

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Lilita Ģēgere

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorante

**JAUNĀS PAAUDZES ŠĶIEDRU OPTISKO
PASTIPRINĀTĀJU IZPĒTE UN NOVĒRTĒJUMS
BLĪVĒTĀS SAKARU SISTĒMĀS**

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Ģēģere, L. Jaunās paaudzes šķiedru optisko pastiprinātāju izpēte un novērtējums blīvētās sakaru sistēmās. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-08" 2021. gada 27. augusta lēmumu, protokols Nr. 2.

<https://doi.org/10.7250/9789934226861>

ISBN 978-9934-22-686-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 26. novembrī plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ģirts Ivanovs,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Roberts Kadiķis,
Elektronikas un datorzinātņu institūts, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Artis Teilāns,
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Lilita Ģeģere (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 72 attēli, septiņas tabulas, viens pielikums, kopā 126 lappuses. Literatūras sarakstā ir 175 nosaukumi.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	5
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	7
Tēmas aktualitāte	7
Darba mērķis un uzdevumi.....	8
Pētījumu metodika	8
Promocijas darba galvenie rezultāti.....	9
Promocijas darba praktiskā vērtība	10
Promocijas darbā aizstāvamās tēzes	10
Rezultātu aprobācija.....	10
Darba apjoms un struktūra	11
PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS	13
Pirmā nodaļa.....	13
Otrā nodaļa	14
Trešā nodaļa.....	19
Ceturta nodaļa.....	22
Piektā nodaļa	25
Sestā nodaļa.....	29
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI.....	34
IZMANTOTĀS LITERATŪTAS SARAKSTS	35

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

ASE – Amplified Spontaneous Emission – pastiprinātā spontānā emisija

AWG – Arrayed Waveguide Gratings – viļņvadu masīva režģis

B

BER – Bit Error Rate – bitu kļūdu attiecība

BLS – Broadband Light Source – platjoslas gaismas avots

C

CD – Chromatic Dispersion – hromatiskā dispersija

CW – Continuous Wave laser – nepārtraukta starojuma lāzers

D

DC – Double-clad – dubultapvalks

DCF – Dispersion Compensating Fiber – dispersiju kompensējoša šķiedra

DEMUX – Demultiplexor – demultipleksors

DFA – Doped Fiber Amplifier – leģētas šķiedras pastiprinātājs

DPSK – Differential Phase Shift Keying – diferenciālā fāzes manipulācija

DRA – Distributed Raman Amplifier – sadalītais Ramana pastiprinātājs

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – blīvas viļņgarumdales blīvēšana

E

EBF – Electrical Bessel Filter – elektriskais Beseļa filtrs

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs

EF – Electrical Filter – elektriskais filtrs

EYE – Eye Diagram Oscilloscope – acu diagrammu osciloskops

EYDFA – Erbium-Ytterbium Doped Fiber Amplifier – ar erbiju un iterbiju leģētu šķiedru optiskais pastiprinātājs

F

FBG – Fiber Bragg Grating – šķiedras Brega režģis

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

H

HNLF – High Non-Linearity Fiber – paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

I

ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication standardization Sector – Starptautiskā telekomunikāciju savienība – Telekomunikāciju standartizācijas sektors.

L

LRA – Lumped Raman Amplifier – diskrētais Ramana pastiprinātājs

M

MLR – Mixed Line Rate – kombinētie līnijas ātrumi

MMF – Mixed Modulation Format – kombinētais modulācijas formāts

MZM – Mach-Zehnder Modulator – Maha-Cendera modulators

MUX – Multiplexor – multipleksors

N

NF – Noise Figure – ienesto trokšņu rādītājs

NGPON – Next Generation PON – nākamās paaudzes *PON*

NRZ – Non-Return-to-Zero – neatgriešanās loģiskas nulles stāvoklī kods

O

ODN – Optical Distribution Network – optiskais sadales tīkls

OF – Optical Filter – optiskais filtrs

OGF – Optical Gaussian Filter – Gausa optiskais filtrs

OLT – Optical Line Terminal – optiskais līnijas terminālis

ONT – Optical Network Terminal – optiskais tīkla terminālis

ONU – Optical Network Unit – optiskā tīkla iekārta

OOK – On-Off Keying – signāla intensitātes modulācijas formāts

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

P

PIN – PIN fotodiode

PP – Parametric pump – parametriskā pumpēšana

PON – Passive Optical Network – pasīvais optiskais tīkls

Q

QAM – Quadrature-amplitude Modulation – kvadrātiskās amplitūdas modulācija

QPSK – Quadraturephase-shift Keying – kvadratūras fāzes manipulācija

R

RP – Raman pump – Ramana pumpēšana

RX – Receiver – uztvērējs

S

SMF – Single Mode Fiber – vienmodas optiskā šķiedra

SOA – Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

SRS – Stimulated Raman Scattering – stimulēta Ramana izkliede

SS-WDM – Spectrum Sliced WDM – spektrāli sagriezts *WDM*

Š

ŠOPS – šķiedru optiskā pārraides sistēma

T

TX – Transmitter – raidītājs

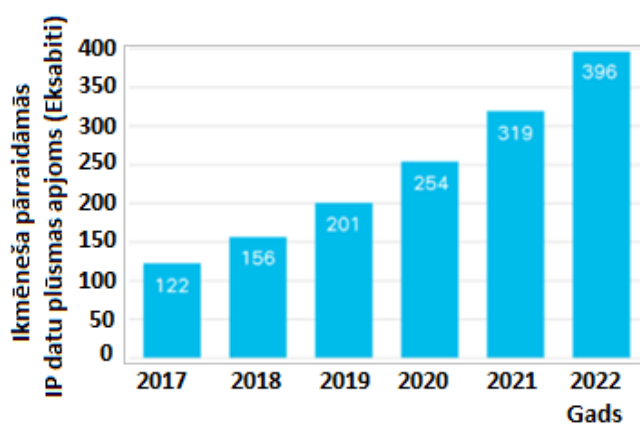
W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Informācijas tehnoloģiju nozare gadu no gada attīstās, un ir vērojams straujš pārraidāmās informācijas apjoma palielinājums. Informācijas apjoma pieaugums ir skaidrojams ar interneta lietotāju, globālajā tīklā reģistrēto iekārtu pieaugumu un piedāvāto pakalpojumu klāsta paplašināšanos: augstas izšķirtspējas video pārraides; videokonferences, mākoņdatošana; e-pakalpojumi; tīmekļa pārlūkošana; failu lejupielāde un *M2M* (angl. val. *machine to machine*). Tāpēc pieaug pieprasījums pēc lielākas telekomunikāciju tīkla kapacitātes. Saskaņā ar *Cisco* prognozes datiem, globālā *IP* datu plūsmas apjoms līdz 2022. gadam sasniegs 4,8 zetabitus, salīdzinot ar 2017. gadu (skat. 1. att.). 1. attēlā redzams, ka 2022. gadā ikmēneša pārraidāmā *IP* trafika apjoms sasniegs 396 eksabitus [1].



1. att. *Cisco* prognozējamais ikmēneša pārraidāmā *IP* trafika apjoms [1].

Pēdējos 20 gados optisko komunikāciju tehnoloģijās novērotas pārraides caurlaides spējas palielinājums šķiedrā un sasniedzis vairākus Tbit/s pārraides ātrumu. Optiskās pastiprināšanas joslas platums ir būtisks ierobežojošais faktors garām sakaru sistēmām un tīkliem. Patlaban pārraidei garos attālumos pie nelieliem zudumiem (vājinājums 0,2 dB/km) izmanto C-joslu (1530–1550 nm) vai L-joslu (1565–1625 nm), kur katra optiskā pastiprinātāja joslas platums ir aptuveni 40 nm (5 THz) [2]. Jau tagad ir paredzams, ka optiskie pastiprinātāji pārklāj S-joslas diapazonu (1460–1530 nm), kur kopējais optiskās pastiprināšanas joslas platums var būt līdz 120 nm (15 THz) un kopējā optiskās pārraides sistēmas caurlaides spēja varētu sasniegt 150 Tbit/s [3].

Optiskos jaudas zudumus rada vājinājums optiskajā šķiedrā (standarta vienmodas šķiedras (*SSMF*) vājinājums ir aptuveni 0,2 dB/km, ja viļņa garums ir 1550 nm). Vājinājumam ir zema vērtība, taču tā ietekme uzkrājas ar katru kilometru un pavājina pārraidāmo signālu vairāku simtu vai tūkstošu kilometru garās pārraides sistēmās. Ik pēc 50 km līdz 100 km signāls ir novājināts par 10–20 dB, un optisko signālu nepieciešams atjaunot vai pastiprināt [4]. Lai kompensētu uzkrāto signāla vājinājumu, var izmantot reģeneratorus vai optiskos pastiprinātājus [9]. Aktīvo elementu skaits pārraides sistēmās ar reģeneratoriem būtiski pasliktināja sistēmas pieejamību kopumā [27]. *WDM* pārraides sistēmās reģeneratoru izmantošana ir dārgs un sarežģīts risinājums, jo pārraidāmā signāla kanāliem nepieciešama demultipleksēšana,

detektēšana, pārveidošana elektriskajā strāvā, atjaunošana un elektriskā signāla pārveidošana optiskajā signālā [2]. Optiskie pastiprinātāji ir otrs veids, kā kompensēt vājinājumu. Optiskais pastiprinātājs ir optiskā ierīce, kas ietekmē ŠOPS attīstību, jo spēj pastiprināt optiskos signālus noteiktā frekvenču diapazonā un nodrošina pastiprināšanu bez optiski elektriskās pārveidošanas [10]. Optiskie pastiprinātāji pastiprina vienlaikus vairākus pārraidāmos kanālu signālus. Optisko signālu pastiprināšana galvenokārt balstās uz enerģijas pāreju no pumpējošā starojuma vai no cita enerģijas veida uz pastiprināmo optisko starojumu. Dažādos optisko pastiprinātāju tipos šis process tiek īstenots dažādi. Pastiprinātāju izmantošana kļūva pieejama arī *WDM* sistēmās, kā arī veicināja optiskās komutācijas ieviešanu [7].

Telekomunikāciju sistēmās ir dažādi optisko pastiprinātāju tipi: pusvadītāju pastiprinātāji (*SOA*); ar retzemju elementiem leģētas šķiedras pastiprinātāji (*xDFA*); Ramana un Briljuēna pastiprinātāji; parametriskie pastiprinātāji (*FOPA*). Optiskajos pastiprinātājos izmanto atšķirīgus efektus signāla pastiprinājuma sasniegšanai [11].

Visā pasaulē arvien vairāk un vairāk tiek pētītas šķiedru optiskās pārraides sistēmas (ŠOPS), kas ļautu palielināt pārraides ātrumu un uzlabot esošo pārraides sistēmu veiktspēju. Tiek pētītas jaunas optiskās šķiedras, jaunas pārraides sistēmu tehnoloģijas un jaunās paaudzes optiskie pastiprinātāji, kas spētu pārraidīt informāciju garākos attālumos un ar lielākiem pārraides ātrumiem.

Darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot visus iepriekš minētos faktus, tika izvirzīts promocijas **darba mērķis**: izpētīt un novērtēt optisko pastiprinātāju darbību *WDM* sakaru sistēmās, un datorsimulācijas programmā izstrādāt jauna tipa *EYDFA* optiskās ierīces modeli ar apvalka pumpēšanas tehnoloģiju.

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

1. Analizēt tehnisko un zinātnisko literatūru par esošo optisko pastiprinātāju darbību *WDM* sakaru sistēmās.
2. Izpētīt un novērtēt *EDFA* optiskā pastiprinātāja veiktspēju atkarībā no pastiprinātāja izvietojuma optiskajā līnijā, mainot starpkanālu intervālu sakaru sistēmā: 37,5 GHz, 50 GHz un 100 GHz; mainot pastiprinājuma apgabala diapazonu: 75 km, 100 km un 150 km.
3. Novērtēt 16 kanālu optiskās *WDM-PON* piekļuves sistēmas veiktspēju ar platjoslas *ASE* gaismas avotu un *DCM* moduli.
4. Novērtēt kombinētās sakaru sistēmas realizāciju 16 kanālu *WDM-PON* sistēmā, izmantojot kombinētos modulācijas formātus un kombinētos datu pārraides ātrumus.
5. Novērtēt diskrēto un sadalīto Ramana pastiprinātāju veiktspēju.
6. Novērtēt kombinēto Ramana-*EDFA*, Ramana-*SOA* un Ramana-*FOPA* pastiprinātāju darbību *WDM* pārraides sistēmā.
7. Izstrādāt *EYDFA* šķiedru optiskā pastiprinātāja modeli datorsimulācijas programmā, un novērtēt apvalka pumpēšanas tehnoloģijas lietojumu signāla pastiprināšanai C-joslā.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā problēmu analīzei un izvirzīto uzdevumu īstenošanai izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentālie mērījumi. Skaitliskās

simulācijas veiktas, izmantojot šķiedru optisko sistēmu simulācijas programmatūru (*Rsoft OptSim* un *VPIphotonics Design Suite*). Skaitlisko simulāciju rezultāti iegūti, izmantojot nelineāro Šrēdingera vienādojumu, tiešo un inverso diskreto ātro Furjē transformāciju, kā arī Monte Karlo metodi bitu kļūdu attiecību (*BER*) novērtēšanai. Optisko pastiprinātāju konfigurēšanai un parametru novērtēšanai iegūtas un izmantotas optiskās jaudas vērtības, jaudas spektrālie blīvumi un acu diagrammas, kā arī bitu kļūdu attiecības vērtības. *WDM* pārraides sistēmu kvalitātes novērtēšanai izmantota visaugstākā *BER* starp visiem kanāliem (sistēmas sliktākais kanāls). Darbā aprakstītie zinātniskie eksperimenti realizēti RTU *ComTech* pētniecības centrā.

Promocijas darba galvenie rezultāti

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Izstrādāts kombinētais Ramana-*FOPA* pastiprinātāja datormodelis S-joslas (1460–1530 nm) daudzkanālu pārraides sistēmai, kas nodrošina vienmērīgāku un plašāku pastiprinājumu, salīdzinot ar esošajiem pastiprinātājiem.
2. Izstrādāts jauna tipa *EYDFA* datormodelis ar apvalka pumpēšanas tehniku, kas ar zemu ieejas signāla jaudu (~ -20 dBm/kanāls) nodrošina līdz 40 kanālu pastiprināšanu C-joslā.

Promocijas darba izstrādes laikā iegūti vairāki **galvenie secinājumi**.

1. Pārraides sistēmās ar *EDFA* pastiprinātāju, kur kanālu intervāls ir zem 100 GHz, ir nepieciešama pumpēšanas jauda virs 60 mW, lai nodrošinātu atbilstošu pastiprināmā signāla kvalitāti un *BER* vērtības zem noteiktā līmeņa 10^{-9} . Ja intervāls ir zem 50 GHz, tad blakus kanālu spektru pārklāšanās ir neizbēgama un jaudas soda vērtība ir lielāka par 0,20 dB.
2. Sistēmās ar vairākiem *EDFA* pastiprināšanas posmiem no enerģijas patēriņa viedokļa optimālākais risinājums ir sistēma ar trīs *EDFA* pastiprinātājiem un 100 km pastiprināšanas diapazonu, jo kopējā sistēmas pumpēšanas jauda ir mazāka (105 mW) un pietiek ar 24 m *EDF* šķiedras, lai nodrošinātu nepieciešamo signāla kvalitāti un sistēmas *BER* būtu zem 10^{-9} . Jaudas sods *WDM* sistēmai ar 3 *EDFA* pastiprinātājiem attiecīgā pret sistēmu bez pastiprināšanas ir tikai 0,32 dB.
3. Izmantojot tikai vienu platjoslas *ASE* gaismas avotu visiem lietotājiem un DCM moduli dispersijas kompensācijai, pētāmā 16 kanālu *WDM* optiskās piekļuves sistēma nodrošināja datu pārraidi vairāk nekā 20 km garā līnijā ar augstu sistēmas veiktspēju ar *BER* 10^{-10} . Šāds risinājums ir labs nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem.
4. Kombinētās konfigurācijas ietekmes novērtējums uz *WDM-PON* sistēmas spektrālo efektivitāti atklāja, ka *SE* efektivitāti var palielināt, optimizējot kanālu intervālu. Sistēmai ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMF*, *SE* (0,62 (bit/s)/Hz) ir 6,2 reizes lielāka nekā tipiskai 100 GHz 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmai. *WDM-PON* sistēmai ar *MMF* un *MLR* spektrālā efektivitāte ir 0,27 (bit/s)/Hz, un tā ir 2,7 reizes lielāka nekā tipiskai sistēmai.
5. Diskreto un sadalīto Ramana pastiprinātāju novietojot tālāk no raidītāja bloka (125 km), ir nepieciešama par 3 % mazāka pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu pastiprināmā signāla kvalitāti *BER* zem 10^{-9} , un arī kanālu pastiprinājums ir virs 21,5 dB. Diskrētā Ramana pastiprinātāja gadījumā pumpēšanas jauda (līdz 500 mW) ir vidēji par 50 % mazāka nekā sadalītā Ramana pastiprinātāja gadījumā (minimālās pumpēšanas jauda ir

905–1020 mW atkarībā no izvietojuma pārraides līnijā).

