām šķiedrām, kuru grupveida gaismas laušanas rādītājs ir zemāks [6]. Lai novērtētu laika aizturi vienmodas optiskajās šķiedrās, lietderīgi ir izmantot efektīvo grupveida gaismas laušanas rādītāju ( $n_{\text{eff}}$ ) serdeņa ( $n_1$ ) vai apvalka ( $n_2$ ) gaismas laušanas rādītāja vietā. Efektīvais gaismas laušanas rādītājs ( $n_{\text{eff}}$ ) ir vidējais gaismas laušanas rādītājs, kas ņem vērā gan  $n_1$  gan arī  $n_2$  vērtību, līdz ar to ir objektīvāk izmantot  $n_{\text{eff}}$  nekā  $n_1$  vai  $n_2$  [10]. Mūsdienu optisko šķiedru ražošanas kompānijas, piemēram, *Corning*, uzrāda tikai  $n_{\text{eff}}$  vērtību (piemēram, pie  $\lambda = 1550$  nm vienmodas *Corning SMF28e* optiskajai šķiedrai  $n_{\text{eff}} = 1.4682$ , bet pie  $\lambda = 1310$  nm  $n_{\text{eff}} = 1.4676$ ) [9, 21]. Zinot, ka gaismas ātrums vakuumā ir  $c = 299792.458$  km/s, un gaismas laušanas rādītājs  $n_0 = 1$  [43], nenovēršamu optiskā signāla aizturi jeb latentumu vakuumā var aprēķināt šādi:

$$\Delta_{\text{vakuumā}} = \frac{1 \text{ km}}{c} = \frac{1 \text{ km}}{299792.458 \text{ km/s}} = 3.336 \mu\text{s} \quad (2)$$

Tomēr optiskajā šķiedrā gaismas laušanas rādītājs ir robežās no 1.45 līdz 1.50, līdz ar to optiskais signāls šķiedrā izplatās lēnāk nekā vakuumā, kas rada lielāku signāla latentumu.

Zinot  $n_{\text{eff}}$  vērtību, gaismas ātrumu izvēlētajā optiskajā šķiedrā pie 1310 nm un 1550 nm gaismas viļņu garumiem var aprēķināt šādi:

$$V_{1310\text{nm}} = \frac{c}{n_{\text{eff}_{1310\text{nm}}}} = \frac{299792.458 \text{ km/s}}{1.4676} = 204273.956 \text{ km/s} \quad (3)$$

$$V_{1550\text{nm}} = \frac{c}{n_{\text{eff}_{1550\text{nm}}}} = \frac{299792.458 \text{ km/s}}{1.4682} = 204190.477 \text{ km/s} \quad (4)$$

Izmantojot iepriekš aprēķināto gaismas ātrumu vienmodas optiskajā šķiedrā pie dažādiem gaismas viļņu garumiem, signāla latentumu, ko ievieš 1 km garš optiskās šķiedras posms, var aprēķināt šādi:

$$\Delta_{1310\text{nm}} = \frac{1 \text{ km}}{V_{1310\text{nm}}} = \frac{1 \text{ km}}{204273.956 \text{ km/s}} = 4.895 \mu\text{s} \quad (5)$$

$$\Delta_{1550\text{nm}} = \frac{1 \text{ km}}{V_{1550\text{nm}}} = \frac{1 \text{ km}}{204190.477 \text{ km/s}} = 4.897 \mu\text{s} \quad (6)$$

Kā redzams izteiksmēs (5) un (6), optiskā signāla aizture optiskajā šķiedrā ir atkarīga gan no  $n_{\text{eff}}$ , gan arī pārraidē izmantotā gaismas viļņa garuma. Balstoties uz iegūtajiem aprēķinu rezultātiem, var pieņemt, ka 1 km garš vienmodas optiskās šķiedras posms ienes 4.9  $\mu\text{s}$  signāla latentumu [31]. Šķiedru optiskajā pārraides sistēmā hromatiskā dispersija tiek kompensēta, pielietojot dispersijas kompensējošu moduli (*DCM*), kurā atrodas dispersijas kompensējošas optiskās šķiedras (*DCF*) posms vai šķiedras Brega režģis (*FBG*) [3, 36]. Tipiskiem tālas darbības piekļuves un metro šķiedru optiskajiem tīkliem nepieciešamais *DCF* šķiedras apjoms ir 15 līdz 25 % no kopējās optiskās pārraides līnijas garuma. Rezultātā, izmantojot *DCF* šķiedru, arī signāla latentums pieaug par apmēram 15 līdz 25 % [15, 31].

