

Mareks Parfjonovs

HIBRĪDA PLATJOSLAS PASTIPRINĀTĀJA IZSTRĀDE ŠOPS RISINĀJUMIEM

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

Mareks Parfjonovs

Doktora studiju programmas "Telekomunikācijas" doktorants

**HIBRĪDA PLATJOSLAS PASTIPRINĀTĀJA
IZSTRĀDE ŠOPS RISINĀJUMIEM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. sc. ing.*

VJAČESLAVS BOBROVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Parfjonovs M. Hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrāde
ŠOPS risinājumiem. Promocijas darba kopsavilkums.
Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-08”
2023. gada 8. decembra lēmumu, protokols Nr. 27.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda Rīgas Tehniskās universitātes un Banku
Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšanas stratēģiskās specializācijas
jomas grantu atbalstu Nr. 8.2.2.0/20/I/008.

**NATIONAL
DEVELOPMENT
PLAN 2020**



EUROPEAN UNION
European Social
Fund

I N V E S T I N G I N Y O U R F U T U R E

<https://doi.org/10.7250/9789934370328>
ISBN 978-9934-37-032-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 23. februārī plkst. 15 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Ipatovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr. sc. comp.* Anita Jansone,
Liepājas Universitāte, Latvija

Asociētais profesors *Dr. phys.* Jānis Alnis,
Latvijas Universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis 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.

Mareks Parfjonovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras avotu saraksts, 77 attēli, 15 tabulu un 51 formula, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 160 nosaukumu.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs ir visaptverošs pētījums par inovatīva hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrādi un ieviešanu šķiedru optiskajās pārraides sistēmās. Reaģējot uz arvien pieaugošo pieprasījumu pēc lielākas tīkla jaudas un datu pārraides efektivitātes, tas cenšas risināt problēmas, kas saistītas ar optiskā signāla pastiprināšanu lielos attālumos mūsdienu optisko sakaru tīklos.

Pētījuma galvenie mērķi ietver jauna hibrīda pastiprinātāja izveidi, kas izmanto dažādu pastiprināšanas tehnoloģiju stiprās puses, vienlaikus mazinot to individuālos ierobežojumus. Darbā apskatīti teorētiskie principi un praktiskie apsvērumi, kas ir hibrīda platjoslas pastiprinātāja pamatā, izmantojot dažādas optisko pastiprinātāju tehnoloģijas. Tā mērķis ir optimizēt signāla kvalitāti un pārraides efektivitāti optisko šķiedru tīklos, jo īpaši gadījumos, kad optiskais vājinājums un joslas platuma paplašināšana ir kritiski faktori.

Stingri izpētot hibrīda platjoslas pastiprinātāja uzbūvi, veiktspējas novērtējumu un reālās pasaules lietojumus, šis darbs veicina jaunāko optisko sakaru tehnoloģiju attīstību. Darbā sniegtie atklājumi un atziņas var ievērojami uzlabot optisko pārraides sistēmu iespējas, tiem ir liela nozīme, lai apmierinātu pieaugošās mūsdienu lieljaudas datu tīklu prasības.

Kopumā pētījums sniedz vērtīgu ieguldījumu optiskās šķiedras pārraides jomā un sola turpināt platjoslas sakaru sistēmu attīstību un uzlabošanu.

SATURS

SATURS	5
SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	6
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS	8
Tēmas aktualitāte	8
Promocijas darba mērķis, darba uzdevumi un aizstāvamās tēzes	8
Pētījumu metodika	9
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	9
Darba struktūra un apjoms	10
Darba aprobācija un publikācijas	11
IEVADS	13
PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS	15
Pirmā nodaļa	15
Otrā nodaļa	17
Trešā nodaļa	20
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI	37
LITERATŪRAS SARAKSTS	41

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

APD – lavīna fotodiode

ASE – pastiprināta spontāna emisija

AWG – viļņvadu masīva režģis

B

BER – bitu kļūdu attiecība

C

CD – hromatiskā dispersija

CD_{SL} – hromatiskās dispersijas slīpums

CO – centrālais ofiss

CW – nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avots

CWDM – rupjas viļņgarumdales blīvēšanas

D

DCF – dispersiju kompensējoša šķiedra

DCM – dispersijas kompensācijas modulis

DEMUX – demultipleksors

DP-QPSK – dualpolarizācijas kvadratūras fāzes manipulācija

DWDM – blīvas viļņgarumdales blīvēšana

DWDM-PON – blīvs viļņgarumdales blīvēts *PON*

F

FBG – šķiedras Brega režģis

FEC – turpvērstā kodu labošana

FOPA – uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs

FP-SOA – Fabri-Pero pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

G

GN – globālais pastiprinājums

H

HNLF – paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

HDWDM – augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmām

I

IL – ienestais vājinājums

ISI – starpsimbolu interference

ITU-T – Starptautiskā Telekomunikāciju savienības Telekomunikāciju sektors

L

LPF – elektrisko zemfrekvenču filtrs

M

MCF – daudzkodolu optiskā šķiedra

MZM – Maha-Zendera instensitātes modulatora

MUX – multipleksors

N

NB-HA – šaurjoslas optisko signālu pastiprināšanas risinājums

NF – ienesto trokšņu rādītājs
NOE – nelineārie optiskie efekti
NRZ – bez atgriešanās pie nulles līnijas
NRZ-OOK – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar ieslēgšanas-izslēgšanas manipulāciju
NRZ-DPSK – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar diferenciālās fāzes manipulāciju
NZDSF — šķiedra ar ne-nulles nobīdītu dispersijas punktu

O

OBPF – optiskās joslas filtrs
ODN – optiskais sadales tīkls
OLT – optiskais līnijas terminālis
OLT-Tx – optiskās līnijas termināļa raidītājiem
ONT – optiskā tīkla galiekārta
ONT-Rx – optiskā tīkla galiekārtas uztvērējs
OSA – optiskais spektra analizators
OSNR – optiskā signāla-trokšņu attiecība
OŠ – optiskā šķiedra

P

PIN – *PIN* fotodiode
PM – jaudas mērītājs
PMD – polarizācijas modu dispersija
PON – pasīvais optiskais tīkls
PRBS – pseidogadījuma bitu secība
P2P – punkts uz punktu

R

ROADM – pārkonfigurējams optiskais pievienošanas-nomaināms multiplekseris
RX – uztvērējs
RZ – ar atgriešanos pie nulles līnijas kods

S

S-LED – superluminiscences gaismas diode (*S-LED*)
SDM – telpas blīvēšanas tehnoloģijas
SMF – vienmodas optiskā šķiedra
SNR – signāla-trokšņu attiecība
SOA – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs
SWB-HA – Platjoslas hibrīda pastiprinātājs

Š

ŠOPS – šķiedru optiskā pārraides sistēma

T

TDM – laikdales blīvēšanas tehnoloģija
TW-SOA – skrejviļņa pusvadītāju optiskais pastiprinātājs
TX –raidītājs

V

VOA – mainīgs optiskais vājinātājs

W

WDM – viļņgarumdales blīvēšana
WSS – viļņgarumdales selektīvais slēdzis

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Saskaņā ar jaunāko CISCO prognozi globālā IP datu plūsma tuvāko piecu gadu laikā palielināsies gandrīz trīs reizes. Iemesli tam ir arvien lielāks galalietotāju skaits, kā arī jauni un uzlaboti esošie kvalitatīvie pakalpojumi. Tādējādi, lai nodrošinātu informācijas pārraidi reālā laikā, ir nepieciešami lielāki datu pārraides ātrumi. Tas rada jaunas problēmas optiskās pārraides sistēmām, viena no tām ir optisko signālu pastiprināšana. Optiskais signāla pastiprinātājs ir mūsdienu šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) elementu kopas neatņemama daļa. Optisko pastiprinātāju lietojumu klāsts ir plašs – no zemu izmaksu, nelielu attālumu piekļuves tīkliem līdz reģionālajiem tīkliem, t. i., ļoti lielu attālumu starpkontinentālajiem zemūdens tīkliem. Optiskie pastiprinātāji ir ļoti aktuāli arī signālu apstrādes tehnikas kontekstā, kas balstās nelineāro optisko efektu (NOE) lietojumā. Piemēram, vairāku viļņu garuma gaismas avoti, viļņu garuma pārveidotāji, pilnīgi optiskie reģeneratori u. c. Šādiem lietojumiem parasti ir vajadzīga liela optiskā jauda. Leģētu šķiedru pastiprinātāju optisko īpašību pētījumi ir bijuši visaptveroši attiecībā uz atšķirīgiem leģējumiem un dažādiem leģējumiem vienā šķiedrā.

