

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Sergejs OLONKINS
Doktora studiju programmas «Telekomunikācijas» doktorants

**PARAMETRISKO UN KOMBINĒTO PASTIPRINĀTĀJU
PIELIETOJUMA IZPĒTE WDM SAKARU SISTĒMĀS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
V. BOBROVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2015

Olonkins S. Parametrisko un kombinēto
pastiprinātāju pielietojuma izpēte WDM sakaru
sistēmās.

Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU,
2015. – 38 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes
«RTU P-08» 2015. gada 4. jūnija lēmumu,
protokols Nr. 29.



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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 24. septembrī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12

OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Dr. sc. comp.* Modris Greitāns
Elektronikas un datorzinātņu institūts

Profesors *Dr. phys.* Valfrīds Paškevics
Daugavpils Universitāte, Dabaszinātņu un matemātikas fakultāte

Asociētais profesors *Dr. sc. comp.* Edgars Celms
Latvijas Universitāte, Datorikas 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.

Sergejs Olonkins(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, divi pielikumi, 54 zīmējumi un ilustrācijas, kopā 147 lappuses. Literatūras sarakstā ir 130 nosaukumi.

PATEICĪBA

Izsaku pateicību promocijas darba vadītājam profesoram Vjačeslavam Bobrovam, par vērtīgajiem padomiem, ieteikumiem un rādīto motivāciju promocijas darba izstrādes gaitā. Paldies arī profesoriem Ģirtam Ivanovam un Jurgim Poriņam par palīdzību promocijas darba izstrādes sākuma. Īpašo pateicību gribētos izteikt saviem kolēģiem un telpas telpas biedriem Andim Supem, Aleksejam Udaļcovam un Sandim Spolītim un Oskaram Ozoliņam, ar kuriem man bija gods strādāt kopā doktorantūras laikā. Paldies jums par draudzīgo atmosfēru, padomiem un atbalstu, kas viennozīmīgi sekmēja šī darba izstrādi.

No sirds pateicos savai ģimenei: tēvam Valerijam, mātei Irinai un māsai Ekaterinai. Bez jūsu palīdzības, atbalsta un mīlestības man tas nebūtu izdevies.

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

ACKNOWLEDGMENT

I would first like to thank my supervisor Professor Vjačeslavs Bobrovs for supporting, giving valuable advice and encouraging me during these past years in which I have developed my Doctoral Thesis. I also like to thank Professors Ģirts Ivanovs and Jurgis Poriņš who helped me during the start of my studies and researches. Especially I would like to thank my colleagues Andis Supe, Aleksejs Udalcovs, Sandis Spolītis and Oskars Ozoliņš with whom I had the pleasure to work with during my doctoral studies. Thank you for the friendly atmosphere, advices and for your support, that definitely has helped me during development of this thesis.

I would also like to thank my entire family, in particular my father Valerijs, my mother Irina and my sister Ekaterina. I could not have done it without your help, support and love.

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

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

ASE — *Amplified Spontaneous Emission* — pastiprinātā spontānā emisija

AWG — *Arrayed Waveguide Gratings* — viļņvadu masīva režģis

B

BER — *Bir Error Rate* — bitu kļūdu attiecība

C

CC-FWM — *Channel-Channel Four Wave Mixing* — starpkanālu četru viļņu mijiedarbe

CW — *Contineous Wave laser* — nepārtraukta starojuma lāzers

CWDM — *Coarse Wavelength Division Multiplexing* — rupjas viļņgarumdales blīvēšana

D

DCF — *Dispersion Compensating Fiber* — dispersiju kompensējoša šķiedra

DFA — *Doped Fiber Amplifier* — pastiprinātājs, kurš balstās uz leģētas šķiedras izmantošanu

DRA — *Distributer Raman Amplifier* — sadalītais Ramana pastiprinātājs

DWDM — *Dense Wavelength Division Multiplexing* — blīvas viļņgarumdales blīvēšana

E

EDFA — *Erbium Doped Fiber Amplifier* — pastiprinātājs, kas balstīts uz šķiedras izmantošanu, kura ir leģēta ar erbija joniem

EYE — *Eye Diagram Oscilloscope* — acu diagrammu osciloskops

F

FBG — *Fiber Bragg Grating* — šķiedras Brega režģis

FOPA — *Fiber Optical Parametric Amplifier* — uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs

FWHM — *Full Width Half Maximum* — joslas platums pusmaksimuma līmenī

FWM — *Four wave Mixing* — četru viļņu mijiedarbe

H

HDWDM — *High Density Wavelength Division Multiplexing* — augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšana

HNLF — *High Non-Linearity Fiber* — paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

L

LRA — *Lumped Raman Amplifier* — diskrētais Ramana pastiprinātājs

M

MZM — Mach-Zehnder Modulator — Maha-Cendera modulators

N

NF — Noise Figure — ienesto trokšņu rādītājs

NRZ — Non-Return-to-Zero — kods bez atgriešanās pie nulles stāvokļa

O

OOK — On-Off Keying — binārais amplitūdas modulācijas formāts

OSNR — Optical Signal-Noise Ratio — optiskā signāla-trokšņu attiecība

P

PC-FWM — Pump-Channel Four Wave Mixing — pumpējošā starojuma un pastiprināmo kanālu četru viļņu mijiedarbe

PMD — Polarization Mode Dispersion — polarizācijas modu dispersija

PolSK — Polarization Shift Keying — polarizācijas manipulācija

PON — Passive Optical Networks — pasīvais optiskais tīkls

R

RIN — Relative Intensity Noise — relatīvais intensitātes troksnis

RX — Receiver — uztvērējs

S

SBS — Stimulated Brillouin Scattering — stimulētā Briljuēna izkliede

SMF — Single Mode Fiber — vienmodas šķiedra

SOA — Semiconductor Optical Amplifier — pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

SOP — State Of Polarization — polarizācija stāvoklis

SRS — Stimulated Raman Scattering — stimulētā Ramana izkliede

T

TDM — Time Division Multiplexing — laukdales blīvēšana

TX — Transmitter — raidītājs

W

WDM — Wavelength Division Multiplexing — viļņgarumdales blīvēšana

X

XGM — Cross Gain modulation — pastiprinājuma šķērsmodulācija

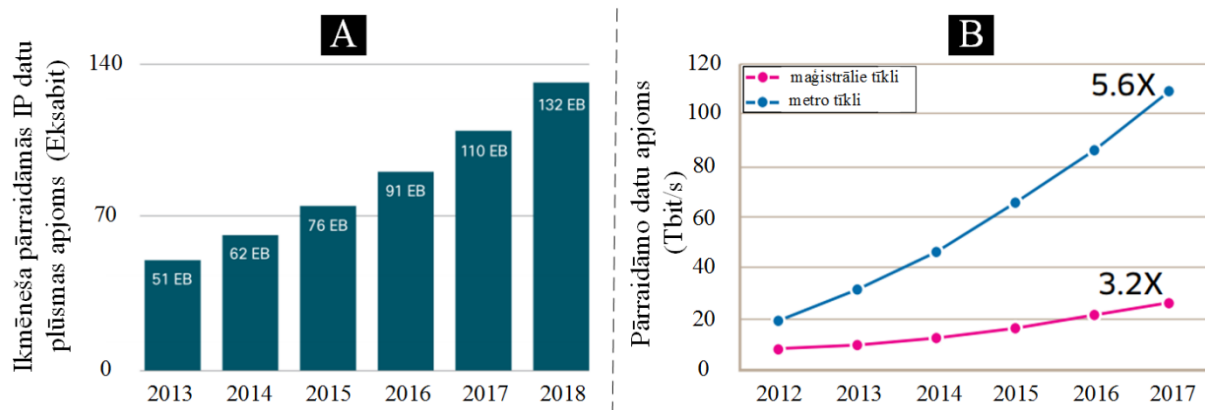
Z

ZDWL — Zero Dispersion Wavelength — nulles dispersijas viļņa garums

Tēmas aktualitāte

Pēdējo divu dekažu laikā pasaulē tika novērots straujš pārraidāmās informācijas apjoma palielinājums. Šāda tendence ir skaidrojama ar interneta un citu pakalpojumu lietotāju skaita strauju pieaugumu, kā arī ar šo pakalpojumu augošo pieejamību. Šāds straujš globālās informācijas pārraides pieaugums ir skaidrojams arī ar piedāvātā pakalpojumu klāsta paplašināšanos ar tādiem resursu ietilpīgiem pakalpojumiem kā augstas izšķirtspējas video pārraide, videokonferences un mākoņdatošana, kā arī ar šo pakalpojumu popularitātes arvien lielāku pieaugumu [1–5].

Saskaņā ar *Cisco* veiktajiem pētījumiem tiek prognozēts, ka pasaules kopējais pārraidāmās *IP* informācijas apjoms 2016. gadā sasniegs 1,1 zetabaitu, bet 2018. gadā — 1,6 zetabaitus. Plānotais ikmēneša pārraidāmais *IP* datu pieaugums laika periodā no 2013. līdz 2018. gadam ir parādīts att. 1.a. Salīdzinot ar 2012. gadu, 2013. gadā stundās ar vislielāko noslodzi pārraidāmais datu apjoms internetā palielinājās par 32 %, bet dienas vidējais internetā pārraidāmo datu apjoms — par 25 %. Ja šāda tendence saglabāsies arī turpmāk, tad 2018. gadā stundās ar vislielāko noslodzi internetā pārraidāmās informācijas plūsmas apjoms sasniegs 1 petabitu sekundē, bet dienas vidējā vērtība sasniegs 311 terabitus sekundē [6, 7]. Savukārt saskaņā ar *Bell Labs* veikto prognozi, kuras rezultāti ir parādīti att. 1.b, laika periodā no 2012. līdz 2017. gadam maģistrālajos tīklos pārraidāmās informācijas apjoma palielinājums sasniegs 320 %, bet metro tīklos — 560 % [8].



Att. 1. *Cisco* prognozējamais ikmēneša pārraidāmo *IP* datu apjoms (A), un *Bell Labs* prognozējamais pārraidāmo datu apjoms maģistrālajos un metro tīklos (B) [6, 8].

Šī visu laiku augošā pieprasījuma apmierināšanai pasaulē arvien vairāk tiek pētītas un lietotas šķiedru optikas pārraides sistēmas [9, 10]. No optiskās pārraides sistēmām šobrīd visaktuālākās ir sistēmas ar viļņgarumdales blīvēšanu (no ang. val. *wavelength division multiplexing* — *WDM*), jo šī tehnoloģija ļauj efektīvāk izmantot pieejamos optisko šķiedru resursus nekā alternatīvas tehnoloģijas [11–14].

WDM sistēmu caurlaides spējas paaugstināšana ir iespējama, palielinot datu pārraides ātrumu kanālos vai kanālu skaitu. Viļņa garuma josla, kas tiek izmantota optiskā signāla pārraidē, ir ierobežota optisko šķiedru ienestā vājinājuma viļņa garuma atkarības dēļ [15, 16]. Mūsdienās vienmodas optisko šķiedru minimālais vājinājums ir ~0,2 dB uz kilometru, un tas ir novērojams «C» viļņa garuma diapazonā, kas atbilst viļņa garumiem no 1530 līdz 1565 nm. Neskatoties uz to, ka vājinājuma vērtība ir tik zema, tā ietekme uzkrājas ar katru nākamo kilometru. Garajās pārraides līnijās, kuru garums ir vairāki simti un pat tūkstoši kilometru, vājinājums ievērojami degradē uztvertā signāla kvalitāti, jo fotodetektoru jutība ir ierobežota [17–19]. Pieaugot kanālu skaitam, palielinās arī optiskā signāla sadalīšanas ienestais vājinājums, it sevišķi jaudas sadalītāju lietošanas gadījumā [20]. Savukārt palielinot datu pārraides ātrumu, ir jārēķinās ar nepieciešamību samazināt pārraides iekārtu (gaismas avotu,

modulatoru, pastiprinātāju, uztvērēju u. c.) ienestos trokšņus, jo lielāka pārraides ātruma signāliem ir mazāka traucējumnoturība.

Līdz ar to ir nepieciešami risinājumi arvien lielāka uzkrātā signāla vājinājuma kompensēšanai arvien platākā viļņa garumu diapazonā. Šobrīd optiskā signāla vājinājuma kompensēšanai pasaulē visplašāk tiek lietoti tieši ar erbiju leģētās optiskās šķiedras pastiprinātāji (*EDFA*), kuru pastiprinājuma spektra platums ir ierobežots (tradicionāliem *EDFA* risinājumiem tas sasniedz vien 35 nm), kas ierobežo esošās sistēmās pārraidei izmantoto viļņa garuma diapazonu [21–23]. Tādēļ ir nepieciešams meklēt jaunus optisko signālu pastiprināšanas risinājumus un iespējas paplašināt pastiprināmo viļņu garumu diapazonu un paaugstināt sasniedzamo pastiprinājuma līmeni jau esošajiem optisko signālu pastiprināšanas risinājumiem. Tas var tikt sasniegts, savienojot dažādu tipu pastiprinātājus. Šādā veidā ir iespējams apvienot to pozitīvās īpašības un daļēji kompensēt trūkumus.

Nepieciešamība pēc optisko tīklu informācijas pārraides kapacitātes palielināšanas un optisko pārraides sistēmu ekspluatācijas izmaksu samazināšanas pēdējo gadu laikā ir radījusi paaugstinātu interesi par signālu apstrādi optiskajā apgabalā [24–27]. Atšķirībā no risinājuma ar optiskā-elektriskā-optiskā (O/E/O) signāla pārveidi, kas ienes noteiktu aizturi, signāla apstrāde optiskajā apgabalā tiek veikta reālā laikā, signālam izplatoties caur nelineāru vidi [28]. Līdz ar to optiskās signālu apstrādes metodes ļauj izvairīties no pārraides ātruma ierobežojumiem, kas rodas no signālu O/E/O pārveides.

Progress nelineāro materiālu izpētē sekmējis optisko šķiedru un citu komponentu izgatavošanu ar lielāku nelinearitātes koeficientu. Līdz ar to nepieciešamā optiskā jauda nelineāro efektu ierosināšanai kļūst arvien zemāka [26]. Tieši nelineāro efektu izpausme ir mehānisms, kas tiek izmantots signāla apstrādei optiskajā apgabalā. Optiskie pastiprinātāji praktiski ir vienīgās iekārtas, kas spēj palielināt pārraidāmā signāla jaudu pietiekami augstu, lai ierosinātu nelineāro efektu izpausmi pārraides laikā. Šā iemesla dēļ optisko pastiprinātāju lietošana signālu apstrādei optiskajā apgabalā tiek plaši pētīta, un tiek demonstrēta pastiprinātāju lietošana visdažādāko signālu apstrādes mērķu sasniegšanai [24–27, 29–31].

Darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot augstāk minētos faktus, tika izvirzīts promocijas **darba mērķis**: novērtēt optisko signālu kombinēto pastiprināšanas risinājumu lietošanas iespējas *SOA* un *EDFA* optisko pastiprinātāju darbības uzlabošanā *WDM* sakaru sistēmās, kā arī izpētīt parametrisko pastiprinātāju iespējamo lietošanu optisko signālu apstrādē.

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

1. novērtēt optisko signālu kombinēto pastiprināšanas risinājumu lietošanas iespējas *EDFA* un *SOA* pastiprinātāju trūkumu kompensēšanai;
2. veikt *EDFA* radītā pastiprinājuma spektra izlīdzināšanu un optiskās signāls-troksnis attiecības palielināšanu pastiprinātāja izejā, izveidojot *Ramana-EDFA* optisko signālu kombinēto pastiprināšanas risinājumu;
3. veikt *SOA* radīto trokšņu daudzuma samazināšanu un sasniedzamā pārraides attāluma palielināšanu, izveidojot *Ramana-SOA* optisko signālu kombinēto pastiprināšanas risinājumu;
4. izpētīt un novērtēt parametrisko pastiprinātāju ar vienu un ar diviem pumpējošajiem starojumiem lietošanas iespēju optisko signālu apstrādē;
5. izmantojot parametrisko pastiprinātāju, izstrādāt daudzkanālu avotu ar vienmērīgu jaudas un starpkanālu intervālu sadalījumu;
6. novērtēt optiskā signāla modulācijas formāta pārveidi no *2-POLSK* uz *NRZ-OOK*, izmantojot parametrisko pastiprinātāju ar vienu lineāri polarizēto pumpējošo starojumu;
7. izmantojot parametrisko pastiprinātāju ar vienu lineāri polarizētu pumpējošo starojumu, veikt optiskā signāla izdalīšanu no signālu plūsmas, kas ir blīvēta pēc polarizācijas stāvokļa.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā problēmu analīze un izvirzīto uzdevumu īstenošana tika veikta, izmantojot matemātiskos aprēķinus un skaitliskās simulācijas, kā arī veicot eksperimentālos mērījumus. Skaitlisko simulāciju rezultāti tika iegūti, izmantojot nelineāro Šrēdingera vienādojumu, kā arī tiešo un inverso diskrēto ātro Furjē transformāciju. Īstenotajās simulācijās nelineārā Šrēdingera vienādojuma aprēķini tika veikti, izmantojot laika apgabala sadale solis metodi. Bitu kļūdu attiecības novērtēšanai tika izmantota Monte Karlo metode. Optisko pastiprinātāju konfigurēšanai un parametru novērtēšanai tika iegūtas un izmantotas optiskās jaudas vērtības, jaudas spektrālie blīvumi un uztverto signālu acu diagrammas, kā arī bitu kļūdu attiecības vērtības. *WDM* sakaru sistēmu kvalitātes novērtēšanai tika izmantota visaugstākā bitu kļūdas attiecība starp visiem kanāliem jeb sistēmas sliktākais kanāls. Skaitlisko simulāciju rezultātu precizitātes pārbaudei laboratorijas apstākļos tika izveidots eksperimentāls modelis ar diviem *EDFA* pastiprinātājiem, kas tika atkārtots simulācijas vidē. Tika veikts iegūto spektru, jaudas un acu diagrammu salīdzinājums.

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Parametriskais pastiprinātājs ar diviem pumpējošajiem starojumiem, cik zināms autoram, pirmo reizi tika izmantots daudzkanālu avota izveidošanai *WDM* sakaru sistēmās, lai dubultotu kanālu skaitu (piedāvātajā risinājumā no 16 uz 32) ar vienmērīgu starpkanālu intervālu un jaudas līmeņu starpību starp kanāliem mazāku par 2 dB.
2. Pirmo reizi parametriskais pastiprinātājs ar vienu lineāri polarizētu pumpējošo starojumu tika izmantots ortogonāli polarizētas gaismas izdalīšanai, kas var tikt lietota *2PolSK* signāla pārveidošanai uz *NRZ-OOK* modulācijas formātu, kā arī signāla izdalīšanai no optiskās plūsmas, kas ir blīvēta pēc polarizācijas stāvokļa.