Jāņem vērā, ka latentums rodas ne tikai pārraides līnijā, bet arī pašos raiduztvērējos. Īpašu uzmanību ir jāpievērš tīkla saskarnes (interfeisa) aizturai jeb serializācijas aizturai. Tā raksturo laika intervālu, kas ir nepieciešams, lai pārvērstu pārraidei paredzētos datus seriālā bitu plūsmā, kas var tikt pārraidīta caur šķiedru optisko pārraides tīklu (skat. 7. izteiksmi).

$$\text{Tīkla saskarnes aizture} = \frac{\text{datu paketes izmērs (biti)}}{\text{bitu pārraides ātrums (biti/sekunde)}} \quad (7)$$

Tabulā 3. ir doti tīkla saskarnes aiztures lielumi, serializējot 64 un 512 baitu datu paketes pie bitu pārraides ātrumiem 622 Mbit/s, 1 Gbit/s, 1.25 Gbit/s, 2.5 Gbit/s un 10 Gbit/s, kuri ir atbilstoši esošajos un nākamās paaudzes optiskajos piekļuves tīklos izmantotajiem datu pārraides ātrumiem [6].

3. tabula

Tīkla saskarnes aiztures vērtības atkarībā no datu paketes izmēriem un bitu pārraides ātruma

	Datu paketes izmērs (baiti)	Bitu pārraides ātrums (Gbit/s)				
		0.622	1	1.25	2.5	10
Tīkla saskarnes aizture (ns)	64	823.2	512	409.6	204.8	51.2
	512	6585.2	4096	3276.8	1638.4	409.6

Tīkla saskarnes aiztures laiks, apstrādājot salīdzinoši maza izmēra paketes (piemēram, 64 baiti), ir mazāks, nekā apstrādājot liela izmēra datu paketes (piemēram, 512 baiti) ar konstantu bitu pārraides ātrumu. Ja tiek izmantots 10 Gbit/s bitu pārraides ātrums, tīkla saskarnes radītā laika aizture 64 baitu paketei būs 51.2 ns, savukārt 512 baitu paketei tā būs 409.6 ns. Līdz ar to — jo lielāku datu paketi nepieciešams pārraidīt, jo lielāks signāla latentums tiks ienests tās apstrādes dēļ (pie konstanta bitu pārraides ātruma).

Latentuma avotus un tipiskas to radītās laika aiztures vērtības ir apkopotas 4. tabulā. Kā redzams, optiskā šķiedra ir viens no galvenajiem latentuma jeb laika aiztures cēloņiem piekļuves un metro optiskajos tīklos. Otrs svarīgākais elements, kas var radīt nozīmīgu latentuma daudzumu, ir hromatiskās dispersijas kompensācijas modulis (*DCM*).

4. tabula

Latentuma avoti un to tipiskas ienestās laika aizkaves vērtības optiskajos piekļuves un metro tīklos