Mūsdienu optiskajās sakaru sistēmās biežāk sastopamie pastiprinātāji ir erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs un Ramana efekta šķiedras pastiprinātājs. Lielu un ļoti lielu attālumu tīklos izmanto hibrīdus risinājumus, kas sastāv gan no EDFA, gan no Ramana pastiprinātājiem.

Pumpēšanas apvalkā metode pastiprinātāju lietojumiem arī ir plaši pētīta. Tiek uzskatīts, ka aktuāls pētījumu virziens ir abu risinājumu kombinācija (dažādi leģējumi un apvalkā pumpēšana). Tomēr ir nepieciešami būtiski sagaidāmo pastiprinātāju papildu pētījumi, lai uzlabotu pastiprinājuma vienmērīgumu, trokšņa koeficientu (signālā un trokšņa attiecība (SNR)), nodrošinātu pumpēšanas avota efektivitāti (energoefektivitāti), pastiprinātāja optisko signāla pastiprinājuma efektivitāti utt. Galvenā ideja ir izpētīt visus jaunākos leģēto šķiedru pastiprinātāju tehniskos risinājumus un izvēlēties vispiemērotāko, lai izstrādātu rentablu pastiprinātāju, kas būtu labāks par patlaban pieejamajiem esošajiem risinājumiem. Tas ietver arī vispiemērotāko leģēto šķiedru meklēšanu, šķiedru optisko parametru mērījumus, īpašu apvienotāju izstrādi, apvalkā pumpētu pastiprinātāju realizēšanu un leģēto šķiedru pastiprinātāju prototipa testēšanu un veikspējas novērtēšanu. Paredzētā darbības joma (bet ne tikai) no lietojumu viedokļa ir viļņgarumdales blīvētās WDM optiskās pārraides sistēmas, metro piekļuves tīkli un pasīvie optiskie tīkli (PON), lai paplašinātu sasniedzamību.

Promocijas darba mērķis, darba uzdevumi un aizstāvamās tēzes

Promocijas darba mērķis – izstrādāt jaunu hibrīdu platjoslas optisko pastiprinātāju, izmantojot dažāda leģējuma optiskās šķiedras un efektīvu apvalka pumpēšanas paņēmieni, lai uzlabotu veikspēju viļņgarumdales blīvētajās (WDM) sakaru sistēmās.

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un pierādītu aizstāvamās tēzes, ir jāveic vairāki darba uzdevumi.

1. Eksperimentāli simulāciju vidē novērtēt EDFA un SOA pastiprinātāju lietojumu maksimālā pārraides attāluma noteikšanai viļņgarumdales blīvētajās WDM sakaru sistēmās, izmantojot 100 Gbit/s DP-QPSK modulāciju uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$

robežvērtību (Q faktora līmenis augstāks par 16 dB).

2. Eksperimentāli RTU Telekomunikāciju institūta (TI) ŠOPS laboratorijā novērtēt dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras pastiprinājuma efektivitāti atkarībā no laiduma garuma jauna inovatīva erbiju jonu leģētās šķiedras pastiprinātāja izstrādei.
3. Eksperimentāli un simulāciju vidē novērtēt *WDM* sakaru sistēmām ar datu pārraides ātrumu līdz 40 Gbit/s uz viļņa garumu hromatiskās dispersijas (*CD*) un nelineāro optisko efektu (*NOE*) ietekmi un kompensācijas metodes maksimālā pārraides attāluma palielināšanai, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla $\text{BER} \geq 1 \times 10^{-9}$.
4. Izstrādāt hibrīdu *Raman-EDFA* pastiprinātāju, novērtēt tā veiktspēju 16 kanālu *DWDM* sakaru sistēmā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, nodrošinot uztvertā signāla $\text{BER} \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

Aizstāvamās tēzes

1. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētajās šķiedrās vislielāko signāla pastiprinājumu iegūst pirmajos 3 m, savukārt, palielinot šķiedras garumu virs 5 m, tiek nodrošināta pastiprinājuma līmeņa saglabāšana un pārnese uz lielākiem gaismas viļņa garumiem.
2. Izmantojot hibrīdā risinājuma *EDFA-Raman* pastiprinātāju, *WDM* sakaru sistēmā iespējams vienlaikus nodrošināt optisko nesēju pastiprināšanu visā telekomunikāciju C joslā (1530–1565 nm) un mazināt uzkrāto hromatisko dispersiju *CD* un starpsimbolu interferenci (*ISI*), nodrošinot maksimālo līnijas pārraides attālumu.

Pētījumu metodika

Promocijas darba uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas, ka arī eksperimentālie mērījumi. Skaitliskās simulācijas realizētas *Matlab* un *RSoft OptSim* simulācijas programmatūrās, kuru pamatā izmantots nelineārais Šrēdingera vienādojums, lietojot sadale-solis (angļu val. – *Split-Step*) metodi, Furjē transformācija un arī Monte Karlo metode bitu kļūdu attiecības (*BER*) novērtēšanai.

Optisko signālu kvalitātes novērtēšanai simulāciju vidē un eksperimentālajās realizācijās izmantoti elektriskā un optiskā signāla spektri un jauda, uztvertā elektrisko signālu kvalitāte tika novērtēta, izmantojot bitu kļūdu attiecību *BER* un acu diagrammas. Eksperimentālo sistēmu realizācijā atsevišķos gadījumos reālā laika mērījumos uztvertā elektrisko signālu kvalitāte novērtēta pēc signāla bitu kļūdu attiecības *BER*. Darbā aprakstītie zinātniskās pētniecības eksperimenti un to rezultāti realizēti RTU TI.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Novērtēts *EDFA* un *SOA* pastiprinātāju lietojums maksimālās pārraides nodrošināšanai viļņgarumdales blīvētājas *WDM* sistēmās, izmantojot vairākus modulācijas formātus (*NRZ*, *RZ*, *DP-QPSK*), atkarībā no datu pārraides ātruma kanālā nepārsniedzot uztvertā signāla $\text{BER} \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.
2. Novērtēts dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras lietojums jauna inovatīva optiskā pastiprinātāja izveidē, nosakot pastiprinājuma efektivitāti atkarībā no leģētās šķiedras laiduma garuma.