6. Kombinētā Ramana-*FOPA* datormodeļa pastiprinājums ir vienmērīgāks un sasniedza 34,7 dB 16 kanālu 40 Gbit/s *WDM* sistēmā. Kombinētā pastiprinātāja pastiprinājums ir par 30 % (8,2 dB) lielāks nekā Ramana un *FOPA* pastiprinājumu summa. Ramana-*FOPA* -3 dB pastiprināšanas joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā 682 mW *FOPA* gadījumā un 0,20 THz platāks, salīdzinot ar optimizēto 660 mW *FOPA*, kas ir izskaidrojams ar tiešu signāla pastiprināšanu caur Ramana pumpēšanas avotu.
7. Apvalka pumpēšanas *EYDFA* datormodeļa pastiprinātājs nodrošināja vienmērīgu un plašāku pastiprinājumu (19,7–28,3 dB), zemu trokšņa līmeni (3,7–4,2 dB) un jaudas sodu mazāku par 0,1 dB. Pārraides sistēma ar šādu *EYDFA* (7 m *EYDF* šķiedra, 3 W 975 nm tieši vērtais pumpēšanas avots un $p_{pieejas} = -20$ dBm uz kanālu) ir piemērota *WDM* lietojumprogrammām.

Promocijas darba praktiskā vērtība

- Sagatavots Latvijas patenta pieteikums “Dispersijas kompensēta spektrāli sagriezta viļņgarumdaļes blīvēta optiskā sakaru sistēma”. Patenta pieteikuma numurs: P-16-108. Patenta numurs: LV15236B (publikācijas/reģistrācijas datums: 20.12.2017).

- Promocijas darba rezultāti izmantoti vairāku zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.

1. ERAF projekts “Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde” (aktivitāte «Atbalsts zinātnei un pētniecībai”), Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/APIA/VIAA/002.

2. ERAF projekts “Efektīvu apvalkā pumpētu šķiedru optisko pastiprinātāju izstrāde telekomunikāciju sistēmām” (aktivitāte “Atbalsts zinātnei un pētniecībai”), Nr. 1.1.1.1/18/A/068.

3. ERAF projekts “Pasīvi šķiedru optiskie sensori energoefektīvai transporta infrastruktūras tehniskā stāvokļa uzraudzībai” (aktivitāte “Atbalsts zinātnei un pētniecībai”), Nr. 1.1.1.1/16/A/072.

Promocijas darbā aizstāvamās tēzes

1. Realizējot kombinēto Ramana-*FOPA* pastiprināšanas datormodeli *WDM* sakaru sistēmā, iegūst vienmērīgāku pastiprinājumu, salīdzinot ar parametrisko pastiprinātāju, un par 0,20 THz platāku -3 dB pastiprināšanas joslas platumu.
2. Izmantojot izstrādāto optisko erbija un iterbija leģējuma šķiedras pastiprinātāja datormodeli, kas ierosina apvalka pumpēšanu šķiedrā, šādam modelim iegūts stabils līdz 28,3 dB pastiprinājums ar 4 dB trokšņa koeficientu visā telekomunikāciju C (1530–1565 nm) joslā.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti sešās starptautiskās zinātniskās konferencēs, kā arī atspoguļoti piecās publikācijās zinātniskajos žurnālos, četrās publikācijās pilna teksta konferenču rakstu krājumos un vienā Latvijas patenta pieteikumā.

Ziņojumi starptautiskās konferencēs

1. Kurbatska I., Bobrovs V., Gavars P., **Gegere L.** “Evaluation of the impact of parameters of transmission system on the performance of WDM-PON” // Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL). Singapūra, Singapūra, 19.–22. novembris, 2017.

2. Kurbatska I., Bobrovs V., Alsevska A., Lyashuk I., **Gegere L.** "Spectral effective solutions for mixed line rate WDM-PON systems" // Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). Krievija, Sanktpēterburga, 22.–25. maijs, 2017.

3. Kurbatska I., Alsevska A., **Gegere L.**, Bobrovs V. "Investigation of influence of Mixed Configurations on performance of WDM-PON" // Electronics 2017. Lietuva, Palanga, 19.–21. jūnijs, 2017.

4. Olonkins S., Stankunovs I., Alsevska A., **Gegere, L.**, Bobrovs V. "Investigation of in-line Distributed Raman Amplifiers with Co and Counter-propagating Pumping Schemes" // 2016 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2016 Shanghai): Proceedings, Ķīna, Shanghai, 8.–11. augusts, 2016.

5. Kurbatska I., Alsevska A., **Gegere L.**, Bobrovs V. "Comparison of modulation formats for use in the next generation passive optical networks" // Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Ķīna, Šanhaja, 8.–11. augusts, 2016.

6. Spolitis, S., **Gegere L.**, Alsevska, A., Trifonovs, I., Porins, J., Bobrovs, V. "Optical WDM-PON Access System with Shared Light Source" // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2015): Proceedings, Čehija, Prāga, 6.–9. jūlijs, 2015.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. Supe A., Zakis K., **Gegere L.**, Redka D., Porins S., Spolitis S., Bobrovs V. "Ramana Assisted Fiber Optical Parametric Amplifier for S-band Multichannel Transmission System", *Fibers2021*, Volume 9, Issue 2, 9; doi: 10.3390/fib9020009.

2. Supe A., Olonkins S., Udalcovs A., Senkans U., Murnieks R., **Gegere L.**, Prigunovs D., Grube J., Elsts E., Spolitis S., Ozolins O., Bobrovs V. "Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-doped Fiber Amplifier for C-band Operation in Optical Networks" // *Appl. Sci.*20212021, Volume 11, Issue 4, 1702; doi: 10.3390/app11041702.

3. Kurbatska I., Alsevska A., **Gegere L.**, Bobrovs V. "Investigation of influence of mixed Configurations on performance of WDM-PON" // *Elektronika ir Elektrotehnika* – 2017. – vol. 23 (2) – pp. 74–78.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. Kurbatska I., Bobrovs V., Gavars P., **Gegere L.**, "Evaluation of the impact of parameters of transmission system on the performance of WDM-PON" // Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL). – Singapore, Singapore – 2017, 1370.-1376. lpp.

2. Kurbatska I., Bobrovs V., Alsevska A., Lyashuk I., **Gegere L.** "Spectral effective solutions for mixed line rate WDM-PON systems" // Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). – St. Petersburg, Russia – 2017, 1771.–1777. lpp.

3. Kurbatska I., Alsevska A., **Gegere L.**, Bobrovs V. "Comparison of modulation formats for use in the next generation passive optical networks" // Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). – Shanghai, China – 2016, 3783.–3787. lpp.

4. Spolitis, S., **Gegere, L.**, Alsevska, A., Trifonovs, I., Porins, J., Bobrovs, V. "Optical WDM-PON Access System with Shared Light Source." // *No: Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2015): Proceedings*, Prague: The Electromagnetics Academy, 2015, 497.–501. lpp.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 126 lappuses. Darbā ir sešas nodaļas, nobeigums, literatūras

saraksts un pielikums.

Darba pirmajā nodaļā ir novērtēti optisko pastiprinātāju (*SOA*, retzemju elementu leģētie šķiedru pastiprinātāji, Ramana, Briljuēna, kombinētie, parametriskais) darbības principi pārraides sistēmās. Veikta salīdzinošā analīze. Formulēts promocijas darba mērķis, uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvamās tēzes, apkopoti rezultāti un definēti turpmākie pētījuma virzieni.

Darba otrajā nodaļā pētīta erbija leģētas šķiedras optiskā pastiprinātāja veikspēja *WDM* sakaru sistēmā. Pētījuma mērķis – novērtēt optiskā signāla kvalitāti atkarībā no *EDFA* pastiprinājuma izvietojuma pārraides līnijā, kanālu intervāla un pastiprināšanas diapazona garuma.

Darba trešajā nodaļā ir veltīta *WDM-PON* tīklu novērtējumam. 3.1. apakšnodaļā ir pētīta 16 kanālu spektrāli sagrieztas *WDM-PON* pārraides sistēmas veikspēja ar vienu platjoslas *ASE* gaismas avotu un dispersijas kompensējošo moduli ar *FGB*. *SS-WDM-PON* optiskā sistēma ir energoefektīva un pēc izmaksām ekonomiska, jo viens gaismas avots tiek dalīts starp vairākiem lietotājiem. Platjoslas *ASE* gaismas avots ir izveidots no diviem kaskādē saslēgtiem *EDFA* pastiprinātājiem. Nākamais trešās nodaļas mērķis ir novērtēt kombinēto (*MML* un *MLR*) koncepciju lietojumu *WDM-PON* sistēmā spektrālās efektivitātes palielināšanai.

Darba ceturtajā nodaļā pētīti sadalīto un diskrēto Ramana pastiprinātāju veikspēja *WDM* sakaru sistēmās. Mērķis – atrast minimālās pumpēšanas starojuma jaudas, kas visos sistēmas kanālos nodrošinātu noteiktās sistēmas *BER* vērtības.

Darba piektajā nodaļā pētīti kombinētie optisko pastiprinātāju risinājumi *WDM* pārraides sistēmās. Pētītas *EDFA*, *SOA*, Ramana un *FOPA* pastiprinātāju kombinācijas. Kombinētais Ramana-*EDFA* izveidots, lai ne tikai izlīdzinātu *EDFA* pastiprinājuma spektru, bet arī palielinātu pārraides līnijas garumu. Savukārt Ramana-*SOA* kombinētais risinājums ļauj samazināt *SOA* radītos signāla kropļojumus. Kombinētais Ramana-*FOPA* ir piemērots *WDM* sistēmās kā priekšpastiprinātājs, un tas sistēmas kanālus pastiprina vienmērīgi.

Darba sestās nodaļas mērķis ir izstrādāt divu retzemju elementu leģējuma pastiprinātāju ar apvalka pumpēšanas tehnoloģiju, kas piemērots telekomunikāciju lietojumiem. Paredzētā lietojuma joma ir *WDM* optiskās pārraides sistēmas, metro piekļuves tīkli un hibrīdi pasīvie optiskie tīkli paplašinātai sasniedzamībai. Apvalka pumpēšanas teknikai ir vairākas priekšrocības, salīdzinot ar tradicionālo kodola pumpēšanu.

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

PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Optiskie signāli šķērso optisko šķiedru un tiek novājināti. Novājinātā optiskā signāla atjaunošanai tika izmantoti reģeneratori, kas signālu pārveidoja no optiskā uz elektrisko un no elektriskā uz optisko. Aktīvo elementu skaits pārraides sistēmās ar reģeneratoriem būtiski pasliktināja sistēmas pieejamību kopumā [7]. Reģeneratori *WDM* sistēmās ir diezgan sarežģīti un dārgi. Pārraides sistēmas vājinājuma kompensēšanai sāka izmantot optiskos pastiprinātājus, kas pastiprina optisko signālu tieši un bez pārveidošanas elektriskajā signālā. Optisko signālu pastiprināšana galvenokārt balstās uz enerģijas pāreju no pumpējošā starojuma vai no cita enerģijas veida uz pastiprināmo optisko starojumu. Katrā optiskajā pastiprinātājā šis process tiek īstenots dažādi. Pastiprinātāju izmantošana kļūva pieejama arī *WDM* sistēmās [7].

Optiskā signāla pastiprināšanai var izmantot dažādus fiziskos principus, kas atbilst galvenajiem optisko pastiprinātāju veidiem.

- Optiskie pastiprinātāji, kuru pastiprinājums balstīts uz materiāla lineārām īpašībām: pusvadītāju pastiprinātāji (*SOA*) un pastiprinātāji uz retzemju elementiem leģētu šķiedru bāzes (*xDFA*).
- Optiskie pastiprinātāji, kuru darbības pamatā ir nelineārie optiskie efekti: Ramana pastiprinātāji, Briljuēna pastiprinātāji un parametriskie pastiprinātāji (*FOPA*).

Optiskajam pastiprinātājam būtu jāatbalsta daudzkanālu darbību pēc iespējas plašākā viļņa garuma joslā, jānodrošina vienmērīgs pastiprinājums visā dinamiskajā pastiprinājuma diapazonā, jābūt augstai piesātinājuma izejas jaudai un zemam trokšņu līmenim. Visas šīs īpašības būtu jāpanāk, saglabājot mazu enerģijas patēriņu un atbilstošu izmēru. Tāpēc pirmajā darba nodaļā ir salīdzināti optisko pastiprinātāju veidi.

SOA ir ekonomiski izdevīgs signālu pastiprināšanai, kas ir vienkārši ievietojams jau esošajās *WDM* pārraides sistēmās. *SOA* raksturīgs liels ienesto *ASE* trokšņu daudzums (7–2 dB), pastiprinājuma maksimums ir 30 dB, ir jutība pret polarizāciju (~ 2 dB) un ir ievērojama nelinearitāte pusvadītāju materiālā [5]. Visi šie trūkumi pasliktina pārraidāma signāla kvalitāti, tāpēc *WDM* sistēmās iepriekšminēto plaši neizmanto.

Populārākais optisko signālu pastiprināšanas risinājums ir ar retzemju elementiem leģēto šķiedru optisko pastiprinātāju izmantošana sakaru sistēmās. Galvenokārt izmanto *EDFA* pastiprinātājus. Ar *EDFA* var sasniegt līdz 54 dB lielu pastiprinājumu noteiktos apstākļos, taču tipiskais *EDFA* pastiprinājums ir aptuveni 30 dB [12]. *EDFA* trokšņu daudzums ir mazāks nekā *SOA* pastiprinātājos, un *NF* vērtība ir ap 5–6 dB, bet ideālai *EDFA* šī vērtība ir ap 3 dB [6, 13]. Protams, *EDFA* pastiprinātājiem ir arī trūkumi: izteikta pastiprinājuma frekvenču atkarība, salīdzinoši šaurs pastiprinājuma spektrs un ierobežota caurlaides josla. Pastiprinājuma spektrs ir nevienmērīgs.

Optiskie pastiprinātāji, kas izmanto Briljuēna izkliedes efektu, nodrošina lielu pastiprinājuma efektivitāti un spēj signālu pastiprināt līdz 30 dB, taču pastiprinājuma spektrs ir šaurs (< 100 MHz), un nobīde starp pumpēšanas avotu un pastiprinājuma frekvencēm ir ap 10–11 GHz [2, 8]. Šī tipa pastiprinātāji netiek plaši izmantoti.

Ramana pastiprinātāji nepastiprina optisko signālu kā *EDFA*, bet tiem ir priekšrocība, jo rada daudz mazāk trokšņu un nodrošina pastiprinājumu plašā frekvenču joslā, spēj mainīt pastiprinājuma spektru.

Attīstoties šķiedru optisko pārraides sistēmu tehnoloģijām, optiskā signāla pastiprināšanai var izstrādāt kombinētos optiskos pastiprinātājus. Kombinēto optisko pastiprinātāju mērķis ir paplašināt pastiprinājuma spektru vai iegūt lielāku pastiprinājuma vērtību pie mazākām ienesto trokšņu vērtībām.

Šķiedru optiskie parametriskie pastiprinātāji spēj nodrošināt augsta līmeņa pastiprinājumu plašā viļņa garuma joslā un, optimizējot konfigurācijas, rada mazu trokšņa daudzumu, salīdzinot ar citiem diskrētiem pastiprinātāju tipiem.

Apvalka pumpēšanas tehnoloģija ir nodrošinājusi izaugsmi šķiedru optisko pastiprinātāju attīstībā. Šādos pastiprinātājos izmanto kopīgi leģētas šķiedras. Izmantojot kopīgi leģētu šķiedru un apvalka pumpēšanas tehniku optiskajos pastiprinātājos, sakaru sistēmas var darboties visās viļņa garuma joslās. Šī tipa pastiprinātāji ļauj sasniegt vienmērīgu pastiprinājumu, uzlabo sistēmas veiktspēju un samazina sistēmas izmaksas.

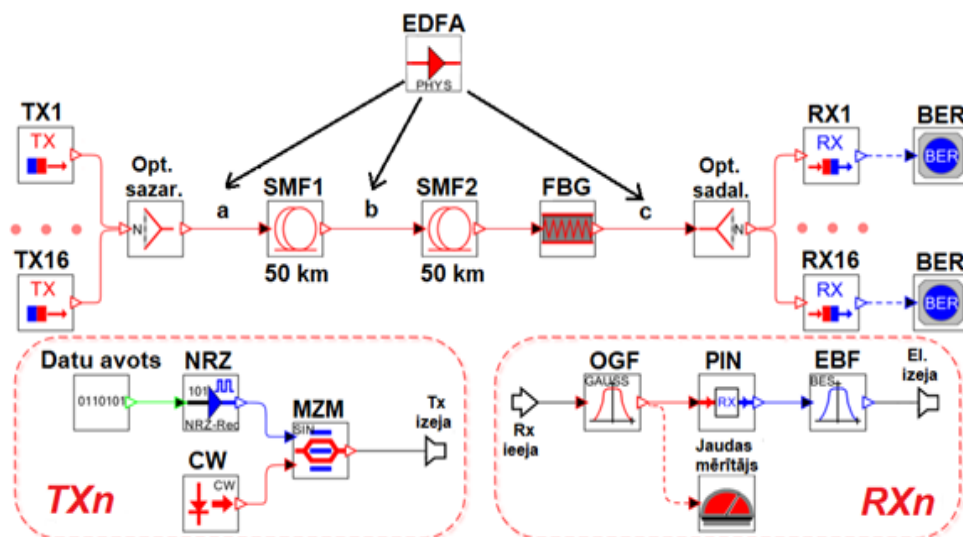
Optiskos pastiprinātājus iespējamas lietot gan aktīvos optiskos tīklos, gan pasīvos optiskos tīklos. Pasīvos optiskos tīklos nav pieļaujama aktīvo elementu klātbūtne pārraides līnijā, bet pastiprinātājus var izvietot pakalpojumu sniedzēja centrālā ofisa telpās. Optisko pastiprinātāju lietošana ļauj palielināt *WDM-PON* tīklu pārraides līnijas garumu.