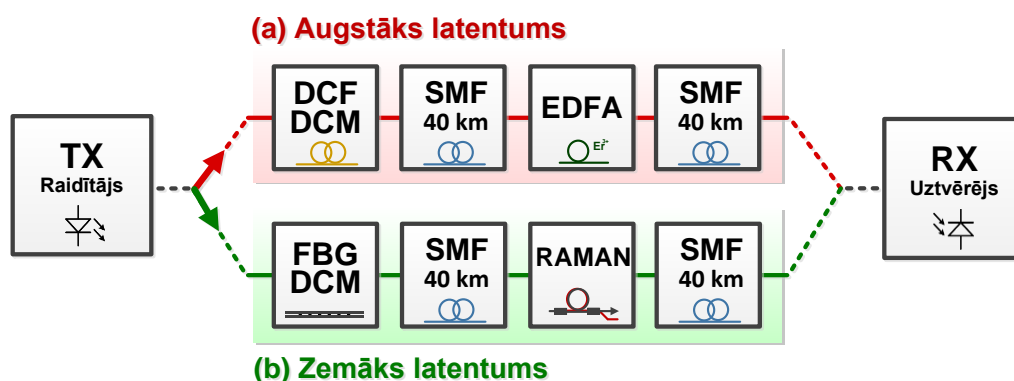
Līnijas komponentes nosaukums	Ienestās laika aiztures vērtība
Vienmodas optiskā šķiedra ( <i>SMF</i> )	4.9 μs uz 1 km šķiedras garuma
Dispersiju kompensējošas optiskās šķiedras modulis ( <i>DCF DCM</i> )	Līdz 25 % no ITU-T G.652 vienmodas šķiedras latentuma vai līdz 5 % no ITU-T G.655 NZ-DSF šķiedras latentuma
Dispersiju kompensējoša šķiedras Brega režģa modulis ( <i>FBG DCM</i> )	5 līdz 50 ns
Ciparu signālu apstrādes pielietošana ( <i>DSP</i> )	Līdz 1 μs
Turpvērstās kļūdu labošanas pielietošana ( <i>FEC</i> )	No 15 līdz 150 μs
Optiskais <i>EDFA</i> pastiprinātājs	Apmēram 0.15 μs uz iekārtu
Optiskais <i>Ramana</i> pastiprinātājs	Nerada papildu laika aizturi
Optiskie raiduztvērēji	Optiskajos tīklos plaši izmantotie raiduztvērēji: 5 līdz 10 μs
	Ļoti zemas aiztures raiduztvērēji: 4 līdz 30 ns
Optiskā signāla reģenerācija ( <i>OEO pārveide</i> )	Apmēram 100 μs

Lai skaitliski novērtētu latentuma samazināšanas metodes šķiedru optiskajos piekļuves tīklos, tika izveidots punkts-punkts optiskais metro piekļuves pārraides sistēmas modelis ar 80 km garu kopējo standarta vienmodas optiskā šķiedras posmu, hromatiskās dispersijas kompensāciju, optiskā signāla pastiprināšanu un pārraides ātrumu 10 Gbit/s (skatīt 33. att.). Tas tika veikts ar mērķi skaitliski parādīt, kā esošais optiskais metro piekļuves tīkls var tikt uzlabots, aizvietojojot tipiskas optiskās un elektriskās komponentes ar citām — autora rekomendētām — zema latentuma komponentēm, neizmainot tīkla topoloģiju.

Pirmais optiskais metro piekļuves tīkls (skatīt 33.a. att.) sastāv no diviem raiduztvērējiem, *DCF DCM* dispersijas kompensācijas moduļa, *EDFA* pastiprinātāja, lai pastiprinātu optisko signālu, un diviem 40 km gariem ITU-T G.652 vienmodas optiskās šķiedras posmiem. Katra optiskās šķiedras posma garums ir 40 km, jo tas ir ITU rekomendēts standarta vienmodas optiskās šķiedras garums bez optiskā signāla pastiprināšanas [17].

Otrs optiskais metro piekļuves tīkls (skatīt 33.b. att.) ir samazināta latentuma tīkls, kas sastāv no diviem ultrazema latentuma raiduztvērējiem, *DCF DCM* ir aizvietots ar *FBG DCM*, kā arī *EDFA* pastiprinātājs šajā risinājumā ir aizvietots ar *Ramana* optisko

pastiprinātāju, kas nerada laika aizturi, jo atšķirībā no *EDFA* caurejošo optisko signālu pastiprina bez papildu optiskās šķiedras posma izmantošanas.



33. att. Punkts-punkts optiskais metro piekļuves tīkls ar (a) augsta latentuma un (b) zema latentuma optiskajām un elektrooptiskajām komponentēm

Lai aprēķinātu kopējo latentuma samazinājumu, kas ir iegūts, nomainot eksistējošās optiskā tīkla komponentes ar zemāka latentuma komponentēm, sākumā katras komponentes ienesto latentumu varam apkopot tabulā (skatīt 5. tabulu).