Promocijas darba izstrādes laikā iegūtie galvenie secinājumi

1. *Ramana-EDFA* kombinētā risinājuma izveidošana ļāva ne tikai izlīdzināt pastiprinājuma spektru, bet arī palielināt *OSNR* visos kanālos par 1,7–2,6 dB. Izmantojot *Ramana* sadalīto pastiprinātāju kaskādē kā priekšpastiprinātāju, tika panākts, ka *EDFA* strādā tuvāk piesātinājuma punktam, un līdz ar to *EDFA* ienesto trokšņu rādītājs samazinājās par 0,3–0,4 dB. *OSNR* palielinājums ir saistīts arī ar to, ka *Ramana* izkliedes koherentā rakstura dēļ *DRA* pastiprināja signālu efektīvāk nekā troksni, kas ļāva iegūt negatīvas ienesto trokšņu rādītāja vērtības (no –0,4 līdz –0,6 dB).
2. *Ramana-SOA* kombinētā risinājuma izveidošana ļāva izmantot tādu *SOA* pumpējošās strāvas vērtību, pie kuras *SOA* rada vismazāk pastiprināmā signāla kropļojumus. Rezultātā, izmantojot *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu, izdevās iegūt aptuveni tādu pašu *BER* līmeni kā *SOA* gadījumā pie 1,5 reizes vājāka signāla, un sasniedzamais pārraides attālums palielinājās par 12 km jeb 11 %.
3. Mainot *FOPA* pumpējošā starojuma jaudu, mainās arī fāžu nesaskaņotības nelineārā daļa. Līdz ar to paralēli pumpējošā starojuma jaudas izmaiņām ir jākorrigē arī tā viļņa garums.
4. *FOPA* pumpējošā starojuma fāzes modulēšana, kas tika lietota *SBS* sliekšņa paaugstināšanai, izraisīja tukšgaitas komponentu spektrālo paplašināšanos par 54 %. Tādēļ sistēmās ar viļņa garuma pārveidi pumpējošā starojuma fāzes modulācijai lietoto frekvenču toņi ir jāizvēlas tā, lai šī tukšgaitas komponentu spektrālā paplašināšanās būtu pēc iespējas mazāka.
5. Manipulējot ar *FOPA* pumpējošo starojumu parametriem, ir iespējams panākt nesējsignālu skaita palielināšanos no 16 līdz 32, nodrošinot 100 GHz starpkanālu intervālu un 1,9 dB jaudas līmeņu atšķirību starp visiem kanāliem. Tika konstatēts, ka pie 0 dBm nesējsignāla jaudas līmeņa *FOPA* ieejā *CC-FWM* procesi izraisīs ievērojamu starpkanālu šķērsrunu. Šā iemesla dēļ, izmantojot parametrisko procesu rezultātā iegūtās tukšgaitas komponentes, kanālu skaita dubultošanai ir nepieciešams kontrolēt nesējsignālu jaudu pastiprinātāja ieejā.

6. Tika konstatēts, ka, pat pielietojot polarizācijas stāvokli saglabājošas *HNLF* šķiedras, *SPM* un *XPM* iespaidā ir novērojama signāla un *FOPA* pumpējošā starojuma *SOP* savstarpējā izvietojuma izmaiņa, tiem izplatoties *HNLF*. Šīs izmaiņas rezultātā signāls, kura *SOP* bija ortogonāls pumpējošā starojuma *SOP* *HNLF* šķiedras ieejā, šķiedras izejā bija pastiprināts par 1,5–1,6 dB.
7. Vienkanāla sistēmā ar *2PolSK* signāla pārveidi uz *NRZ-OOK* modulācijas formātu tika konstatēts, ka starp *NRZ-OOK* signālu no standarta vienkanāla sistēmas un pārveidoto signālu pastāv 0,4 dB jaudas sods. Bet ierosinātās tukšgaitas komponentes gadījumā šis jaudas sods bija par 0,2 dB mazāks. Šādi rezultāti ir skaidrojami ar to, ka *FWM* procesā ierosinātā tukšgaitas komponente nesatur sākotnējā *2PolSK* signāla loģiskās «0» komponentes starojumu, kas pārveidotajā *NRZ* signālā ir interpretējams kā troksnis.
8. Daudzkanālu sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi starp tukšgaitas komponentēm tika novērota izteiktāka *CC-FWM* procesu izpausme nekā starp kanāliem pie sākotnējām frekvencēm. Tas ir izskaidrojams ar to, ka *BER* vērtību zem 10^{-12} sliekšņa iegūšanai visos 8 kanālos tukšgaitas komponentu frekvenču joslā bija nepieciešama par 35 mW lielāka pumpējošā starojuma jauda nekā signāliem sākotnējā frekvenču joslā. Šis pastiprinājuma atšķirības rezultātā tika novērota izteiktāka *CC-FWM* procesu izpausme, kas arī radīja papildu starpkanālu šķērsrunu. Papildus tam *CC-FWM* radītā šķērsruna tika pārnesta ne tikai no spektrālām komponentēm signāla frekvenču joslā, bet tika ģenerēta arī starp tukšgaitas komponentēm.
9. Atšķirībā no sistēmas ar modulācijas formāta pārveidošanu sistēmā ar signāla izdalīšanu no divu pēc polarizācijas blīvēto signālu plūsmas tiek novērota situācija, kad pie vienas frekvences ir iespējams, ka ortogonāli polarizēto komponentu loģiskais «1» tiek novērots abos kanālos vienlaikus. Līdz ar to ortogonāli polarizētā starojuma ietekme uz izdalītā signāla kvalitāti bija par 0,4 dB (tukšgaitas komponentu gadījumā par 0,3 dB) lielāka nekā sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi.

Darba **praktiskā vērtība**

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti divu starptautisko (ESF un ERAF), viena Latvijas un viena RTU zinātniskās pētniecības projekta realizācijai.
2. Saistībā ar sadarbības līgumu aktualitāte par optisko signālu pastiprināšanas efektivitātes paaugstināšanu šķiedru optikas pārraides sistēmās tika ietverta VAS «Latvijas Valsts radio un televīzijas centrs» sagatavotajā «Maģistrālo tīklu tehnoloģiju un to projektēšanas pamattendenču novērtējumā» (ERAF fonda projekts Nr.3DP/3.2.2.3.0/12/IPIA/SM/001 «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos»).
3. Sagatavots Latvijas patenta pieteikums par daudzkanālu gaismas avota izveidi viļņgarumdales blīvētā šķiedru optiskā piekļuves sakaru sistēmā. Patenta pieteikuma numurs: P-15-45.

Darbā izvirzītās **aizstāvamās tēzes**

1. Kombinēto optisko signālu pastiprināšanas risinājumu veidošana paaugstina optiskā signāla — trokšņu attiecību *WDM* sakaru sistēmās līdz 3 dB kanālā, kas ļauj palielināt pārraides attālumu un samazina bitu-klūdu attiecību.
2. Izmantojot parametriskā pastiprinātāja tukšgaitas komponentu ģenerēšanas īpašību, var 2 reizes palielināt kanālu skaitu raidītāju blokā *WDM* sakaru sistēmās.
3. Signāla pārveidošanu no polarizācijas bināras manipulācijas uz *NRZ-OOK* modulācijas formātu var panākt, izmantojot parametrisko pastiprinātāju ar lineāri polarizētu pumpējošo starojumu.
4. Pielietojot parametrisko pastiprinātāju ar lineāri polarizētu pumpējošo starojumu, ir iespējams veikt optiskā signāla izdalīšanu sakaru sistēmās ar polarizācijas blīvēšanu.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti **10** starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti **4** publikācijās zinātniskajos žurnālos, **6** publikācijās pilna teksta konferenču rakstu krājumos, **3** rakstos konferenču tēžu krājumos un **vienā** Latvijas patenta pieteikumā.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. **Olonkins S.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. «Comparison of Semiconductor Optical Amplifier and Discrete Raman Amplifier Performance in DWDM Systems» // Electronics and Electrical Engineering, Lietuvā, Palangā, 2012. gada 18.–20. jūnijs.
2. **Olonkins S.**, Bobrovs V., Poriņš J. «Comparison of Co and Counter-propagating Raman Amplification in Nonlinearity Sensitive DWDM Transmission Systems» // Developments in Optics and Communications 2012, Latvijā, Rīgā, 2012. gada 12.–14. aprīlis.
3. **Olonkins S.**, Bobrovs V., Ozoliņš O., Poriņš J., Lauks G. «Hybrid Optical Amplifiers for Flexible Development in Long Reach Optical Access Systems» // IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT 2012), Krievijā, Sanktpēterburgā, 2012. gada 3.–5. oktobris.
4. **Olonkins S.**, Bobrovs V. «Implementation of FOPA with Pimp Phase Modulation for an 8 Channel DWDM Transmission System» // Developments in Optics and Communications 2013, Latvijā, Rīgā, 2013. gada 10. aprīlis.
5. **Olonkins S.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. «Investigation of Fiber Optical Parametric Amplifier Performance in DWDM Transmission Systems» // Electronics and Electrical Engineering, Lietuvā, Palangā, 2013. gada 19. jūnijs.
6. **Olonkins S.**, Ozoliņš O., Bobrovs V., Poriņš J., Ivanovs Ģ. «Binary PolSK to OOK Modulation Format conversion in Single-Pump FOPA for Optical Access Networks» // Fiber Optics in Access Networks 2013, Kazahstāna, Almati, 2013. gada 11. septembris.
7. **Olonkins S.**, Supe A., Ļašuks I., Poriņš J. «Demonstration of Binary PolSK to OOK Modulation Format Conversion Using a Single-Pump Fiber Optical Parametric Amplifier» // International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing 2014, Lielbritānijā, Mančestrā, 2014. gada 25. jūlijs.
8. **Olonkins S.**, Ļašuks I., Poriņš J. «Demonstration of Polarization Multiplexed Signals Division Using a Fiber Optical Parametric Amplifier» // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2014), Ķīnā, Guangzhou, 2014. gada 25.–28. augusts.
9. **Olonkins S.**, Spolītis S., Ļašuks I., Bobrovs V. «Cost Effective WDM-AON with Multicarrier Source Based on Dual-Pump FOPA» // International Congress on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT 2014), Krievijā, Sanktpēterburgā, 2014. gada 6.–8. oktobris.
10. **Olonkins S.**, Bobrovs V. «Implementation of Fiber Optical Parametric Amplifier for Distinguishing of Polarization Multiplexed Signals in Optical Transmission Systems» // Advanced Optical Materials and Devices (AOMD8), Latvijā, Rīgā, 2014. gada 25.–27. augusts.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. **Olonkins S.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. «Comparison of Semiconductor Optical Amplifier and Discrete Raman Amplifier Performance in DWDM Systems» // Electronics and Electrical Engineering, 2012, Vol. 123, Iss.7, 133–136 lpp., ISSN 1392-1215.
2. Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Olonkins S.**, et.al. «Application of the Erbium-Doped Fiber Amplifier in Wavelength Division Multiplexing (WDM) Transmission Systems» // International Journal of Physical Sciences (IJPS), Vol. 9 Iss. 5, 91.–101. lpp., ISSN 1992–1950.

3. Bobrovs V., Olonkins S., Ivanovs Ģ., Poriņš J. «**Comparitive Performance of Raman-SOA Hybrid Optical Amplifiers in DWDM Transmission Systems**» // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2012, No.6, 41.–54. lpp., ISSN 0868–8257.
4. Olonkins S., Bobrovs V., Ivanovs G. «**Investigation of Fiber Optical Parametric Amplifier Performance in DWDM Transmission Systems**» // Electronics and Electrical Engineering, 2014, Vol. 20 Iss. 1, 88.–91. lpp., ISSN 1392-1215.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. Olonkins S., Bobrovs V., Ozoliņš O., Poriņš J., Lauks G. «**Hybrid Optical Amplifiers for Flexible Development in Long Reach Optical Access Systems**» // IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT 2012), (ISBN: 978-1-4673-2017-7), 2012. gada oktobris, 605.–610. lpp.
2. Olonkins S., Ozoliņš O., Bobrovs V., et. al. «**Binary PolSK to OOK Modulation Format Conversion in Single-Pump FOPA for Optical Access Networks**» // 4th International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN 2013), (ISBN: 978-1-4799-1502-6), 2013. gada septembris, 15.–20. lpp.
3. Olonkins S., Ļašuks I., Poriņš J. «**Demonstration of Polarization Multiplexed Signals Division Using a Fiber Optical Parametric Amplifier**» // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2014), 2014. gada augusts, 1669.–1673. lpp., (ISBN 978-1-934142-28-8).
4. Olonkins S., Spolitis S., Ļašuks I., Bobrovs V. «**Cost Effective WDM-AON with Multicarrier Source Based on Dual-Pump FOPA**» // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2014), 2014. gada oktobris, 23.–28. lpp.
5. Olonkins S., Supe A., Ļašuks I., Poriņš J. «**Demonstration of Binary PolSK to OOK Modulation Format Conversion Using a Single-Pump Fiber Optical Parametric Amplifier**» // 9th International Symposium on Communications, Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2014), 2014. gada jūlijs, 955.–959. lpp.
6. Spolitis S., Olonkins S., Poriņš J. «**Realization of Dense Bidirectional Spectrum Sliced WDM-PON Access System**» // 9th International Symposium on Communications, Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2014), 2014. gada jūlijs, 552.–557. lpp.

Raksti konferenču tēžu krājumos

1. Olonkins S., Ivanovs Ģ. «**Comparison of Co and Counter-propagating Raman Amplification in Nonlinearity Sensitive DWDM Transmission Systems**» // Developments in Optical Communications 2012, (ISBN 978-9984-49-518-7), 2012. gada aprīlis, 82.–83. lpp.
2. Olonkins S., Bobrovs V. «**Implementation of FOPA with Pump Phase modulation for an 8 Channel DWDM Transmission System**» // Developments in Optics and Communications 2013, (ISBN: 978-9984-49-518-7), 2013. gada aprīlis, 34.–35. lpp.
3. Olonkins S., Bobrovs V. «**Implementation of Fiber Optical Parametric Amplifier for Distinguishing of Polarization Multiplexed Signals in Optical Transmission Systems**» // Advanced Optical Materials and Devices 2014, (ISBN 978-9934-51-758-7), 2014. gada augusts, 27.–28. lpp.

Latvijas patents

Sagatavots Latvijas patenta pieteikums «Viļņgarumdales blīvētā šķiedru optiskā piekļuves sakaru sistēma ar daudzkanālu gaismas avotu».

Promocijas darba rezultāti izmantoti 2 starptautisko (ESF un ERAF) un divu Latvijas mēroga zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.

Starptautiskie zinātniskās pētniecības projekti

1. ERAF projekts «Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde» (aktivitāte «Atbalsts zinātnei un pētniecībai»), Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/002.
2. ESF projekts «Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai», Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016.

Latvijas zinātniskās pētniecības projekti

1. «Aktīva kombinēta viļņgarumdales blīvēta šķiedru optikas pārraides sistēma», RTU, Nr. ZP-2014/19.
2. «Tehnoloģijas drošai un uzticamai gudrajai pilsētai», VPP, Nr.10-4/VPP-4/11.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 147 lappuses. Darbā ir ievads, četras nodaļas, literatūras saraksts un pielikumi. Ievadā tika pamatota veikto pētījumu aktualitāte un noteikti promocijas darba pētījumu virzieni.

Darba pirmajā nodaļā tika aprakstīti *EDFA*, *SOA*, *Ramana* un *Briljuēna* optisko pastiprinātāju darbības principi, tika noteikti un salīdzināti šo pastiprinātāju tipu raksturlielumi, kā arī formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvamās tēzes, apkopoti galvenie rezultāti un definēti turpmākie pētījumu virzieni.

Darba otrajā nodaļā tika apskatītas *EDFA*, *SOA* un *Ramana* pastiprinātāju lietošanas iespējas optisko signālu kombinēto pastiprināšanas risinājumu veidošanā. Pēc tam tika izveidoti pārraides sistēmu simulācijas modeļi *OptSim* programmatūrā ar *Ramana-EDFA* un *Ramana-SOA* kombinētajiem pastiprināšanas risinājumiem. *Ramana-EDFA* kombinētais risinājums tika izveidots *EDFA* pastiprinājuma spektra izlīdzināšanai un *OSNR* palielināšanai pastiprinātāja izejā. Savukārt *Ramana-SOA* kombinētais risinājums — *SOA* radīto signāla kropļojumu daudzuma samazināšanai un pārraides attāluma palielināšanai.

Darba trešajā nodaļā tika veikta parametrisko pastiprinātāju ar vienu un ar diviem pumpējošajiem starojumiem darbības analīze un definēti faktori, kas iespaido to darbību. Tika izveidots daudzkanālu *WDM* sakaru sistēmas modelis, kurā signāls tika pastiprināts, izmantojot *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu, un tika novērtēta šā pastiprinātāja veiktspēja. Tika izstrādāts daudzkanālu avota modelis, kas ir balstīts uz *FOPA* ar 2 pumpējošajiem starojumiem un par kuru ir iesniegts Latvijas patenta pieteikums. Šāds parametrisko pastiprinātāju tukšgaitas komponentu ģenerēšanas īpašības pielietojums tika pētīts pirmo reizi.

Ceturtajā nodaļā ir izpētīta parametrisko pastiprinātāju radītā pastiprinājuma polarizācijas atkarība un tās lietošanas iespējas optisko signālu apstrādē. Tika izstrādāti simulācijas modeļi vienkanāla un multikanālu sistēmām, kur *FOPA* ar vienu lineāri polarizēto pumpējošo starojumu tika izmantots signāla ar bināro polarizācijas manipulāciju pārveidošanai uz *NRZ-OOK* modulācijas formātu, un veikts šo sistēmu darbības novērtējums. Ir izpētīta un novērtēta arī *FOPA* pastiprinātāja ar vienu lineāri polarizētu pumpējošo starojumu izmantošana optiskā signāla izdalīšanai no divu pēc polarizācijas blīvētu signālu plūsmas. Cik zināms autoram, abi šajā nodaļā aprakstītie *FOPA* potenciālie pielietojumi tika pētīti un aprakstīti pirmo reizi.

Nobeigumā ir apkopoti un pamatoti darba galvenie secinājumi. Pielikumos ir pievienoti konferences, publikāciju un projektu saraksti.

DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Optisko signālu pastiprināšana galvenokārt ir balstīta uz enerģijas pāreju no pumpējošā optiskā starojuma vai no cita enerģijas veida uz pastiprināmo optisko starojumu. Dažādu veidu optiskajos pastiprinātājos šis process tiek īstenots atšķirīgi. Galvenokārt tas notiek, izmantojot stimulētās emisijas parādību, pastiprinājuma vidē, kā, piemēram, pusvadītāju optiskajos pastiprinātājos vai leģēto šķiedru optiskajos pastiprinātājos. Optisko signālu pastiprināšanai tiek izmantoti arī Ramana, Briljuēna un četru viļņu mijiedarbes nelineārie optiskie efekti, kas tiek ierosināti attiecīgi Ramana, Briljuēna un parametriskajos optiskajos pastiprinātājos [32].

Optisko signālu pastiprināšanas mehānisms balstās uz stimulētās gaismas emisijas izpausmi pastiprinājuma vidē. Gaismas emisijas parādību var izskaidrot, izmantojot Rezerforda-Bora atomisko modeli. Bors nodefinēja, ka elektroni var pārlekt no viena enerģijas stāvokļa uz citu, veicot tā saucamo kvantu lēcienus, kas savukārt norāda uz orbītas izmaiņu. Šādai orbītas izmaiņai ir nepieciešama enerģijas līmeņa izmaiņa. Ja elektrons pārlec no augstāka enerģijas līmeņa uz zemāku, tiek izstarots fotons. Fotons satur enerģiju, kas atbilst sākotnējā augstākā enerģijas līmeņa un zemākā ieņemtā līmeņa enerģijas starpībai, jo kopējai šā procesa enerģijai jāpaliek nemainīgai. Tas izriet no enerģijas nezūdamības likuma [33]. Tātad fotona enerģiju var noteikt pēc šādas izteiksmes [34]:

$$E_{fotona} = E_2 - E_1 = h\nu_{fotona}, \quad (1.1.)$$

kur E_{fotona} — radītā fotona enerģija,

E_1 un E_2 — augstākā un zemākā enerģētiskā līmeņa enerģija,

h — Planka konstante,

ν_{fotona} — radītā fotona frekvence.