Otrā nodaļa

Kad notiek pārraide lielos attālumos, optiskais signāls ir ļoti novājināts, tāpēc, lai atjaunotu optiskās jaudas budžetu, ir nepieciešams realizēt optiskā signāla pastiprināšanu. Izvēloties signāla pastiprināšanas metodes *WDM* sistēmai, priekšroka tiek dota *EDFA* pastiprinātājiem [14]. Galvenie iemesli šādai *EDFA* pastiprinātāju popularitātei ir tas, ka šie pastiprinātāji ir samērā viegli realizējami un to izmantošana ir ekonomiski izdevīga, ļauj pastiprināt optisko signālu, nepārveidojot to elektriskajā signālā un otrādi. Šie pastiprinātāji ir ar zemu trokšņa līmeni, raksturīga arī augsta energoefektivitāte ($> 50\%$), gandrīz nejutīgi pret signāla polarizāciju [15–16]. Sistēmās ar *EDFA* ir nepieciešams piemeklēt tādu pastiprinātāju konfigurāciju, kas nodrošinātu labāko pārraidāmo signālu kvalitāti, nepasliktinātu kopējo sistēmas darbību un ļautu sasniegt pēc iespējas lielāku pārraides attālumu. *EDFA* veiktspēja atkarīga no tādiem pastiprinātāja parametriem kā ieejas signāla optiskās jaudas, pumpējošā starojuma jaudas, viļņa garuma un pumpēšanas izplatīšanās virziena, *EDF* šķiedras garuma un erbija jonu populācijas inversijas sasniedzamā līmeņa. Šie pastiprinātāja parametri ietekmē *EDFA* pastiprināšanas līmeni, pastiprinājuma spektra formu un saražoto trokšņa daudzumu [13, 17].

Šajā nodaļā pētīta *EDFA* pastiprinātāju veiktspēja dažādos apstākļos, kādos pastiprinātājs darbojas. Pētīts, kā mainās pastiprinātā signāla kvalitāte, kad tiek mainīts kanālu intervāls (37,5 GHz, 50 GHz, 100 GHz), pastiprinājuma apgabala garums (75 km, 100 km un 150 km) un *EDFA* izvietojums (jaudas, līnijas un priekšpastiprinātājs) sistēmā. *EDFA* konfigurācijas izvēlētas tā, lai visos sistēmas kanālos nodrošinātu *BER* vērtības, zemākas par 10^{-9} .

OptSim simulācijas programmā realizēta 16 kanālu 10 Gbit/s *WDM* pārraides sistēma. Pētot *EDFA* veiktspējas atkarību no pastiprinātāja izvietojuma pārraides sistēmā, tika izmantots simulācijas modelis, kas redzams 2. attēlā.



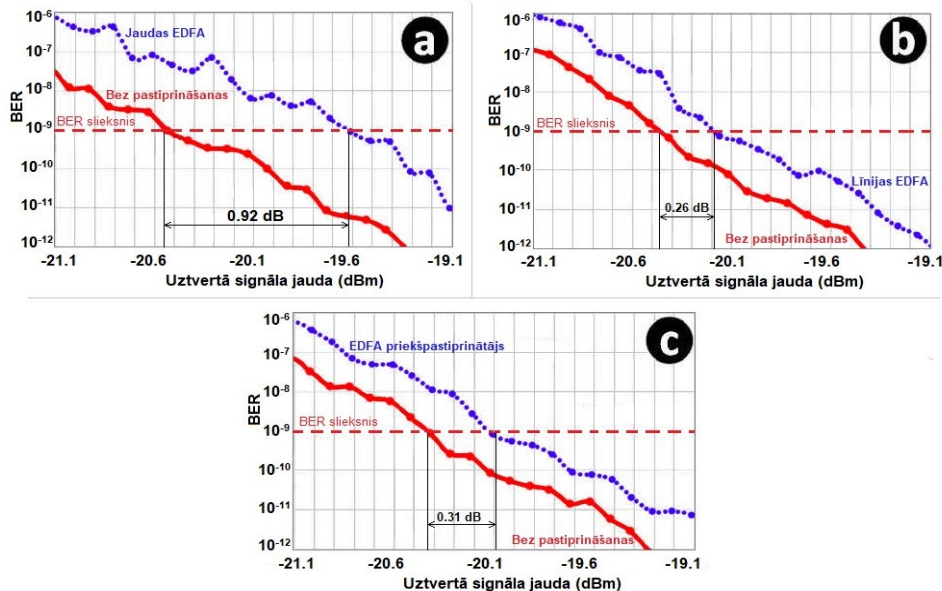
2. att. 16 kanālu 10 Gbit/s *WDM* pārraides sistēmas simulācijas modelis ar *NRZ-OOK* modulācijas formātu un dažādiem *EDFA* izvietoējuma scenārijiem: (a) jaudas pastiprinātājs; (b) līnijas pastiprinātājs; (c) priekšpastiprinātājs.

Pētījuma sākumā katram pastiprinātājam noteikta minimālā pumpēšanas jauda un *EDF* šķiedras garums. Jaudas pastiprinātāja gadījumā mazākā pumpējošā starojuma jauda, kas nodrošinātu *BER* zem 10^{-9} , ir 550 mW, un tā novērota 8 m garā *EDF* šķiedrā (pastiprinājums: 12,74 dB–12,94 dB un trokšņa faktors (*NF*): 5,03 dB–5,19 dB). Līnijas *EDFA* nepieciešama 50 mW pumpējošā starojuma jauda un 8 m garš *EDF* (pastiprinājums: 12,00 dB–12,88 dB un *NF*: 5,12 dB–5,30 dB). Priekšpastiprinātājam ir nepieciešams vismaz 4 mW pumpējošā starojuma jauda un 6 m garš *EDF* (pastiprinājums: 12,43 dB–12,66 dB un *NF*: 5,26 dB–5,48 dB).

Lai novērtētu *EDFA* pozicionēšanas ietekmi uz pastiprinātā signāla kvalitāti, visiem trim *EDFA* pozicionēšanas scenārijiem iegūta *BER* vērtību atkarība kanālos ar sliktāko signāla kvalitāti (augstākās *BER* vērtības) no uztvertā signāla jaudas, un šie rezultāti salīdzināti ar rezultātiem, kas iegūti *WDM* sistēmā bez pastiprināšanas (3. att.).

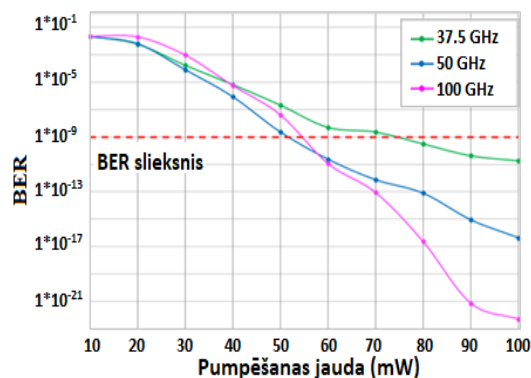
Jaudas pastiprinātāja gadījumā novērots 0,92 dB jaudas sods attiecībā pret sistēmu bez pastiprināšanas, līnijas *EDFA* – 0,26 dB un priekšpastiprinātāju – 0,31 dB. Visos gadījumos galvenā jaudas soda līmeņa daļa ir saistīta ar *EDFA* radīto pastiprināto spontāno emisijas (*ASE*) troksni.

No pumpēšanas enerģijas patēriņa viedokļa labāk izmantot *EDFA* kā priekšpastiprinātāju, bet ieejas signāla mazās jaudas dēļ sasniegtā populācijas inversija netiek izmantota efektīvi, kā tas ir līnijas pastiprinātāja gadījumā. Tā rezultātā priekšpastiprinātājs rada vairāk *ASE* trokšņu nekā līnijas *EDFA* konfigurācija. Tas rada papildu jaudas sodu attiecībā uz sistēmu bez pastiprināšanas.



3. att. *BER* vērtību atkarība kanāliem ar sliktāko signāla kvalitāti no uztvertā signāla jaudas sistēmā bez pastiprināšanas (nepārtrauktā līnija) un ar pastiprināšanu (punktētā līnija): (a) jaudas pastiprinātājs; (b) līnijas *EDFA*; (c) priekšpastiprinātājs.

EDFA darbību ietekmē arī starpkanālu intervāls, un pētījumā izmantotas 16 kanālu 10 Gbit/s *WDM* pārraides sistēmas ar līnijas *EDFA* simulācijas modelis (3. b att.). Izvēlēta *EDFA* konfigurācija: 12 m *EDF* šķiedra (šāds *EDF* garums izvēlēts, pamatojoties uz pētījumu rezultātiem [19]), un 980 nm tieši vērsta pumpēšana [13, 19].

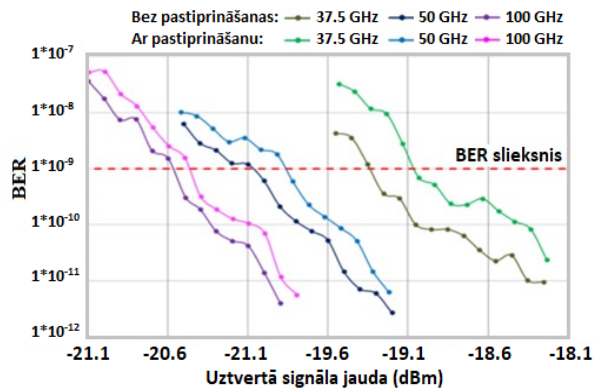


4. att. Sistēmas maksimālās *BER* atkarība no 980 nm pumpējošā starojuma jaudas.

Izvēlēta pastiprinātāja konfigurācija nodrošināja šādas pastiprinājuma un trokšņa skaitļa (*NF*) vērtības:

- sistēma ar 37,5 GHz kanālu intervālu: 80 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšanas avots nodrošina pastiprinājumu no 23,98 dB līdz 24,53 dB, *NF* – no 4,47 dB līdz 4,5 dB;
- sistēma ar 50 GHz kanālu intervālu: 60 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšanas avots nodrošina pastiprinājumu no 22,38 dB līdz 23,33 dB, *NF* – no 4,5 dB līdz 4,54 dB;
- sistēma ar 100 GHz kanālu intervālu: 60 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšanas avots nodrošina pastiprinājumu no 21,7 dB līdz 23,94 dB, *NF* - no 4,48 dB līdz 4,56 dB.

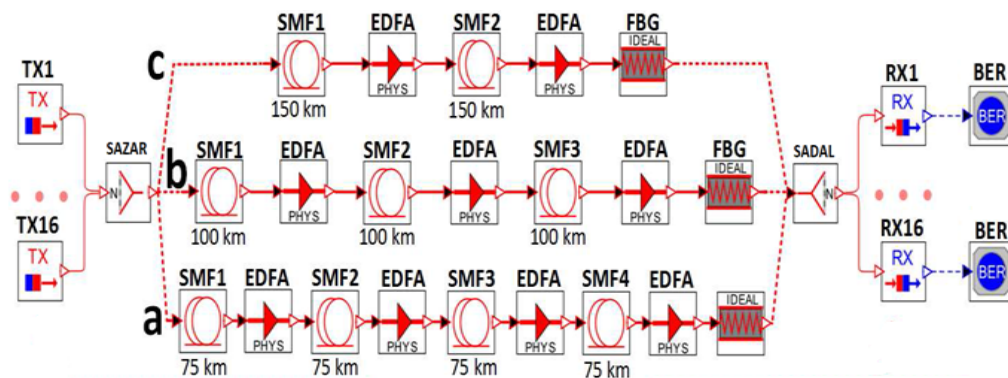
Sistēma ar 100 GHz kanālu intervālu uzrāda augstākas *BER* vērtības nekā 50 GHz. Tas ir saistīts ar *EDFA* pastiprinājuma spektra slīpumu. 100 GHz konfigurācijā pārraidei izmantotais viļņa garuma diapazons ir divas reizes lielāks nekā 50 GHz intervāla gadījumā.



5. att. *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas *WDM* sistēmā ar un bez pastiprināšanas.

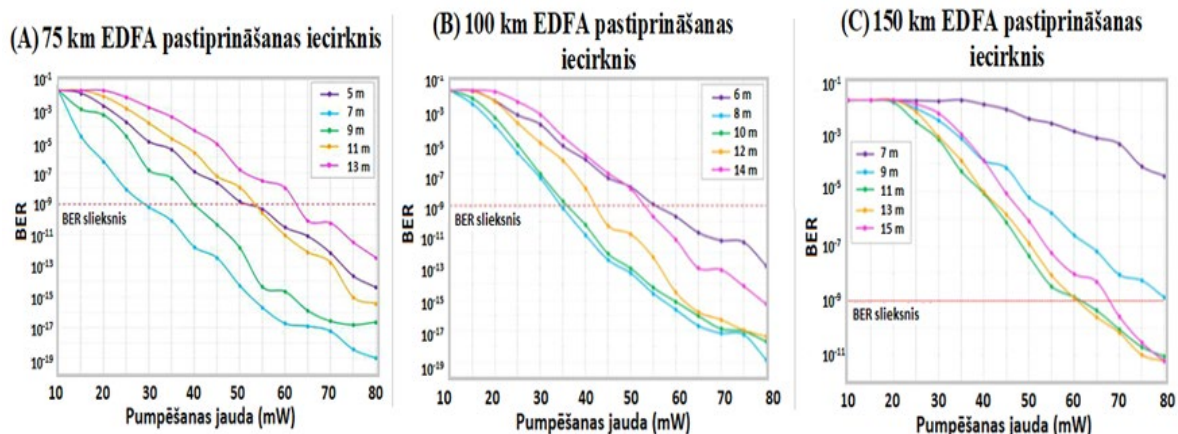
Kā redzams 5. attēlā, *WDM* sistēmā ar *EDFA* un 100 GHz kanālu intervālu jaudas sods ir 0,1 dB, sistēmā ar 50 GHz kanālu intervālu – 0,18 dB, sistēmā ar 37,5 GHz kanālu intervālu – 0,22 dB. Jo mazāks ir kanālu intervāls, jo lielāks ir jaudas sods.

Garās sakaru sistēmās ir neizbēgama vairāku pastiprinājuma iecirkņu izmantošana, kas izraisa pārraidītā signāla kvalitātes pasliktināšanos. Pastiprinājuma apgabala garuma izvēle ir sarežģīta problēma, kur katrai pārraides sistēmai nepieciešama individuāla pieeja. *EDFA* nevienmērīgais pastiprinājuma spektrs izraisa papildu šķiedras nelinearitātes rašanos kanālos ar lielāku pastiprinājumu. Turklāt katrs nākamais *EDFA* ne tikai rada *ASE* trokšņus, bet arī pastiprina iepriekšējo pastiprināšanas iecirkņu trokšņus. Šie divi faktori var dramatiski pasliktināt pārraidītā signāla kvalitāti, tādējādi ierobežojot arī sasniedzamo pārraides attālumu. Ja pastiprinātāju skaits tiek samazināts, palielinot pastiprinājuma apgabala garumu, *EDFA* ir nepieciešamas garākas *EDF* šķiedras, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājumu. Tas rada situāciju, ka veidosies lielāks *ASE* daudzums, līdz ar to pasliktinās arī signāla kvalitāte [13, 17].



6. att. 16 kanālu 10 Gbit/s *WDM* pārraides sistēmas modelis ar trīs dažādiem pastiprinājuma apgabala garumiem: (a) 75 km; (b) 100 km; (c) 150 km.

EDF garums un pumpējošā starojuma jauda vienlaikus palielināta (attiecīgi no 4 m līdz 15 m un no 10 mW līdz 80 mW) visiem *EDFA* pastiprinātājiem, kas izvietoti optiskajā pārraides līnijā (7. att.).



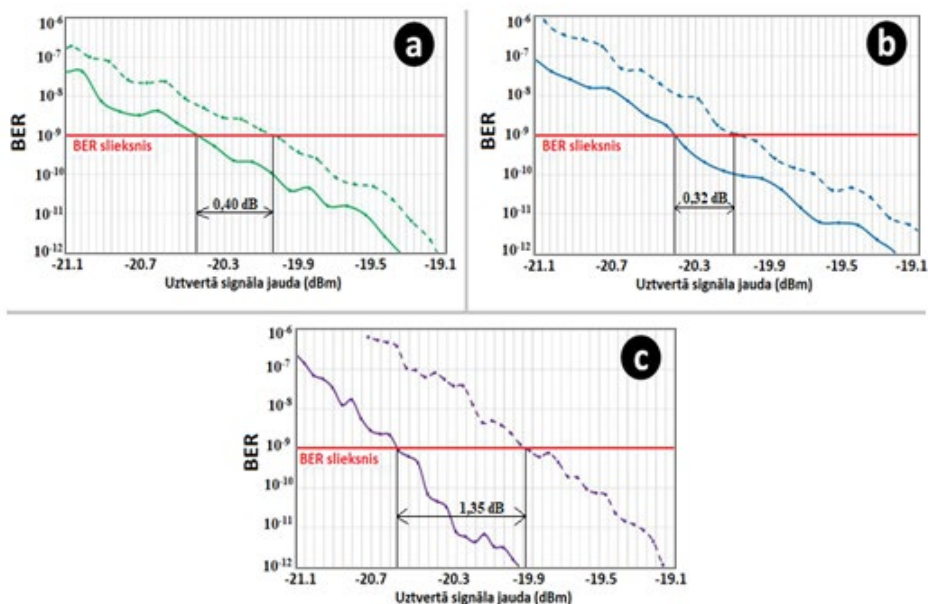
7. att. Sistēmas maksimālā BER vērtības atkarība no pumpēšanas jaudas pie dažādiem EDF šķiedras garumiem.