3. Pamatojoties uz mūsdienu šķiedru optisko ātrgaitas sakaru sistēmu prasībām jeb datu pārraides ātruma kanālā (vismaz 40 Gbit/s uz λ) noteiktajām prasībām, ko nosaka 3-dB caurlaides josla (elektriskā segmenta un optiskā segmenta daļas), novērtēta hromatiskās dispersijas CD un nelineāro optisko efektu NOE ietekme atkarībā no datu pārraides attāluma viļņgarumdales blīvētās WDM sistēmas risinājumā, nosakot optimālos parametrus jauna hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrādei ātrgaitas ŠOPS lietojumam, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$.
4. Piedāvāts jauns hibrīds $Raman-EDFA$ pastiprinātāja risinājums, kas apvieno erbija leģētās šķiedras un Ramana efekta pastiprinājuma priekšrocības, vienlaikus veicot optiskā signāla pastiprināšanu un hromatiskās dispersijas CD kompensāciju atkarībā no līnijas garuma, spējīgs nodrošināt stabilu darbību vismaz 16 kanālu $DWDM$ sakaru sistēmas risinājumā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, nepārsniedzot uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

Promocijas darba praktiskā vērtība

1. RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes (ETF) TI izstrādāts jauns inovatīvs dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras makets, spējīgs nodrošināt stabilu pastiprinājumu viļņgarumdales blīvētās (WDM) sistēmas risinājumā C joslas (1530–1565 nm) darbības diapazonā.
2. RTU ETF TI izstrādāts jauns hibrīds $Raman-EDFA$ pastiprinātāja makets, spējīgs nodrošināt stabilu darbību vismaz 16 kanālu $DWDM$ sakaru sistēmas risinājumā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, nepārsniedzot uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

Promocijas darba iegūtie rezultāti tika izmantoti ERAF projektā “Efektīvu apvalkā pumpētu šķiedru optisko pastiprinātāju izstrāde telekomunikāciju sistēmām” Nr. 1.1.1.1/18/A/068.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba apjoms ir 123 lappuses. Darbā ir ievads, trīs nodaļas, nobeigums un literatūras saraksts.

Darba pirmajā nodaļā apskatīti ŠOPS ietekmējošie faktori, ko nepieciešams izanalizēt, lai veiktu izpēti par optiskās šķiedras (OŠ) pastiprinātājiem un to ietekmējošiem parametriem, tādējādi ņemot vērā pamatfaktoros, kas nepieciešami simulatīvai un eksperimentālai hibrīda pastiprinātāja izstrādāšanai viļņgarumdales blīvētā sistēmā WDM sistēmā.

Darba otrajā nodaļā apskatīti ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja ($EDFA$) fizikālie pamati, gaismas pastiprināšanās fizika ar retzemju metālu (erbija) leģētā šķiedrā un trokšņu rašanās cēloņi, kā arī dota uzziņa par $EDFA$ izplatītākajiem lietojumiem. Nodaļā aplūkoti arī Ramana efekta šķiedras pastiprinātāja fizikālie pamati, aprakstīts gaismas pastiprināšanās ar ierosinātās Ramana izkļiedes palīdzību mehānisms, kā arī Ramana pastiprinātāja trokšņu novērtējums. Nodaļas nobeigumā minēti izplatītie Ramana pastiprinātāja lietojumi. Darba trešā nodaļa ir eksperimentālā daļa. Tajā, izmantojot $RSoft OptSim$ vidi, kā arī veicot eksperimentālo darbu laboratorijā (eksperimentālā testēšana, izstrāde un mērījumi), pētīta šķiedru optikas pārraides līnijas laiduma un pastiprinātāja parametru ietekme uz pārraidāmā signāla kvalitāti viļņgarumdales blīvētā (WDM) sistēmā, lai noteiktu maksimālo attālumu, kurā var pārraidīt kvalitatīvu signālu, izmantojot katru no pētāmo pastiprinātāju veidiem, kā arī abus

pastiprinātājus kopā (izmantojot hibrīdu pastiprinātāju). Darba nobeigumā, balstoties teorētiskajā informācijā un eksperimentālajā daļā iegūtajos rezultātos, definēti secinājumi par EDFA un Ramana pastiprinātāju un to hibrīda risinājuma izmantošanas iespējām.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti izklāstīti sešos zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (*SCOPUS*, *WoS*, *IEEE*) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos no sešiem autora esošajiem autordarbiem. Darba rezultāti prezentēti trīs konferencēs.

Promocijas darba izstrādes laikā sasniegtie rezultāti prezentēti trīs starptautiskajās zinātniskajās konferencēs.

1. Piedalījies starptautiskajā konferencē (angļu val. *Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2023 – Proceedings*), prezentējot darbu par tēmu: K. Zakis, S. Spolitis, T. Salgals, L. Gegere, **M. Parfjonovs**, D. Prigunovs, V. Bobrovs, A. Supe, “*Experimental Characterization of Signal Gain Evolution in Cladding-pumped Doped Fiber Amplifier*”, 2023. gada 3.–6. jūlijs.
2. Piedalījies starptautiskajā konferencē (angļu val. *Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2023 – Proceedings*), prezentējot darbu par tēmu: D. Prigunovs, P. Morevs, **M. Parfjonovs**, T. Salgals, R. Kudojars, V. Bobrovs, “*Performance Analysis of Hybrid Raman-EDFA Amplifier in WDM Transmission Systems*”, 2023. gada 3.–6. jūlijs.
3. Piedalījies starptautiskajā konferencē (angl. *Progress In Electromagnetics Research Symposium – Fall, PIERS – FALL 2017*), prezentējot darbu par tēmu: V. Dilendorfs, **M. Parfjonovs**, A. Alsevska, S. Spolitis, V. Bobrovs, “*Influence of Dispersion Slope Compensation on 40 Gbit/s WDM-PON Transmission System Performance with G.652 and G.655 Optical Fibers*”, 2017. gada 19.–22. novembrī.

Promocijas darba rezultāti izklāstīti sešos zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (*SCOPUS*, *WoS*, *IEEE*) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos.

1. Zaķis, K., Spolitis, S., Salgals, T., Gegere, L., **Parfjonovs, M.**, Prigunovs, D., Bobrovs, V., Supe, A. “*Experimental Characterization of Signal Gain Evolution in Cladding-pumped Doped Fiber Amplifier*,” 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 754–758, DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221551.
2. Prigunovs, D., Morevs, P., **Parfjonovs, M.**, Salgals, T., Kudojars, R., Bobrovs, V. “*Performance Analysis of Hybrid Raman-EDFA Amplifier in WDM Transmission Systems*,” 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1787–1791, DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221537.
3. Pavlovs, D., Bobrovs, V., Alsevska, A., **Parfjonovs, M.**, Ivanovs, G. “*Investigation of Power Efficiency Changes in DWDM Systems Replacing Erbium-Doped Amplifiers by Semiconductor Optical Amplifiers*,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 59, no. 1, 2022, pp. 44–52. DOI:10.2478/lpts-2022-0005.
4. Zvirbule, K., Matsenko, S., **Parfjonovs, M.**, Murnieks, R., Aleksejeva, M., Spolitis, S. “*Implementation of Multi-Wavelength Source for DWDM-PON Fiber Optical Transmission Systems*,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 57, no. 4, 2020, pp. 24–33. DOI:10.2478/lpts-2020-0019.
5. Pavlovs, D., Bobrovs, V., **Parfjonovs, M.**, Alsevska, A., Ivanovs, Ģ. Evaluation of

Signal Regeneration Impact on the Power Efficiency of Long-Haul DWDM Systems. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol. 54, no. 5, 2017, pp. 68–77, DOI: 10.1515/lpts-2017-0035.

6. Dilendorfs, V., **Parfjonovs, M.**, Alsevska, A., Spolitis, S., Bobrovs, V. “*Influence of Dispersion Slope Compensation on 40 Gbit/s WDM-PON Transmission System Performance with G.652 and G.655 Optical Fibers,*” 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL), Singapore, 2017, pp. 598–604, DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293207.

IEVADS

Mūsdienās strauji pieaug pārraidīto datu apjoms. “Ericsson” analītiķi paredz mobilo datu pieaugumu no 51 EB 2020. gadā līdz 236 EB 2026. gadā, no kuriem 54 % veidos 5G datu plūsmas [1].

Papildus tam optiskā infrastruktūra ir ļoti plaši izplatīta un ir pieejamas plašas caurlaides joslas, kas atvieglo tās izmantošanu jaunu sistēmu izveidē. Jaunu pasīvo optisko tīklu (PON) standartu izstrādē tiek ietverta līdzaspastāvēšana ar vēsturiskajiem standartiem, tādējādi paātrinot pāreju uz augstāka datu pārraides ātruma tīkliem [2].