Optiskie pastiprinātāji tiek klasificēti pēc pastiprināšanas procesa rakstura [34]:

- 1) pastiprinātāji, kur pastiprinājums tiek iegūts, izmantojot materiāla lineārās īpašības (pusvadītāju optiskie pastiprinātāji (*SOA*), un pastiprinātāji uz retzemju elementiem leģētu šķiedru bāzes (*xDFA*));
- 2) pastiprinātāji, kuru darbības princips ir balstīts uz materiāla nelineārajām īpašībām (Ramana optiskie pastiprinātāji, Briljuēna optiskie pastiprinātāji un šķiedru optiskie parametriskie pastiprinātāji).

Otrs princips, pēc kura tiek klasificēti optiskie pastiprinātāji, ir pastiprinājuma vide:

- 1) pastiprinātāji, kuros tiek izmantots pusvadītāju materiāls (*SOA*);
- 2) pastiprinātāji, kas ir izveidoti uz optisko šķiedru bāzes.

Vissvarīgākie optiskos pastiprinātājus raksturojošie parametri ir pastiprinājuma lielums, pastiprinājuma joslas platums, pastiprinājuma piesātinājuma jauda, polarizācijas jutība un pastiprinātāja radītie trokšņi.

Radītais pastiprinājums optiskajiem pastiprinātājiem tiek noteikts kā izejas signāla jaudas attiecība pret tā paša signāla jaudu pastiprinātāja ieejā. Pastiprinātāji dažreiz tiek raksturoti arī ar pastiprinājuma efektivitāti, kas apzīmē pastiprinājumu kā funkciju no pumpējošā starojuma jaudas. Šā lieluma mērvienība ir dB/mW [35].

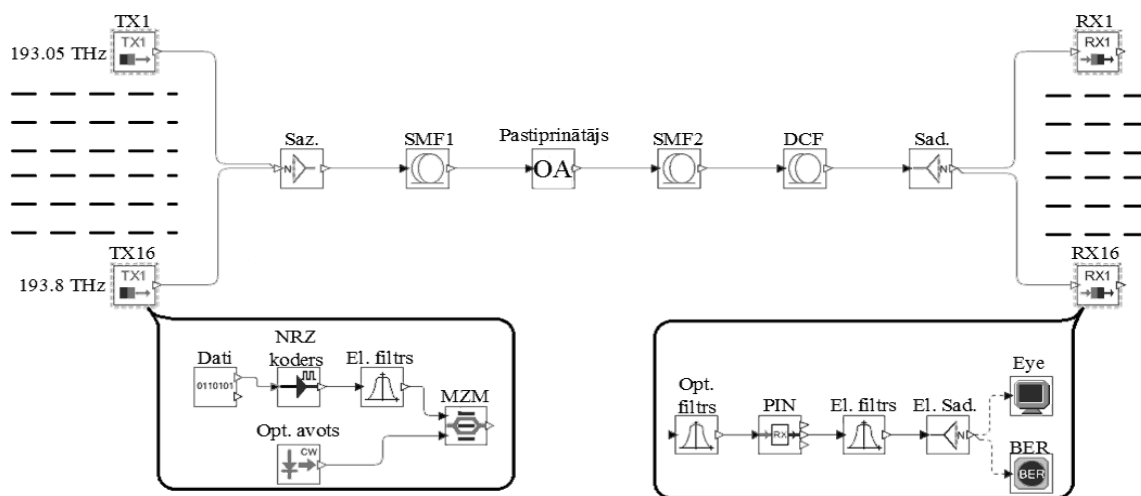
Pastiprinātāja radītā pastiprinājuma joslas platums ir attiecināms uz viļņa garumu vai frekvenču diapazonu, kurā pastiprinātāja darbība ir efektīva, proti, kur tas spēj nodrošināt pārraidāmā signāla jaudas pieaugumu. Šis lielums ir sevišķi būtisks *WDM* sakaru sistēmās, jo tas ierobežo pārraides sistēmas kanālu skaitu, kas tiks pastiprināti [34].

Pastiprinājuma piesātinājuma punkts optiskajam pastiprinātājam ir sasniedzamās izejas jaudas vērtības maksimums, proti, kad optiskā signāla jauda pastiprinātāja izejā vairs

nepalielinās, palielinoties signāla jaudai pastiprinātāja ieejā. Kad ieejas jauda tiek palielināta virs piesātinājuma vērtības, visi nesēji pastiprinājuma vidē jau ir piesātinājuma stāvoklī, un vēl lielāka gaismas enerģijas pārnese nav iespējama. Piesātinājuma jauda ir definēta kā izejas jauda, pie kuras ir 3 dB samazinājums signāla pastiprinājumā, salīdzinot ar maksimālo iespējamo pastiprinājumu [34].

Optisko signālu pastiprinātajos dominējošais trokšņu avots ir pastiprinātā spontānā emisija (no angļu val. *amplified spontaneous emission* — *ASE*), kas parādās pastiprinājuma vidē [36]. Pastiprinātāju radīto trokšņu daudzums ir atkarīgs no dažādiem faktoriem. Visbūtiskākie no tiem ir pastiprinājuma vides materiāla parametri (piemēram, enerģētiskā līmeņa spontānais dzīves laiks), pastiprinājuma spektrs, trokšņu joslas platums, pastiprinātāja piesātinājuma un populācijas inversijas parametri. Pastiprinātāja radīto trokšņu problēma visvairāk izpaužas sistēmās, kur daudzi pastiprinātāji ir saslēgti kaskādē, piemēram, maģistrālajās optiskajās līnijās. Katrs pastiprinātājs šajā kaskādē pastiprina ne tikai pārraidāmo signālu, bet arī iepriekšējā pastiprinātāja radītos trokšņus, klāt vēl pievienojot savu *ASE* trokšņu daļu [34]. Pastiprinātāja radīto *ASE* trokšņu daudzuma novērtēšanai parasti tiek izmantots ienesto trokšņu radītājs (no ang. val. *noise figure* — *NF*). Šis lielums raksturo optiskā signāla-trokšņu attiecības (no ang. val. *optical signal-to-noise ratio* — *OSNR*) izmaiņu, signālam izejot caur pastiprinātāju [34, 37].

Autora veiktajos pētījumos, izmantojot simulācijas programmatūru *OptSim 5.2*, tika novērtēta *SOA*, *EDFA*, diskrētā Ramana pastiprinātāja (no ang. val. *lumped Raman amplifier* — *LRA*) un sadalītā Ramana pastiprinātāja (no ang. val. *distributed Raman amplifier* — *DRA*) veikspēja vienādos ekspluatācijas apstākļos. Izveidotā simulācijas shēma ir dota att. 2. Šāds *WDM* pārraides sistēmas modelis tiks lietots arī turpmāk darbā, kad tiks analizēta kāda pastiprinātāja darbība.



Att. 2. 16 kanālu 10 Gbit/s *DWDM* sakaru sistēmas modelis, kas tika izmantots optisko pastiprinātāju veikspējas salīdzināšanai.

Pastiprinātāju veikspēja tika novērtēta 16 kanālu *DWDM* sakaru sistēmā ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu kanālā, 50 GHz starpkanālu intervālu un *NRZ-OOK* modulācijas formātu. Katrā no gadījumiem tika noteikts arī dispersijas kompensējošās šķiedras (no ang. val. *dispersion compensating fiber* — *DCF*) garums. Optiskie pastiprinātāji šajā gadījumā tika izmantoti kā līnijas pastiprinātāji. *SOA*, *EDFA*, *LRA* un *DRA* optisko pastiprinātāju darbības salīdzinājumu ir parādīts tab. 1.

Tabula 1.

16 kanālu 10 Gbit/s *DWDM* sakaru sistēmā iegūto rezultātu apkopojums atkarībā no izmantotā optiskā pastiprinātāja (2. kolonna — bez pastiprinātāju lietošanas)

Pastiprinātāja tips	—	<i>SOA</i>	<i>EDFA</i>	<i>LRA</i>	<i>DRA</i>
Pārraidē attālums, km	69	112	135	119	146
<i>DCF</i> šķiedras garums, km	5	15	20	17	20
Pastiprinājuma koeficients 1546–1553 nm diapazonā, dB	—	17,4	23,4–25,1	19,9–20	24,9–25
<i>NF</i> vērtība 1546–1553 nm diapazonā, dB	—	—	4,5–4,6	3–3,1	–8,6
Sarpkanālu šķērstrauces līmenis kanālā ar vislielāko <i>BER</i> , dBm	–55,5	–50	–47,9	–48,3	–49,3

Vislielākais pārraidē attālums tika sasniegts sistēmā ar *DRA*. Šeit, tāpat kā *LRA* gadījumā, sasniedzamo pastiprinājumu ierobežoja nelineāro efektu ietekme uz pastiprināmā signāla kvalitāti. *DRA* pumpēšanai tika izmantots 1150 mW tieši vērsta pumpējošais starojums. Līdz ar to pastiprinājuma process norisinājās pārraidē līnijas posmā no *DRA* pumpējošā avota līdz uztvērēju blokam. Tātad *SMF* šķiedras vājinājums samazināja signāla pastiprinājuma tempu virzienā no pastiprinātāja uz uztvērēju bloku, kas ļāva iegūt daudz lielāku pastiprinājumu nekā *LRA* gadījumā, un līdz ar to būtiski palielināt sasniedzamo pārraidē attālumu. Neskatoties uz to, ka vidējais pastiprinājums *DRA* gadījumā bija tikai par 0.7 dB lielāks nekā *EDFA* pastiprinātājam, sasniegtais pārraidē attālums bija par 11 km lielāks nekā sistēmā ar *EDFA*. Tas ir skaidrojams ar Ramana pastiprinātāju zemo efektivitāti pie mazas pastiprināmā signāla jaudas. Tātad pastiprināmais signāls, kura jauda ir daudz lielāka nekā trokšņu jauda, tiks pastiprināts efektīvāk nekā pastiprinātāja radītie trokšņi. Tomēr kā trūkumu sadalītajam Ramana pastiprinātājam ir jāatzīmē zema pastiprinājuma efektivitāte (25 dB pastiprinājuma iegūšanai bija nepieciešams 1150 mW jaudīgs pumpējošais starojums). *EDFA* spēj nodrošināt lielu signāla pastiprinājumu, bet tas ir iespējams tikai 35 nm plašā joslā C diapazonā. *EDFA* pastiprinātājiem ir raksturīgas lielākas ienesto trokšņu rādītāja vērtības nekā *LRA* un *DRA*. Savukārt *SOA* galvenais trūkums ir ļoti liela trokšņainība, tādēļ tie reti tiek lietoti *WDM* sistēmās, pat neskatoties uz plašo pastiprinājuma spektru.

Nemot vērā *SOA* pārmērīgo ienesto trokšņu daudzumu, *EDFA* pastiprinājuma spektra viļņa garuma atkarību un nelīdzenumu un Ramana pastiprinātāju zemo pastiprināšanas efektivitāti, ir skaidrs, ka, ja *Cisco* un *Bell Labs* prognozes piepildīsies, optiskajās sakaru sistēmās būs nepieciešams cits optisko signālu pastiprināšanas risinājums, kas spētu nodrošināt lielāku pastiprinājumu platākā viļņa garumu diapazonā, vienlaikus ģenerējot pēc iespējas mazāk trokšņus pastiprināmajā signālā.

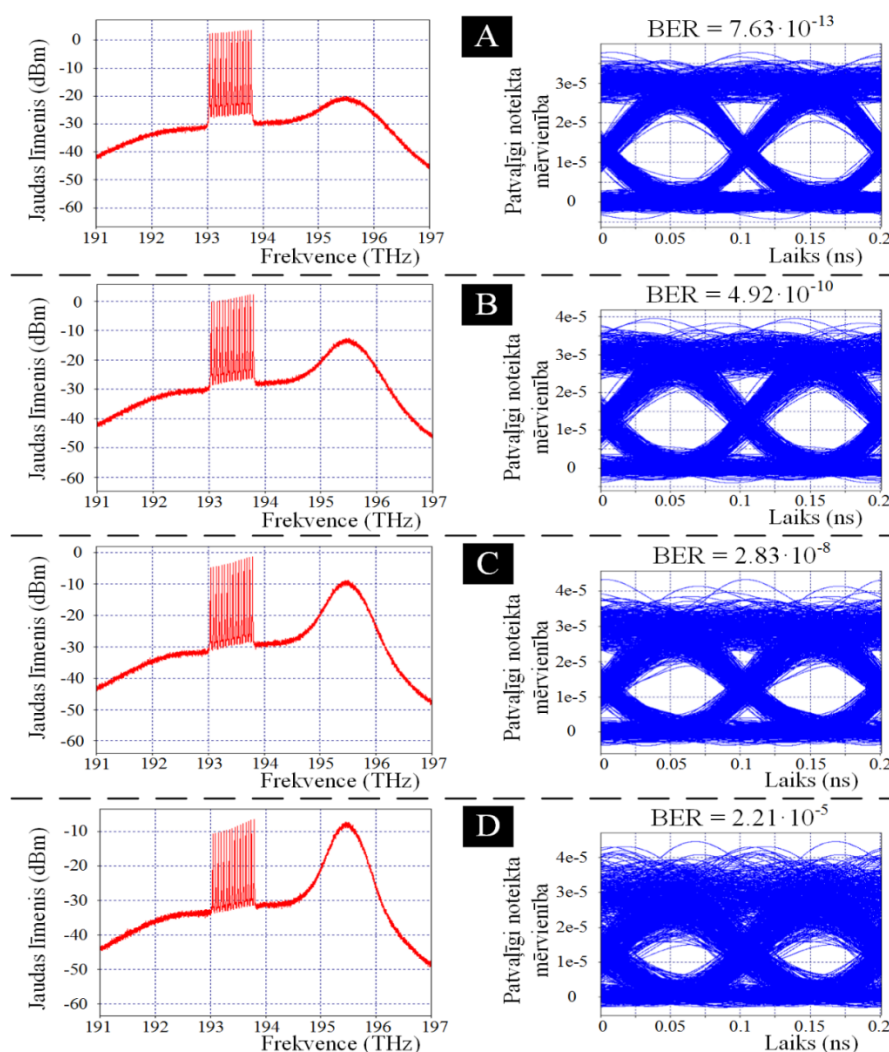
Pirmais iespējamais risinājums ir iepriekš aprakstīto optisko pastiprinātāju apvienošana kombinētajos optisko signālu pastiprināšanas risinājumos, kas ļautu kompensēt dažādu pastiprinātāju tipu negatīvās īpašības, piemēram, paplašināt un izlīdzināt *EDFA* pastiprinājuma spektru vai samazināt *SOA* radīto trokšņu īpatsvaru pastiprinātāja izejā.

Otrais iespējamais risinājums ir parametrisko pastiprinātāju (no ang. val. *fiber optical parametric amplifier* — *FOPA*) lietošana. Šā tipa pastiprinātāji spēj nodrošināt augsta līmeņa pastiprinājumu plašā viļņa garumu joslā un, salīdzinot ar citiem diskrēto pastiprinātāju tiem, pie optimizētas konfigurācijas rada ļoti maz trokšņu. Turklāt parametriskie pastiprinātāji var tikt izmantoti arī signālu apstrādei, piemēram, viļņa garuma pārveidei [38, 39], dispersijas kompensēšanai [40], laikdales blīveto signālu demultipleksēšanai [31] un signālu 2R un 3R reģenerēšanai (2R — signāla jaudas un formas atjaunošana; 3R — signāla jaudas, formas un fāzes atjaunošana) [41, 42].

Otrā nodaļa

Šajā nodaļā tika izpētīti optisko signālu pastiprināšanas kombinētie risinājumi, kas tika veidoti no mūsdienās komerciāli lietoto optisko pastiprinātāju (*SOA*, *EDFA* un *Ramana* pastiprinātāju) kombinācijām. Tika izpētīta un nodemonstrēta *Ramana-EDFA* un *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu lietošana *WDM* sakaru sistēmās jau esošo diskreto līnijas pastiprinātāju darbības uzlabošanai. *SOA* ienesto būtisko signāla kropļojumu dēļ un *EDFA* radītā pastiprinājuma spektra viļņa garuma atkarības dēļ netika apskatīta *EDFA-SOA* kombinētā risinājuma veidošana.

EDFA pastiprinājuma nevienmērīgums un pastiprināmā signāla kropļojumi, kurus rada *ASE* troksnis, būtiski iespaido pārraides sistēmas darbību, it īpaši sistēmās ar vairākiem pastiprināšanas posmiem. *EDFA* pastiprinājuma spektra nevienmērīguma un ienesto signāla kropļojumu ietekmes demonstrēšanai tika izveidots 16 kanālu 10 Gbit/s *DWDM* sakaru sistēmas modelis ar četriem pastiprināšanas posmiem. Katra pastiprinātāja ieejā tika nodrošināta vienāda signāla jauda. Iegūtie rezultāti ir parādīti att. 3.



Att. 3. Optiskie spektri *EDFA* pastiprinātāju izejā (pa kreisi) un acu diagrammas 9. kanālā detektētajam signālam pēc 1. (a), 2.(b), 3.(c) un 4.(d) pastiprināšanas posmiem.

Pēc katra pastiprināšanas posma signāla *BER* vērtības pieauga par 2–3 kārtām (pie vienādas ieejas signāla jaudas). Salīdzinot *EDFA* pastiprinājuma spektrus pēc 1. un 4. pastiprināšanas posma, tika konstatēts, ka pastiprinājums vidēji samazinājās par 11,6 dB, bet pastiprinājuma atšķirība starp kanāliem palielinājās no 1,3 līdz 4,3 dB. Tika secināts, ka:

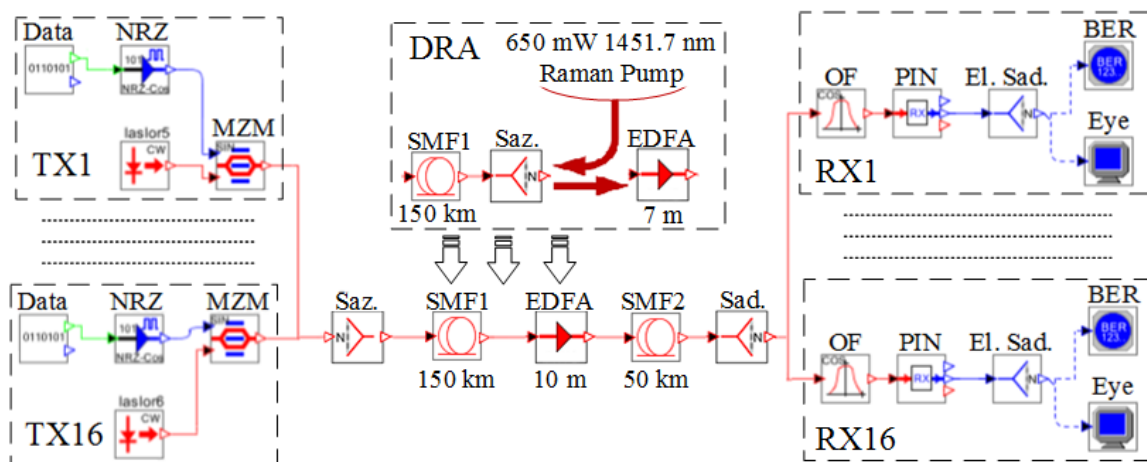
- katrs nākamais *EDFA* ne tikai radīja pastiprinātās spontānās emisijas trokšņus, bet pastiprināja arī iepriekšējajos pastiprināšanas etapos radītos trokšņus, kas savukārt būtiski degradēja pastiprināmā signāla kvalitāti;
- *ASE* jaudas līmenis pēc katra pastiprinātāja pakāpeniski pieaug. Līdz ar to uz iepriekšējos pastiprināšanas etapos radīto trokšņu pastiprināšanu tiek patērēta daļa no erbija jonu populācijas inversijas. Rezultātā samazinājās tā populācijas inversijas daļa, kas nodrošināja ieejas signāla pastiprinājumu.