EDFA konfigurācijas:

- 7 m gara EDF šķiedra un 30 mW pumpēšanas jauda izvēlēta sistēmai ar četriem EDFA pastiprinātājiem (75 km garš katrs pastiprināšanas iecirknis);
- 8 m gara EDF šķiedra un 35 mW pumpēšanas jauda izvēlēta sistēmai ar trīs EDFA pastiprinātājiem (100 km garš katrs pastiprināšanas iecirknis);
- 11 m gara EDF šķiedra un 65 mW pumpēšanas jauda izvēlēta sistēmai ar diviem EDFA pastiprinātājiem (150 km garš katrs pastiprināšanas iecirknis).

Visos trīs gadījumos novērotas vienādas tendences, kad EDF garumi ir īsāki vai garāki nekā izvēlētajās konfigurācijās, nepieciešama lielāka pumpējošā starojuma jauda, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājumu un attiecīgo signāla kvalitāti.

8. attēlā redzams WDM sistēmu ar un bez pastiprināšanas BER vērtību atkarības no uztvertā signāla jaudas salīdzinājums un noteiktais sistēmas jaudas sods.



8. att. BER vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas sistēmā bez pastiprināšanas (nepārtrauktā līnija) un ar pastiprināšanu (punktētā līnija) pie pastiprinājuma apgabala garuma (a) 75 km; (b) 100 km; c) 150 km.

Raugoties no enerģijas patēriņa viedokļa, energoefektīvākā ir sistēma ar trīs *EDFA* pastiprinātājiem un 100 km garu pastiprināšanas apgabalu (105 mW pumpēšanas jauda un 24 m *EDF*), nodrošinot nepieciešamo signāla kvalitāti. Sistēmā ar 75 km garu pastiprināšanas apgabalu un četriem *EDFA* pastiprinātājiem kopējā pumpēšanas jauda un *EDF* kopējais garums ir 120 mW un 28 m, izmantojot tikai divus *EDFA* pastiprinātājus (150 km garš pastiprināšanas apgabals), – pumpēšanas jauda ir 130 mW un *EDF* – 22 m. Risinājums ar trīs pastiprinātājiem rada vismazākos pastiprinātā signāla traucējumus. 100 km garā pastiprināšanas apgabalā jaudas sods ir par 0,08 dB mazāks nekā sistēmā ar 75 km garu pastiprināšanas apgabalu un par 1,03 dB mazāks nekā sistēmā ar 150 km garu pastiprināšanas apgabalu. Katrs nākamais pastiprinātājs ne tikai rada savu *ASE*, bet arī pastiprina iepriekšējā *EDFA* radīto *ASE* troksni, tāpēc sistēmā ar četriem *EDFA* kopējais *ASE* daudzums uztvērēja ieejā ir lielāks, jo ir lielāks pastiprinātāju skaits sistēmā. Sistēmā ar diviem *EDFA* lielā jaudas sodu vērtība ir saistīta ar neatbilstībām, ko rada šķiedru nelinearitāte.

Apkopojot visus iepriekš minētos rezultātus, var secināt, ka *EDFA* pastiprinātāja veiktspēju ietekmē dažādi darbības apstākļi, tāpēc *EDFA* ir jāpārkonfigurē, lai pastiprinātāju izmantotu pēc iespējas efektīvāk.

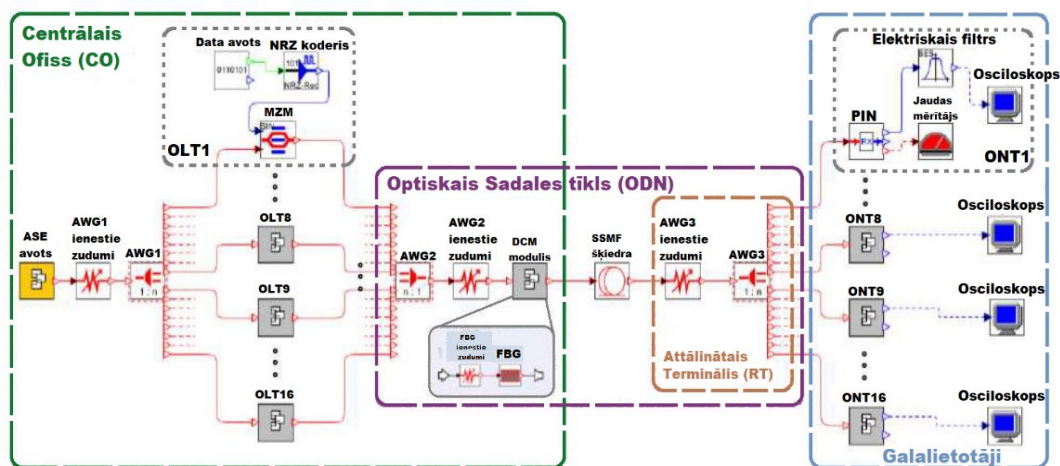
Trešā nodaļa

Pasīvos optiskos tīklos nav pieļaujama aktīvo elementu klātbūtne pārraides līnijā, bet pastiprinātājus var izvietot pakalpojumu sniedzēja centrālā ofisa telpās. Optisko pastiprinātāju lietošana ļauj palielināt *WDM-PON* tīklu kapacitāti un veiktspēju.

Daudzsološa tehnoloģija, kas apmierinātu augošās joslas platuma prasības, visā pasaulē ir spektrāli sagriežts viļņgarumdales blīvēšanas pasīvais optiskais tīkls. Šīs tehnoloģijas priekšrocība ir tās spēja izvietot elektriskos un optikas elementus vienā centrālajā birojā (*CO*) un vienkāršot *NG-PON* tīkla arhitektūru, kā arī lietot tikai vienu platjoslas gaismas avotu (*BLS*) visiem lietotājiem [27, 39, 30]. *SS-WDM-PON* optiskā sistēma ir energoefektīva un pēc izmaksām ekonomiska, jo viens gaismas avots tiek dalīts starp vairākiem lietotājiem, nevis katrs no tiem izmanto individuālo gaismas avotu [31]. *SS-WDM-PON* pārraides sistēmas darbība ir ierobežota ar hromatisko dispersiju (*CD*) [30, 32]. Dispersija izraisa optiskā signāla impulsu paplašināšanos un zaudē savu formu, pārvietojoties optiskajā šķiedrā. Tāpēc tas ierobežo pārraidītā signāla kvalitāti, maksimālo sasniedzamo datu pārraides ātrumu un pārraides sistēmas pieejamību [2, 33]. Dispersijas kompensējošo šķiedru (*DCF*) vai šķiedru Brega režģi (*FBG*) var izmantot *NG-PON* sistēmās [32].

Intensīvi modulētā 16 kanālu *SS-WDM-PON* sistēmā ar *NRZ* līnijas kodu un tiešo detektēšanu pārraides ātrums (2,5 Gbit/s) ir ierobežots pārāk intensīva trokšņa dēļ, kas rodas no nekoherēta *ASE* avota [28, 34]. *BER* sliekšnis ir $< 10^{-10}$. *SS-WDM-PON* sistēmai (9. att.) ir tikai viens *BLS* gaismas avots (*ASE*), ko kopīgi izmanto visi *ONT*.

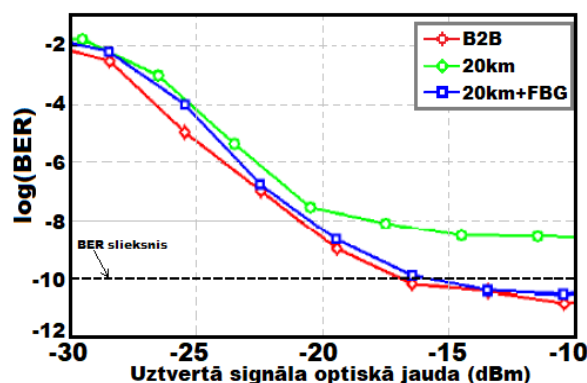
Pētāmajā *SS-WDM-PON* sistēmā izmantots iepriekš izstrādāts [35] *ASE* platjoslas gaismas avots ar +23 dBm (200 mW) izejas jaudu un vienmērīgu izejas spektru 192,3–194,0 THz frekvenču diapazonā. Vienmērīgs *ASE* gaismas avots izveidots no diviem kaskādē saslēgtiem *EDFA* pastiprinātājiem, jo šī metode ļauj sasniegt vienmērīgāku *ASE* izejas spektru.



9. att. 16 kanālu *SS-WDM-PON* simulācijas modulis ar spektrāli sagrieztu platjoslas ASE gaismas avotu un dispersijas kompensācijas moduli.

SS-WDM-PON sistēmā novēroti signāla kropļojumi, un *CD* kompensēšanai izmantots šķiedru Brega režģa dispersijas kompensācijas modulis. Noskaidrots, ka optimālais *CD* daudzums, kas ir jākompensē ar *FBG DCM* 20 km *SMF* šķiedras diapazonam, ir 310 ps/nm, ja viļņa garums ir 1550 nm.

Jaudas zudumi, saņemot optisko signālu 16 kanālu *SS-WDM-PON* sistēmai ar $BER < 10^{-10}$ pēc 20 km pārraides un *CD* kompensācijas ar *FBG DCM*, ir 1,9 dB. Šos zudumus ievieš ASE platjoslas gaismas avota šķērstraucējumu efekti, dispersija un trokšņiem līdzīgs raksturs.



10. att. 16 kanālu *SS-WDM-PON* sistēmai izmērītās *BER* vērtības, salīdzinot ar uztvertā signāla vidējo optisko jaudu.

Realizētā un izpētītā *SS-WDM-PON* 16 kanālu pārraides sistēma ir piemērota *NGPON* tehnoloģijas risinājumam. Realizētā sistēma nodrošina datu pārraidi vairāk nekā 20 km šķiedru diapazonā. Lai nodrošinātu augstu sistēmas veiktspēju ar $BER < 10^{-10}$, izmantots *DCM* modulis (ar šķiedru Brega režģi) hromatiskās dispersijas kompensācijai.

Pārraides tīkla informācijas kapacitāti var palielināt, palielinot pārraides ātrumu vai samazinot kanālu intervālu. Tomēr abus šos risinājumus nevar izmantot, ja tiek izmantoti tradicionālie optisko signālu modulācijas formāti, piemēram, *NRZ-OOK* [37]. Lai gan modulācijas formāta maiņa nozīmē iekārtu nomaiņu, kā arī būtiskus papildu izdevumus interneta pakalpojumu sniedzējiem.

Viens no vairāk pētītajiem risinājumiem, kā palielināt *WDM* pārraides sistēmas kopējo kapacitāti, ir palielināt tās spektrālo efektivitāti [36, 48]. Kombinētās pārraides sistēmas

metodes izmantošana ir efektīvs risinājums attiecībā uz spektrālo efektivitāti. Kombinētās pārraides sistēmas gadījumā jauni datu pārraides ātrumi vai modulācijas formāti var būt piemēroti tikai daļai kanālu, kas nodrošinātu mazākus izdevumus. Tas garantē procentuālas izmaiņas kanālos ar augstu datu ātrumu, citu modulācijas formātu vai minimālu kanālu intervālu. Tādējādi kombinēto *WDM* sistēmu var uzskatīt par starpposmu pakāpeniskai pārejai uz augstāku datu pārraides ātruma sistēmu, kā arī pāreju uz citu modulācijas formātu. Nepieciešamība izmantot pārraidi kanālos ar kombinētiem modulācijas formātiem (*MMF*) vai kombinētiem līnijas ātrumiem (*MLR*) dod atspērienu interneta pakalpojumu sniedzējiem pārraides tīkla infrastruktūras attīstībai [38–39].

Veicot pētījumu 3.2. apakšnodaļā, tiek novērtēts *MMF* un *MLR* līdzāspastāvēšana, kas tiek izmantota pārejas posma gadījumā, lai nodrošinātu augstāku datu pārraides ātrumu ar mazākām izmaksām. Tika pētīts, kā *MMF*, *MLR* un nevienmērīgo kanālu intervāli ietekmē *WDM-PON* pārraides sistēmas darbību, salīdzinot kombinēto konfigurāciju sistēmas darbību ar *WDM-PON* pārraides sistēmas darbību ar vienādiem kanālu intervāliem. Novērtēta spektrālā efektivitāte kombinētā *WDM-PON* sistēmā, salīdzinot ar *WDM-PON* ar vienādiem modulācijas formātiem, datu pārraides ātrumiem un kanālu intervāliem visos kanālos.

Duobinārais intensitātes modulācijas formāts izmantots kā otrs modulācijas formāts. DB kodēšanas izvēle kombinēto risinājumu ieviešanai balstās arī uz iepriekš veiktajiem pētījumiem. Liels skaits pētījumu demonstrē, ka duobinārais modulācijas formāts ir perspektīvs risinājums, nodrošinot augstāku datu pārraides ātrumu un mazāku kanālu intervālu, jo tas ir ļoti izturīgs pret hromatisko dispersiju un tam ir ierobežots platuma spektrs. Piemēram, autori [41] atklāj, ka duobinārais modulācijas formāts parādīja savu pārākumu, salīdzinot ar citiem pētītajiem intensitātes formātiem (*NRZ*, *RZ*, *CSRZ*), sasniedzot minimālu kanālu intervālu, kas vienāds ar 12,5 GHz ar 10 Gbit/s *WDM* sistēmu. Duobinārais modulācijas formāts ir arī efektīvāks nekā citi formāti ar 40 Gbit/s pārraides ātrumu. Turklāt ziņojumā [42] autori norāda, ka duobinārais modulācijas formāts uzrādīja augstu spektrālās efektivitātes līmeni, salīdzinot ar *NRZ*, *RZ* un *CSRZ* ātrgaitas datu sistēmā ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMF*. Turklāt duobinārais modulācijas formāts raidītājs ir daudz vienkāršāks, salīdzinot ar moderniem modulācijas formātiem. Ir svarīgi atzīmēt arī to, ka DB neprasa mainīt uztvērēju, jo ir iespējams izmantot to pašu uztvērēju, kā tas ir *NRZ* kodēšanas gadījumā.

Iegūtie rezultāti ir liecina, ka *Q*-koeficients, ko demonstrē sliktākais *NRZ* kanāls kombinētajā pārraides sistēmā ar nevienādiem kanāla intervāliem (vienāds ar 18,3 dB), ir augstāks par sliktākā kanāla *Q*-koeficientu 10 Gbit/s *NRZ* pārraides sistēmā ar 18,75 GHz kanālu intervālu (18,01 dB). *Q*-koeficients sliktākajam *NRZ* kanālam, kas iegūts *MLR* pārraides sistēmā (18,28 dB), ir lielāks par 18,01 dB *Q*-koeficientu, kas nodemonstrēts atsaucēs sistēmā. Tas ļauj secināt, ka abu minēto koncepciju piemērošana neietekmē *WDM-PON* veiktspēju un pat to palielina.

Iegūtie rezultāti liecina, ka *WDM-PON* kanālu daļēja izmantošana ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu palielina šo kanālu *Q*-koeficientu, salīdzinot ar sistēmu ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu visiem kanāliem. *Q*-koeficients sliktākajam 40 Gbit/s DB kanālam *MLR* sistēmā ir vienāds ar 17,78 dB, salīdzinot ar 17,64 dB, ko demonstrēja sistēma ar visiem 40 Gbit/s DB kanāliem. Balstoties uz šiem rezultātiem, var secināt, ka 40 Gbit/s datu ātruma izmantošana tikai daļai kanālu atvieglo atbilstību *WDM-PON* veiktspējas prasībām.

Kombinētās konfigurācijas ietekmes novērtējums uz *WDM-PON* spektrālo efektivitāti atklāj, ka gan sistēma ar nevienādu kanālu intervālu, gan *MLR* sistēmu parāda spektrālās

efektivitātes pieaugumu, salīdzinot ar sistēmu ar vienādiem kanāliem. Spektrālā efektivitāte, piedāvātai 10 Gbit/s sistēmai ar nevienādiem kanālu intervāliem, ir 0,62 bit/s/Hz, kas ir 6,2 reizes lielāka nekā spektrālā efektivitāte tipiskajā 100 GHz 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmā (vienāds ar 0,1 bit/s/Hz). Tomēr, lietojot fiksēto, bet minimāli iespējamo kanālu intervālu, kas vienāds ar 18,75 GHz, ļauj sasniegt tikai neredzami sliktāku spektrālo efektivitāti SE nekā kombinētā konfigurācija (vienāda ar 0,61 bit/s/Hz). Tas nozīmē, ka spektrālās efektivitātes palielināšana tiek nodrošināta, optimizējot kanālu intervālu. Spektrālā efektivitāte pētāmajai *MLR* sistēmai ir vienāda ar 0,27 bit/s/Hz, kas ir 2,7 reizes lielāka, salīdzinot ar 10 Gbit/s *WDM-PON* (0,1 bit/s/Hz). Turklāt *MLR* sistēmas Q-koeficienta pietiekami augstā vērtība (vienāda ar 17,78 dB) ļauj secināt, ka sistēmas spektrālo efektivitāti var palielināt, samazinot kanāla intervālus, kas joprojām atbilst minimālajām Q-koeficienta prasībām.