Optiskais signāla pastiprinātājs ir mūsdienu šķiedru optiskās pārraides sistēmu (ŠOPS) elementu kopas neatņemama daļa. Optisko pastiprinātāju lietojumu klāsts ir plašs – no zemu izmaksu, nelielu attālumu piekļuves tīkliem līdz reģionālajiem tīkliem un ļoti lielu attālumu starpkontinentālajiem zemūdens tīkliem. Pastiprinātāju uzbūvi ietekmē pieprasījums pēc lielākas joslas ietilpības šķiedru optikas pārraides sistēmās. Mūsdienās aktīvi notiek viļņgarumdales (WDM) sistēmu attīstība ar kanāla datu pārraides ātrumu 100 Gbit/s un vairāk. Nepieciešamība apmierināt šo lielu pārraides ātrumu sistēmu prasības pret lielākas ietilpības esošo optiskās šķiedras (OŠ) un optisko viļņu garuma komutācijas iekārtām pieprasa sarežģītāku modulācijas un demodulācijas formātu izmantošanu, kas spēj kodēt vairākus bitus vienā simbolā un bieži iekļauj diferenciālu vai koherentu detektēšanu. Vispārējā gadījumā šādi modulācijas formāti palielina sistēmas izturību pret hromatisko dispersiju (CD), polarizācijas modu dispersiju (PMD) un filtrēšanas kropļojumiem, bet rada papildu prasības pret optisko pastiprinātāju trokšņu parametriem to jutības pret nelineārajiem signāla kropļojumiem dēļ un paaugstinātas prasības pret optiskā signāla-trokšņa (OSNR) attiecības.

No citas pusēs, optisko pastiprinātāju īpatnības, tādas kā pastiprinājuma koeficienta spektrs, tā atkarība no kanālu blīvuma, piesātinājums un dinamiskā impulsa reakcija, kā arī optiskie trokšņi, ko papildus ienes pastiprinātājs, rada ierobežojumus pārraides sistēmu attīstībai, uzbūvei un darbībai.

Pēdējās desmitgadēs pastiprinātāju attīstību nosaka četras galvenās tendences. Pastiprinātājam jābūt ar platu optisko pastiprinājuma joslu, lai efektīvi darbotos sistēmās ar lielu kanālu skaitu. Izmantotajai optikai un ātrdarbīgām elektroniskajām komponentēm jānodrošina ātra veiktspēja dinamiskajos tīklos. Noteicošās ir arī izmaksu samazināšanas un pastiprinātāju moduļu standartizācijas tendences. Reaģējot eksponenciāli, augošu pārraidāmo datu apjomu tīkli tiek veidoti, izmantojot blīvu viļņgarumdales blīvēšanu (DWDM). Komerciālajā lietošanā esošajos tīklos izmanto līdz 160 kanāliem ar 50 GHz atstatumu C un L joslās. Tomēr lielākajā daļā tīklu datu pārraidei izmanto C joslu. Pirms kāda laika plaši izplatītas bija fiksētās punkts-punkts WDM sistēmas. Tomēr straujš datu apjoma pieaugums izraisīja vispārēju pārorientēšanos uz dinamiskajiem optiskajiem tīkliem. Visi jaunie pilsētīklu, reģionālo un tālo sakaru tīklu risinājumi iekļauj pārkonfigurējamā optiskā pievienošanas-nomainas multiplekserra (ROADM) principā balstītas iekārtas dinamiskajai optiskajai komutācijai, un tie jau tiek plaši izmantoti lielo un reģionālo sakaru pakalpojumu sniedzēju tīklos. Tāpēc pastiprinātāju konstrukcijai ir jāapmierina dinamisko optisko sakaru sistēmu ātrdarbības prasības. Savukārt pastiprinātāju cenas 10 gadu laikā ir būtiski samazinājušās. Tas noticis pumpēšanas lāzeru, erbija šķiedras un citu komponentu, kā arī darbaspēka cenu samazinājuma dēļ. Pastiprinātāju piedāvājuma paplašināšanās tirgū izraisīja pastiprinātāju parametru pseidostandardizēšanos. Ražošanas pieejas un pastiprinātāju uzbūves izmaiņas ir veicinājušas pāreju uz modulāriem pastiprinātājiem. Turpmākās izmaiņas ražošanā un tirgus paplašināšanās rada nepieciešamību izveidot standartus pastiprinātāju ražošanas jomā [3].

Mūsdienu tīklos biežāk sastopams erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs un Ramana efekta šķiedras pastiprinātājs. Lielu un ļoti lielu attālumu tīklos tiek izmantots hibrīds risinājums, kas ietver gan *EDFA*, gan Ramana pastiprinātājus.

Kopš tā izstrādes brīža 1987. gadā ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs *EDFA* ir mainījis telekomunikāciju jomu. Mūsdienās *EDFA* tiek uzskatīta par ļoti attīstītu tehnoloģiju. Viens no izplatītiem tās lietojumiem ir *ROADM*, kur optiskais pastiprinātājs ir svarīga komponente. Iespēja pārraidīt optiskos kanālus, izmantojot *ROADM*, ļauj operatoriem samazināt izmaksas uz viļņa garumu optiskajā tīklā. Izmantojot Ramana pastiprinātāju, pastiprinājumu var iegūt jebkurā vēlamā joslā, bet pastiprinājuma koeficientam var piešķirt izlīdzinātu formu, ja optiskā pumpēšana tiek veikta vairākos viļņa garumos vienlaikus. Ramana pastiprinātāja spektra elastīgums ir viena no tā galvenajām īpašībām un priekšrocībām [3].

Šajā darbā tiek apskatīts būtiskākie *EDFA* un Ramana šķiedras pastiprinātāja darbības principi, īpatnības un ierobežojumi, to nozīme šķiedru optikas pārraides sistēmā. Eksperimentālajā daļā, veicot *WDM* pārraides sistēmas simulāciju, tiek pētīta pastiprinātāju un sistēmas parametru ietekme uz signāla pastiprinājumu, simulējot *EDFA* un Ramana pastiprinātāju līnijā atsevišķi, pēc tam no hibrīda risinājumu, kas ietver *EDFA* un Ramana pastiprinātāju vienā pārraides līnijas laidumā.

PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Darba **pirmajā nodaļā** veikta ŠOPS datu pārraidi ietekmējošo faktoru analīze un novērtējums, kā arī izpētīti viļņgarumdales blīvētās *WDM* sakaru sistēmas darbības principi.

Optiskie signāla pastiprinātāji ir neatņemama ŠOPS risinājumu sastāvdaļa. Visizplatītākie ir ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji *EDFA* un Ramana šķiedras pastiprinātāji. Ramana šķiedras pastiprinātājiem, kuru pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra (*DCF*), ir potenciāls lietojums nākotnes tālsatiksmes lielas jaudas šķiedru optiskās pārraides sistēmās ŠOPS. Ir pieejami arī hibrīdie Ramana-erbija šķiedru pastiprinātāji (*Raman-EDFA*), lai uzlabotu optiskā signāla-troksņa attiecības *OSNR* veiktspēju optiskās pārraides sistēmās. Šajā nodaļā analizēti ŠOPS datu pārraides ietekmējošie faktori un rādītāji, kas nepieciešami, lai pamatotu hibrīda platjoslas optiskā pastiprinātāja eksperimentālās izstrādes laikā iegūtos rezultātus un analizētu visus iepriekš minētos ietekmējošos faktoros.