Pastiprinājuma slīpums pieauga pēc katra pastiprināšanas posma. Nevienmērīgs pastiprinājums ir nevēlams daudzkanālu *WDM* sistēmās, it īpaši sistēmās ar vairākiem kaskādē saslēgtiem *EDFA* līnijas pastiprinātājiem, jo tas izraisa dažādu kanālu signālu jaudas līmeņu atšķirību, kas savukārt izraisīs signāla kvalitātes degradāciju kanālos ar zemāku pastiprinājuma līmeni.

Apkopojot augstāk pieminēto informāciju, tika secināts, ka *EDFA* pastiprinātāju ir nepieciešams konfigurēt ar mērķi iegūt pēc iespējas līdzienāku kopējo pastiprinājuma spektru pārraidē izmantotajā frekvenču diapazonā, kā arī samazināt *EDFA* radīto signāla kropļojumu daudzumu.

Ramana-EDFA pastiprinātāja kombinētais risinājums

Ramana-EDFA optisko pastiprinātāju kombinācijā lielāko trokšņu daļu ienes *EDFA* pastiprinātājs. Tāpēc vairumā gadījumos Ramana pastiprinātājs tiek izmantots kā priekšpastiprinātājs. *EDFA* pastiprinātājs nodrošina mazāku ienesto trokšņu daudzumu, strādājot tuvāk piesātinājuma punktam. Līdz ar to kombinētajos risinājumos izmanto *EDFA* ar salīdzinoši īsu leģēto šķiedru (jo garāka ir leģētā šķiedra, jo vairāk tiek pastiprināti spontānās emisijas radītie fotoni). Tālākai *Ramana-EDFA* kombinētā risinājuma analīzei tika izmantots simulācijas modelis, kas ir attēlots att. 4.



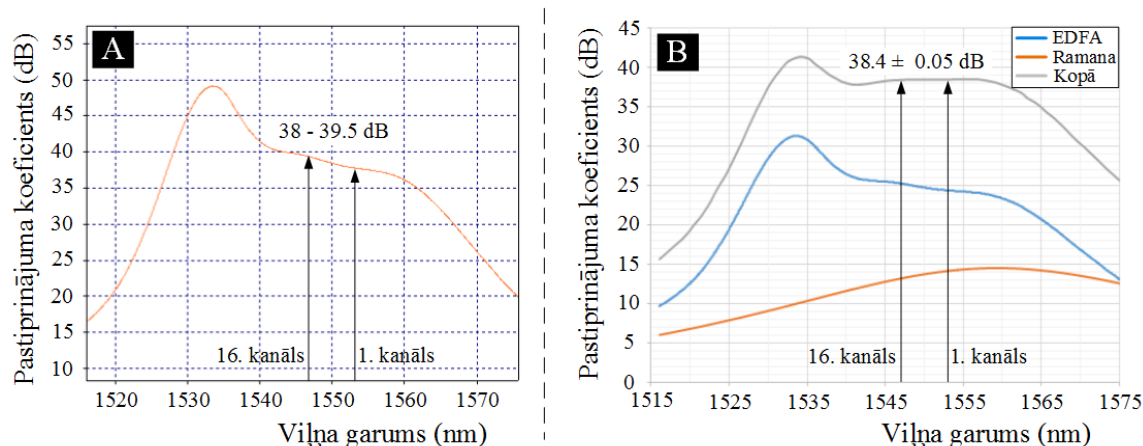
Att. 4. Simulācijas modelis 10 Gbit/s 16 kanālu *DWDM* sakaru sistēmai ar *EDFA* pastiprinātāju vai ar *Ramana-EDFA* kombinēto risinājumu.

Simulācijas modelī 16 raidītāju optiskās plūsmas tiek apvienotas un pārsūtītas caur 150 km garu standarta vienmodas šķiedru (*SMF1*). Signāla jaudas līmenis *SMF1* šķiedras izejā visos 16 kanālos sasniedza $-37,1 \pm 0,1$ dBm. Kopējā optiskā plūsma tika pastiprināta vai nu ar *EDFA* pastiprinātāju, vai ar *Ramana-EDFA* kombinēto pastiprināšanas risinājumu (att. 4. ar bultiņām norādīts kombinētā pastiprinātāja izvietojums) un pēc tam pārraidīta tālāk pa 50 km garu *SMF* šķiedru (*SMF2*). Dispersijas kompensācija tika veikta ar Brega režģi, un pēc tam viss pienākošais signāls tika sadalīts uz 16 uztvērējiem, izmantojot optiskās jaudas sadalītāju.

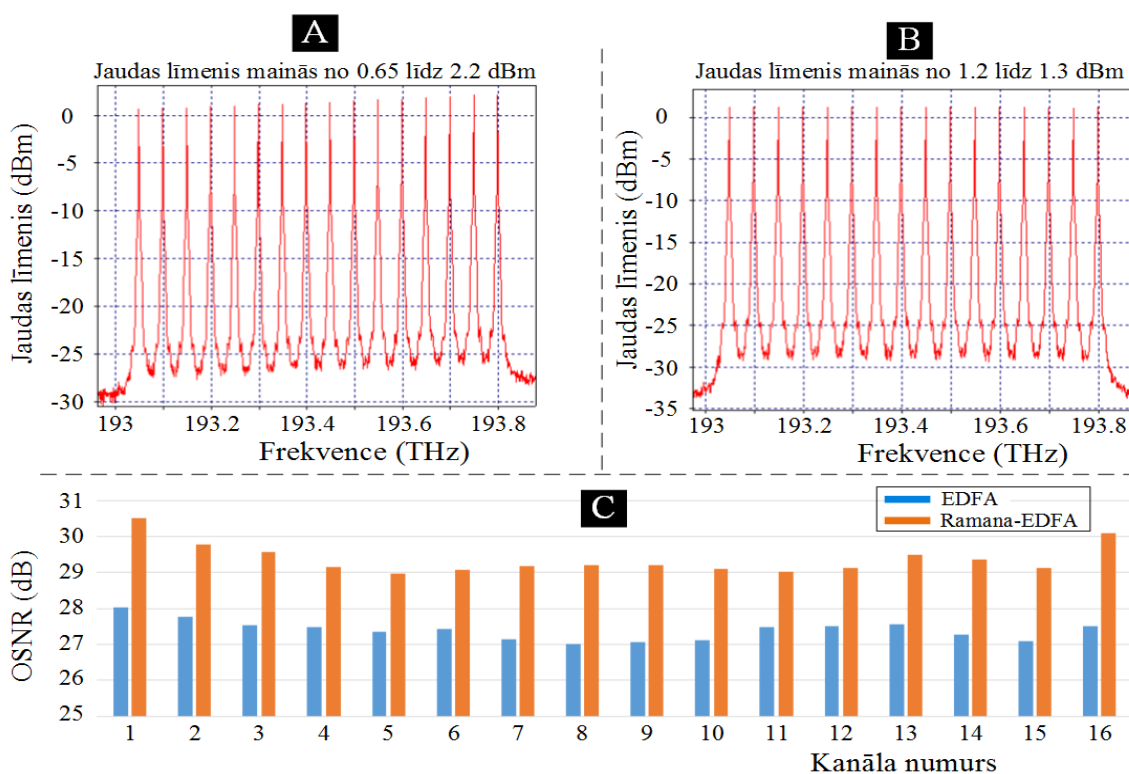
Salīdzinot *EDFA* līnijas pastiprinātāja un *Ramana-EDFA* kombinētā risinājuma radītos pastiprinājuma spektrus (skat. att. 5.), tika konstatēts, ka kombinētā risinājuma veidošana ļauj samazināt pastiprinājuma atšķirību no 1,5 dB (*EDFA* gadījumā) līdz 0,1 dB.

Kā redzams att. 6., ar kombinētā risinājuma lietošanu tika panākts *OSNR* uzlabojums visos pārraides sistēmas kanālos, sākot no 1,7 līdz pat 2,6 dB, kas vidēji sastāda ~2 dB palielinājumu. *OSNR* uzlabojumu var izskaidrot šādi:

- ar sadalītā Ramana pastiprinātāja palīdzību signāla jaudas līmenis *EDFA* ieejā tika pacelts par 13,1–14,1 dB, kas nodrošināja to, ka *EDFA* strādā tuvāk piesātinājuma režīmam;
- *EDF* šķiedras garums tika samazināts par 3 metriem, kas ļāva samazināt nepieciešamo ieejas signāla jaudu, lai *EDFA* strādātu piesātinājuma režīmā;
- stimulētās Ramana izkliedes koherents raksturs nodrošina to, ka *SMFI* optiskajā šķiedrā signāls tika pastiprināts efektīvāk nekā optiskais troksnis, kas ļāva iegūt negatīvas ienesto trokšņu rādītāja vērtības (no –0,4 līdz –0,6 dB pārraidē izmantotajā viļņa garuma diapazonā), un līdz ar to uzlabot *OSNR*.



Att. 5. Pastiprinājuma spektrs *EDFA* pastiprinātājam (A) un *Ramana-EDFA* kombinētajam risinājumam (B).



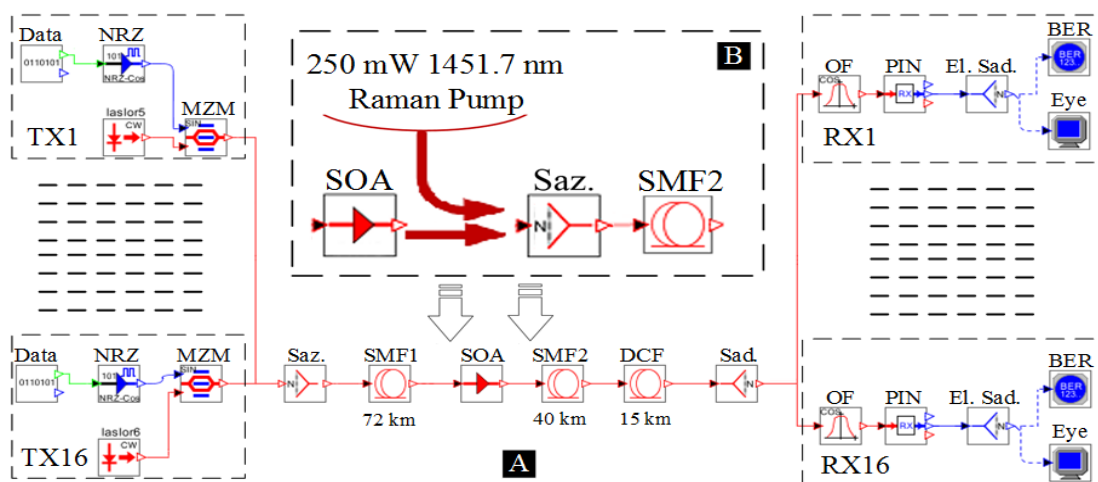
Att. 6. Signālu spektrs *EDFA* izejā (A), *Ramana-EDFA* kombinētā risinājuma izejā (B) un optiskā signāla-trokšņu attiecības salīdzinājums starp visiem pārraides kanāliem *EDFA* un izveidotā *Ramana-EDFA* kombinētā pastiprinātāja gadījumā (C).

Kombinētā risinājuma gadījumā tika konstatēts, ka signālu jaudas palielināšana *EDFA* ieejā un ar erbiju leģētas šķiedras garuma samazināšana ļāva samazināt *EDFA* ienesto trokšņu rādītāja vērtības par 0,3–0,4 dB.

Veicot iepriekš aprakstīto *EDFA* un *Ramana-EDFA* risinājumu darbības salīdzinājumu, var secināt, ka kombinētais risinājums spēj nodrošināt līdzenu pastiprinājumu un lielākas *OSNR* vērtības. Tomēr šāda risinājuma īstenošanai ir nepieciešami jaudīgāki lāzēri, kas palielina šāda risinājuma izveidošanas izmaksas. *EDFA* līnijas pastiprinātājam bija nepieciešams 316 mW pumpējošais lāzers, lai nodrošinātu $-37,1$ dBm ieejas signāla pastiprinājumu virs 38 dB. Kombinētajā risinājumā Ramana pastiprinātājam bija nepieciešams 650 mW pumpēšanas avots, lai pastiprinājums būtu pietiekami liels un tā slīpums spētu izkompensēt *EDFA* ar 200 mW pumpējošo starojumu radītā pastiprinājuma slīpumu. Tātad — abu pastiprinātāju kopējā pumpējošā jauda bija 850 mW. Tomēr ar kombinēto risinājumu tika iegūts pastiprinājums, kura atšķirība nepārsniedza 1 dB vērtību 23 nm diapazonā (no 1538 līdz 1561 nm, par 17 nm platāks nekā tika izmantots 16 kanālu pārraidei), kas ļauj būtiski paplašināt kanālu skaitu *WDM* sakaru sistēmās.

***Ramana-SOA* pastiprinātāja kombinētais risinājums**

Ramana-SOA kombinētais risinājums tika veidots ar mērķi samazināt pusvadītāju pastiprinātāja radīto signāla kropļojumu daudzumu un līdz ar to palielināt sasniedzamo pārraides attālumu. Pārraides sistēmas modelis (skat att. 7.), kurā tika pētīta šī pastiprinātāju kombinācija, ir līdzīgs iepriekš izmantotajam.

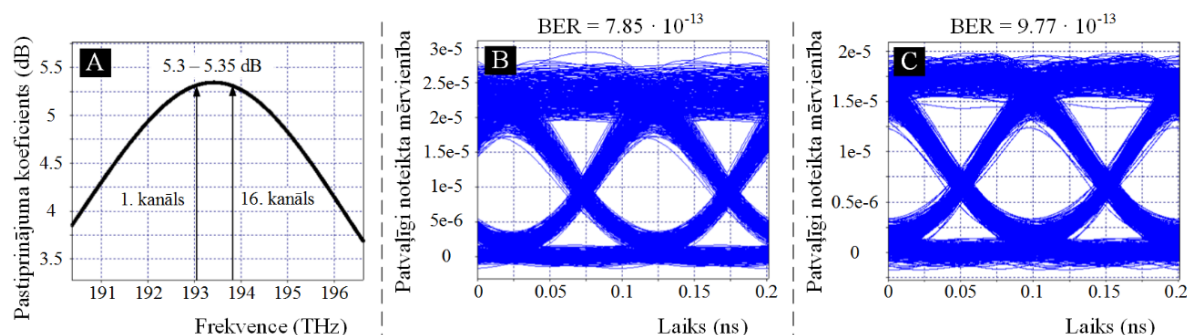


Att. 7. 16 kanālu 10 Gbit/s *NRZ-OOK DWDM* pārraides sistēmas simulācijas modelis ar 50 GHz starpkanālu intervālu gadījumā ar *SOA* līnijas pastiprinātāju (A) un ar *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu (B).

Pārraides līnijas posma garums starp raidītāju bloku un *SOA* tika speciāli piemeklēts, lai nodrošinātu optimālu signāla jaudu pusvadītāju pastiprinātāja ieejā. Sadalītā Ramana pastiprinātāja ievietošana kaskādē pirms pusvadītāju pastiprinātāja paaugstinātu signāla jaudu *SOA* ieejā, kas novestu pie izteiktākas nelineāro optisko efektu izpausmes pusvadītāju materiālā un līdz ar to pasliktinātu pastiprināmā signāla kvalitāti. Līdz ar to kā pirmais pastiprinātājs kaskādē tika izmantots tieši pusvadītāju pastiprinātājs.

Ramana-SOA kombinētā risinājuma veidošana ļāva izmantot pusvadītāju pastiprinātāju režīmā, kad tas radīja vismazāk pastiprināmā signāla kropļojumus, bet pastiprinājuma deficīts, kas radās, samazinot pumpējošās strāvas vērtību par 43 mA, lai samazinātu trokšņu daudzumu, tika kompensēts, izmantojot 250 mW 1451,7 nm tieši vērsto pumpējošo starojumu. *Ramana-SOA* kombinētā risinājuma izveidošana ļāva palielināt sasniedzamo pārraides attālumu par 12 km. Ramana pastiprinātāja radītais pastiprinājuma spektrs ir parādīts att. 8.a. Acu diagrammas kanāliem ar vislielāko *BER* vērtību sistēmai ar *SOA* pastiprinātāju (9. kanāls) un

sistēmai ar *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu (10. kanāls) ir atspoguļotas attiecīgi att. 8.b un att. 8.c. Att. 8.a ir redzams, ka iegūtais pastiprinājums ir pietiekami liels, lai kompensētu 5,3 dB pastiprinājuma deficītu, kas parādījās pēc *SOA* pumpējošās strāvas samazināšanas par 43 mA.

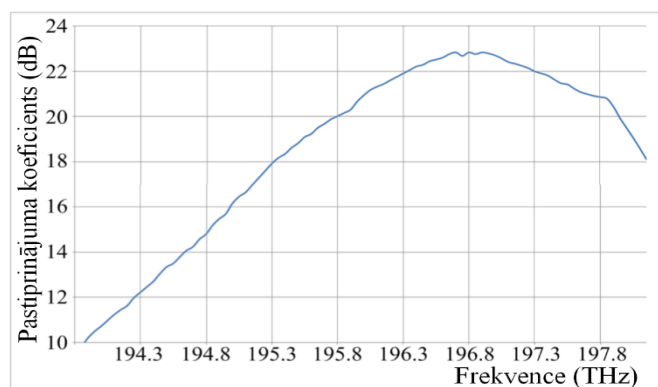


Att. 8. Ramana pastiprinātāja pastiprinājuma spektrs (A) un acu diagrammas 9. kanālā sistēmā ar *SOA* pastiprinātāju (B) un 10. kanālā sistēmā ar *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu (C).

Salīdzinot att. 8.b un att. 8.c, tika konstatēts, ka, izmantojot *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu, izdevās iegūt aptuveni tādu pašu *BER* līmeni kā *SOA* gadījumā, tikai pie 1,5 reizes zemākas signāla jaudas. Tas parāda, ka, izmantojot *SOA* kopā ar sadalīto Ramana pastiprinātāju un attiecīgi veicot *SOA* pumpējošās strāvas korekcijas, ir iespējams būtiski samazināt ienesto trokšņu daudzumu un līdz ar to paaugstināt pastiprinātā signāla kvalitāti.

Trešā nodaļa

FOPA pastiprinātāji var būt balstīti uz deģenerēto *FWM* (ar vienu pumpējošo starojumu) un uz nedeģenerēto *FWM* (ar diviem pumpējošiem starojumiem). *FOPA* radītais pastiprinājums sasniegs maksimumu, ja tiek nodrošināts fāžu saskaņošanas nosacījums jeb fāžu nesaskaņotības parametrs k ir vienāds ar nulli. *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu gadījumā, neskatoties uz plašu pastiprinājuma diapazonu, pastiprinājuma spektrs nav līdzens. Šajā darbā parādītajā eksperimentālajā pārraides sistēmā pastiprinājuma joslas platums -3 dB līmenī sasniedza 2,2 THz (skat. att. 9.). Tika konstatēts, ka *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu optimāla darba režīma nodrošināšanai ir nepieciešams uzturēt nelielu negatīvu lineāro fāžu nobīdi attiecībā pret nulles dispersijas frekvenci, kas kompensētu fāžu nesaskaņotības nelineāro daļu. Šā iemesla dēļ pumpējošā starojuma viļņa garumam jābūt lielākam par šķiedras nulles dispersijas viļņa garumu (no ang. val. *zero dispersion wavelength* — *ZDWL*).