5. tabula

Kopējā latentuma aprēķins tipiskai un samazināta latentuma optiskajai punkts-punkts metro piekļuves sistēmai ar pārraides attālumu 80 km

Līnijas komponente	Parasta pārraides sistēma	Samazināta latentuma pārraides sistēma
2 x 40 km ITU-T G.652 vienmodas optiskā šķiedra	$4.9 \mu\text{s} \times 80 \text{ km} = 392 \mu\text{s}$	$4.9 \mu\text{s} \times 80 = 392 \mu\text{s}$
1 CD kompensācijas modulis (DCM)	<i>DCF DCM</i> : $25 \% \text{ no } 392 \mu\text{s} = 98 \mu\text{s}$	<i>FBG DCM</i> : 50 ns
1 optiskais pastiprinātājs	<i>EDFA</i> : 0.15 $\mu\text{s}$	Ramana pastiprinātājs neienes aizturi
2 raiduztvērēji	$2 \times 10 \mu\text{s} = 20 \mu\text{s}$	$2 \times 4 \text{ ns} = 8 \text{ ns}$
2 tīkla interfeisa aizture	$2 \times 51.2 \text{ ns} = 102.4 \text{ ns}$	$2 \times 51.2 \text{ ns} = 102.4 \text{ ns}$
<b>Kopējā uzkrātā latentuma vērtība:</b>	<b>510.25 <math>\mu\text{s}</math></b>	<b>392.16 <math>\mu\text{s}</math></b>

Aprēķinot katras sistēmas kopējo ienesto latentumu, tika pieņemts, ka tiek pārraidīta 64 baitu datu pakete (64 baiti ir tipisks datu paketes izmērs tirdzniecības datu ziņojumapmaiņas sistēmās (angl. *market data messaging systems*), kas rada 51.2 ns tīkla interfeisa aizkavi katra raiduztvērēja elektriskajā daļā. Kā redzams tabulā 5., iegūtie rezultāti pierāda, ka, izmantojot esošo standarta vienmodas šķiedru optisko pārraides līniju un nomainot *DCF* dispersijas kompensācijas moduli ar *FBG* moduli, *EDFA* optisko pastiprinātāju ar Ramana pastiprinātāju, kurā pastiprināšanai netiek izmantots papildu optiskās šķiedras posms, kā arī pārraidē izmantotos raiduztvērējus ar zema latentuma raiduztvērējiem, kopējais iepriekšminētās pārraides sistēmas latentums tiek samazināts no 510.25  $\mu\text{s}$  līdz 392.16  $\mu\text{s}$ , kas ir 118.09  $\mu\text{s}$  jeb 23.1 %.

## PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

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

1. Salīdzinot ar *TDM-PON* sistēmām, *WDM-PON* un *SS-WDM PON* sistēmas ir piemērotākas nākamās paaudzes *PON (NGPON)* tīkliem, jo spēj nodrošināt vismaz 10 Gbit/s lejuplūsmas datu pārraides ātrumu katram abonentam.
2. Pielietojot hromatiskās dispersijas kompensācijas metodes (*DCF* un *FBG*), 16 kanālu *WDM-PON* piekļuves sistēmas ar pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā, maksimālo pārraides attālumu ir iespējams palielināt vairāk par 25 % (līdz 70 km robežās).
3. Dispersijas kompensācijas realizācijas gadījumā zemāku uztvertā signāla BER ir iespējams iegūt, pielietojot šķiedras Brega režģi (*FBG*) nevis dispersijas kompensējošu šķiedru (*DCF*). Tas ir izskaidrojams ar to, ka *FBG* var tikt izmantots pie augstākām optiskajām pārraides jaudām, jo tas mazāk izraisa nelineāros optiskos efektus, kas var kropļot pārraidāmo optisko signālu, kā arī tā ienesto zudumu lielums (ap 3.5 dB vienam *DCM* modulim) tipiski ir mazāks nekā *DCF* šķiedrai (ap 0.6 dB/km).
4. 16 kanālu *SS-WDM PON* sistēmas realizācijai nepieciešamo platjoslas *ASE* gaismas avotu ar izejas jaudu vismaz +23 dBm (200 mW) un līdzenu izejas optiskā signāla frekvenču raksturlīkni sistēmas darbības diapazonā (C joslā) var izveidot no diviem kaskādē savienotiem *EDFA* pastiprinātājiem, piemeklējot to parametrus (erbija leģētās šķiedras garumu, pumpējošo gaismas avotu jaudu un viļņa garumu).
5. Sagriezto elektrisko 1 Gbit/s *NRZ* signālu var pārraidīt caur līdz 25 km garām *SMF*, *DSF* un *NZ-DSF* šķiedrām, uztvert un pilnībā atjaunot tā 1 GHz frekvenču pamatjoslas formu, pārraidot un apvienojot 500 MHz platas frekvenču joslas šķēles elektrisko komponentu pamatjoslas platumā.
6. Optiskajās piekļuves metro sakaru sistēmās ir iespējams samazināt latentuma parametru vismaz par 20 %, pielietojot darbā piedāvāto risinājumu, kas paredz aizstāt esošos optiskos un optoelektriskos sistēmas elementus ar zemākas aiztures elementiem.