1.1. apakšnodaļā analizēta *WDM* sakaru sistēmas klasifikācija un darbības principi. Salīdzinot ar citām sakaru sistēmām, ŠOPS pēc savām īpašībām un iespējām ir pārāka par tām. To būtiski ietekmē faktors, ka optiskai šķiedrai OŠ ir mazs vājinājums, salīdzinot ar citiem materiāliem, kas tiek izmantoti datu pārraidē, kā arī tas, ka OŠ mazs ienestais vājinājums nodrošina datu pārraidi daudz lielākos attālumos. Savukārt liela OŠ caurlaides spēja dod iespēju pārraidīt informāciju daudz lielākā ātrumā. OŠ neietekmē blakus esošie modulētie optiskie signāli, kā arī OŠ nav pakļauta vājiem elektromagnētiskiem traucējumiem [4, 5].

Raidītāja daļā tiek izmantots starojuma avots, modulators un starojuma ievades ierīce optiskajā šķiedrā. Kā starojuma avots tiek izmantota lāzera diode. Modulatora funkcija ir izmainīt amplitūdu, fāzi vai polarizācijas stāvokli, kas tiek definēts atbilstoši tam, kāds ir nepieciešamais informācijas pārraides ātrums. Vienmodas optiskās šķiedras (*SMF*) galvenokārt tiek izmantotas mūsdienu OŠ līnijā, protams, ir arī risinājumi, kuros tiek lietota daudzmodu OŠ.

Mūsdienās tiek izmantotas dažādas tehnoloģijas, kas ir nepieciešamas, palielinot datu pārraides apjomu: (1) pastāv viļņgarumdales blīvēšanas tehnoloģija *WDM*; (2) laikdales blīvēšanas tehnoloģija (*TDM*); (3) telpas blīvēšanas tehnoloģijas (*SDM*). *WDM* nodrošina vairāku kanālu vienlaikus pārraidi caur vienu optisko šķiedru. [6, 7, 8]. *TDM* pamatideja ir sadalīt pārraidāmo kanālu bitu plūsmas – piešķirt konkrēta kanāla bitiem attiecīgu laika intervālu un pārraidīt šo vairāku kanālu bitu plūsmas caur ātrdarbīgo līniju. *SDM* tehnoloģijas pamatā ir palielināt kanālu skaitu, izmantojot daudzkodolu optiskās šķiedras (*MCF*). *WDM* ir visizplatītākā no visām trim minētajām tehnoloģijām. *SDM* nav līdz galam izpētīta un pagaidām nevar aizstāt ŠOPS. *WDM* sakaru sistēmām ir raksturīga starpkanālu šķērsrunas ietekme – konkrētā kanālā citu kanālu signāls tiek reprezentēts kā troksnis, tādā veidā radot pārraides kvalitātes pasliktināšanos. *WDM* sistēmas centrālie elementi ir optiskie multipleksori/demultipleksori, jo tie izpilda spektrālo kanālu apvienošanas/izdalīšanas funkciju telpā – faktiski veic pasīvu maršrutēšanu pēc viļņa garumiem [9].

Visi *WDM* sakaru sistēmas kanālu viļņa garumi ir izvietoti ar noteiktu starpkanālu intervālu. Pēc starpkanālu intervālu lielumiem *WDM* sakaru sistēmas tiek klasificētas rupjas viļņgarumdales blīvēšanas (*CWDM*) sakaru sistēmās un blīvas viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmās (*DWDM*). *CWDM* sakaru sistēmas darbojas viļņu garumos no 1271 nm līdz 1611 nm, ieteicamais starpkanālu intervāls *ITU-T G694.2* rekomendācijā ir 20 nm (2500 GHz). *DWDM* sakaru sistēmu kanālu izvietojums ir atkarīgs no dažādiem starpkanālu intervāliem:

12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz un 100 GHz (ieteicamais kanālu izvietojums norādīts *ITU-T G694.1* rekomendācijā). Ar 0,8 nm jeb 100 GHz starpkanālu intervālu katra viļņu garuma diapazonā var tikt realizēti 80 kanāli. *DWDM* sakaru sistēmas ar kanālu intervālu 50 GHz un mazāk tiek sauktas arī par augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmām (*HDWDM*) un ļauj multipleksēt ap 128 kanāliem un vairāk [10, 11].

Pastāv trīs dažādi optiskā signāla atjaunošanas veidi: (1) 1R – optiskā signāla pastiprināšana; šī optiskā signāla atjaunošanas veida pamatā ir optiskās jaudas pievienošana, neietekmējot optiskā signāla formu vai sinhronizāciju; (2) 2R – optiskā signāla pastiprināšana un formas atjaunošana, netiek atjaunots laika intervāla garums (sinhronizācija); (3) 3R – optiskā signāla pastiprināšana, formas atjaunošana un sinhronizācijas atjaunošana. Papildus pastiprināšanai un formas atjaunošanai tiek atjaunota arī sākotnējā signāla sinhronizācija (oriģinālais cikla ilgums) [9, 12, 13].

1.2. apakšnodaļā analizēti nelineārie optiskie efekti (*NOE*) šķiedru optiskajās sakaru sistēmās. Nodaļā analizētas telekomunikācijās lietotās OŠ un *NOE* tajās, kā arī to ietekme uz optisko blīvēšanas sistēmu darbību. Nelineārie efekti šķiedru optikā ir līdzīgi nelineāriem efektiem citās fizikālās sistēmās (mehāniskajās un elektroniskajās) – tie maina šķiedru īpašības un izraisa parazītisko harmoniku ģenerāciju frekvencēs, kas ir vienādas ar sistēmas pamatfrekvenču lineāru kombināciju. Rezultātā vides optiskās raksturlieknes (polarizācija, laušanas koeficients, absorbcijas koeficients) kļūst par gaismas viļņa elektriskā lauka intensitātes funkcijām, vides polarizācija kļūst nelineāri atkarīga no lauka intensitātes, bet viļņi ar dažādām frekvencēm un izplatīšanas virzieniem ietekmē cits citu [14]. Optiskajā šķiedrā *NOE* parādās jau pie jaudām no 1 W līdz 100 W. Pirmkārt, tā kā gaisma izplatās caur šķiedras iekšpusi jeb serdeni, tad pat pie nelielas gaismas intensitātes tā ir diezgan liela attiecībā pret šķiedras šķērsriezuma laukumu (*NOE* svarīga tieši intensitāte). Otrkārt, gaisma izplatās bez defokuscēšanas (bez šķērsriezuma laukuma izmaiņas) patvaļīgi lielos attālumos. Gaismas izplatīšanos OŠ ietekmē dažādas optiskās parādības. Šīs parādības tiek dalītas divās lielās grupās. Pirmajā grupā iekļautas optiskās parādības, ko apvieno optikas īpašības, kas nav atkarīgas no gaismas intensitātes un pārraidāmo optisko signālu izmaiņa tikai kvantitatīvi. Svarīgākās no tām ir optiskā signāla rimšana un īso gaismas impulsu izplešanās OŠ dispersijas dēļ, un to sauc par lineāro optiku. Otrajā – nelineārā optika, kas aplūko gaismas izplatīšanos vielā, kuras optiskās īpašības mainās gaismas ietekmē, un pēta *NOE* – optiskās parādības, kuru cēlonis ir nelineārā vides polarizācijas atkarība no gaismas elektriskā lauka intensitātes.

1.3. apakšnodaļā veikta šķiedru optiskās pārraides sistēmas uztvertā signāla kvalitātes novērtēšanas kritēriju analīze. Bitu kļūdu varbūtības *BER* mērījumi bieži tiek veikti kā galakvalitātes pieņemšanas tests jaunizbūvētam šķiedru optikas pārraides sistēmām. *BER* ir noderīgs, testējot eksistējošas pārraides sistēmas. Tipiskas *BER* sliekšņa vērtības ir robežās no 10^{-9} līdz 10^{-13} [16, 18]. Šīs sliekšņa vērtības mainās atkarībā no organizācijas, pakalpojumu sniedzēja vai pārraides sistēmas. Piemēram, *ITU-T* standartos *G.957* un *G.984.2* ir definēts, ka *PON* sistēmās tiek izmantota sliekšņa vērtība $BER < 10^{-10}$ [19, 20], savukārt citos avotos [16] un [17] ir minēts, ka tiek izmantots $BER < 10^{-9}$, jo optisko uztvērēju jutība bieži vien tiek definēta pie šāda *BER*.