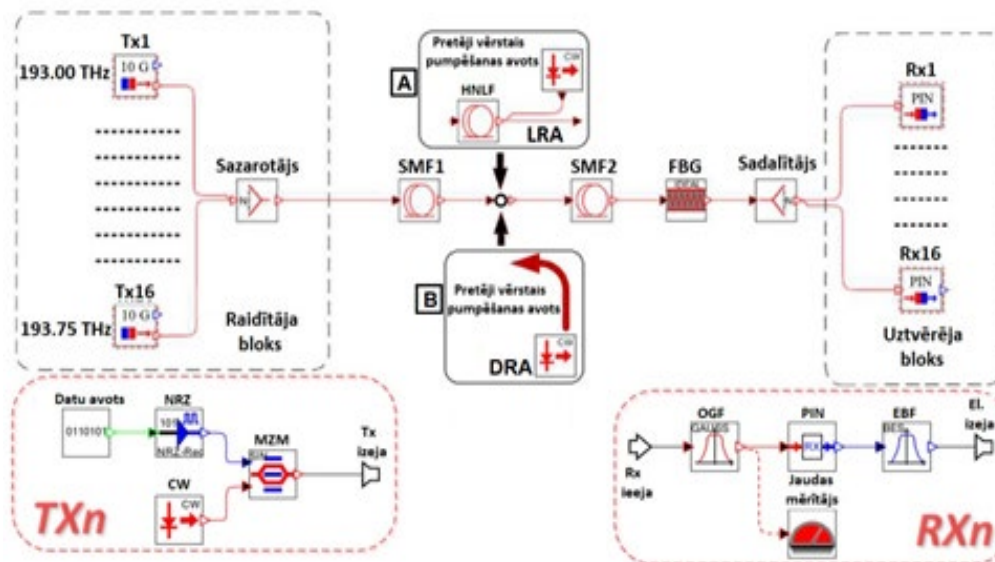
WDM-PON var sekmīgi izmantot kombinētos līnijas ātrumus, kombinētos modulācijas formātus un nevienādu kanālu koncepcijas. Tomēr, lai sasniegtu augstāku spektrālo efektivitāti *WDM-PON*, ir nepieciešami pētījumi par šo koncepciju piemērošanu vienlaikus.

Ceturtais nodaļa

Ramana pastiprināšana ir bijusi viena no optisko pastiprinātāju tehnoloģijām, kas sākumā tika ieviesta lēni, taču, palielinoties optisko tīklu veikspējas vajadzībām, to sāka plaši izmantot. Ramana pastiprinājums notiek, pateicoties Ramana efektam, kas ir nelineārs. Ramana pastiprinātāji ir pirmās plaši komercializētās nelineārās optiskās ierīces telekomunikācijās, un tie ir pozicionēti kā viens no daudzsolākajiem visu optisko signālu pastiprināšanas risinājumiem. Ramana pastiprinātājam raksturīgs salīdzinoši plašs pastiprinājuma spektrs, kura formu var mainīt, mainot pumpēšanas parametrus, un ir zināms, ka tie rada ļoti mazu traucējumu daudzumu, piemēram, salīdzinot ar *EDFA*. Tas ir iemesls, kāpēc Ramana pastiprinātājus lielākoties ievieš maģistrālās optiskajās pārraides sistēmās [21–22].

Līdztekus iepriekšminētajām priekšrocībām Ramana pastiprinātājiem ir viens būtisks trūkums – slihta pumpēšanas efektivitāte, ja ir zema ieejas signāla jauda. Ir divu veidu Ramana pastiprinātāji: diskretie (*LRA*) un sadalītie Ramana pastiprinātāji (*DRA*). Diskrētais Ramana pastiprinātājs ir modulis, kas satur uztītu augstas nelinearitātes šķiedru (*HNLF*) vai dispersijas kompensējošo šķiedru (*DCF*). *DCF* vai *HNLF* šķiedru izmanto kā pastiprinājuma vidi, jo tajās Ramana pastiprinājuma efektivitāte ir lielāka nekā parastai vienmodas šķiedrai. Sadalītos pastiprinātājos par pastiprinājuma vidi kalpo pati šķiedra (pārraides līnija). Pārsvārā izmanto sadalītos pastiprinātājus, jo tiem ir labāki parametri. Sadalītiem pastiprinātājiem ir labāka signāla un trokšņa attiecība [23, 43, 55]. Sakarā ar to, ka *HNLF* un *DCF* ir mazāks serdeņa efektīvais laukums un augstāka nelinearitātes koeficienta vērtība, *LRA* ir nepieciešama mazāka pumpēšanas jauda nekā *DRA* gadījumā, lai sasniegtu noteiktu ieejas signāla pastiprināšanas līmeni ar noteiktu jaudu. Bet, ja tiek izmantota pretēji vērsta pumpēšana, *DRA* gadījumā signāls sāk pastiprināties tuvāk raidītājam nekā *LRA* gadījumā, kas nozīmē, ka signāls tiek pastiprināts efektīvāk [24–25].

Šajā nodaļā pētīti Ramana pastiprinātāju veikspēja *WDM* sakaru sistēmās ar pretēji vērsto pumpēšanas konfigurāciju, ja ir dažādas ieejas signāla jaudas vērtības. Ar *OptSim* programmu ieviests 16 kanālu 10 Gbit/s *DWDM* pārraides sistēma ar *NRZ-OOK* simulācijas modelis (11. att). Katrs no šiem raidītājiem darbojas ar savu frekvenci diapazonā 193,0–193,75 THz ar 50 GHz kanālu intervālu, un izejas jauda ir 2 mW (3 dBm).

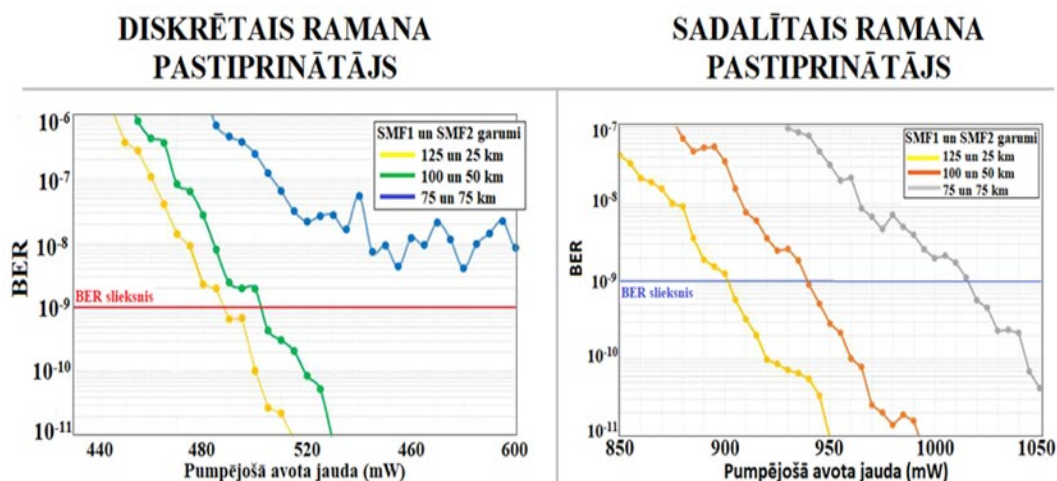


11. att. 16 kanālu 10 Gbit/s DWDM pārraides sistēmas simulācijas modelis ar līnijas LRA (A) un līnijas DRA (B) pastiprinātāju.

Sadalītie Ramana pastiprinātāji ir mazāk trokšņaini, taču šāda veida pastiprinātājiem ir slikta pumpēšanas efektivitāte, ja ir zema ieejas signāla jauda, tāpēc to vietā var izmantot diskrētos Ramana pastiprinātājus (*LRA*). *LRA* pastiprinātāji galvenokārt tiek izmantoti, lai palielinātu šķiedru optisko tīklu kapacitāti. *LRA* kā pastiprinājuma vidi izmanto augstas nelinearitātes šķiedru (*HNLF*). Izvēloties *HNLF* garumu, jāņem vērā divi galvenie faktori: pirmkārt, jo garāks ir *HNLF*, jo mazāka pumpēšanas jauda ir nepieciešama, lai nodrošinātu noteiktu pastiprināšanas līmeni, otrkārt, jo garāks ir *HNLF*, jo būtiskākas ir pastiprinātā signāla neatbilstības, ko izraisa šķiedru nelinearitāte. Tāpēc ir svarīgi atrast līdzsvaru starp pastiprināšanas efektivitāti un pastiprinātā signāla kropļojumu daudzumu. Beigās nolemts, ka esošajā sistēmā tiks izmantots 3 km garš *HNLF* [44]. Sistēmā ar *DRA* pastiprinātāju pastiprinājuma nesējs ir *SMF1* šķiedra.

Izmantotas trīs dažādas *SMF1* un *SMF2* šķiedru garuma kombinācijas, saglabājot kopējo pārraides attālumu attiecīgi 150 km: 75 km un 75 km, 100 km un 50 km un 125 km un 25 km. Šādā veidā var novērtēt pastiprinātāja veikspēju, ja ieejas signāla jaudas vērtības ir dažādas. Pumpēšanas viļņa garums izvēlēts tā, lai nodrošinātu pēc iespējas lielāku pastiprinājumu un pēc iespējas mazāku pastiprinājuma starpību starp visiem 16 kanāliem. Šādu pastiprinājumu var iegūt, ja pastiprināšanas spektra maksimumu novieto starp diviem centrālajiem kanāliem. Pumpēšanas starojuma viļņa garums ir vienāds ar 1452,096 nm (206,455 THz).

Sākumā katrai šķiedru garuma kombinācijai tiek atrasta minimālā pumpēšanas jauda, kas nodrošina atbilstošu signāla kvalitāti un *BER* zem 10^{-9} .



12. att. *LRA* un *DRA* sistēmas *BER* atkarība no pumpēšanas jaudas trīs dažādiem *SMF1* un *SMF2* garumiem.

LRA pumpēšanas jauda:

- 490 mW, ja *LRA* izvietots 125 km no raidītāja (pastiprinājums: 21,43 dB –21,56 dB);
- 505 mW, ja *LRA* izvietots 100 km no raidītāja (pastiprinājums: 21,58 dB –21,71 dB);
- *LRA* izvietojot 75 km no raidītāja, nav sasniegta vēlāmā signāla kvalitāte, tāpēc tālāk netika apskatīta.

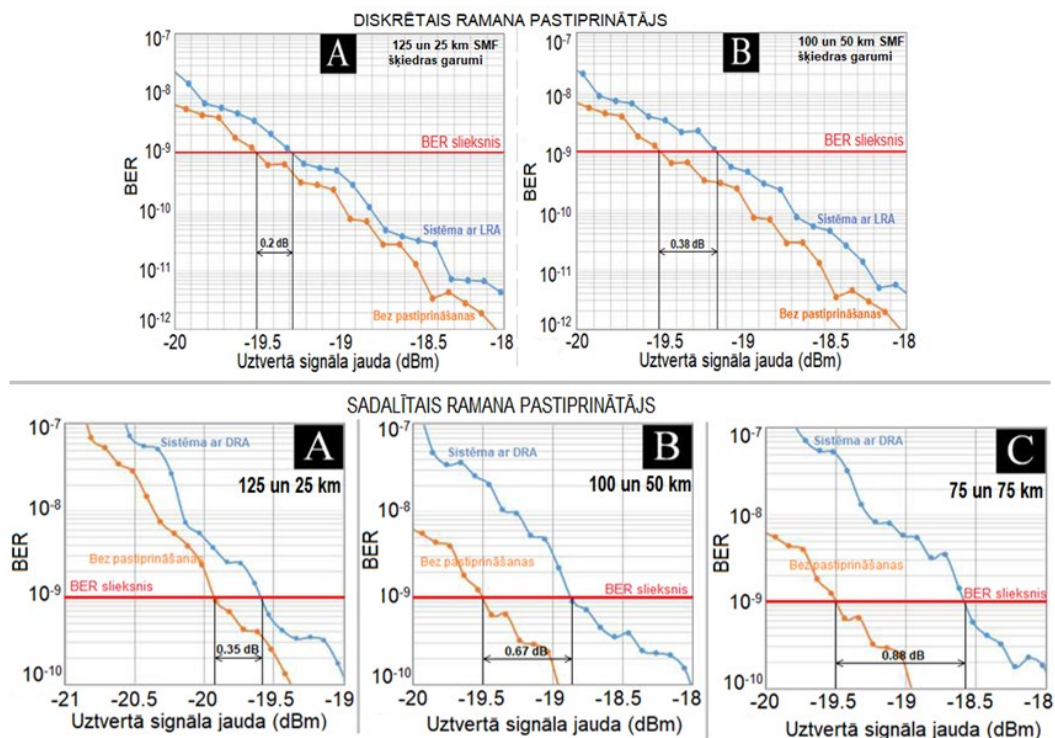
DRA pumpēšanas jauda:

- 905 mW, ja *DRA* izvietots 125 km no raidītāja (pastiprinājums: 19,96 dB –20,08 dB);
- 940 mW, ja *DRA* izvietots 100 km no raidītāja (pastiprinājums: 20,32 dB –20,44 dB);
- 1020 mW, ja *DRA* izvietots 75 km no raidītāja (pastiprinājums: 20,71 dB –20,83 dB).

Sistēmā ar *DRA* pastiprinātāju šādas lielas pumpēšanas jaudas atšķirības aptuveni tādā pašā pastiprinājuma līmenī izskaidrojamas ar to, ka jaudīgāka signāla pastiprināšanai pie noteikta dB daudzuma nepieciešamas lielākas pumpēšanas jaudas.

Sistēmā ar *DRA* nepieciešamā signāla kvalitātes nodrošināšanai bija nepieciešams apmēram par 1,2 dB mazāks pastiprinājums nekā *LRA* sistēmā. Tas ir saistīts ar faktu, ka *LRA* gadījumā papildus vājinājumam, kas uzkrājas pārraides laikā, pastiprinātājam bija nepieciešams arī kompensēt pašas *HNLf* šķiedras ienestos zudumus. *DRA* nepieciešamas divas reizes jaudīgāka pumpēšana, lai nodrošinātu aptuveni tādu pašu līmeņa pastiprināšanu. Tas izskaidrojams ar faktu, ka *SMF* šķiedra ir daudz izturīgāka pret nelinearitāti nekā *HNLf* šķiedra. Lielāka šķiedru nelinearitātes noturība izskaidro, kāpēc *DRA* sistēmas gadījumā sasniegta atbilstošā signāla kvalitāte, ja pastiprinājums izvietots 75 km no raidītāja, bet sistēmā ar *LRA* to nevarēja sasniegt.

Lai novērtētu abu Ramana pastiprinātāju darbību ar izvēlēto konfigurāciju, iegūto *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas salīdzināta ar sistēmu bez pastiprināšanas (13. att.).



13. att. Sistēmas *BER* atkarība no uztvertā signāla jaudas *LRA* (augšējos grafikos) un *DRA* (apakšējos grafikos) pastiprinātājam.

Jaudas sods starp sistēmu bez pastiprināšanas un sistēmu ar *LRA*, ja *LRA* novietots 125 km attālumā no raidītāja bloka, – 0,2 dB. Ja *LRA* novietots 100 km attālumā no raidītāja bloka – 0,38 dB.

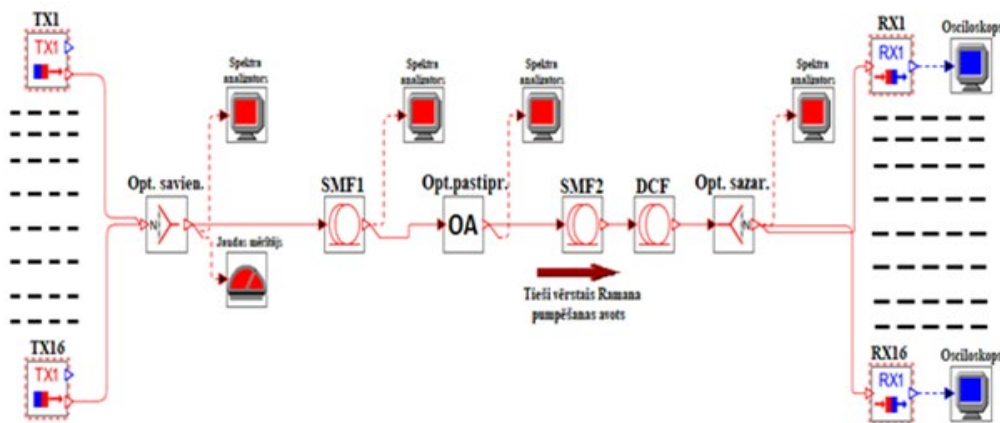
Jaudas sods starp sistēmu bez pastiprināšanas un sistēmu ar *DRA* ir tikai 0,35 dB, ja *SMF1* garums ir 125 km. Ja *SMF1* šķiedras garums ir 100 km, jaudas sods sasniedz 0,67 dB, ja *SMF1* garums ir tikai 75 km, – 0,88 dB. Tāpat kā sistēmā ar *LRA*, arī *DRA* gadījumā jaudas soda palielinājums, pastiprinātāja pumpēšanas avotam atrodoties tuvāk raidītāja blokam, ir izskaidrojams ar šķiedras nelinearitāti. Jo tuvāk pumpēšanas avots ir raidītāja blokam, jo garāks ir *SMF2* šķiedras garums un jo lielāks ir tā kopējais optiskais vājinājums. *SMF1* izejā jābūt arī lielākai pastiprinātā signāla jaudai, kas skaidrāk izsaka šķiedru nelinearitāti.