Nobeigumā jāuzsver, ka iegūtie rezultāti var tikt pielietoti gan ekspluatācijā esošu optisko piekļuves pārraides sistēmu uzlabošanai, gan arī jaunu ieviešanai. Saistībā ar sadarbības līgumu, rekomendācijas praktiski izmantotas SIA «Telia Latvija» šķiedru optikas pārraides sistēmu pilnveidošanai un LVRTC realizēta ERAF projekta «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos» izstrādē, kā arī valsts pētījumu programmā (VPP) «Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai». Izmantojot iegūtos rezultātus, ir izstrādāta un patentēta *WDM-PON* šķiedru optiskā piekļuves sakaru sistēma ar dispersijas kompensāciju, kas ir realizēta uz čirpota šķiedras Brega režģa bāzes (Latvijas patenta nr. LV-14628).

## LITERATŪRA

- [1] Agrawal G. Fiber-Optic Communication Systems. – USA: John Wiley and Sons, 2002. – 561 p.
- [2] Bobrovs V., Porins J., Ozolins O., Ivanovs G., Optisko blīvēšanas sistēmu attīstība // Rīga: Sakaru pasaule, 2008. – Vol. 50, No. 2 – 1.–5. lpp.
- [3] Bobrovs V., Spolitis S. and Ivanovs G. Comparison of chromatic dispersion compensation techniques for WDM-PON solution// Proceedings of 2<sup>nd</sup> Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC). – Vilnius, Lithuania, April 25–27. 2012. – pp. 64–67.
- [4] Bobrovs V., Spolitis S., Gavars P., Ivanovs G. Comparison of Passive Chromatic Dispersion Compensation Techniques for Long Reach Dense WDM-PON System// Journal of Electronics and Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 122, No. 6 – pp. 65–70.
- [5] Bobrovs V., Spolitis S., Ivanovs G. and Gavars P. Performance Improvement of High Speed Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Proceedings of IX International Symposium on Telecommunications (BIHTEL). – Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, October 25–27. 2012. – pp. 1–6.
- [6] Bobrovs V., Spolitis S., Ivanovs G. Latency Causes and Reduction in Optical Metro Networks// Proceedings of SPIE Photonics West 2014 OPTO. – USA, San Francisco, February 1–6. 2014. – pp. 1–11. **(Invited)**.
- [7] Bobrovs V., Spolitis S., Trifonovs I., Ivanovs G. Spectrum Sliced WDM-PON System as Energy Efficient Solution for Optical Access Systems// Proceedings of 5<sup>th</sup> IEEE Latin America Conference on Communications (LATINCOM 2013). – Santiago, Chile, November 24–26. 2013. – pp. 1–6.
- [8] Cisco Systems. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2013–2018// White paper. – 2014. – Vol. 1. – pp. 1–16.
- [9] Corning Inc. Corning SMF-28e+ optical fiber product information// Product information sheet. – 2013. – Vol. 1. – pp. 1–4.
- [10] Corning Inc. Explanation of the Sources of Variation in Optical Fiber Effective Group Index of Refraction Values// White paper – 20120. – Vol. 1. – pp. 1–4.
- [11] Duwayne R. A. Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and Using Optical Time-Domain Reflectometers. – SanDiego: Elsevier Academic Press, 2004. – pp. 437.
- [12] El-Sahn Z. A., Mathlouthi W., Fathallah H., LaRochelle S., Rusch L. A. Dense SS-WDM Over Legacy PONs: Smooth Upgrade of Existing FTTH Networks// Journal of Lightwave Technology. – 2010. – Vol. 28, No. 10 – pp. 1485–1495.
- [13] Fiber To The Home Council Europe. 6<sup>th</sup> FTTH Handbook. – Brussels: FTTX Council Europe, 2014. – pp. 162.
- [14] Fibre to the Home Council Europe (FTTHCouncil). Record breaking roll-out speeds in Latvia, Incumbent Lattelecom transformed the country's broadband Internet market// FTTH Case study. – 2011. – pp. 1–2.
- [15] Hardy S. Breaking Barriers to Low Latency//Lightwave Online Magazine. – 2010. – Vol. 27, No. 6. – pp. 1–10.
- [16] ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid// International Telecommunication Union. – 2012. – pp. 1–16.
- [17] ITU-T G.959.1. Optical transport network physical layer interfaces// International Telecommunication Union. – 2012. – pp. 1–74.
- [18] ITU-T G.975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems// International Telecommunication Union. – 2004. – pp. 1–58.
- [19] ITU-T G.984.6. Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension// International Telecommunication Union. – 2008. – pp. 1–40.