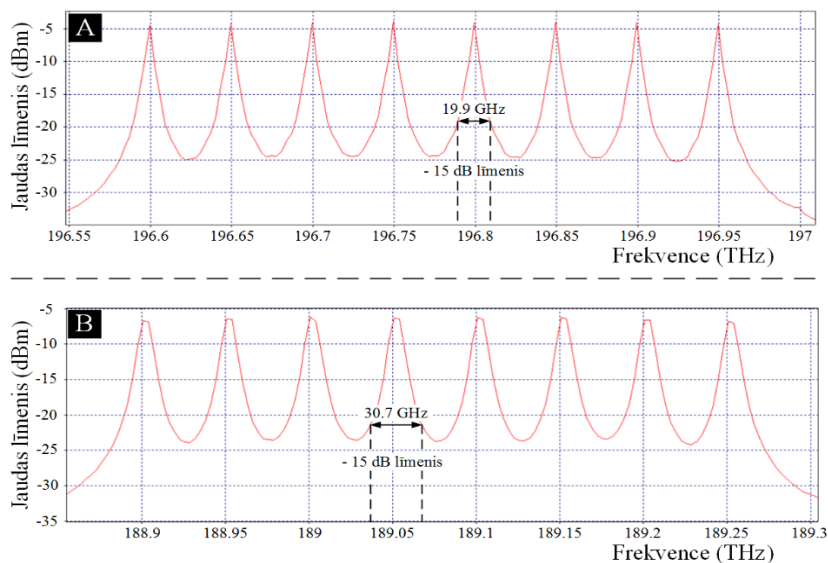


Att. 9. *FOPA* ar 660 mW 1553,9 nm pumpējošo starojumu radītā pastiprinājuma spektrs.

Pastiprinājuma joslas platums ir izteikti atkarīgs no vides nelinearitātes parametra un pumpējošā starojuma jaudas un pastiprinājuma vides (*HNLF* šķiedras) garuma. Tātad, palielinot šķiedras garumu, ir iespējams iegūt lielāku pastiprinājumu, bet šādā gadījumā pastiprinājuma spektra platums līdzvērtīgi samazināsies (jo garāka ir šķiedra, jo vairāk tiks

uzkrāta fāžu nesaskaņotība). Šā iemesla dēļ, veidojot *FOPA* pastiprinātājus, nav ieteicams lietot *HNLFF* šķiedru, kas ir garāka par 1 km. Ja pastiprinātāja pieskaņošana tiek veikta, lai iegūtu pēc iespējas platāku pastiprinājuma spektru, ir jāizmanto pēc iespējas īsāku šķiedru, bet pastiprinājuma līmeņa uzturēšanai ir jāpalielina pumpējošā starojuma jaudu vai jāizvēlas šķiedru ar lielāku nelinearitātes koeficientu. Izvēloties pumpējošā starojuma parametrus, ir nepieciešams ņemt vērā, ka mainot pumpējošā starojuma jaudu mainās arī fāžu nesaskaņotības nelineārā daļa. Līdz ar to paralēli pumpējošā starojuma jaudas izmaiņām ir jākorrigē arī tā viļņa garumu.

Parametrisko pastiprinātāju ar vienu pumpējošo starojumu darbība apgrūtina dažādi faktori, kurus ir jāņem vērā, projektējot konkrētu *FOPA* realizāciju. Ir nepieciešams selektīvi izvēlēties pumpējošā starojuma parametrus, lai nodrošinātu pēc iespējas lielāku pastiprinājuma efektivitāti un lai izvairītos no izteiktas *CC-FWM* un *PC-FWM* radītās starpkanālu šķērsrunas ģenerēšanās, kas rodas pārmērīgas pumpēšanas gadījumā. Ļoti būtiska ir arī *SBS* sliekšņa paaugstināšana, pretējā gadījumā pastiprinājuma efektivitāte samazināsies, un pastiprināmais signāls tiks izkropļots. Viens no visefektīvākajiem *SBS* sliekšņa paaugstināšanas risinājumiem ir pumpējošā starojuma fāzes modulēšana. Tomēr, kā redzams att. 10., pie nepietiekami rūpīgas pumpējošā starojuma fāzes modulējošo frekvenču izvēles var rasties būtiska tukšgaitas komponentu spektra paplašināšanās. Līdz ar to sistēmās, kur tukšgaitas komponentes tiek izmantotas signāla apstrādei, ir jānodrošina, lai pumpējošā starojuma fāzes modulācija neizraisītu pārmērīgu tukšgaitas komponentu spektrālo paplašinājumu (mūsu gadījumā tas sasniedz 54 % –15 dB līmenī no jaudas spektra maksimuma, skat. att. 10.). *FWM* procesa ierosināšanai ir nepieciešama arī leņķiskā momenta saglabāšana starp četriem mijiedarbē iesaistītajiem fotoniem, jo parametriskajam pastiprinājumam ir izteikta polarizācijas atkarība.

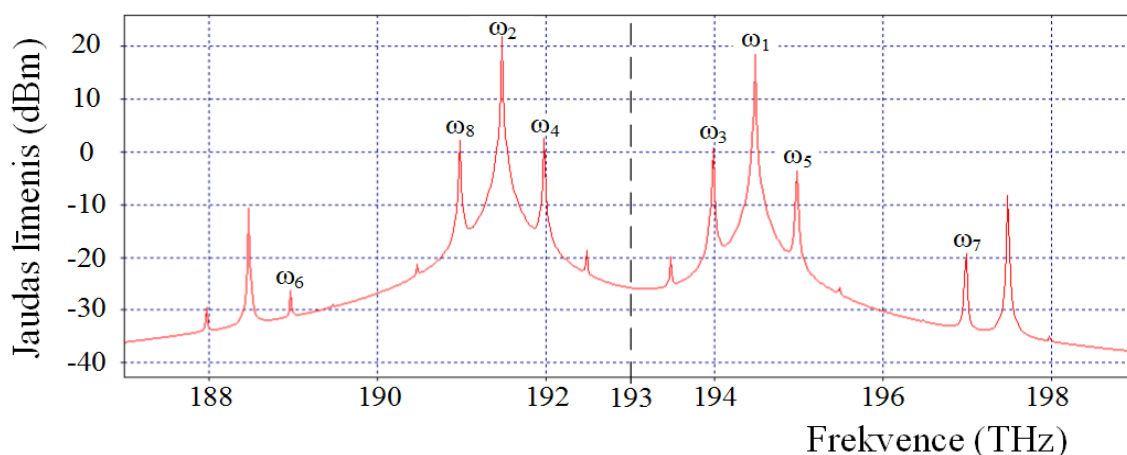


Att. 10. Pārraidāma signāla spektrs (A) un tukšgaitas komponentu spektrs (B) parametriskā pastiprinātāja izejā.

Atšķirībā no *FOPA* ar vienu pumpējošo avotu *FOPA* ar diviem pumpējošiem avotiem var nodrošināt vienmērīgu pastiprinājumu ļoti plašā frekvenču diapazonā. Vienmērīga pastiprinājuma sasniegšanai plašā frekvenču diapazonā ir nepieciešams nodrošināt, lai pumpējošo starojumu frekvences tiktu izvietotas simetriski attiecībā pret pastiprinājuma vietas *ZDWL*, bet frekvenču attālumam starp *ZDWL* un pumpējošajiem starojumiem ir jābūt pietiekami lielam (atkarīgs no konkrētas *FOPA* konfigurācijas), lai izvairītos no *PC-FWM* radīto komponentu ietekmes uz pastiprināmajā signāla kvalitāti.

FOPA ar diviem pumpējošiem starojumiem rada gan deģenerētas, gan nedeģenerētas izpausmes *FWM*, tāpēc parametrisko procesu rezultātā ar 1 pastiprināmo signālu ir iespējams iegūt vismaz 5 tukšgaitas komponentes (skat att. 11., kur ω_1 un ω_2 ir pumpējošo avotu

frekvences, bet ω_3 ir signāls), kas ir tiešā veidā saistītas ar pastiprināmā signāla frekvenci. Tas rada pastiprinājuma spektra iekritumus pumpējošo avotu tuvumā. No pētījuma iegūtajiem rezultātiem tika secināts, ka pie 0,5 mW pumpējošā starojuma jaudas ir ieteicams, ka pastiprināmā signāla frekvence ir vismaz 1,2 THz attālumā no pumpējošajiem starojumiem.



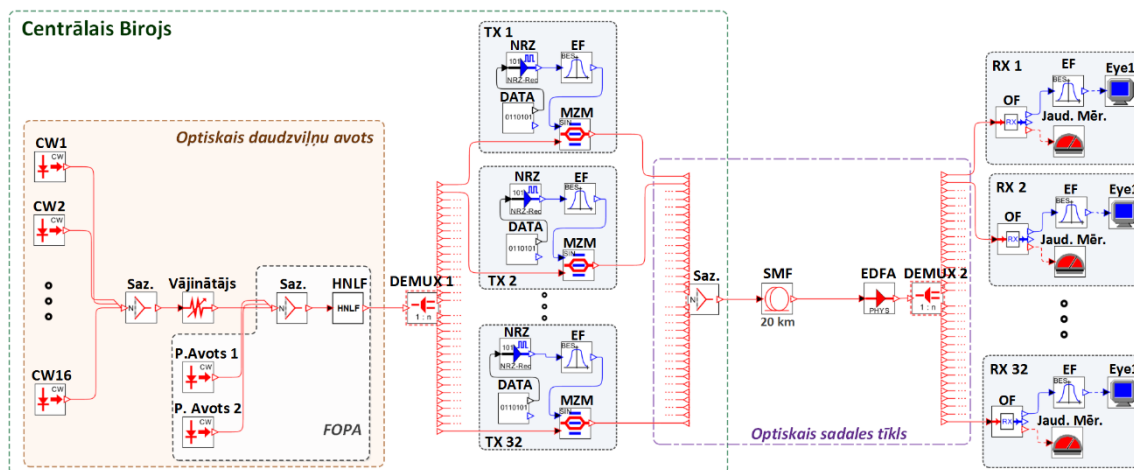
Att. 11. Optiskais spektrs 500 metru garas *HNLF* šķiedras izejā ar 200 mW 191,5 THz un 194,5 THz *FOPA* pumpējošajiem starojumiem.

Tāpat kā *FOPA* pastiprinātājiem ar vienu pumpējošo starojumu, arī *FOPA* ar diviem pumpējošiem starojumiem ir nepieciešams lietot kādu no *SBS* negatīvās ietekmes samazināšanas metodēm. Bet šeit jāņem vērā tāda atšķirība, ka *FOPA* ar diviem pumpējošajiem avotiem, manipulējot ar abu pumpējošo starojumu fāzi, var panākt, ka attiecīgā tukšgaitas komponente spektrāli nepaplašināsies. *FOPA* ar diviem pumpējošiem avotiem radītā pastiprinājuma efektivitāte ir atkarīga no *SRS* izraisītās enerģijas pārejas starp pumpējošiem starojumiem. Pilnībā izvairīties no šā efekta nav iespējams. Tā ietekmes samazināšanai pumpējošajam starojumam ar lielāko frekvenci parasti izvēlas lielāku jaudu nekā otram pumpējošajam starojumam, tādā veidā panākot, ka abu pumpējošo starojumu vidējās jaudas atšķirība pastiprinājuma vidē ir minimāla.

Daudzkanālu gaismas avots

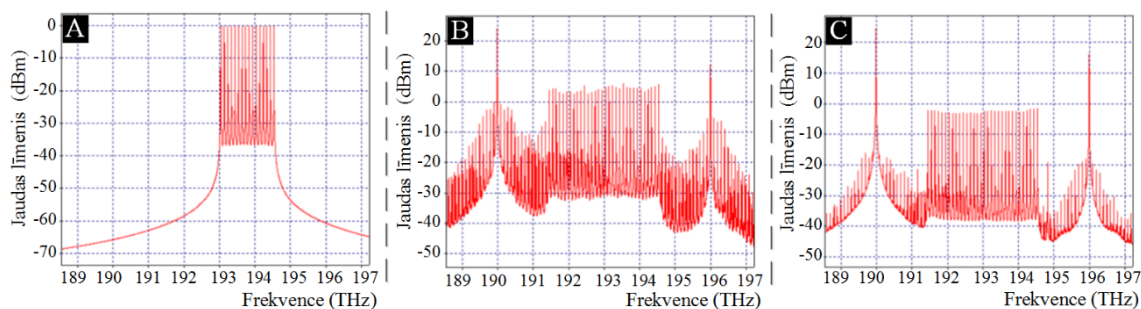
Tradicionālā *WDM* sakaru sistēmu arhitektūrā viena kanāla nesēja radīšanai ir nepieciešams viens optiskā starojuma avots. Tas nav ekonomiski visefektīvākais risinājums, jo, palielinot pārraides kanālu skaitu, attiecīgi palielinās arī nepieciešamo gaismas avotu skaits. Šā iemesla dēļ arvien vairāk pētījumi tiek veikti tādas pārraides sistēmu arhitektūras meklējumos, kas spēs nodrošināt lielāku signālu nesēju skaitu ar pēc iespējas mazāk optiskā starojuma avotiem [43–45]. *FOPA* pastiprinātāji optisko signālu parametriskās pastiprināšanas procesā ģenerē tukšgaitas komponentes, kas pēc savas būtības ir pēc fāzes konjugētas pastiprināmā signāla kopijas. Šīs tukšgaitas komponentes varētu tikt lietotas ne tikai viļņa garuma pārveidošanai vai signāla 2R un 3R reģenerācijai, bet arī nesēju skaita palielināšanai *WDM* sakaru sistēmas raidītāju pusē.

Līdz ar to tika izstrādāts *FOPA* pastiprinātāja modelis ar diviem pumpējošiem starojumiem, kas tika lietots esošo nesēju skaita divkāršošanai *WDM* sakaru sistēmā. Šā iemesla dēļ tika izveidota 32 kanālu *DWDM* sakaru sistēma ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu kanālā, 100 GHz starpkanālu frekvenču intervālu un *NRZ-OOK* modulācijas formātu. Šīs sistēmas simulācijas modelis ir parādīts att. 12.



Att. 12. 32 kanālu 10 Gbit/s WDM sakaru sistēmas modelis ar piedāvāto daudzkanālu avota risinājumu, kas balstās uz viļņa garuma pārveides veikšanu, izmantojot FOPA ar diviem pumpējošiem starojumiem.

Sakaru sistēmas simulācijas modelī, kas dots att. 12., galvenā īpatnība ir tā, ka FOPA pastiprinātājs tika pieslēgts pirms raidītāju bloka jeb 32 kanālu modulatoru ieejām. Optiskais daudzkanālu avots sastāv no nepārtraukta starojuma lāzeriem ($CW1-CW16$), optiskā vājinātāja, diviem jaudīgiem pumpējošajiem avotiem, diviem optiskiem sazarotājiem un 500 metru garas HNLFS šķiedras. Viena no šā eksperimenta galvenajām prioritātēm bija iegūt 32 datu signālu nesējus ar vienmērīgu frekvenču sadalījumu (vienādu starpkanālu intervālu), ko ir iespējams panākt izmantojot ω_4 tukšgaitas komponentes. Ņemot vērā, ka tukšgaitas komponentu ω_4 un sākotnējo gaismas avotu frekvenču izvietojums ir simetrisks attiecībā pret pastiprinājuma vietas ZDWL, tika pieņemts lēmums izvēlēties frekvenci nesējam ar vismazāko frekvenci par 50 GHz lielāku nekā HNLFS šķiedras ZDWL (193 THz). Līdz ar to 16 sākotnējo nesēju frekvences tika izvietotas diapazonā no 193,05 THz līdz 194,55 THz ar 100 GHz starpkanālu intervālu (skat. att. 13.a). Optiskais starojums, kas tiek sūtīts caur parametrisko pastiprinātāju, nav modulēts un pēc būtības reprezentē nepārtrauktu starojumu kopu. HNLFS šķiedras izejā tika iegūta kombinācija no 16 sākotnējiem nesējiem, parametrisko procesu rezultātā uzģenerētajām 16 ω_4 tukšgaitas komponentēm, 2 pumpējošiem starojumiem un pārējām tukšgaitas un trešās kārtas komponentēm (skat. att. 13.b un 13.c). Tika izmantoti divi pumpējošie starojumi ar 190 THz un 196 THz frekvencēm un jaudu — 400 mW katrs (26 dBm).

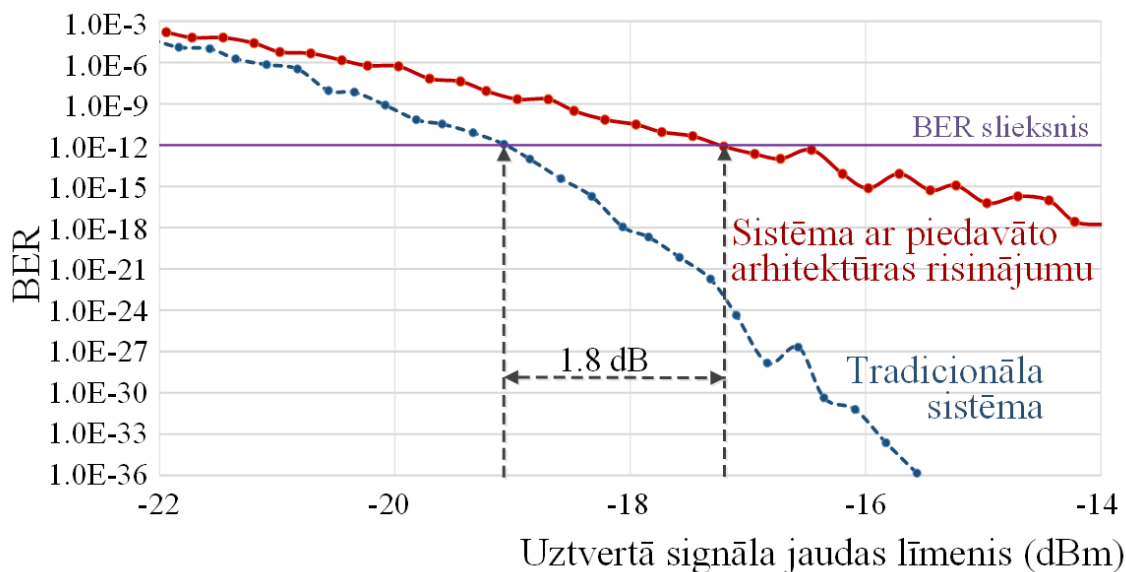


Att. 13. Optiskais spektrs FOPA ieejā pie nesēju jaudas 0 dBm (A), un optiskie spektri HNLFS šķiedras izejā pie nesēju jaudas 0 dBm (B) un pie nesēju jaudas -10 dBm (C).

Tika novērots, ka pie pārmērīgi liela ieejas signālu jaudas līmeņa CC-FWM procesi izraisīs ievērojamu starpkanālu šķērsrunu (skat. att. 13.b). Šā iemesla dēļ, izmantojot parametrisko procesu rezultātā iegūtās tukšgaitas komponentes nesējsignālu skaita dubultošanai, ir nepieciešams ierobežot nesējsignālu jaudu pastiprinātāja ieejā. Vadoties pēc iegūtajiem rezultātiem, sākotnējo nesējsignālu jaudas līmenis pastiprinātāja ieejā tika iestatīts -10 dBm līmenī. Tukšgaitas komponentu frekvenču centrēšana attiecībā pret demultipleksora

filtru caurlaides joslu centrālajām frekvencēm tika panākta, mainot pirmā pumpējošā starojuma frekvenci (simulācijās iegūtā frekvence — 196,01 THz). Ar iepriekš aprakstīto pastiprinātāja konfigurāciju maksimālā jaudas līmeņu atšķirība starp kanāliem tika samazināta līdz 1,9 dB.