Piektā nodaļa

Šajā nodaļā pētīti kombinētie pastiprināšanas risinājumi, kas veidoti no *SOA*, *EDFA*, Ramana un *FOPA* pastiprinātāju kombinācijām. Darbā pētīta un salīdzināta Ramana-*EDFA* un Ramana-*SOA* kombinēto risinājumu izmantošana 16 kanālu *WDM* pārraides sistēmā. Sakarā ar pārmērīgo *SOA* radīto kropļojumu skaitu un spēcīgo *EDFA* radītā pastiprinājuma atkarību no viļņa garuma *EDFA-SOA* kombinētā risinājuma ieviešana nav apsvērta. Vēl šajā nodaļā pētīts Ramana-*FOPA* kombinētais pastiprinātājs *WDM* sistēmā.

Kombinēto Ramana-*SOA* un Ramana-*EDFA* pastiprinātāju radītā signāla traucējumu pētīšanai izstrādāta 10 Gbit/s 16 kanālu *DWDM* pārraides sistēma ar *NRZ-OOK* modulāciju un 50 GHz kanālu intervālu (14. att.). Pārraides sistēma darbojas 193,05–193,8 THz frekvenču joslā. Vispirms signāls tiek raidīts pa 72 km vienmodas šķiedru (*SMF1*) ar 0,2 dB/km vājinājumu un 16 ps/nm/km hromatisko dispersiju. *SMF* garumu nosaka optiskā signāla nepieciešamā jauda optiskā pastiprinātāja ieejā, kas ir ļoti svarīga, pateicoties piesātinājuma

efektam – it īpaši, ja tiek izmantots *SOA*. Arī *EDFA* šis parametrs ir būtisks, taču tas ir optimizēts pusvadītāju pastiprinātājam. Vāja signāla jaudas līmenis katram kanālam pie pastiprinātāja ieejas ir aptuveni $-22,4$ dBm, tāpēc signālu pastiprina līnijas *SOA* vai *EDFA*.



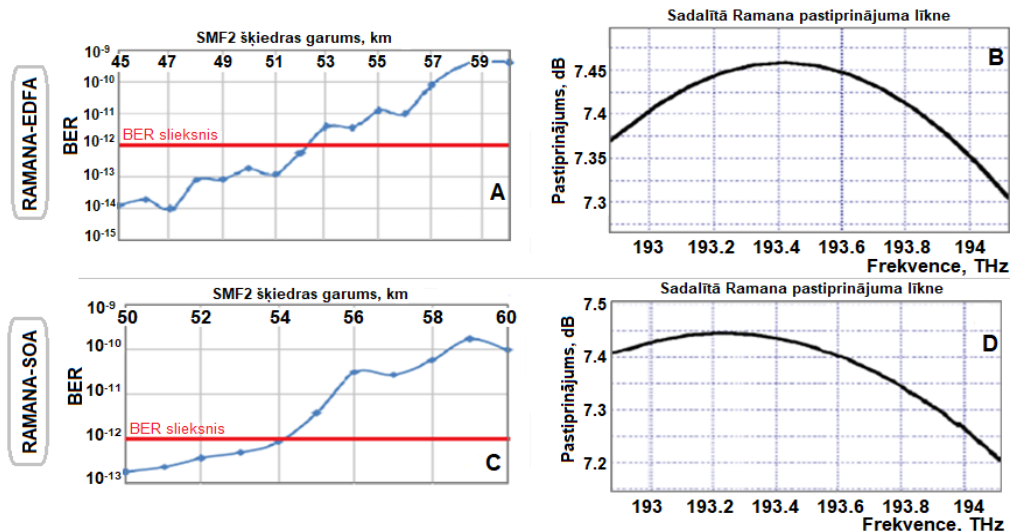
14. att. 16 kanālu 10 Gbit/s *DWDM* pārraides sistēmas simulācijas modelis ar kombinēto optisko pastiprinātāju.

SOA pumpēšanas strāva ir optimizēta, lai samazinātu pastiprinātāja radītos signāla traucējumus. *EDFA* parametri tiek izvēlēti tādā veidā, lai jaudas spektra nevienmērīgumu varētu viegli kompensēt ar vienu Ramana pumpēšanas avotu. Tad pastiprinātais signāls nonāk otrā *SMF* šķiedrā, kur to pastiprina mazjaudas *DRA*, kura jauda ļauj sasniegt maksimālo signāla pastiprinājumu, neizraisot pārāk daudz nelineāru kropļojumu. Otrās *SMF* garums ir mainīgs, lai iegūtu maksimālo pārraides attālumu. Optiskās līnijas beigās signāls ienāk 17 km garā *DCF* šķiedrā.

Pirmkārt, atrastas Ramana-*SOA* un Ramana-*EDFA* konfigurācijas, kas ļauj sasniegt maksimālo pārraides attālumu. *SOA* pastiprinātāja pumpēšanas strāva ir 370 mA, jo, to palielinot, *SOA* pastiprinājums samazinās un ir sasniegts populācijas inversijas maksimālais līmenis. Kombinētā Ramana-*EDFA* izvēlēts 5 m gara *EDF* šķiedra ar 10 dBm 980 nm tieši vērsto un 16 dBm 1480 nm pretēji vērsto pumpēšanas avotu. *EDFA* pastiprinājums svārstās no 12,93 dB līdz 13,1 dB un trokšņa rādītājs – no 5,33 līdz 5,49 dB viļņa garuma 1547–1553 nm diapazonā. *EDFA* konfigurācija nav optimāla, tomēr iegūtais trokšņa rādītājs ir mazāks nekā *SOA* teorētiskais.

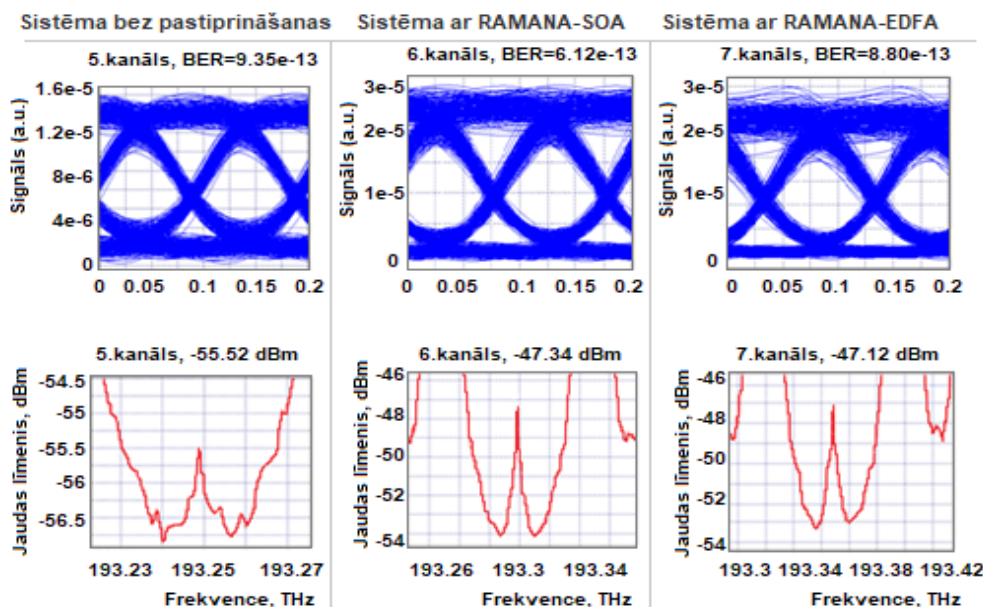
Kombinēto Ramana-*EDFA* un Ramana-*SOA* pastiprinātāju izpētei izmantots tieši vērstais 1453,1 nm Ramana pumpēšanas avots ar pumpēšanas jaudu 350 mW, jo, palielinot jaudu, *FWM* radītie šķērstraucējumi pārsniedz pieļaujamo vērtību un pasliktina kopējo sistēmas darbību.

SMF2 šķiedra ir *DRA* pastiprināšanas vide, tāpēc ir jāatrod *SMF2* garums (15. att.). Ramana-*SOA* pastiprinātājam maksimālais *SMF2* garums ir 52 km (kopējais pārraides attālums – 124 km), kas nodrošina sistēmas $BER < 10^{-12}$. Ramana-*EDFA* pastiprinātājam šķiedras garums ir 54 km (kopējais attālums – 126 km). Svarīgi piebilst, ka ir iegūts arī maksimālais pārraides attālums sistēmai, kurā netika lietota pastiprināšana, un tas ir 69 km. Tas nozīmē, ka Ramana-*SOA* kombinācija spēj pagarināt šo attālumu par 55 km, Ramana-*EDFA* – par 57 km.



15. att. Sistēmas *BER* atkarība no *SMF2* garuma (A, C) un DRA iegūtie pastiprinājuma spektri Ramana-SOA (B) un Ramana-EDFA (D).

Lai identificētu faktorus, kas ierobežo pārraidi katrā no trijiem gadījumiem, tika izanalizētas kanālu acu diagrammas ar vissliktāko *BER* (16. att.).



16. att. Kanālu acu diagrammas ar sliktāko *BER* vērtību (augšējos grafikos) un starpkanālu šķērštraucējumi attiecīgajos kanālos (apakšējos grafikos).

Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, veikti vairāki secinājumi.

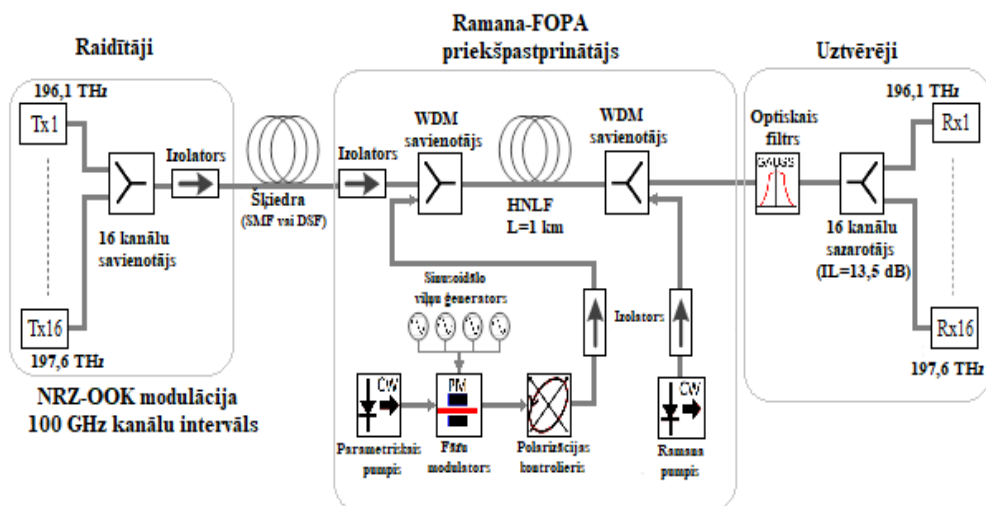
1. Kombinētā pastiprinājuma ieviešana var nodrošināt vienmērīgāku pastiprinājumu. Ramana-EDFA gadījumā EDFA parametri tika koriģēti, lai iegūtu pastiprinājuma spektru, ko viegli varētu izlīdzināt ar vienu Ramana pumpēšanas avotu. Ievadītā EDFA konfigurācija nodrošināja 0,17 dB pastiprinājumu starpību, un pēc EDFA papildināšanas ar DRA tika iegūts pastiprinājuma spektrs, kurā maksimālā pastiprinājuma starpība ir tikai 0,05 dB.

2. Pat neoptimāli konfigurēts EDFA rada mazākus signālu kropļojumus nekā SOA. Ieejas signāla jauda tika īpaši pielāgota SOA, tādēļ EDFA nebija optimāli konfigurēts, tomēr Ramana-EDFA uzrāda labākus rezultātus un nodrošina pārraidi garākā optiskā līnijā nekā Ramana-SOA

pastiprinātājs (attiecīgi 126 km un 124 km). Ramana-*SOA* nodrošināja vidējo pastiprinājuma 19,6 dB, Ramana-*EDFA* – 20,4 dB.

3. *EDFA* radīja mazākus signāla kropļojumus, tāpēc Ramana-*EDFA* risinājums nodrošināja labāku pastiprinājuma kvalitāti nekā Ramana-*SOA*. Abos gadījumos galvenais faktors, kas ierobežo pārraidi, ir *FWM* saražotais kanālu šķērštraucējums.

Otrs šīs nodaļas pētījuma mērķis ir kombinētais Ramana-*FOPA* pastiprinātājs. Abi šie pastiprinātāji ļauj mainīt joslas platumu, izmantojot piemērotus pumpēšanas avotus. Tika pētīta abu šo pastiprinātāju kombināciju 16 kanālu 40 Gbit/s WDM pārraides sistēmā, kas darbojas S-joslā (17. att). Kanāli tika pārraidīti pa 150 km garu *NZ-DSF* (*ITU-T G.655*) šķiedru, jo, salīdzinot *SMF* un *NZ-DSF* šķiedras, nebija novērotas pamanāmas atšķirības. Galvenais mērķis ir atrast Ramana-*FOPA* konfigurāciju, kas padara iespējami ļoti vāju optiskā signāla pastiprinājumu, vienlaikus saglabājot pēc iespējas zemāku jaudas starpību, kā arī vienmērīgi pastiprināt visus kanālus un saglabājot sistēmas *BER* zem 10^{-9} . Piedāvātā Ramana-*FOPA* iestatīšana salīdzināta ar viena pumpēšanas avota *FOPA* pastiprinātāju ar tādu pašu izejas signāla jaudas līmeni, lai novērtētu veikspējas uzlabojumus pēc Ramana pievienošanas sistēmai. Kombinētā pastiprinātāja veikspēja novērtēta, analizējot pastiprinājuma līkni, saņemta *OSNR* un *BER* vērtības.



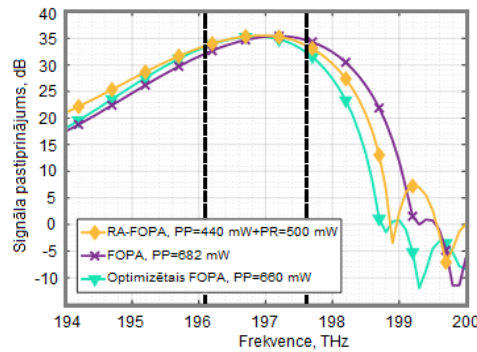
17. att. Ramana-*FOPA* kombinētā pastiprinātāja simulācijas shēma, kas darbojas kā priekšpastiprinātājs 16 kanālu WDM sistēmā.

Ramana-*FOPA* veikspēja ir atkarīga no diezgan sarežģītas mijiedarbības starp dažādiem nelineāriem efektiem, ir jāatrod, kādi parametriskās pumpēšanas (PP) un Ramana pumpēšanas (RP) parametri jāizvēlas, lai sasniegtu nepieciešamās pastiprinājuma īpašības. Konstatēts, ka Ramana-*FOPA* WDM kanālu pastiprinājums ir vienāds, ja tiek apvienoti 192,918 THz un 440 mW izejas jauda PP un 206,13 THz un 500 mW izejas jauda RP.

Vidējais 16 kanālu WDM pastiprinājums Ramana-*FOPA* gadījumā ir 34,7 dB, kas ir vidēji par 8,2 dB lielāks nekā Ramana un *FOPA* pastiprinājumu summa.

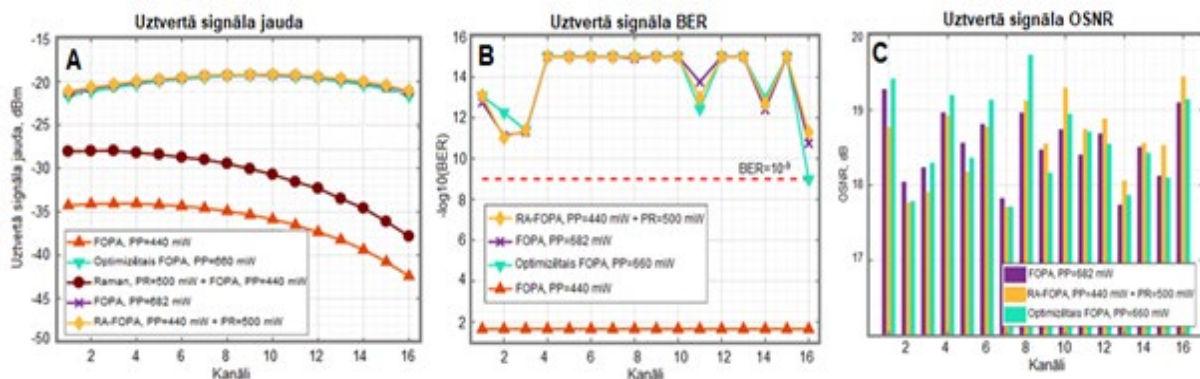
Ramana-*FOPA* pastiprinātāja darbību tika salīdzināta ar viena pumpējošā avota *FOPA* pastiprinātājiem (PP – 682 mW un 660 mW). 18. attēlā redzams, ka visu šo trīs pastiprinātāju pastiprinājums ir aptuveni vienāds, tikai kombinētajam risinājumam pastiprinājums ir vienmērīgāks un plašāks. Ramana-*FOPA* –3 dB pastiprinājuma joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā *FOPA* gadījumā ar 682 mW un 0,20 THz platāks par optimizēto *FOPA* pie

660 mW, ko daļēji var izskaidrot ar tiešu signālu pastiprināšanu, izmantojot Ramana pumpēšanu.



18. att. *FOPA* un Ramana-*FOPA* signāla pastiprinājuma līknes.