- [20] Ivanovs G., Spolitis S., Parts R., Bobrovs V. Performance Improvement of Spectrum-sliced Passive Optical Network// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Taipei, Taiwan, March 25–28. 2013. – pp. 308–311.
- [21] Jovanovic N., Thomas J., Williams R., Steel M., Marshall G., Fuerbach A., Nolte S., Tünnermann A., and Withford M. Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings enable simple, linearly polarized fiber lasers// Optics Express. – 2009. – Vol. 17, No. 8. – pp. 6082–6095.
- [22] Kaminow I. P., Li T., Willner A. E. Optical Fiber Telecommunications VB. Systems and Networks. – USA: Elsevier, 2008. – pp. 915.
- [23] Kawanishi T., Kanno A., Yoshida Y. and Kitayama. K. Impact of wave propagation delay on latency in optical communication systems// Proceedings of SPIE 8646, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems V. – San Francisco, USA, February 02.2013. – pp. 1–8.
- [24] Kay R. Pragmatic Network Latency Engineering Fundamental Facts and Analysis// cPacket Networks, White Paper. – 2009. – pp. 1–31.
- [25] Keiser G. Optical Communications Essentials. – USA: McGraw-Hill, 2007. – pp. 372.
- [26] Lee C.-H., Sorin W. V., Kim B. Y. Fiber to the Home Using a PON Infrastructure// Journal of Lightwave Technology. – 2006. – Vol. 24, No. 12. – pp. 4568–4583.
- [27] Machuca C. M., Chen J., Wosinska L., Mahloo M., Grobe K. Fiber access networks: Reliability and power consumption analysis// Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). – Bologna, Italy, February 8–10. – 2011. – pp. 1–6.
- [28] Mahloo M., Dixit A., Chen J., Machuca C. M., Lanoo B., Colle D., Wosinska L. Towards Reliable Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks// IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, No. 2. – pp. 14–23.
- [29] Mazzaresse, D. Minimizing latency in long-haul networks// Lightwave Online Magazine. – 2011. – Vol. 28, No. 5. – pp. 1–12.
- [30] New Paradigm Resources Group (NPRG) Inc. The Low-Latency Services Market// Market report. – 2010. – pp. 1–39.
- [31] Nordell S. Network latency – how low can you go?// Lightwave Online Magazine – 2012. – Vol. 29, No. 6. – pp. 1–3.
- [32] Spolitis S., Bobrovs V., Berezins S., Ivanovs G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System// Proceedings of 15<sup>th</sup> International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2012). – Rome, Italy, October 15–18. 2012. – pp. 195–199.
- [33] Spolitis S., Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of High-Speed AWG Filtered Spectrum-Sliced WDM PON System// Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012). – Poznan, Poland, July 18–20. 2012. – pp. 21–24.
- [34] Spolitis S., Bobrovs V., Ivanovs G. New Generation Energy Efficient WDM-PON System Using Spectrum Slicing Technology// Proceedings of 4<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2012). – St. Petersburg, Russia, October 3–5 October. 2012. – pp. 586–590.
- [35] Spolitis S., Bobrovs V., Ivanovs G. Reach Improvement of Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Proceedings of Seventh International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012). – Victoria, Canada, November 12–14. 2012. – pp. 296–301.
- [36] Spolitis S., Ivanovs G. Extending the Reach of DWDM-PON Access Network Using Chromatic Dispersion Compensation// Proceedings of IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2011). – Stockholm, Sweden, October 19–21.2011. – pp. 29–33.