Piedāvātā sistēmas arhitektūras risinājuma veiktspējas novērtēšanai tika iegūta *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas kanālā ar vissliktāko signāla kvalitāti (ar vislielāko *BER*). Šie rezultāti tika salīdzināti ar tādiem pašiem rezultātiem, kas tika iegūti sistēmā ar tradicionālo arhitektūru (ar 32 lāzeravotiem, kas darbojas nepārtraukta izstarojuma režīmā). Iegūtās sakarības attēlotas att. 14. Tika konstatēts, ka starp sistēmu ar piedāvāto daudzkanālu avota risinājumu un tradicionālo 32 kanālu risinājumu pastāv 1,8 dB jaudas sods. Daļa no iegūtā jaudas soda ir saistāma ar *ASE* trokšņiem, kurus ienesa *EDFA* pastiprinātājs, kas tika izmantots kā priekšpastiprinātājs nepieciešamā signāla jaudas līmeņa nodrošināšanai uztvērēju ieejās.



Att. 14. *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas 12. kanālā sistēmā ar piedāvāto optisko daudzkanālu avota risinājumu (sarkanā līkne) un sistēmā ar tradicionālo arhitektūru (zilā līkne).

Piedāvātajai sistēmas arhitektūrai ir vismaz divas alternatīvas, kas spēj nodrošināt vairāk nekā vienu nesējsignālu uz vienu starojuma avotu: spektrāli sagrieztās sistēmas [44, 46] un sistēmas, kas balstītas uz *FWM* izmantošanu daudzu spektrālo komponentu ģenerēšanā [45, 47]. Tomēr *FOPA* radīto ω_4 tukšgaitas komponentu izmantošana nesēju dubultošanai *WDM* sistēmās nodrošina vislabāko nesējsignāla stabilitāti un līdz ar to arī visaugstāko pārraidāmā signāla kvalitāti.

Ceturrtā nodaļa

Šajā nodaļā tika izpētīta parametriskā pastiprinājuma polarizācijas atkarība un tās iespējamais pielietojums optisko signālu apstrādē. Tika konstatēts, ka maksimālā pastiprinājuma efektivitāte tiek sasniegta gadījumā, kad abi pumpējošie starojumi ir lineāri polarizēti ar vienādu polarizācijas stāvokli un to *SOP* sakrīt ar pastiprināmā signāla *SOP*. Kad abu lineāri polarizēto pumpējošo starojumu *SOP* ir ortogonāli pastiprināmā signāla *SOP*, pastiprinājums samazinās līdz minimumam un plašā frekvenču joslā ir vienāds ar 0. Šajā darbā iegūtie rezultāti parādīja, ka tik pat liela pastiprinājuma polarizācijas atkarība ir novērojama arī *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu gadījumā.

Šāda parametrisko pastiprinātāju īpašība var tikt izmantota viena polarizācijas stāvokļa izdalīšanai no divu ortogonāli polarizētu starojumu kombinācijas. Galvenā problēma, kas parādās, izmantojot *FOPA* konkrēta polarizācijas stāvokļa izdalīšanai, ir nodrošināt signāla un

pumpējošo starojumu *SOP* savstarpējā izvietoējuma saglabāšanu visā *HNLF* šķiedras garumā. Problēma parādās šādu iemeslu dēļ:

- gaismas dubultlaušanas iespaidā optisko starojumu *SOP* izmaiņās, un tā rezultātā ir novērojama gadījuma rakstura *SOP* rotācija. Kompensēt šādu optisko starojumu *SOP* izmaiņu ir sarežģīts uzdevums, jo rotācijas ātrumu ietekme dažādi faktori: temperatūra, optiskā starojuma frekvence, iekšējās un ārējās mehāniskās slodzes u. c. No pumpējošo starojumu un pastiprināmā signāla *SOP* rotācijas ir iespējams izvairīties, kā pastiprinājuma vidi izmantojot polarizācijas stāvokli saglabājošas *HNLF* šķiedras;
- kad pastiprināmais signāls un pumpējošie starojumi izplatās pa pastiprinājuma vidi, papildus gaismas dubultlaušanai to polarizācijas stāvokļus iespaido arī *SPM* un *XPM*. Līdz ar to, konfigurējot parametrisko pastiprinātāju, ir nepieciešams izvairīties no pārmērīgas pumpēšanas, pretējā gadījumā tas var izraisīt izteiktāku *SPM* un *XPM* izpausmi, kas samazina *FWM* procesa efektivitāti pastiprinājuma vidē.

Pilnībā izvairīties no signāla un pumpējošo starojumu *SOP* savstarpējā izvietoējuma izmaiņas nav iespējams. Lai to nodemonstrētu, tika izveidots simulācijas modelis, kur *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu (500 mW, 1553,9 nm) pastiprina signālu ar -31 dBm kopējo jaudu *HNLF* šķiedras ieejā. Signāls un pumpējošais starojums bija lineāri polarizēti, un sakotēji to *SOP* sakrita. Simulācijas gaitā pumpējošā starojuma *SOP* tika pagriezts attiecībā pret signāla *SOP* un tika novērota signāla kopējā jauda pastiprinātāja izejā. Tika konstatēts, ka, pat pielietojot polarizācijas stāvokli saglabājošas šķiedras *SPM* un *XPM* iespaidā, novērojama signāla un pumpējošā starojuma *SOP* savstarpējā izvietoējuma izmaiņa, kuras rezultātā signāls, kura *SOP* bija ortogonāls pumpējošā starojuma *SOP* *HNLF* šķiedras ieejā, ieguva 1,5–1,6 dB pastiprinājumu. Gadījumā, kad pastiprināmā signāla *SOP* sakrita ar pumpējošā starojuma *SOP*, iegūtais pastiprinājums sasniedza 18,3 dB, kas bija par 16,7 dB lielāks nekā pie ortogonāla *SOP* izvietoējuma *HNLF* šķiedras ieejā.

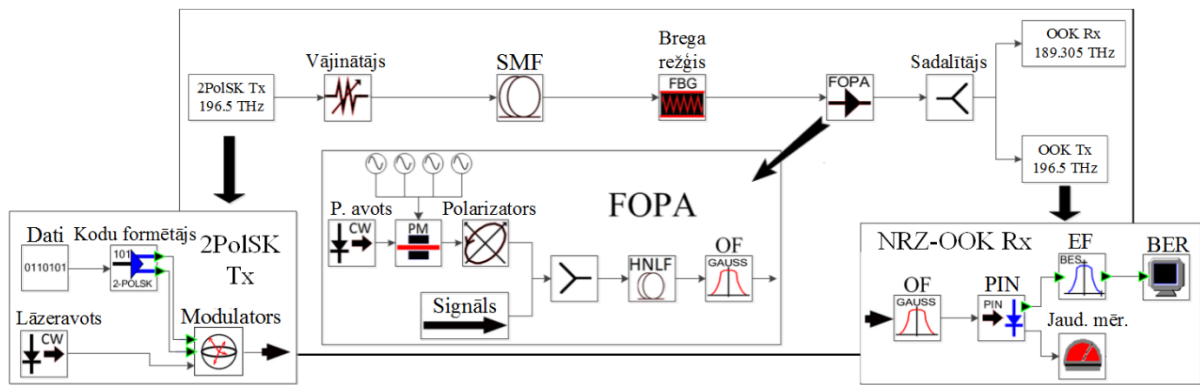
Kā jau tika iepriekš minēts, *FOPA* radītā pastiprinājuma polarizācijas atkarība var tikt lietota starojuma ar konkrētu *SOP* izdalīšanai no ortogonāli polarizētu starojumu plūsmas, kas attiecīgi var tikt izmantots pēc polarizācijas multipleksēto signālu demultipleksēšanai un *2PolSK* signāla pārveidošanai *NRZ-OOK* modulācijas formātā.

Modulācijas formāta pārveide

2PolSK signāla pārveidošanai *NRZ-OOK* modulācijas formātā tika apskatīti vienkānā un daudzkanālu sistēmu gadījumi. Lai izvairītos no *SOP* savstarpējā izvietoējuma izmaiņām starp pumpējošajiem starojumiem, abos gadījumos tika izmantoti parametriskie pastiprinātāji ar vienu pumpējošo avotu. Gan vienkānā, gan daudzkanālu sistēmu gadījumos *FOPA* tika novietots uztvērēja (vai uztvērēju bloka) ieejā.

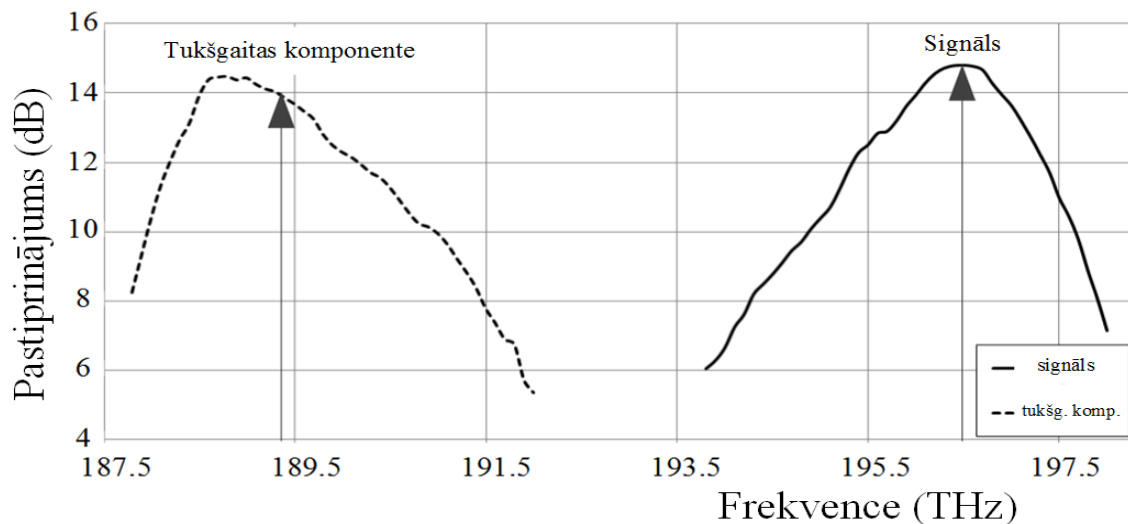
Tika izveidots vienkānā pārraides sistēmas modelis ar *2PolSK* modulācijas formātu, 150 km garu optisko šķiedru, *FOPA* priekšpastiprinātāju (kas vienlaikus pildīja arī modulācijas formāta un viļņa garuma pārveidotāja funkcijas) un diviem uztvērējiem *NRZ-OOK* signāla uztveršanai pie signāla un tukšgaitas komponentes frekvencēm. Izveidotais simulācijas modelis ir parādīts att. 15.

Vienkānā sistēmas gadījumā primārais uzdevums darbā bija novērtēt no jauna izveidoto modulācijas formāta pārveidošanas risinājumu, nosakot jaudas sodu, kuru ienes tieši modulācijas formāta pārveidošana. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, tika izvēlēts 535 mW 1554,1 nm pumpējošais starojums, kura fāze tika modulēta ar šādiem frekvenču toņiem: 180 MHz, 420 MHz, 1,087 GHz un 2,133 GHz. Šāda pastiprinātāja konfigurācija nodrošināja 14,8 dB pastiprinājumu *2PolSK* signāla loģiskā «1» komponentei, kas bija pietiekams uz *NRZ-OOK* formātu pārveidotā signāla *BER* vērtību nodrošināšanai zem 10^{-12} sliekšņa.



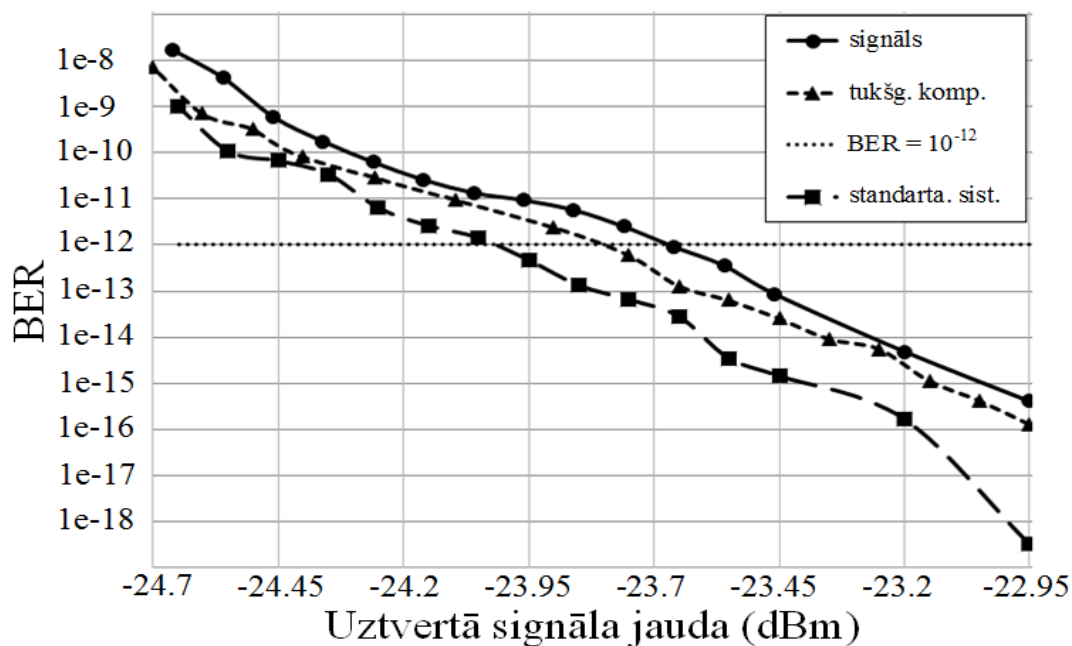
Att. 15. Simulācijas modelis vienkanāla sakaru sistēmai, kurā pārveide no *2PolSK* uz *OOK* intensitātes modulācijas formātu tiek veikta ar *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu.

No iegūtajiem rezultātiem tika secināts, ka tukšgaitas komponentei ir nepieciešama mazāka pumpējošā starojuma jauda *BER* vērtību zem 10^{-12} sliekšņa nodrošināšanai, neskatoties uz to, ka tukšgaitas komponentes pastiprinājums ir par 0,8 dB mazāks nekā signāla pastiprinājums (skat. att. 16.). Līdz ar to vienkanāla sistēmas gadījumā kā informatīvo signālu ir ieteicams uztvert tieši tukšgaitas komponenti. Šādi rezultāti ir skaidrojami ar to, ka signāls pie sākotnējās frekvences satur ortogonāli polarizētu loģiskās «0» komponenti, kas pārveidotajā *NRZ-OOK* signālā tiek interpretēti, kā troksnis.



Att. 16. *FOPA* ar lineāri polarizētu pumpējošo starojumu radītais pastiprinājuma spektrs signālam (nepārtraukta līnija) un tukšgaitas komponentei (raustīta līnija).

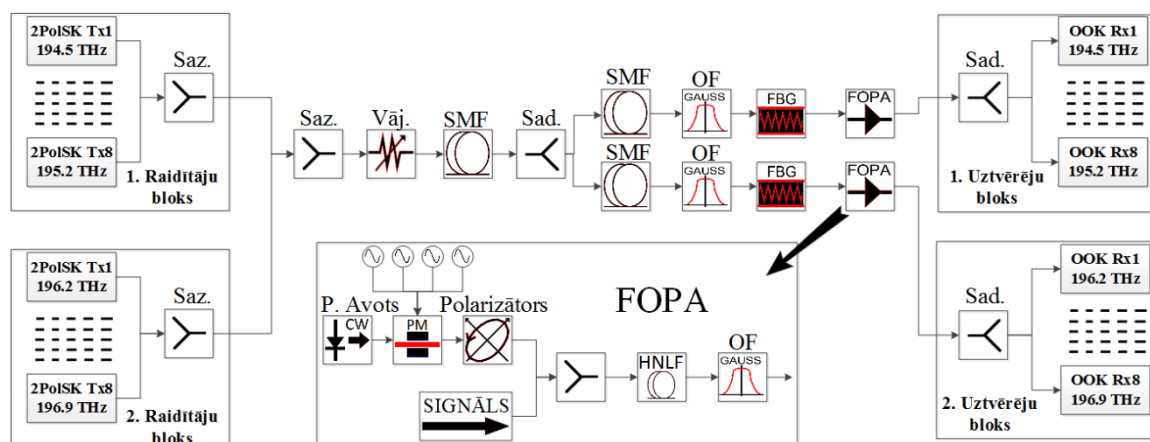
Tika konstatēts, ka nepieciešamā iegūtā *NRZ-OOK* signāla jauda, lai nodrošinātu *BER* zem 10^{-12} vērtības, ir $-23,6$ dBm, bet nepieciešamā tukšgaitas komponentes jauda ir $-23,8$ dBm (skat. att. 17.). Standarta vienkanāla sistēmā ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu nepieciešamais signāla līmenis *BER* vērtības zem 10^{-12} sliekšņa nodrošināšanai sasniedza -24 dBm. Tātad starp *NRZ-OOK* signālu no standarta vienkanāla sistēmas un no *2PolSK* uz *NRZ-OOK* pārveidoto signālu pastāv 0,4 dB jaudas sods. Īpaši jāuzsver, ka jaudas sods starp *NRZ-OOK* signālu no standarta vienkanāla sistēmas un ierosināto tukšgaitas komponenti bija par 0,1 dB mazāks — vien 0,2 dB. Šādi rezultāti ir skaidrojami ar to, ka *FWM* procesa gaitā ierosinātā tukšgaitas komponente nesatur sākotnēja *2PolSK* signāla loģiskās «0» komponentes starojumu, kas šajā gadījumā ir kā troksnis pārveidotajam *NRZ* signālam. Iegūtās jaudas soda vērtības ir attiecināmas uz relatīvo intensitātes troksni, kas tiek pārņemts no pumpējošā starojuma uz pastiprināmo signālu, kā arī uz *SPM* un *XPM* izraisīto signāla un pumpējošā starojuma *SOP* nesakritību.



Att. 17. BER vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas standarta NRZ-OOK vienkanāla sistēmā (raustīta līnija), sistēmā ar piedāvāto modulācijas formāta pārveides risinājumu pie sākotnējā signāla frekvencē (nepārtraukta līnija) un pie tukšgaitas komponentes frekvencē (punktēta līnija).