Ramana-*FOPA* kombinētais pastiprinātājs nodrošina vienmērīgu izejas jaudu. Salīdzinot *BER* sadalījumu, var redzēt, ka 16. kanāls uzrāda sliktāko veiktspēju, tas ir saistīts ar *FOPA* stāvo pastiprinājuma līkni, kas rada mazāku kanāla jaudu. Attiecīgi vidējā un standarta *OSNR* novirze: Ramana-*FOPA* – $18,57 \pm 0,53$ dB, *FOPA* – $18,52 \pm 0,45$ dB, optimizētā *FOPA* – $18,59 \pm 0,61$ dB. Tas pierāda, ka pēc uztvertā signāla jaudas izlīdzināšanas visi trīs pastiprinātāji rada aptuveni vienādu trokšņa līmeni. Jāatzīmē, ka abiem viena pumpēšanas avota *FOPA* ir izmantoti ievērojami jaudīgāki parametriskās pumpēšanas lāzeri, lai sasniegtu vienādu izejas jaudu un *OSNR* līmeni.



19. att. *WDM* kanālu jaudas sadalījums (A), *BER* sadalījums (B) un *OSNR* sadalījums (C).

Viena pumpēšanas avota *FOPA* jauda (PP = 682 mW) ir mazāka par 38 %, salīdzinot ar kopējo pumpēšanas jaudu (PP = 440 mW un RP = 500 mW) Ramana-*FOPA* konfigurācijā, nepieciešamā *FOPA* pumpēšanas jauda ir vairāk nekā par 36 % lielāka nekā katram atsevišķam Ramana-*FOPA* pumpēšanas lāzeram. Viena pumpēšanas avota augstā jauda ir saistīta ar ieviešanas problēmām, piemēram, siltuma izkliedi, efektivitāti un *SBS* ierobežojumiem attiecībā uz palaišanas jaudu.

Kombinētajam Ramana-*FOPA* pastiprinātājam ir ievērojamas priekšrocības *WDM* pārraides sistēmās, un šo kombinēto risinājumu var izmantot, lai būtiski uzlabotu esošo *FOPA* pastiprinātāju darbību.

Sestā nodaļa

Optisko pastiprinātāju aktualitāte ir saistīta ar faktu, ka strauji attīstās optiskās pārraides

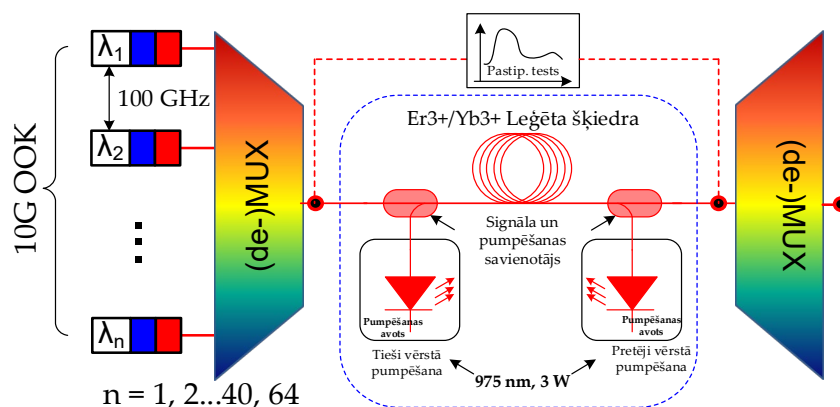
sistēmas, jo palielinās pārraidīto datu apjoms un ir nepieciešami lielāki datu pārraides ātrumi. Tas rada jaunus izaicinājumus, un viens no tiem ir optisko signālu pastiprināšana.

Šīs nodaļas mērķis ir izstrādāt divu retzemju elementu leģējuma pastiprinātāju ar apvalka pumpēšanas tehnoloģiju. Šāda tipa pastiprinātāji ļautu sasniegt augstu un vienmērīgu pastiprinājumu. Paredzētā lietojuma joma ir *WDM* optiskās pārraides sistēmas, metro piekļuves tīkli un hibrīdi pasīvie optiskie tīkli paplašinātai sasniedzamībai.

Divu retzemju leģēto elementu kombinācija uzlabo pumpēšanas efektivitāti, kas ir būtiska apvalka pumpēšanas risinājumam. Kā otrs retzemju elements izvēlēts iterbijs ($3+$), jo Yb ir daudz lielāks absorbcijas šķērsgriezums nekā Er, un tas nodrošina emisiju Er absorbcijas joslā.

Apvalka pumpēšanas metodes būtiska komponente ir speciāls savienotājs, kas apvieno signālu un pumpējošo gaismu tā, lai signāls izplatās leģētās šķiedras kodolā, un pumpējošais starojums – apvalkā. Apvalka pumpēšanai var izmantot dažādus savienotājus atkarībā no to fiziskās realizācijas. Uzmanību piesaistījusi viena no konusveida šķiedru kūlīšu tehnikām. Izmantojot šādu tehniku, šķiedru savienotāju ražošana nav tik sarežģīta.

Pētīta apvalka pumpēšanas *EYDFA* darbība dažādos darbības apstākļos, lai novērtētu piemērotību pilsētas optisko pārraides tīklu piekļuves segmentam. Lai veiktu analīzi, izstrādāta simulācijas sistēma (20. att.), izmantojot *VPIphotonics Design Suite* [48]. Pastiprinātāja modelis veidots, izmantojot komerciāli pieejamās Er/Yb leģējuma šķiedras *Fibercore CP1500Y* iegūtos raksturlielumus. Lai izveidotu reālistisku *EYDFA* modeli, eksperimentāli iegūtie *CP1500Y* šķiedras pārklāšanās koeficienti un absorbcijas šķērsgriezumi ievadīti *EYDFA* modelī. Pastiprinātāja veiktspēja novērtēta, ņemot vērā tā pastiprinājumu, trokšņa rādītāju, kas ir *ASE* trokšņa daudzums, ko rada pastiprināšana un pumpēšanas jaudas pārveidošanas efektivitāte.



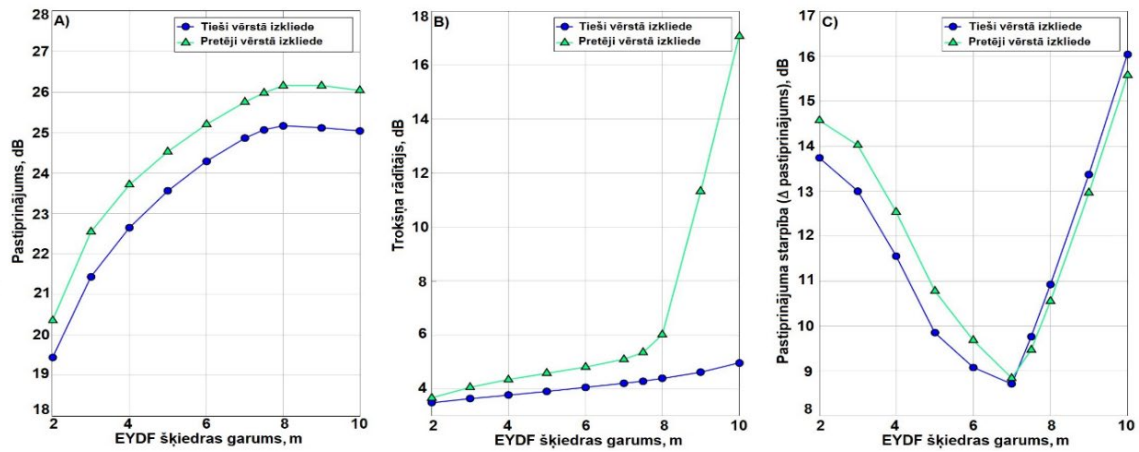
20. att. Vienkāršots simulācijas sistēmas modelis ar apvalka pumpēšanas *EYDFA*.

Simulācijas sistēmas parametri: 10 Gbit/s *NRZ-OOK*, 1 līdz 64 kanāli, 191,6–195,5 THz darbības diapazons, 100 GHz kanālu intervāls, –25 dBm/kan līdz –10 dBm/kan.

***EYDFA* pumpēšanas avota parametri:** 975 nm viļņgarums, 3 W pumpēšanas jauda, tieši un pretēji vērstā izplatīšanās.

Leģētās šķiedras parametri: līdz 10 m šķiedras garums, $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ Er^{3+} koncentrācija, $2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ Yb^{3+} koncentrācija, $1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ Er/Yb šķērsrelaksācijas koeficients.

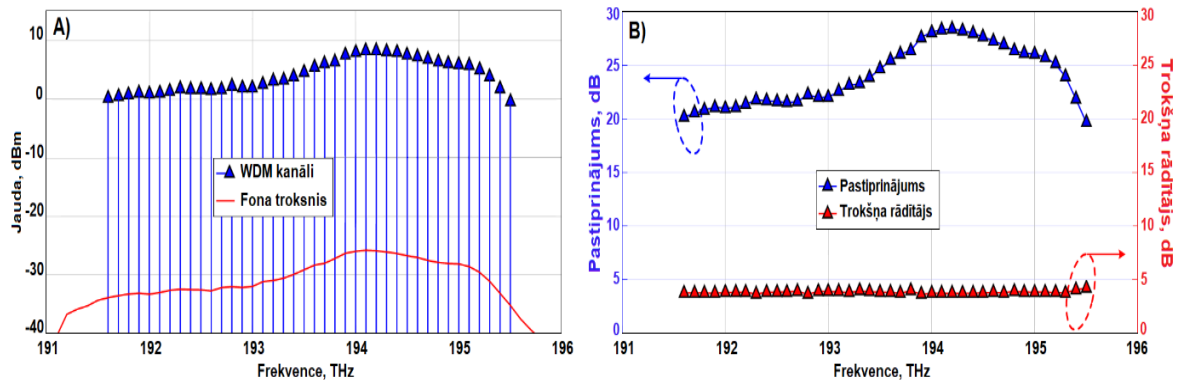
EYDFA konfigurācija izvēlēta, iegūstot pastiprinājumu un *NF* pie dažādiem pastiprināšanas vides garumiem gan tieši, gan netieši vērstai izkliedei. Lai iegūtu šos rezultātus, *EYDFA* ievietots 40 kanālu *WDM* pārraides sistēmas modelī un ieejas signāla jauda –20 dBm/kan.



21. att. (A) vidējais pastiprinājums, (B) vidējais trokšņa rādītājs, (C) maksimālā pastiprinājuma starpība starp kanāliem atkarībā no *EYDF* šķiedras garuma.

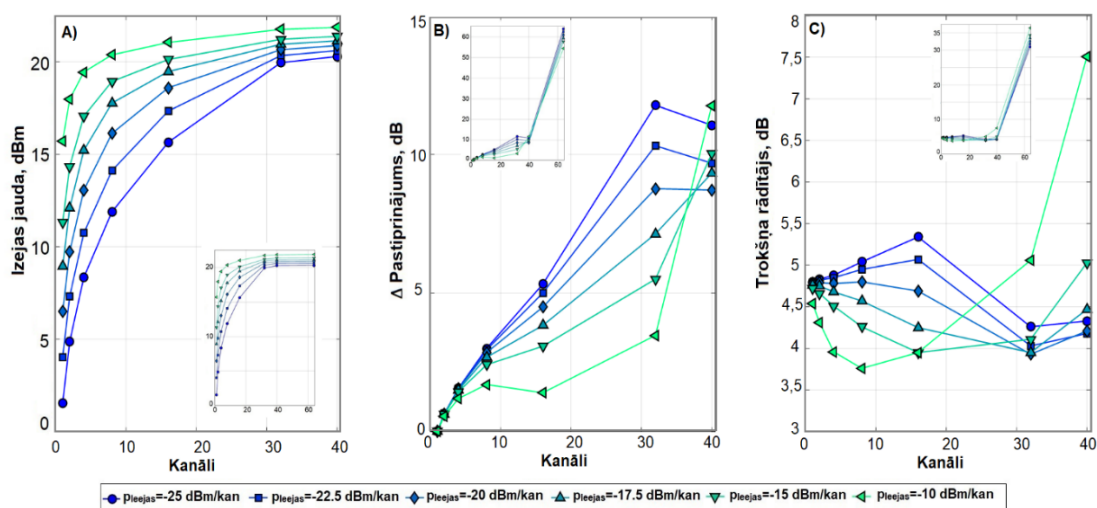
21. (A) attēlā redzams, ka pastiprināšanas vides garuma palielināšana izraisa vidējo pastiprināšanas pieaugumu tikai līdz 8 m *EYDF* un tad pastiprinājums nedaudz samazinās. Līdz 8 m *EYDF* iegūtās *NF* vērtības ir 6 dB robežās, pēc tam *NF* palielinās, it īpaši pretēji vērstatās pumpēšanas gadījumā (21. (B) att.). Pastiprinājuma starpība sasniedz minimālo līmeni gan tieši, gan pretējo vērsto pumpēšanas avotu risinājumiem, kad *EYDF* šķiedras garums ir 7 m. Pretēji vērstaais pumpēšanas avots nodrošina lielāku vidējo pastiprinājumu, tieši vērstaais – mazākas *NF* vērtības. Tika izvēlēts izmantot zemākā trokšņa rādītāja vērtības, nevis lielāku pastiprinājumu, tāpēc viena kodola apvalka pumpēšanas *EYDFA* izvēlēts 3W 975 nm tieši vērstaais pumpēšanas avots un 7 m *EYDF* šķiedra.

22. attēlā redzami signāla un trokšņu spektri pastiprinātāja izejā, kā arī pastiprinājuma un trokšņa rādītāja spektri.



22. att. (A) optiskais jaudas spektrs, (B) vidējais pastiprinājums un *NF* sistēmā ar 40 *WDM* kanāliem.

Signāla jauda svārstās no 0,1 dBm līdz 8,3 dBm (22. (A) att.). Tas tika sasniegts, izmantojot *EYDFA* pastiprinājumu koeficientu, kura spektrs ir redzams 22. (B) attēlā un svārstās no 19,7 dB līdz 28,3 dB. 40 pastiprināto kanālu trokšņa rādītāju vērtības mainās no 3,7 līdz 4,2 dB. Apskatīšu *EYDFA* reakciju, ja tiks mainīts kanālu skaits un jauda pastiprinātāja ieejā.



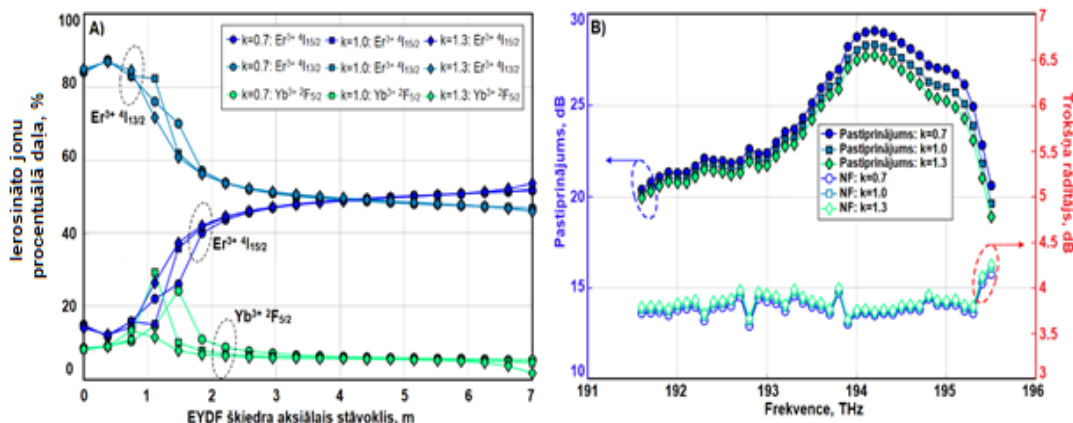
23. att. (A) izejas jauda, (b) maksimālā pastiprinājuma starpība, (c) maksimālie trokšņa rādītāji, salīdzinot ar *WDM* kanālu skaitu un ieejas jaudu.

Jo lielāks ir kanālu skaits, jo mazāka ir izejas jaudas atšķirība pie dažādām signāla jaudām pastiprinātāja ieejā. Turklāt jaudas pieaugums pastiprinātāja izejā kļūst nenozīmīgs, palielinot skaitu no 40 līdz 64 kanāliem, neatkarīgi no signāla jaudas *EYDFA* ieejā. Ja ieejas signāla jauda ir -25 dBm/kan un kanālu skaitu palielina no 16 līdz 32, tiek novērots lielāks *ASE* trokšņa līmenis. Palielinot kanālu skaitu no 32 līdz 40, pastiprinātāja izejas jauda pieaug tikai par 0,3 dB un paliek nemainīga, ja ieejas kanālu skaits tiek palielināts no 40 līdz 64 kanāliem. Tas pierāda, ka šajā brīdī pastiprinātājs jau darbojas piesātinājuma režīmā. Pamatojoties uz 23. (A) attēlā redzamā grafika rezultātiem, var uzskatīt, ka *EYDFA* izejas jauda ar izvēlēto konfigurāciju ir ierobežota līdz aptuveni 22 dBm.

Ja kanālu skaits ir līdz 32, tad pie lielākas ieejas signāla jaudas ir mazāka maksimālā pastiprinājuma starpība starp kanāliem. Bet, palielinot kanālu skaitu līdz 40, situācija kļūst pretēja, pastiprinājuma starpība pie ieejas signāla jaudas -25 dBm/kan kļūst mazāka.