Uztvertā signāla kvalitātes faktors (*Q* faktors) ir vēl viens sistēmas darbības kvalitātes novērtēšanas parametrs, ko var lietot kā alternatīvu *BER* testēšanai. *Q* faktors tiek definēts kā attiecība starp vidējo fotodiodes strāvu starp uztvertā “1” bita stāvokli un “0” bita stāvokli, dalītu ar standarta novirzes summu no abu stāvokļu trokšņu strāvas summas [16, 17, 18].

Signāla parametri, kas iegūstami no acu diagrammas, var tikt iedalīti divās grupās – ar amplitūdu saistīti parametri un ar laiku saistīti parametri. Kā amplitūdas parametrus var minēt [15] vidējo jaudu, loģiskā “1” un “0” līmeņus, acs amplitūdu un atvēruma augstumu, loģisko “1” un “0” līmeņu svārstības un augstā un zemā jaudas līmeņa attiecību, kas raksturo optiskā signāla modulācijas dziļumu. Acu diagramma ataino mērāmā diskrētā signāla vairāku bitu periodu, kas ir uzlikti viens virs otra, summāro ainu. Respektīvi, acu diagramma rodas, bitiem daudreiz pārklājoties citam virs otra [16].

Lai izprastu blīvas viļņgarumdales blīvētā pasīvā optiskā tīkla (*WDM-PON*) sistēmu darbību, ir nepieciešams apskatīt tām pieejamo frekvenču spektru, ko var iedalīt vairākās joslās. Patlaban šķiedru optikā informācijas pārraidei lieto gaismas viļņa garumus no 660 nm līdz 1600 nm. Vienmodas optiskajās šķiedrās tiek izmantota caurlaides josla no 1260 nm līdz 1675 nm (atbilst *ITU-T G.694.2* rekomendācijā minētajām O, E, S, C, L, U joslām). Kopumā vienmodas optiskajās šķiedru pārraides sistēmās var tikt izmantota 58,95 THz jeb 415 nm caurlaides josla. *WDM* sistēmās izmantojamais frekvenču spektrs tiek iedalīts sešās joslās. Šīs ITU rekomendētās joslas apkopotas 1.2. tabulā [18, 21].

1. tabula

ITU-T G.694.2 rekomendācijā definētās *WDM* frekvenču joslas [22, 23]

Joslas apzīmējums	Joslas tips	Izmantojamais gaismas viļņa garuma diapazons, nm
O	Oriģināla (<i>Original</i>)	1260–1360
E	Paplašināta (<i>Extended</i>)	1360–1460
S	Īssviļņu garums (<i>Short wavelengths</i>)	1460–1530
C	Standarta (<i>EDFA logs; Conventional</i>)	1530–1565
L	Garš viļņu garums (paplašināts <i>EDFA logs; Long wavelengths</i>)	1565–1625
U	Ultra garš viļņu garums (<i>Ultra long wavelengths</i>)	1625–1675

Otrā nodaļa

Optiskie pastiprinātāji tiek klasificēti pēc pastiprināšanas procesa rakstura [21]:

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 materiāla nelineārajās īpašībās (Ramana optiskie pastiprinātāji, Briljuēna optiskie pastiprinātāji un parametriskie pastiprinātāji (*FOPA*)).

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.

Tālāk šajā nodaļā katrs no iepriekš pieminētajiem optisko pastiprinātāju tipiem tiks apskatīts detalizētāk, analizējot to galvenās priekšrocības un trūkumus.

2.1. apakšnodalā novērtēta *EDFA* pastiprinātāja uzbūve un darbības princips, kā arī lietojums ŠOPS risinājumos. Vieni no visplašāk lietotajiem optiskajiem pastiprinātājiem ir leģēto šķiedru optiskie pastiprinātāji. Šāda tipa pastiprinātājos silīcija dioksīda šķiedra ražošanas procesā ir leģēta ar retzemju elementiem, lai izveidotu divu, trīs vai četru līmeņu sistēmu, kas spēj nodrošināt efektīvu pumpēšanu. Šādos pastiprinātājos var izmantot 14 retzemju ķīmiskos elementus ar atomu numuriem no 58 līdz 71. Tādus retzemju elementus joni kā erbijs, holmijs, neodīms, samārijs, tūlijs un iterbiji varētu izmant, lai izgatavotu leģēto šķiedru pastiprinātājus, kas darbojas viļņa garuma diapazonā no redzamās gaismas līdz pat infrasarkanajam starojumam [24]. Visbiežāk izmantotais retzemju elements ir erbijs, jo ar erbiju leģētas šķiedras optiskie pastiprinātāji *EDFA* darbojas C joslā (1530–1565 nm), kur ir novērojams silīcija dioksīda šķiedru vājinājuma līknes minimums [24]. Eksistē arī *EDFA* optiskie pastiprinātāji, kas ir veidoti, lai strādātu L joslā (1565–1625 nm) [25]. Tos mēdz saukt par “nobīdīta pastiprinājuma” *EDFA*, un šāda pastiprinājuma spektra nobīde tiek panākta ar fluorida un citu elementu izmantošanu šķiedras izgatavošanas procesā [25].

Tipisks *EDFA* radītais pastiprinājums ir ap 30 dB, bet var tikt sasniegts arī 54 dB pastiprinājums [27]. Jo vairāk kanālu tiek pārraidīti optiskajā šķiedrā, jo lielāka ir nepieciešamā ierosmes enerģija. *EDFA* pastiprinātājos tiek izmantotas dažādas pumpēšanas shēmas.

1. Ar tieši vērsto pumpēšanu – pie mazas ieejas signāla jaudas un liela pastiprinājuma spēj nodrošināt zemāku trokšņu līmeni.

2. Ar pretēji vērsto pumpēšanu – nepieciešama mazāka pumpējošā starojuma jauda nekā tieši vērstas pumpēšanas gadījumā, lai sasniegtu pastiprinātāja piesātinājumu.

Viena no tīklu projektēšanas problēmām ir *EDFA* pastiprinātāja pumpējošā avota viļņa garuma izvēle – 980 nm vai 1480 nm. Efektīvu pumpēšanu var panākt ar pumpēšanas starojumu, kura viļņa garums ir tuvu 980 nm vai 1480 nm [24]. Ar 980 nm pumpējošo starojumu ir iespējams panākt augstāku populācijas inversijas līmeni, kas savukārt ļauj iegūt mazāku pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) trokšņu daudzumu. Tātad no trokšņu viedokļa labāk ir izmantot 980 nm pumpējošo starojumu. Savukārt pastiprinātāja kvantu efektivitāte ir lielāka pie 1480 nm pumpēšanas, jo enerģijas līmeņu starpība starp pumpējošo un pastiprināmo starojumu ir mazāka. Tātad ar 1480 nm pumpējošo starojumu var iegūt lielāku pastiprinājuma koeficientu [26]. Pašā sakumā ir grūti noteikt, kam tiks dota priekšroka – augstam pastiprinājumam vai zemam trokšņa līmenim. Nākas meklēt kompromisu, ievērojot sistēmas izmaksas un katra viļņa garuma priekšrocības un trūkumus [28, 29]. Pastiprinājuma efektivitāti mēra mērvienībās dB/mW, un tā tiek definēta kā leņķa tangenss, ko veido pastiprinājuma koeficienta atkarības no pumpēšanas jaudas grafika no koordinātu sākumpunkta vērsta pieskare pret horizontālo asi.

2. tabulā redzams šo divu viļņu garumu parametru salīdzinājums [28, 29].