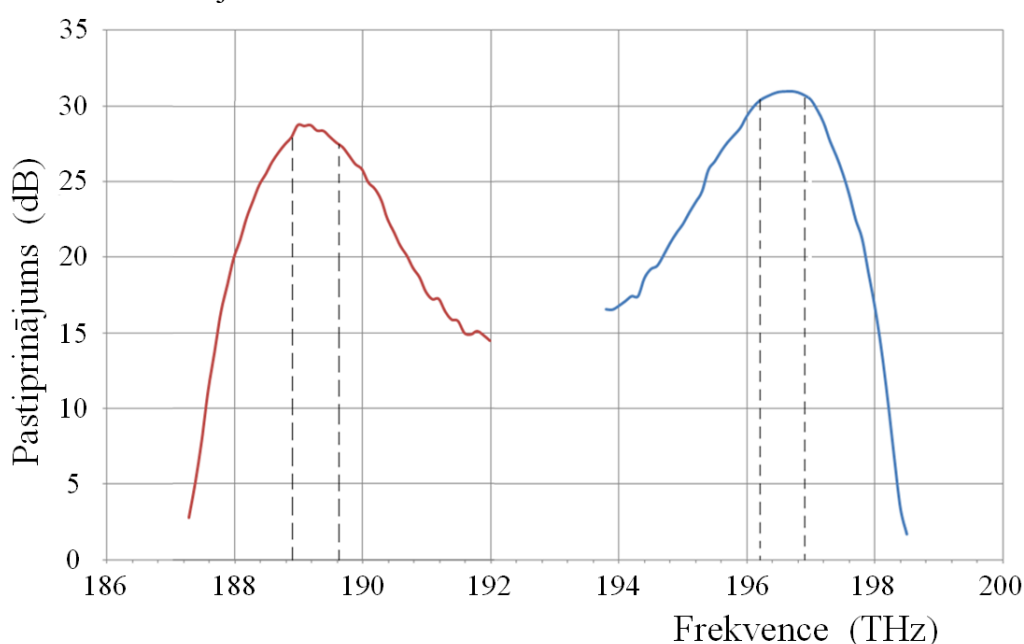
Daudzkanālu sistēmas gadījumā galvenais mērķis bija novērtēt izstrādātā modulācijas formāta pārveidošanas risinājuma darbaspēju pie starpkanālu šķērsrunas. Veicot 2PolSK signāla pārveidi uz NRZ-OOK modulācijas formātu, izmantojot FOPA ar lineāri polarizētu pumpējošo starojumu, īpašu uzmanību ir jāpievērš CC-FWM radītās starpkanālu šķērsrunas līmeņa kontrolei, jo pie pumpējošā starojuma un signālu SOP sakritības FWM process norisinās maksimāli efektīvi, tajā skaitā arī CC-FWM radīto trokšņveida spektrālo komponentu ģenerēšanās.

Piedāvāta risinājuma novērtēšanai sistēmā ar starpkanālu šķērsrunu tika izveidots 16 kanālu 10 Gbit/s DWDM sakaru sistēmas modelis ar 2PolSK modulācijas formātu un 100 GHz starpkanālu intervālu (skat. att. 18.). Šajā sistēmā piekļuves tīkls tika sadalīts divos zaros, pa 8 kanāliem katrā. Darbā tika aprakstīti tikai tie rezultāti, kas tika iegūti 2. piekļuves tīkla zarā. Signālu sadalīšanai uz 8 uztvērējiem tika izmantots optiskās jaudas sadalītājs ar 10,5 dB ienesto vājinājumu.



Att. 18. Simulācijas modelis 16 kanālu sakaru sistēmai ar 2 piekļuves tīkla zariem, kur katrā zarā FOPA ar vienu pumpējošo starojumu tiek izmantots kā pārveidotājs no 2PolSK uz OOK intensitātes modulācijas formātu.

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, 2. piekļuves tīkla zarā tika izmantots 790 mW 1554,15 nm pumpējošais starojums, kura fāze tika modulēta ar tādiem pašiem frekvenču toņiem kā vienkanāla sistēmas gadījumā: 180 MHz, 420 MHz, 1,087 GHz un 2,133 GHz. Tika konstatēts ka, lai nodrošinātu BER vērtības zem 10^{-12} sliekšņa, visām 8 tukšgaitas komponentēm ir nepieciešams par 35 mW lielāks pastiprinājums nekā signāliem pie sākotnējās frekvences. Iegūtais pastiprinājums tukšgaitas komponentēm ir vismaz par 2,2 dB mazāks, bet pastiprinājuma spektra slīpums maksimuma tuvumā ir lielāks nekā signālu frekvenču joslā (skat. att. 19.). Iegūtais pastiprinājuma līmenis signālu frekvenču joslā starp 8 kanāliem mainījās diapazonā no 30,3 līdz 30,9 dB, tātad pastiprinājuma atšķirība starp kanāliem sasniedza 0,6 dB. Starp tukšgaitas komponentēm tika konstatēta 2,6 dB pastiprinājuma atšķirība (no 26,1 līdz 28,7 dB), bet vislielākā pastiprinājuma atšķirība starp viena un tā paša kanāla signāla un tukšgaitas komponenti sasniedza 4,2 dB. Ar to arī ir skaidrojama par 35 mW lielākas jaudas nepieciešamība BER vērtību zem 10^{-12} sliekšņa iegūšanai visos 8 kanālos tukšgaitas komponentu frekvenču joslā.



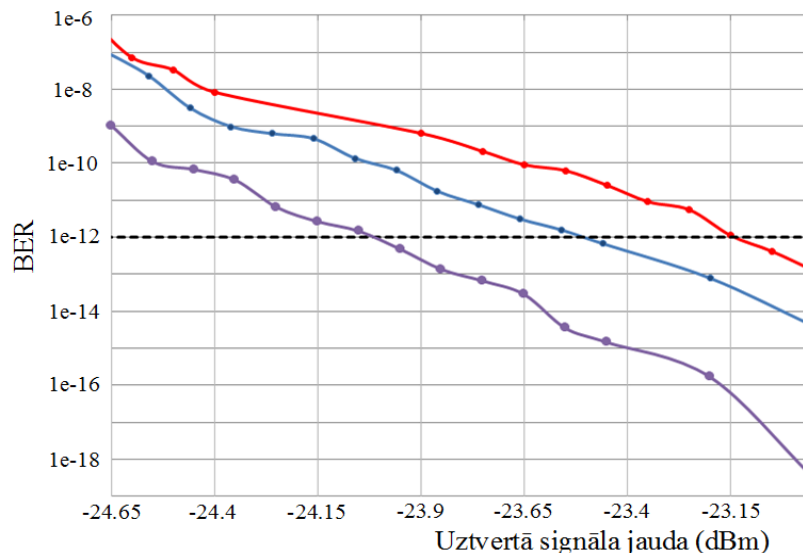
Att. 19. Sākotnējā signāla (zils) un tukšgaitas komponentu (sarkans) pastiprinājums, pielietojot *FOPA* ar lineāri polarizētu pumpējošo starojumu, kura jauda ir 790 mW un viļņa garums ir 1554,15 nm.

Piedāvātā risinājuma veiktspējas novērtēšanai rezultāti, kas tika iegūti piekļuves tīkla 2. zarā, tika salīdzināti ar standarta 8 kanālu *DWDM* sistēmu bez signālu pastiprināšanas. Tika salīdzinātas BER vērtību atkarības no uztvertā signāla jaudas 5. kanālā standarta 8 kanālu sistēmā un sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi gan sākotnējam signālam, gan signālam pie tukšgaitas komponentes frekvences. Kā redzams att. 20., lai nodrošinātu BER vērtības zem 10^{-12} sliekšņa, sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi nepieciešamā signāla jauda bija vismaz -23,5 dBm. Sistēmā ar standarta risinājumu attiecīgais nepieciešamais jaudas līmenis bija -23,9 dBm, līdz ar to šajā gadījumā jaudas sods starp signālu ar pārveidoto modulācijas formātu un signālu, kam sākotnējais modulācijas formāts bija *NRZ-OOK*, ir 0,4 dB. Īpaši jāuzsver tas, ka pretēji vienkanāla sistēmas gadījumam daudzkanālu sistēmā tukšgaitas komponentu BER vērtības bija lielākas nekā signāliem — uztverot 5. kanālam atbilstošo tukšgaitas komponenti, bija nepieciešams vismaz -23,15 dBm BER vērtību zem 10^{-12} sliekšņa nodrošināšanai, kas ir par 0,3 dB vairāk, nekā uztverot 5. kanāla signālu.

Tika konstatēts, ka tukšgaitas komponentes gadījumā ir novērojamas lielākas amplitūdas fluktuācijas, kas loģiskās «0» un loģiskā «1» līmeņus padara biezākus. Iemesls šādu amplitūdas

trokšņu ģenerēšanai ir *CC-FWM* parazītiskā mijiedarbe, kas parādās parametriskās pastiprināšanas rezultātā un rada trešās kārtas parazītiskās spektrālās komponentes, kuru frekvences sakrīt ar pārraidāmo signālu frekvencēm. Kā jau tika minēts iepriekš, tukšgaitas komponentu frekvenču joslā pastiprinājuma atšķirība starp 8 kanāliem bija daudz lielāka (par 2 dB) nekā signāla frekvenču joslā. Šīs pastiprinājuma atšķirības rezultātā tika novērota izteiktāka *CC-FWM* procesa izpausme, kas arī radīja papildu starpkanālu šķērsrunu. Papildus tam *CC-FWM* radītā šķērsruna bija novērojama ne tikai signālu frekvenču joslā, bet arī starp tukšgaitas komponentēm.

Tika arī konstatēts, ka pumpējošā starojuma fāzes modulācija radīja tukšgaitas komponentu spektrālo paplašināšanos par 40 %, kas savukārt izraisīja papildu starpkanālu



Att. 20. *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas 5. kanālā standarta sistēmā ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu (violet) un sistēmā ar *2PolSK* pārveidošanu uz *NRZ-OOK* modulācijas formātu signālam pie sākotnējās frekvencē (zils) un signālam pie tukšgaitas komponentes frekvences (sarkans).

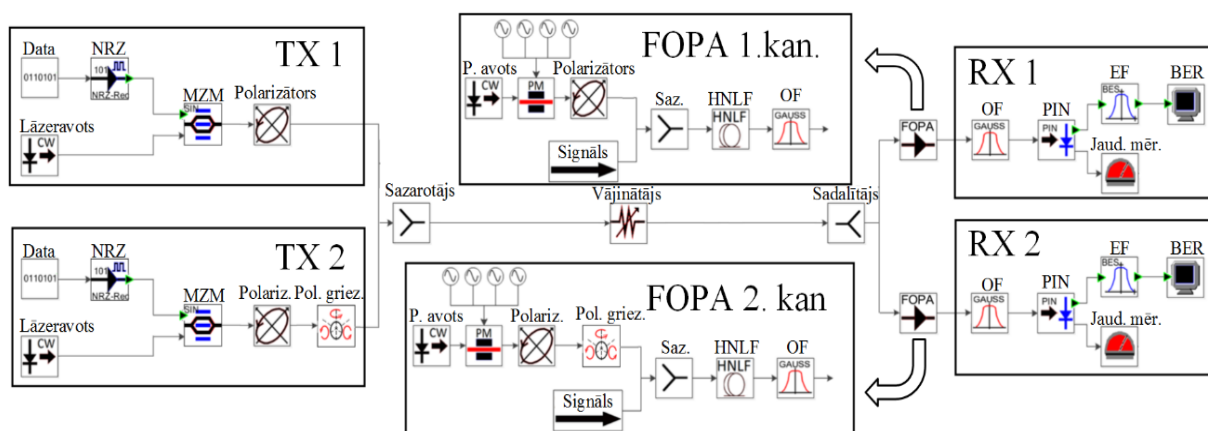
šķērsrunu. *CC-FWM* un tukšgaitas komponentu spektrālā paplašinājuma izraisītā starpkanālu šķērsruna ir galvenais iemesls, kāpēc tukšgaitas komponentu gadījumā jaudas sods attiecībā pret standarta sistēmu bija par 0,4 dB lielāks nekā signāliem sākotnējās frekvencēs.

Polarizācijas blīvētu signālu atdalīšana

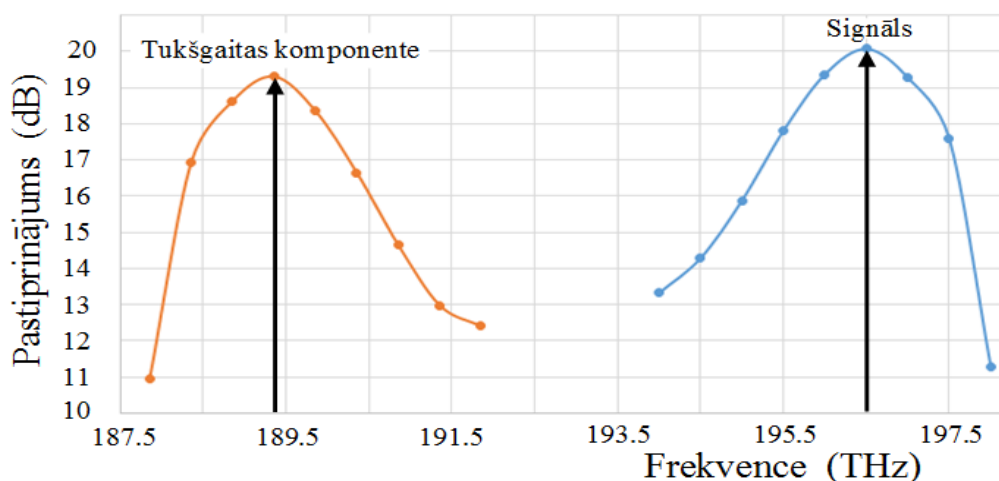
Otrs izpētītais *FOPA* pastiprinājuma polarizācijas atkarības pielietojums bija signāla ar konkrētu *SOP* izdalīšana no divu pēc polarizācijas stāvokļa multipleksētu *NRZ-OOK* signālu kombinācijas. Šim nolūkam tika izveidota 2 kanālu 10 Gbit/s sakaru sistēma ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu un blīvēšanu pēc polarizācijas (skat. att. 21.). Abi signāli, kuru *SOP* tika novietoti savstarpēji ortogonāli, tika pārraidīti, izmantojot centrālo nesējfrekvenci 196,5 THz.

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, tika pieņemts lēmums abu *FOPA* gadījumā lietot 530 mW 1553,9 nm pumpējošo starojumu, jo tieši šāda pumpējošā starojuma jauda bija viszemākā, kas spēja nodrošināt *BER* zem 10^{-12} sliekšņa gan 1., gan 2. kanālā. Iepriekš aprakstītie rezultāti parādīja, ka pumpējošā starojuma fāzes modulēšana var izraisīt tukšgaitas komponentu spektrālo paplašināšanos. Situācijā, kad ir liela varbūtība, ka abi ortogonāli polarizētie optiskie starojumi tiks novēroti vienlaikus loģiskā «1» līmenī, optisko starojumu *SOP* savstarpējā nobīde vairāk ietekmē pastiprināmā signāla kvalitāti nekā gadījumā, kad šāda vienlaikus loģisko «1» raidīšana netiek veikta, piemēram, *2PolSK* signāla gadījumā. Tāpēc ir būtiski minimizēt nevēlamas fāžu nobīdes starp pumpējošo starojumu un pastiprināmo signālu, kas var radīt arī signāla un pumpējošā starojuma savstarpējā *SOP* izvietojuma izmaiņu. Ņemot vērā šo faktu un vienlaikus novērojot arī *FOPA* radītā pastiprinājuma spektru un *OSNR*

pastiprinātāja izejā, pumpējošā starojuma fāzes modulēšanai tika izvēlēti šādi frekvenču toni: 0,13 GHz, 0,42 GHz, 1,087 GHz un 1,94 GHz. Iegūtais signāla pastiprinājums 1. kanālā sasniedza 20 dB, bet 2. kanālā — 20,1 dB. Tukšgaitas komponentu pastiprinājuma maksimums bija par 0,7 dB zemāks (skat att. 22.).



Att. 21. Divu kanālu 10 Gbit/s sakaru sistēmas modelis ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu, kanālu multipleksēšanu pēc polarizācijas stāvokļa un *FOPA* ar vienu pumpējošo starojumu, kas veic signāla ar noteiktu polarizācijas stāvokli izdalīšanu.

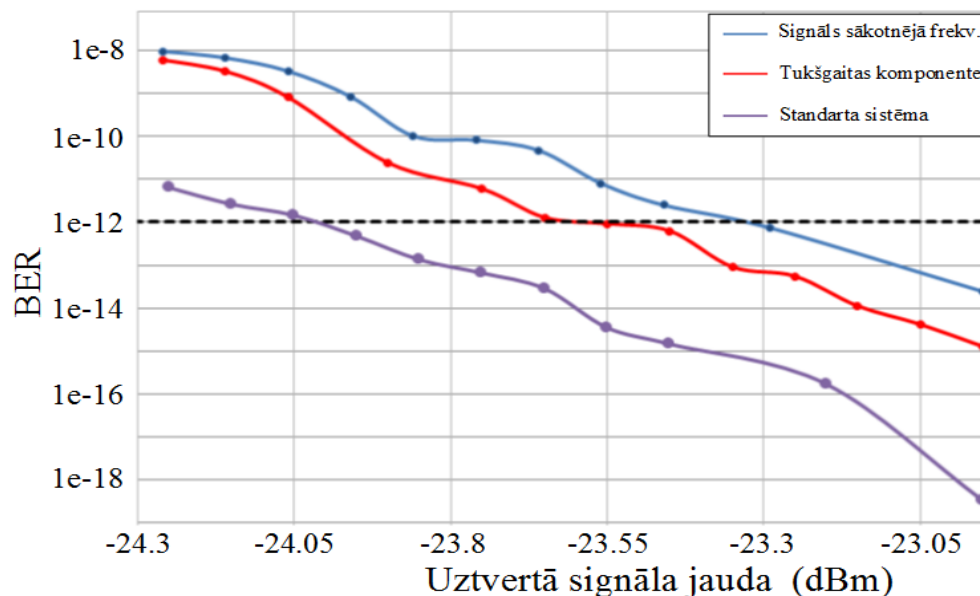


Att. 22. 1. kanālā iegūtais *FOPA* radītā pastiprinājuma spektrs signālam (zils) un tukšgaitas komponentei (oranžs).

Piedāvātā risinājuma veiktspējas novērtēšanai tika iegūta *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas, un šie rezultāti tika salīdzināti ar tādiem pašiem rezultātiem, kas tika iegūti standarta vienkanāla pārraides sistēmā ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu bez optiskā signāla pastiprināšanas. No rezultātiem, kas parādīti att. 23., var secināt, ka starp 1. kanālā detektēto signālu un signālu no standarta vienkanāla *NRZ-OOK* sistēmas ir 0,8 dB jaudas sods. Signālam, kas tika detektēts tukšgaitas komponentu frekvenču joslā, jaudas sods ir 0,5 dB.

Atšķirībā no sistēmas ar modulācijas formāta pārveidošanu šajā gadījumā tika novērota situācija, kad pie vienas frekvences ir iespējams, ka ortogonāli polarizēto komponentu loģiskais «1» pienāk vienlaikus abos kanālos. Līdz ar to ortogonāli polarizētā starojuma ietekme uz izdalītā signāla kvalitāti bija lielāka nekā sistēmā ar modulācijas formāta pārveidošanu. Galvenokārt tieši ar šo faktu ir skaidrojama lielāka jaudas soda vērtība nekā vienkanāla sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi. Mazāks jaudas sods tukšgaitas komponentes gadījumā ir skaidrojams ar to, ka 2. kanāla ortogonāli polarizētais starojums nav iesaistīts parametriskās pastiprināšanas un tukšgaitas komponentes ģenerēšanas procesā un līdz ar to neatspoguļojas pašā tukšgaitas komponentē. Neskatoties uz to, ka ortogonāli polarizētajam starojumam

(2. kanāls) ir daudz zemāks pastiprinājums (1–2 dB), tā jaudas līmenis joprojām ir pietiekami augsts, lai iespaidotu izdalītā signāla *BER* vērtību, kas mūsu gadījumā papildus radīja 0,3 dB jaudas sodu. Tukšgaitas komponentes izmantošana ļāva sasniegt zemāku jaudas sodu attiecībā pret standarta vienkanāla sistēmu ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu, bet *BER* vērtības zem 10^{-12} sliekšņa sasniegšanai bija nepieciešams lietot par 10 mW lielāku pumpējošā starojuma jaudu, nekā uztverot sākotnējo signālu ar frekvenci 196,5 THz.