- [37] Spolitis S., Ivanovs G. Investigation of Future Perspectives and Technology of Passive Optical Network// Proceedings of Riga Technical University 52<sup>nd</sup> International Conference. – Riga, Latvia, October 13–14. 2011. – pp. 21–21.
- [38] Spolitis S., Ivanovs G. Performance Evaluation of WDM and TDM Passive Optical Networks// Proceedings of 12<sup>th</sup> International Young Scientists Conference «Optics and High Technology Material Science (SPO 2011)». – Kyiv, Ukraine, October 27–30. 2011. – pp. 215–216.
- [39] Spolitis S., Vegas Olmos J. J., Bobrovs V., Ivanovs G., Monroy, I. T. A Novel Approach for Transmission of 56 Gbit/s NRZ Signal in Access Network Using Spectrum Slicing Technique// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2013). – Beijing, China, December 12–15. 2013. – pp. 1–3.
- [40] Spolitis S., Olonkins S., Porins J. Realization of Dense Bidirectional Spectrum Sliced WDM-PON Access System// Proceedings of 9<sup>th</sup> International Symposium on Communications Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2014). – Manchester, England, July 23–25. 2014. – pp. 552–557.
- [41] Spolitis S., Wagner C., Vegas Olmos J. J., Bobrovs V., Ivanovs G., Monroy I. T. Experimental Demonstration of a Scalable Sliceable Transceiver for Optical Access Networks// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2014). – Beijing, China, November 11–14. 2014. – pp. 1–3.
- [42] TeraXion Company. ClearSpectrum TDCMX compact tunable dispersion compensation module// Product technical specification. – 2014. – pp. 1–2.
- [43] Thyagarajan K. S., Ghatak A. Fiber Optic Essentials – USA: Wiley-IEEE Press, 2007. – pp. 259.
- [44] Wagner C., Madsen P., Spolitis S., Vegas Olmos J. J., Monroy I. T. Sliceable transponders for metro-access transmission links// Proceedings of SPIE Photonics West 2015, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems (OPTO). – San Francisco, USA, February 10–12. February. 2015. – pp. 1–11. **(Invited)**.
- [45] Wagner C., Spolitis S., Vegas Olmos J. J., Bobrovs V., Ivanovs G. and Monroy I. T. Re-use of low bandwidth equipment for high bitrate transmission using signal slicing technique// Proceedings of Opto Electronics and Communications Conference (OECC 2015). – Shanghai, China, June 28 to July 2. 2015. – pp. 1–3. (Submitted).
- [46] Waqas A. I., Yousaf K., Shah A. M. P., Zeeshan M. A Comparative Study of Multiplexing Schemes for Next Generation Optical Access Networks// Journal of Optical Communications. – 2014. – Vol. 35, No. 3. – pp. 201–205.
- [47] Wong M. A., Zulkifli N., Idrus S. M., Analysis of the next generation green optical access networks// Proceedings of 18<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). – Jeju Island, South Korea, October 15–17. 2012. – pp. 498–503.
- [48] Yuang M. C., Hsu D-Z., Tien P-L., Chen H-Y., Wei C-C., Chen S-H., Chen J. An energy and cost efficient WDM/OFDMA PON system: design and demonstration// Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31, No. 16. – pp. 2809–2816.
- [49] Lightwave Staff: Broadband for all' target achieved says EU, 2014. / Internets. – [www.lightwaveonline.com/articles/2014/05/broadband-for-all-target-achieved-says-eu.html](http://www.lightwaveonline.com/articles/2014/05/broadband-for-all-target-achieved-says-eu.html)
- [50] Rigby P.: FTTH subscriber growth accelerates says FTTH Council Europe, 2014./ Internets. – [www.lightwaveonline.com/articles/2014/02/ftth-subscriber-growth-accelerates-says-ftth-council-europe.html](http://www.lightwaveonline.com/articles/2014/02/ftth-subscriber-growth-accelerates-says-ftth-council-europe.html)
- [51] Valsts izglītības attīstības aģentūra: Latvijas zinātnieki izstrādā nākamās paaudzes datu pārraides risinājumus. [www.viaa.gov.lv/lat/starpvalstu\\_sadarbiiba/norvegijas\\_finansu\\_instruments/eez\\_projektu\\_pieredze/akademiskie\\_petijumi\\_pieredze/?text\\_id=6451](http://www.viaa.gov.lv/lat/starpvalstu_sadarbiiba/norvegijas_finansu_instruments/eez_projektu_pieredze/akademiskie_petijumi_pieredze/?text_id=6451)
- [52] VAS Latvijas Valsts radio un televīzijas centrs (LVRTC): ERAF projekta «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos» apraksts / Internets. – [www.lvrvc.lv/lat/par\\_mums/projekti/](http://www.lvrvc.lv/lat/par_mums/projekti/)