Pumpējošā avota viļņu garumu salīdzinājums [5, 28]

Parametri	Viļņa garums, nm	
	1480	980
Gaismas avots (lāzerdiole)	InGaAsP/InP	InGaAs/APD
Pastiprināšanas efektivitāte*, dB/mW	6,3	11
Trokšņu rādītājs, dB	~ 5,5	3–4,5
Izejas piesātinājuma jauda**, dBm	+ 20	+ 5
Pumpēšanas viļņa garumu diapazons, nm	20 (1470–1490)	šaurš, 2 (979–981)
Stara sašķelšana	grūta	viegla
Izejas jauda, mW	50–200	10–20
* Pie vienādiem <i>EDF</i> šķiedras garumiem.		
** Atkarīgs no pumpēšanas jaudas.		

2.2. apakšnodaļā analizēts Ramana pastiprinātāja lietojums un sniegts novērtējums. Viens no Ramana efekta lietojumiem ir Ramana optiskais pastiprinātājs. Eksistē diskrētie un sadalītie Ramana pastiprinātāji. Diskrētie pastiprinātāji ir atsevišķs modulis, kas veic pastiprināšanu kādā līnijas posma beigās. Sadalītiem pastiprinātājiem pastiprināšana notiek nevis atsevišķā modulī ar uztītu šķiedru, bet pašā līnijā. Pastiprinājuma efektivitāte Ramana pastiprinātājiem pie zemiem ieejas signāla jaudas līmeņiem ir mazāka, un tā pieaug, palielinoties signāla jaudai. Tas ir tādēļ, ka stimulētā Ramana izkliede ir koherents enerģijas pārejas process. Līdz ar to salīdzinoši jaudīgs signāls tiks pastiprināts efektīvāk nekā troksnis, kura jaudas līmenis ir daudz zemāks [30]. Šāda koherentā pastiprināšana var radīt signāla-trokšņa attiecības uzlabošanas pastiprinātāja izejā un pie negatīvām ienesto trokšņu rādītāja vērtībām, kas liecina par to, ka signāls tiek pastiprināts efektīvāk nekā troksnis un tā jaudas pieaugums ir lielāks [32]. Tomēr šāda Ramana pastiprinājuma nodrošināšanai zemu ieejas signālu jaudas līmeņu gadījumā rodas nepieciešamība pēc jaudīgiem pumpējošā starojuma avotiem, kuru optiskā starojuma jauda ir tuvu (vai pārsniedz) 1 W [30, 31].

Ramana pastiprinātājos, tāpat kā *EDFA* gadījumā, var izmantot tieši, pretēji un abpusēji vērstas pumpēšanas shēmas. Ramana izkļedes fenomens ir ārkārtīgi ātrs process, kas norisinās dažu femto sekunžu laikā.

2.3. apakšnodaļā novērtēts pusvadītāju optisko pastiprinātāju *SOA* lietojums sakaru sistēmu risinājumos. Pusvadītāju optiskais pastiprinātājs ir optoelektriskā ierīce, kas noteiktos darba apstākļos var pastiprināt gaismu, kas izplatās caur to. Šajā ierīcē tiek izmantota stimulētās emisijas parādība optiskā signāla pastiprinājuma nodrošināšanai. Pumpēšanas strāva ir ārējā enerģijas plūsma, kas nodrošina populācijas inversijas sasniegšanu. Šīs strāvas nesēji ieņem stāvokli aktīvā slāņa vadītspējas zonā, atstājot “caurumus” valentajā zonā [33]. Pusvadītāju materiālos ir iespējami trīs pārejas mehānismi: spontāna emisija; stimulēta emisija; stimulēta absorbcija.

Enerģijas līmeņa spontānais dzīves laiks pusvadītāju pastiprinātājiem ir robežās no dažām nanosekundēm līdz pat dažiem simtiem pikosekunžu [33]. Tādēļ vienmēr pastāv varbūtība, ka elektrons vadāmības zonā ierosinātā stāvokļa dzīves laika garumā tā arī nenonāks saskarsmē ar pastiprināmā signāla fotonu, līdz ar to spontānās emisijas rezultātā radīs fotonu ar nejaušu

izplatīšanās virzienu, viļņa garumu un fāzi. Šī iemesla dēļ signālā parādās liels pastiprinātāja radīto trokšņu daudzums. Šis aditīvais troksnis ir pastiprināšanas procesa nevēlama sastāvdaļa, bet no tā nevar pilnībā izvairīties [17]. Šie spontāni ģenerētie fotoni ne tikai rada troksni plašā frekvenču diapazonā, bet arī samazina populācijas inversijas līmeni, kas negatīvi ietekmē arī sasniedzamo pastiprinājuma līmeni. Spontānā emisija ir tiešas pastiprinājuma procesa sekas, tādējādi izveidot beztrokšņu pusvadītāju pastiprinātājus nav iespējams.

Pusvadītāju pastiprinātāji galvenokārt tiek klasificēti divos tipos: Fabri-Pero (*FP-SOA*) un skrejviļņa pastiprinātāji (*TW-SOA*). Skrejviļņa pusvadītāju pastiprinātāji ir tādi pastiprinātāji, kur atstarošanās ir necīga aptuvenā signāla enerģijas daļa, kas tiek atstarota, tam izplatoties caur *TW-SOA*, un tā ir 0,01 %. Var tikt izmantoti arī dažādi atstarošanas samazinoši apvalki, lai iegūtu pusvadītāju pastiprinātājus ar atstarošanās koeficientu, mazāku par 10^{-5} . *TW-SOA* ir mazāk jutīgs pret pumpējošās strāvas fluktuācijām, temperatūras izmaiņām un pastiprināmā signāla polarizāciju nekā *FP-SOA* [33].

SOA priekšrocības ir liels pastiprinājums (~ 30 dB), vienkārša konstrukcija un plats pastiprinājuma spektrs. Spektra platums parasti ir no 40 nm līdz 50 nm, bet ir arī *SOA* pastiprinātāji ar 60 nm un vairāk platāku spektru. No trūkumiem var minēt lielu *ASE* troksni, lielus ienestos zudumus (~ 10 dB), polarizācijas jutīgumu un signāla spektra kropļojumus.

2.4. apakšnodalā novērtēts Briljuēna optiskā pastiprinātāja lietojums sakaru sistēmu risinājumos. Briljuēna pastiprinātāju radīto pastiprinājumu var izmantot vāju optisko signālu pastiprināšanai, kuru frekvence ir nobīdīta attiecībā pret pumpējošā starojuma frekvenci par lielumu, kas ir vienāds ar Briljuēna nobīdi. Lai pumpētu Briljuēna pastiprinātājus, ir lietojami pusvadītāju lāzери, jo to izstarojuma frekvenču josla ir daudz šaurāka par Briljuēna pastiprinājuma joslu. Briljuēna pastiprinātāji spēj nodrošināt 30 dB pastiprinājumu pie pumpējošā starojuma jaudas, mazākas par 10 mW, kas ir milzīgs ieguvums, salīdzinot ar citiem optisko pastiprinātāju tipiem. Briljuēna pastiprinājuma spektrs ir šaurāks par 100 MHz, pie tam pumpējošā un pastiprināmā signāla frekvenču starpībai jāatbilst Briljuēna nobīdei ar precizitāti līdz 10 MHz. Šī iemesla dēļ Briljuēna optiskie pastiprinātāji netiek izmantoti šķiedru optikas pārraides sistēmās optisko signālu pastiprināšanai. Tos var izmantot citiem nolūkiem, piemēram, lai uzlabotu uztvērēja jutību, selektīvi pastiprinot noteiktas frekvences signālu pirms detektēšanas, vai arī kā pārskatājamu šaurjoslas optisko filtru kanālu izvēlei blīvā daudzkanālu sistēmā ar dažu desmitu megabitu sekundē pārraides ātrumu kanālā [17, 25].