Att. 23. *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas standarta vienkanāla sistēmā ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu (violets), pēc polarizācijas multipleksētā sistēmā izdalītam signālam (zils) un tukšgaitas komponentei (sarkans).

Salīdzinot pastiprinājuma spektrus vienkanāla sistēmā ar modulācijas formāta pārveidošanu un sistēmā ar pēc polarizācijas multipleksētu signālu izdalīšanu, tika konstatēts, ka pēdējā gadījumā sasniegtais pastiprinājums bija par 5,2 dB lielāks (14,8 un 20 dB attiecīgi), neskatoties uz to, ka pumpējošā starojuma jauda atšķīrās tikai par 5 mW. Tas tiek skaidrots ar šādiem diviem faktoriem:

- pirmkārt, sistēmā ar signāla izdalīšanu no ortogonāli polarizētu signālu kombinācijas signāla līmenis *HNLf* šķiedras ieejā bija par 3,4 dB zemāks (−44,1 dBm). Līdz ar to pastiprinātajam bija nepieciešama mazāka pumpējošā starojuma jauda konkrēta pastiprinājuma līmeņa nodrošināšanai;
- otrkārt, lai minimizētu tukšgaitas komponentu spektrālo paplašināšanos, sistēmā ar polarizācijas multipleksētu signālu izdalīšanu tika pārkonfigurēti frekvenču toņi, kas tika izmantoti pumpējošā starojuma fāzes modulēšanai. Pastiprinājuma atšķirība parāda, ka pie iegūtās konfigurācijas *SBS* nomākšana ir efektīvāka nekā sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi.

Apkopojot visu šajā nodaļā izklāstīto informāciju, var secināt, ka parametriskā pastiprinājuma polarizācijas atkarība var tikt izmantota optiskā starojuma ar noteiktu polarizācijas stāvokli izdalīšanai no divu ortogonāli polarizētu optisko starojumu plūsmas. *FOPA* ar lineāri polarizētu pumpējošo starojumu var tikt izmantots gan *2PolSK* signāla pārveidei *NRZ-OOK* modulācijas formātā, gan signāla izdalīšanai no divu pēc polarizācijas stāvokļa multipleksētu optisko signālu plūsmas. Abos gadījumos tika atrastas tādas *FOPA* konfigurācijas, kas nodrošināja signāla *BER* vērtības zem 10^{-12} sliekšņa, tajā pašā laikā nevienam no piedāvātajiem risinājumiem jaudas sods nebija lielāks par 1,8 dB attiecībā pret attiecīgajiem standarta risinājumiem.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

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

1. *Ramana-EDFA* kombinētā risinājuma izveidošana ļāva ne tikai izlīdzināt pastiprinājuma spektru, bet arī palielināt *OSNR* visos kanālos par 1,7–2,6 dB. Izmantojot Ramana sadalīto pastiprinātāju kaskādē kā priekšpastiprinātāju, tika panākts, ka *EDFA* strādā tuvāk piesātinājuma punktam, un līdz ar to *EDFA* ienesto trokšņu rādītājs samazinājās par 0,3–0,4 dB. *OSNR* palielinājums ir saistīts arī ar to, ka Ramana izkliedes koherentā rakstura dēļ *DRA* pastiprināja signālu efektīvāk nekā troksni, kas ļāva iegūt negatīvas ienesto trokšņu rādītāja vērtības (no –0,4 līdz –0,6 dB);
2. *Ramana-SOA* kombinētā risinājuma izveidošana ļāva izmantot tādu *SOA* pumpējošās strāvas vērtību, pie kuras *SOA* rada vismazāk pastiprināmā signāla kropļojumus. Rezultātā, izmantojot *Ramana-SOA* kombinēto risinājumu, izdevās iegūt aptuveni tādu pašu *BER* līmeni kā *SOA* gadījumā pie 1,5 reizes vājāka signāla, un sasniedzamais pārraides attālums palielinājās par 12 km jeb par 11 %;
3. mainot *FOPA* pumpējošā starojuma jaudu, mainās arī fāžu nesaskaņotības nelineārā daļa. Līdz ar to paralēli pumpējošā starojuma jaudas izmaiņām ir jākorrigē arī tā viļņa garums;
4. *FOPA* pumpējošā starojuma fāzes modulēšana, kas tika lietota *SBS* sliekšņa paaugstināšanai, izraisīja tukšgaitas komponentu spektrālo paplašināšanos par 54 %. Tādēļ sistēmās ar viļņa garuma pārveidi pumpējošā starojuma fāzes modulācijai lietoto frekvenču toni ir jāizvēlas tā, lai šī tukšgaitas komponentu spektrālā paplašināšanās būtu pēc iespējas mazāka;
5. manipulējot ar *FOPA* pumpējošo starojumu parametriem, ir iespējams panākt nesējsignālu skaita palielināšanos no 16 līdz 32, nodrošinot 100 GHz starpkanālu intervālu un 1,9 dB jaudas līmeņu atšķirību starp visiem kanāliem. Tika konstatēts, ka pie 0 dBm nesējsignāla jaudas līmeņa *FOPA* ieejā *CC-FWM* procesi izraisīs ievērojamu starpkanālu šķērsrunu. Šā iemesla dēļ, izmantojot parametrisko procesu rezultātā iegūtās tukšgaitas komponentes kanālu skaita dubultošanai, ir nepieciešams kontrolēt nesējsignālu jaudu pastiprinātāja ieejā;
6. tika konstatēts, ka, pat pielietojot polarizācijas stāvokli saglabājošas *HNLf* šķiedras, *SPM* un *XPM* iespaidā ir novērojama signāla un *FOPA* pumpējošā starojuma *SOP* savstarpējā izvietojuma izmaiņa, tiem izplatoties *HNLf*. Šīs izmaiņas rezultātā signāls, kura *SOP* bija ortogonāls pumpējošā starojuma *SOP* *HNLf* šķiedras ieejā, šķiedras izejā bija pastiprināts par 1,5–1,6 dB;
7. starp izveidoto vienkanāla sistēmu ar *2PolSK* signāla pārveidi uz *NRZ-OOK* modulācijas formātu un standarta vienkanāla *NRZ-OOK* modulācijas formāta sistēmu pastāv 0,4 dB jaudas sods. Bet ierosinātās tukšgaitas komponentes gadījumā šis jaudas sods bija par 0,2 dB mazāks. Šādi rezultāti ir skaidrojami ar to, ka *FWM* procesa gaitā ierosinātā tukšgaitas komponente nesatur sākotnējā *2PolSK* signāla loģiskās «0» komponentes starojumu, kas pārveidotajā *NRZ* signālā ir interpretējams kā troksnis;
8. daudzkanālu sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi starp tukšgaitas komponentēm tika novērota izteiktāka *CC-FWM* procesu izpausme nekā starp kanāliem pie sākotnējām frekvencēm. Tas ir izskaidrojams ar to, ka *BER* vērtību zem 10^{-12} sliekšņa iegūšanai visos 8 kanālos tukšgaitas komponentu frekvenču joslā bija nepieciešama par 35 mW lielāka pumpējošā starojuma jauda nekā signāliem sākotnējā frekvenču joslā. Šīs pastiprinājuma atšķirības rezultātā tika novērota izteiktāka *CC-FWM* procesu izpausme, kas arī radīja papildus starpkanālu šķērsrunu. Papildus tam *CC-FWM* radītā šķērsruna tika pārnesta ne tikai no spektrālajām komponentēm signāla frekvenču joslā, bet tika ģenerēta arī starp tukšgaitas komponentēm;
9. atšķirībā no sistēmas ar modulācijas formāta pārveidošanu sistēmā ar signāla izdalīšanu no divu pēc polarizācijas blīvētu signālu plūsmas ir iespējama situācija, kad pie vienas

frekvences ortogonāli polarizēto komponentu loģiskais «1» tiek novērots abos kanālos vienlaikus. Līdz ar to ortogonāli polarizētā starojuma ietekme uz izdalītā signāla kvalitāti bija par 0,4 dB (tukšgaitas komponentu gadījumā par 0,3 dB) lielāka nekā sistēmā ar modulācijas formāta pārveidi.

Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti starptautisko «Viedas pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai» (ESF) un «Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde» (ERAF) projektu, kā arī «Tehnoloģijas drošai un uzticamai gudrajai pilsētai» (valsts pētījumu programmas) un «Aktīva kombinēta viļņgarumdales blīvēta šķiedru optiskas pārraides sistēma» (RTU) zinātniskās pētniecības projektu realizācijai. Saistībā ar sadarbības līgumu aktualitāte par optisko signālu pastiprināšanas efektivitātes paaugstināšanu šķiedru optikas pārraides sistēmās tika ietverta VAS «Latvijas Valsts radio un televīzijas centrs» sagatavotajā «Maģistrālo tīklu tehnoloģiju un to projektēšanas pamattendenču novērtējumā» (ERAF fonda projekts Nr. 3DP/3.2.2.3.0/12/IPIA/SM/001 «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos»).

Balstoties uz darbā atspoguļotajiem rezultātiem, sagatavots Latvijas patenta pieteikums par daudzkanālu gaismas avota izveidi viļņgarumdales blīvētā šķiedru optiskajā piekļuves sakaru sistēmā. Patenta iesnieguma numurs P-15-45.

LITERATŪRA

- [1] Li T., Yu J., Jie L., Lau A.P.T., Nan C. and Chao L. «Advanced modulation formats for short reach optical communication systems,» *Network, IEEE* , Vol. 27, No. 6, pp. 6.–13., November–December 2013.
- [2] Ali R., Ali M. S., Mir T., Shabir B. and Lilla U. F. «Analytical review of advanced optical modulation formats», *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)*, Vol 4, No. 1, pp. 35.–43., February 2015.
- [3] Rahman T., Rafique D., Napoli A., de Man E., Spinnler B., Bohn M., Okonkwo C. M., Koonen A. M. J. and de Waardt H. «Ultralong Haul 1.28-Tb/s PM-16QAM WDM Transmission Employing Hybrid Amplification,» *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 9, pp. 1794.–1804., May 1, 2015.
- [4] Marom D. M. and Blau M. «Switching solutions for WDM-SDM optical networks,» *Communications Magazine, IEEE* , Vol. 53, No. 2, pp. 60.–68., Feb. 2015.
- [5] Morsy-Osman M., Chagnon M., Poulin M., Lessard S. and Plant D.V. «224-Gb/s 10-km Transmission of PDM PAM-4 at 1.3 μm Using a Single Intensity-Modulated Laser and a Direct-Detection MIMO DSP-Based Receiver,» *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No.7, pp. 1417.–1424., April 1, 2015.
- [6] Cisco Systems Inc. «The Zettabyte Era: Trends and Analysis», white paper. – June 2014 – pp. 1.–24.
- [7] Cisco Systems Inc. «Cisco VNI: Forecast and Methodology, 2013–2018», white paper. – June 2014. – pp. 1.–14.
- [8] BELL LABS Metro Network Traffic Growth: An Architecture Impact Study Strategic White Paper 2013.
- [9] Pilipetskii A.N. «High-capacity undersea long-haul systems,» *Selected Topics in IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 484.–496., July–Aug. 2006.
- [10] Sharma P., Kumar A. and Sharma V. K. «Performance analysis of high speed optical network based on Dense Wavelength Division Multiplexing,» *2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, pp. 446.–449., 7–8 Feb. 2014.
- [11] Kurosu T., Namiki S., Akimoto R., Kuwatsuka H., Sekiguchi S., Yasuoka N., Morito K., Hasama T. and Ishikawa H. «Demonstration of 172-Gb/s Optical Time Domain Multiplexing and Demultiplexing Using Integratable Semiconductor Devices,» *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 19, pp. 1416.–1418., Oct. 1, 2010.
- [12] Sharma N., Vij R. and Badhan N. «Enhanced spectral efficiency for intensity modulated DWDM systems,» *2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC)*, pp. 1.–6., Feb. 27, 2015 March 1, 2015.
- [13] Sharma N., Vij R. and Badhan N. «Enhanced spectral efficiency for intensity modulated DWDM systems,» *Twenty First National Conference on Communications (NCC)*, pp. 1.–6., Feb. 27–March 1, 2015.
- [14] Sharma P., Kumar A. and Sharma V. K. «Performance analysis of high speed optical network based on Dense Wavelength Division Multiplexing,» *International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, pp. 446.–449., Feb. 7–8, 2014.

- [15] Agrawal G. P. «Fiber Optics Communications Systems», John Wiley & Sons, USA, 2002, 561 p.
- [16] Thyagarajan K. and Ghatak A. «Fiber Optic Essentials», John Wiley & Sons Inc., Canada, 2007, 259 p.
- [17] Kikuchi K. «Ultra-long-haul optical transmission characteristics of wavelength-division multiplexed dual-polarisation 16-quadrature-amplitude-modulation signals,» *Electronics Letters*, Vol. 46, No. 6, pp. 433.–434., March 18, 2010.
- [18] Downie J. D. «High-capacity long-haul transmission using ultra-low loss optical fiber,» *17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, pp. 172.–173., July 2.–6. 2012.
- [19] Šalik P., Čertík F. and Roka R. «Duobinary Modulation Format in Optical Communication Systems», *Advances in Signal Processing*, Vol. 3., Iss. 1., pp. 1.–7., 2015.
- [20] 3MTM technical specifications «PLC Optical Splitters», USA, pp. 1.–2., 2008.
- [21] Baney D.M. and Stimpel J. «WDM EDFA gain characterization with a reduced set of saturating channels,» *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, No. 12, pp. 1615.–1617., Dec. 1996.
- [22] Sharma M. and Sharma V. R. «Gain flattening of EDFA in C-band using RFA for WDM application,» *2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN 2015)*, pp. 346.–351., 19.–20. Feb. 2015.
- [23] Becker P. C., Plisson N. A. and Simpson J. R. «Erbium Doped Fiber Amplifiers», Academic Press, USA, 1999, 481 p.
- [24] Houbavlis T., Zoiros K. E., Kalyvas M., Theophilopoulos G., Bintjas C., Yiannopoulos K., Pleros N., Vlachos K., Avramopoulos H., Schares L., Occhi L., Guekos G., Taylor J. R., Hansmann S. and Miller W. «All-optical signal Processing and applications within the esprit project DO_ALL,» *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 781.–801., Feb. 2005.
- [25] Oxenlowe L. K., Pu M., Ding Y., Hu H., Da Ros F., Vukovic D., Jensen A. S., Ji H., Galili M., Peucheret C. and Yvind K. «All-optical signal processing using silicon devices,» *European Conference on Optical Communication (ECOC 2014)*, pp. 1.–3., 21.–25. Sept. 2014.
- [26] Willner A. E., Khaleghi S., Chitgarha M. R. and Yilmaz O. F. «All-Optical Signal Processing», *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 32., No. 4, February 15th, 2014.
- [27] Chu C.-H., Lin S.-L., Chan S.-C. and Hwang S.-K. «All-Optical Modulation Format Conversion Using Nonlinear Dynamics of Semiconductor Lasers,» *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 48, No. 11, pp. 1389.–1396., Nov. 2012.
- [28] Ozolins O., Parts R., Bobrovs V. «Impact of cascaded MRRs on all-optical clock recovery from 40 Gbit/s RZ-OOK signal,» *9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2014)*, pp. 541.–545., 23.–25. July 2014.
- [29] Hisano D., Maruta A. and Kitayama K.-I. «Timing detector using cross gain modulation in semiconductor optical amplifier for adaptive all-optical signal processing,» *18th Microoptics Conference (MOC 2013)*, pp. 1.–2., 27.–30. Oct. 2013.
- [30] Hu H., Jopson R. M., Gnauck A. H., Dinu M., Chandrasekhar S., Xie C. and Randel S. «Parametric Amplification, Wavelength Conversion, and Phase Conjugation of a 2.048-

- Tbit/s WDM PDM 16-QAM Signal,» *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 7, pp. 1286.–1291., April 1, 2015.
- [31] Hansryd J. and Andrekson P. A. «O-TDM demultiplexer with 40-dB gain based on a fiber optical parametric amplifier,» *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, No. 7, pp. 732.–734., July 2001.
 - [32] Shama H. B., Gulati T. and Rawat B. «Evaluation of Optical Amplifiers», *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, No. 1, 2012, pp. 663.–667.
 - [33] Csele M. «Fundamentals of Light Sources and Lasers», John Wiley & Sons Inc., Canada, 2004, 343 p.
 - [34] Thyagarajan K. and Ghatak A. «Fiber Optics Essentials», John Wiley & Sons Inc., Canada, 2007, 259 p.
 - [35] Forestieri E. «Optical Communication Theory and Techniques», Springer Science + Business Media Inc., USA, 2005, 216 p.
 - [36] Kaminow I. P., Li T. and Willner A. E. «Optical Fiber Telecommunications: Components and Subsystems», Academic Press, USA, 2008, 945 p.
 - [37] Agrawal G. P. «Applications of Nonlinear Fiber Optics», Academic Press, USA, 2001, 473 p.
 - [38] Karasek M., Honzatko P., Vojtech J., Radil J. «Multi-wavelength conversion at 10 Gb/s and 40 Gb/s based on 2 pumps FOPA», *13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2011)*, 2011, pp. 1.–4.
 - [39] Temprana E., Ataie V., Peric A., Alic N., Radic S. «Wavelength conversion of QPSK signals in single-pump FOPA with 20 dB conversion efficiency,» *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC 2014)*, 9.–13. Mar. 2014, pp. 1.–3.
 - [40] Ruo-Ding L., Kumar P., W. Kath W. L. «Dispersion Compensation with Phase-sensitive Optical Amplifiers» *IEEE Journal of Lightwave Technology*, No. 12, 1994, pp. 541–549.
 - [41] Wang J., Ji H., Hu H., Mulvad H. C. H., Galili M., Palushani E., Jeppesen P., Yu J. L., Oxenlowe L. K. «All-optical 2R regeneration of a 160-Gbit/s RZOOK serial data signal using a FOPA», *IEEE Photonics Conference (IPC 2012)*, 23.–27. Sept. 2012, pp. 108.–109.
 - [42] Wang J., Yu J., Meng T., Miao W., Sun B., Wang W., Yang E., «Simultaneous 3R Regeneration of 4*40-Gbit/s WDM Signals in a Single Fiber», *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1816–1822, 2012.
 - [43] Lee H. H., Cho S. H., Lee J. H., Lee S. S. «Excess intensity noise suppressed 100-GHz spectrum-sliced WDM-PON with pre-spectrum-sliced seed light source», *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010)*, 19.–23. Sept. 2010, pp. 1.–3.
 - [44] Spolītis S., Olonkins S., Poriņš J. «Realization of Dense Bidirectional Spectrum Sliced WDM-PON Access System», *9th International Symposium on Communications Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2014)*, *Conference Proceedings*, 2014, pp. 1.–6.
 - [45] Ivanovs Ģ., Ļašuks I., Ščemeļevs A. «A Hybrid TDM/WDM-PON System with Fwm-Generated Source of Multiwavelength Optical Signals», *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 47, Nr. 5, 2010, pp. 3.–14.

- [46] Mathlouthi W., Vacondio F., Rusch L. A. «High-Bit-Rate Dense SS-WDM PON Using SOA-Based Noise Reduction With a Novel Balanced Detection», *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 22, Nov. 15. 2009, pp. 5045.–5055.
- [47] Fok M. P., Shu C. «Bandwidth enhanced multi-wavelength source from an SBS-assisted fiber ring laser using four-wave mixing in a highly nonlinear bismuth oxide fiber», *Conference on Lasers and Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2006)*, 21.–26. May 2006, pp. 1.–2.