Līdzīga tendence ir redzama 23. (C) attēlā, kur kanālu skaita pieaugums pastiprinātāja ieejā vispirms izraisa iegūto *NF* samazināšanos, savukārt pēc tam, kad kanālu skaits sasniedz noteiktu vērtību, vidējās *NF* vērtības sāk augt. Pastiprinājuma starpības un vidējā trokšņa rādītāja vērtības dramatiski palielinās, palielinot kanālu skaitu no 40 līdz 64, jo pastiprinātājs ar šādu konfigurāciju nevar nodrošināt pastiprinājumu visā frekvenču apgabalā, ko aizņem 64 kanāli, un signālu augstākas frekvences kanāli tiek absorbēti pastiprināšanas vidē.

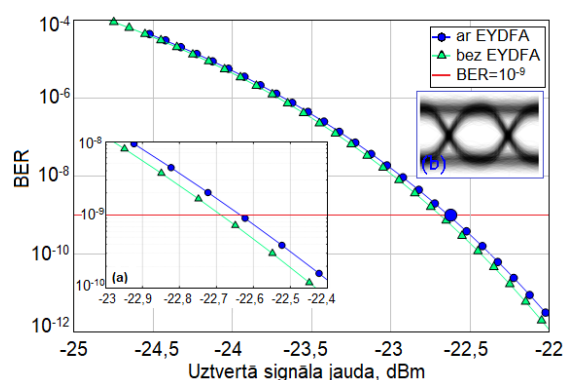
Izejas jaudas ierobežojums galvenokārt ir saistīts ar pastiprināšanas vides fizikālajiem parametriem, kas raksturo ātrumu visā šķiedrā, ar kuru pumpēšanas starojums tiek patērēts un pārnest uz pastiprināto signālu. *EYDF* šķiedras Yb^{3+} joni ir atbildīgi par pumpējošā starojuma ātru absorbciju un par tās enerģijas daļu pārraidi uz Er^{3+} joniem, tāpēc, manipulējot ar Yb emisijas un absorbcijas šķērsgriezumu raksturlielumiem, iegūts priekšstats par to, kā Yb^{3+} jonu raksturlielumi ietekmē *EYDFA* darbību. Eksperimentāli izmērītie Yb emisijas un absorbcijas šķērsgriezumi reizināti ar 0,7 un 1,3 koeficientu, un iegūta pastiprinājuma, *NF* un ierosinātā jonu procentuālā atkarība no šķiedras aksiālā stāvokļa (24. att.).



24. att. Jutības analīze, kas parāda Yb^{3+} absorbcijas un emisijas šķēsgriezumu ietekmi uz jonu ierosmi koeficientiem $k = 0,7, 1,0, 1,3$: (A) ierosināto jonu procentuālā attiecība pret aksiālo stāvokli šķiedrā; (B) *EYDFA* vidējais pastiprinājums un maksimālais *NF WDM* sistēmā ar 40 kanāliem.

Ja šķēsgriezuma vērtības samazinās par 30 %, ierosināto Yb jonu procentuālā pīķa vērtība samazinās par 5 % un tiek pārvietota tālāk pastiprināšanas vidē: no 1,1 m līdz 1,5 m *EYDF* (24. (A) att.). Tas pagarina *EYDF* garumu, kur notiek signāla pastiprināšanās, un tā rezultātā tiek iegūts lielāks pastiprinājums (par $\sim 0,7$ dB) un zemāks *NF* (par $\sim 0,1$ dB). Pretēja situācija novērota, ja Yb emisijas un absorbcijas šķēsgriezumi palielināti par 30 %, Yb populācijas inversijas maksimums tiek novērots 0,74 m attālumā no *EYDF* šķiedras ieejas (par 0,36 m tuvāk). Rezultātā iegūtais vidējais pastiprinājums ir samazinājies par 0,5 dB, un vidējais *NF* pieaudzis par 0,05 dB.

BER veikspēja novērtēta 40 kanālu *DWDM* sistēmas konfigurācijai ar *EYDFA* un bez pastiprināšanas (25. att.). Rezultātā jaudas sods ir zem 0,1 dB, ja $BER = 10^{-9}$. Šādus traucējumu līmeņus var uzskatīt par nenozīmīgiem. Tomēr pastiprinājuma spektri būtu jāizlīdzina, piemēram, izmantojot pastiprināšanas izlīdzināšanas filtrus vai vairākus pastiprināšanas iecirkņus, pirms šādus pastiprinātājus efektīvi izmantot optisko zudumu kompensēšanai *WDM* pārraides sistēmās.



25. att. Sliktākā *BER* atkarība no uztvertā signāla jauda 40 kanālu *WDM* sistēmā ar un bez *EYDFA* pastiprinātāja, kur (a) pietuvināts, ja $BER = 10^{-9}$, (b) acu diagramma, kas fiksēta konfigurācijai ar pastiprinātāju, ja $BER \cong 10^{-9}$.

Pētījuma laikā atrastie un atklātie pastiprinātāja raksturlielumi ir svarīgi, lai eksperimentāli tālāk izstrādātu un testētu apvalka pumpēšanas *EYDFA* pastiprinātāju.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Veicot definēto uzdevumu izpildi, ir iegūti vairāki **promocijas darba rezultāti un secinājumi**.

Pārtraides sistēmās ar *EDFA* pastiprinātāju, kur kanālu intervāls ir zem 100 GHz, ir nepieciešama pumpēšanas jauda virs 60 mW, lai nodrošinātu atbilstošu pastiprināmā signāla kvalitāti un *BER* vērtības zem noteiktā līmeņa 10^{-9} . Ja intervāls ir zem 50 GHz, tad blakus kanālu spektru pārklāšanās ir neizbēgama un jaudas soda vērtība ir lielāka par 0,20 dB.

Sistēmās ar vairākiem *EDFA* pastiprināšanas posmiem no enerģijas patēriņa viedokļa optimālākā ir sistēma ar trīs *EDFA* un 100 km pastiprināšanas diapazonu, jo kopējā sistēmas pumpēšanas jauda ir mazāka (105 mW) un pietiek ar 24 m *EDF* šķiedras, lai nodrošinātu nepieciešamo signāla kvalitāti un sistēmas *BER* būtu zem 10^{-9} . Jaudas sods *WDM* sistēmai ar trīs *EDFA* pastiprinātājiem attiecībā pret sistēmu bez pastiprināšanas ir tikai 0,32 dB.

Izmantojot tikai vienu platjoslas *ASE* gaismas avotu visiem lietotājiem un *DCM* moduli dispersijas kompensācijai, pētāmā 16 kanālu *WDM* optiskās piekļuves sistēma nodrošināja datu pārraidi vairāk nekā 20 km garā līnijā ar augstu sistēmas veiktspēju (*BER* 10^{-10}). Šāds risinājums ir labs nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem.

Kombinētās konfigurācijas ietekmes novērtējums uz *WDM-PON* sistēmas spektrālo efektivitāti atklāja, ka SE efektivitāti var palielināt, optimizējot kanālu intervālu. Sistēmai ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMF*, SE (0,62 (bit/s)/Hz) ir 6,2 reizes lielāka nekā tipiskai 100 GHz 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmai. *WDM-PON* sistēmai ar *MMF* un *MLR* spektrālā efektivitāte ir 0,27 (bit/s)/Hz un ir 2,7 reizes lielāka nekā tipiskai sistēmai.

Diskrētā un sadalītā Ramana pastiprinātāju novietojot tālāk no raidītāja bloka (125 km), ir nepieciešama par 3 % mazāka pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu pastiprināmā signāla kvalitāti *BER* zem 10^{-9} un arī kanālu pastiprinājums būtu virs 21,5 dB. Diskrētā Ramana pastiprinātāja gadījumā pumpēšanas jauda (līdz 500 mW) ir vidēji par 50 % mazāka nekā sadalītā Ramana pastiprinātāja gadījumā (minimālās pumpēšanas jauda ir 905–1020 mW atkarībā no izvietojuma pārtraides līnijā).

Kombinētā Ramana-*FOPA* datormodeļa pastiprinājums ir vienmērīgāks un sasniedz 34,7 dB 16 kanālu 40 Gbit/s *WDM* sistēmā. Kombinētā pastiprinātāja pastiprinājums ir par 30 % (8,2 dB) lielāks nekā Ramana un *FOPA* pastiprinājumu summa. Ramana-*FOPA* –3 dB pastiprināšanas joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā 682 mW *FOPA* gadījumā un 0,20 THz platāks, salīdzinot ar optimizēto 660 mW *FOPA*, kas izskaidrojams ar tiešu signāla pastiprināšanu, izmantojot Ramana pumpēšanas avotu.

Apvalka pumpēšanas *EYDFA* datormodeļa pastiprinātājs nodrošināja vienmērīgu un plašāku pastiprinājumu (19,7–28,3 dB), zemu trokšņa līmeni (3,7–4,2 dB) un par 0,1 dB mazāku jaudas sodu. Pārtraides sistēma ar šādu *EYDFA* (7 m *EYDF* šķiedra, 3W 975 nm tieši vērsta pumpēšanas avots un $p_{\text{pieejas}} = -20$ dBm uz kanālu) ir piemērota *WDM* lietojumprogrammām.

IZMANTOTĀS LITERATŪTAS SARAKSTS

- [1] Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017–2022, Cisco Systems, White Paper, December 2018.
- [2] Agrawal G. Fiber-Optic Communication Systems. – USA: John Wiley and Sons, 2002. – 561 p.
- [3] Morioka, T. New Generation Optical Infrastructure Technologies: EXAT Initiative Towards 2020 and Beyond// IEEE. – 2009. – pp. 1–2.
- [4] Варава, Н., Никоноров, М., Пронин, С. Оптические усилители EDFA: практическое применение // Первая миля. – № 3, 2011, с. 48–53.
- [5] Connelly M. J. “Semiconductor optical amplifiers”, University of Limerick, Ireland, 2004, 177 p.
- [6] Zyskind, J., Srivastava, A. Optically Amplified WDM Networks. First edition. – USA: Academic Press, 2011. – 502 p. ISBN: 978-0-12-084590-3.
- [7] Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – Москва: Техносфера, 2004. 495 с.
- [8] Islam M.N. “Raman amplifiers for telecommunications”, IEEE Selected Topics in Journal of Quantum Electronics, Vol. 8, No. 3, 2002, pp. 548.–559.
- [9] Zhu, Z. Design green and cost-effective translucent optical networks. From: Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC 2011) and the National Fiber Optic Engineers Conference, 6.–10. march, 2011, pp. 1.–3.
- [10] Shaymal, B and Ajoy, G. Guided Wave Optics and Photonic Devices, – USA: – CRC Press, 2017. – 564 p.
- [11] Premaratne M. and Agrawal G. P. “Light Propagation in Gain Media. Optical Amplifiers”, Cambridge University Press, USA, 2011, 286 p.
- [12] Laming R. I., Zervas M. N., Payne D. N. “Erbium Doped Fiber Amplifier with 54 dB Gain and 3.1 dB Noise Figure”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, No. 12, 1992, pp. 1345–1347.
- [13] P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, Erbium-Doped Fiber Amplifiers. USA: Academic Press, 1999, p. 481.
- [14] F. Idachaba, U. I. Dike, H. Orovwode, “Future trends in fiber optics communication”, in Proc. World Congress on Engineering (WCE 2014), London, vol. 1, 2014, pp. 438–442.
- [15] J. Putrina, S. Olonkins, V. Bobrovs, “Investigation of in-line EDFA performance dependence on channel spacing in WDM transmission systems”, Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2016), Riga, Latvia, 2016, pp. 17–21.
- [16] Dutta AK, Dutta NK, Fujiwara M (2003). WDM technologies: Passive optical components. USA: Academic Press, 551(4).
- [17] Putrina, J. and V. Bobrovs, “Evaluation of erbium doped fiber amplifier application in fiber optics transmission systems”, 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 3796–3802, Shanghai, 2016.
- [18] J. Putrina, “EDFA characteristics and working principle evaluation in FOTS”, M. S. thesis, Telecom. Inst., Riga Technical University, Riga, Latvia, 2016.
- [19] G. Ivanovs, V. Bobrovs, S. Olonkins, A. Alsevska, L. Gegere, R. Parts et al., “Application of the Erbium-Doped Fiber Amplifier in Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Transmission Systems”, International Journal of Physical Sciences, vol. 9, no. 5, pp. 91–101, 2014.

[21] Islam M. N. “Raman amplifiers for telecommunications”, USA: Springer, 2004, p. 298.

[22] Bickovs, V., S. Olonkins, and V. Bobrovs, “Raman pre-amplifier performance comparison in two 320 Gbps transmission systems”, 2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 13–16, Riga, 2016.

[23] Agrawal G. P., Headley C. “Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems”, United Kingdom: Elsevier Academic Press, 2005, p. 389.

[24] Olonkins, S., I. Stankunovs, A. Alsevska, L. Gegere, and V. Bobrovs, “Investigation of in-line distributed Raman amplifiers with co and counter-propagating pumping schemes”, PIERS Proceedings, 3773–3777, Shanghai, China, Aug. 8–11, 2016.

[25] Zhang, T., X. Zhang, and G. Zhang, “Distributed fiber Raman amplifiers with incoherent pumping”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 6, 1175–1177, 2005.

[26] Mohmamed N. I. Raman Amplifiers for Telecommunications. New York: Springer, 2004. 331 p. ISBN 0-387-00751-2.

[27] Mahloo, M., J. Chen, L. Wosinska, A. Dixit, B. Lannoo, D. Colle, and C. M. Machuca, “Towards reliable hybrid WDM/TDM passive optical networks”, IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 2, 14–23, 2014.

[28] Bobrovs V., Spolitis S., Ivanovs G. and Gavars P. Performance Improvement of High Speed Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Proceedings of IX International Symposium on Telecommunications (BIHTEL). – Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, October 25.–27. – 2012. – pp. 1–6.

[29] Darren, P. and E. Mitchell, “Long-reach optical access technologies”, IEEE Network, Vol. 21, No. 5, 5–11, 2007.

[30] Vukovic, A., M. Savoie, and H. Hua, “Performance characterization of PON technologies”, Proc. of International Conference on Application of Photonics Technology, 1–10, Ottawa, 2007.

[31] Choi, B. H. and S. S. Lee, “The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals”, Optics Communications, Vol. 284, No. 24, 5692–5696, 2011.

[32] Spolitis, S., V. Bobrovs, and G. Ivanovs, “Reach improvement of spectrum-sliced dense WDM- PON system”, Proc. of 7th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, 296–301, 2012.

[33] Keiser, G., Optical Communications Essentials, McGraw-Hill, 2007.

[34] Ivanovs G., Spolitis S., Parts R., Bobrovs V. Performance Improvement of Spectrum-sliced Passive Optical Network// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Taipei, Taiwan, March 25–28. – 2013. – pp. 308–311.

[35] Spolitis S., Bobrovs V., Berezins S., Ivanovs G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System// Proceedings of 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2012). – Rome, Italy, October 15–18. – 2012. – pp. 195–199.

[36] A. Udalcovs, V. Bobrovs, I. Trifonovs, T. Celmins, “Investigation of Maximum Distance Reach for Spectrally Efficient WDM System with Mixed Data Rates and Signal Formats”, Elektronika ir Electrotechnika, vol. 19, no. 1, pp. 87–92, vol. 19, no. 1, 2013.

- [37] Nag, A., M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, No. 4, 466–475, Feb. 15, 2010.
- [38] A. Udalcovs, V. Bobrovs, "Investigation of spectrally efficient transmission for differently modulated optical signals in mixed data rates WDM systems", in 2011 Proc. IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW), pp. 7–12.
- [39] A. Udalcovs, P. Monti, V. Bobrovs, R. Schatz, L. Wosinska, G. Ivanovs, "Spectral and energy efficiency considerations in mixed-line rate WDM networks with signal quality guarantee", in 2013 Proc. 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–7.
- [40] R. Bajpai, S. Sengar, S. P. Singh, "Comparison of performance of a mixed line rate optical WDM network using different modulations at 40Gbps", 2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Spring), pp. 1–3.
- [41] R. Agalliu, M. Lucki, "System Performance and Limits of Optical Modulation Formats in Dense Wavelength", *Elektronika ir Electrotechnika*, vol. 22, no. 2, pp. 123–129, 2016.
- [42] N. Sharma, R. Vij, N. Badhan, "Enhanced spectral efficiency for intensity modulated DWDM systems", 2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC), Mumbai, 2015, pp. 1–6.
- [43] Miyamoto, T., et al., "Highly nonlinear fiber-based lumped fiber Raman amplifier for CWDM transmission systems", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 11, 3475–3483, Nov. 2005.
- [44] Al-Khateeb, M. A. Z., M. Tan, M. A. Iqbal, M. McCarthy, P. Harper, and A. D. Ellis, "Four wave mixing in distributed Raman amplified optical transmission systems", 2016 IEEE Photonics Conference (IPC), 795–796, Waikoloa, HI, 2016.
- [45] S. K. Routray, A. Javali, R. Nyamangoudar, L. Sharma, "Latching on to Keck's law: Maintaining the high speed trends in optical communication", 4th Int. Conf. Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS 2017), Coimbatore, 2017, pp. 1–5.
- [46] C. Matte-Breton et al., "Modeling and Characterization of Cladding-Pumped Erbium-Ytterbium Co-doped Fibers for Amplification in Communication Systems", in *Journal of Lightwave Technology*, December 2019.
- [47] C. Headley III et al., "Tapered fiber bundles for combining laser pumps (Invited Paper)", in *Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications*, 2005, vol. 5709, p. 263.
- [48] VPIphotonics GmbH, "VPItransmissionMaker 11.0", <https://www.vpi Photonics.com/>, accessed May 2020.