Trešā nodaļa

Atbilstoši promocijas darba mērķim, definētajiem darba uzdevumiem un izvirzītajām tēzēm, šajā nodaļā aprakstīti un ilustratīvi parādīti promocijas darba eksperimentālās daļas rezultāti un secīgi to apraksti.

Dažādu tipu optisko pastiprinātāju kaskādes slēgumus uzskata par pastiprinātāju kombinēto risinājumu (hibrīdais pastiprinātājs). Lai iegūtu lielāku pastiprinājumu pie mazāka ienesto trokšņa daudzumu un paplašinātu pastiprinājuma spektru, tiek veidoti kombinētie risinājumi. Iegūtā risinājuma pastiprinājumā tiek summēta izmantoto optisko pastiprinātāju radītie pastiprinājumi [25, 34, 35].

Kombinētie risinājumi, ko lieto, lai pastiprinātu optisko signālu, klasificē divās pamatgrupās.

1. Platjoslas kombinētie risinājumi (angļu val. – *seamless and wideband hybrid amplifiers; SWB-HA*), kur dažādu tipu optiskie pastiprinātāji tiek izmantoti, lai iegūtu pēc iespējas plataku pastiprinājuma spektru kombinācijā ar zemāku ienesto trokšņu daudzumu.

2. Šaurjoslas kombinētie risinājumi (angļu val. – *narrow band hybrid amplifier; NB-HA*), kur dažādi optisko pastiprinātāju tipi tiek izmantoti, lai iegūtu lielāku pastiprinājumu pie lielākas optiskā signāla-trokšņu attiecības.

Platjoslas kombinēto risinājumu gadījumā tipiskais pastiprinājuma spektrs ir ap 80 nm, savukārt šaurjoslas kombinēto risinājumu gadījumā tipiskais pastiprinājuma spektrs ir robežās no 30 nm līdz 40 nm. Šaurjoslas risinājumi parasti tiek lietoti C vai L viļņa garuma joslās, savukārt platjoslas risinājumu gadījumā var tikt izmantotas arī abas šīs joslas paralēli, tādējādi veidojot divjoslu pastiprinātāju [25].

3.1. apakšnodalā veikts dispersijas ietekmes novērtējums uz *WDM* sakaru sistēmas darbību. Viļņgarumdales blīvētais sakaru sistēmas *WDM* eksperimentālajai realizācijai tika izmantota *RSoft*, *OptSim* simulāciju programmatūra. Šajā etapā visiem eksperimentālajiem un simulācijas modeļiem iestatītais pārraides ātrums bija 40 Gbit/s katram kanālam. Raidītājs tika izveidots no pieciem galvenajiem elementiem – datu avota, *RZ* vai *NRZ* līnijas kodu, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota (*CW*), Maha-Zendera instensitātes modulatora (*MZM*) un optiskā joslas filtra (*OBPF*). Kanālu centrālās frekvences, sākot no 1. līdz 16. kanālam, tika noteiktas no 192,4 THz līdz 193,9 THz. Darbības kanālu frekvences tika izvēlētas saskaņā ar *ITU-T G.694.1* rekomendācijām. Uztvērējs visiem kanāliem tika izveidots, izmantojot trīs elementus – optisko joslas filtru *OBPF*, otrās kārtas optisko Besela filtru, *PIN* fotodiode un ceturtais kārtas elektrisko zemfrekvenču filtru (*LPF*). ŠOPS pārraides līnija tika veidota no *SMF* (G.652) vai *NZDSF* (G.655) optiskās šķiedras laiduma, dispersācijas kompensācijas šķiedras (*DCF*) *CD* un Brega režģi (*FBG*) dispersijas slīpuma (*CD_{SL}*) kompensācijai. ŠOPS pārraides līniju sadalītājs un kombinētājs kopā ar raidītāju un uztvērēju optiskajiem filtriem veidoja masīva viļņvada režģa (*AWG*) multiplekseru un demultiplekseru.

Izvēlētais ŠOPS pārraides līnijas garums gan *RZ*, gan *NRZ* līniju kodiem, izmantojot *SMF*, bija 50 km. Attiecīgi tika pievienots dispersijas kompensācijas modulis (*DCM*) un pastiprinātāji, lai kompensētu uzkrātās *CD* dispersijas vērtības, kā arī šķiedru ienesto vājinājumu (*IL*) optiskās līnijas laiduma posmā. Lai kompensētu *DCF* ievietošanas zudumus, tika izmantoti papildu pastiprinātāji, kuru pastiprinājums tika iestatīts tāds pats kā *DCF* šķiedru laiduma ievietošanas zudumu vērtības. Lai noteiktu kanālu veiktspēju, *BER* tika definēts mazāks par 10^{-12} . Eksperimenta gaitā 16 kanālu *WDM* sistēmai tika piemērota tikai *CD* kompensācija, izmantojot *DCF*.

DCM atrašanās vieta tika mainīta ŠOPS ar mērķi noskaidrot, kā *DCM* atrašanās vieta mainīs atsevišķu kanālu veiktspēju 16 kanālu *WDM* sistēmā. Sākotnēji eksperimentālā simulācija tika veikta 16 kanālu sistēmai ar *RZ* līnijas koda formātu, izmantojot *DCF* pirms, pēc un simetriskai *CD* kompensācijai. Simulatīvā eksperimenta turpinājumā *RZ* līnijas kods tika nomainīts uz *NRZ* līnijas kodu, un tika atkārtotas *CD* kompensācijas simulācijas. Pēc tam *SMF* tika aizstāts ar *NZDSF*, un simulācijas tika atkārtotas vēlreiz. Pēc visām *CD* kompensācijas simulācijām tika pievienots papildu šķiedras Brega režģis *FBG CD_{SL}* kompensācijai.

Vispirms tika noteikts 16 kanālu *WDM* sistēmas ar datu pārraides ātrumu kanālā 40 Gbit/s, pārraides līnijas garums bez *CD* un *CD_{SL}* kompensācijas. Izmantojot *RZ* līnijas kodu, maksimālais pārraides līnijas garums bija 3,0 km ar *SMF* (uzkrātā *CD* vērtība – 48,0 ps/nm), savukārt ar *NZDSF* pārraides līnijas garums bija 6,9 km (uzkrātā *CD* vērtība – 27,6 ps/nm).

Sliktākais rezultāts tika fiksēts 11. kanālā (193,4 THz), kur attiecīgi BER vērtības ar SMF bija $4,7 \times 10^{-13}$, BER vērtība ar $NZDSF$ – $9,6 \times 10^{-13}$, attiecīgi noteiktais BER sliekšnis ($BER < 10^{-12}$) netika pārsniegts. Maksimālais iegūtais pārraides līnijas garums, izmantojot NRZ līnijas kodu kopā ar SMF , bija tikai 2,4 km (uzkrātā CD vērtība – 38,4 ps/nm), savukārt ar $NZDSF$ šis garums sasniedza 10,2 km (uzkrātā CD vērtība – 40,8 ps/nm). Sliktākā kanālu veikspēja SMF un $NZDSF$ tika novērota vairākos definētos kanālos. Izmantojot SMF šķiedru, sliktākais rezultāts tika novērots 13. kanālā, kur BER bija $1,5 \times 10^{-13}$, bet $NZDSF$ tika novērots 12. kanālā, kur BER bija $7,0 \times 10^{-13}$. Kopējā uzkrātā CD vērtība bija 800 ps/nm 16 kanālu WDM sistēmai ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s kanālā, izmantojot 50,0 km SMF . CD kompensācijai tika izmantots DCF , CD_{SL} kompensēšanai ŠOPS tika pievienots papildu šķiedras Brega režģis FBG .

3.2. apakšnodalā aprakstīts četru viļņu mijiedarbes (FWM) efekta lietojums spektrāli efektīvu ŠOPS risinājumu izveidē.

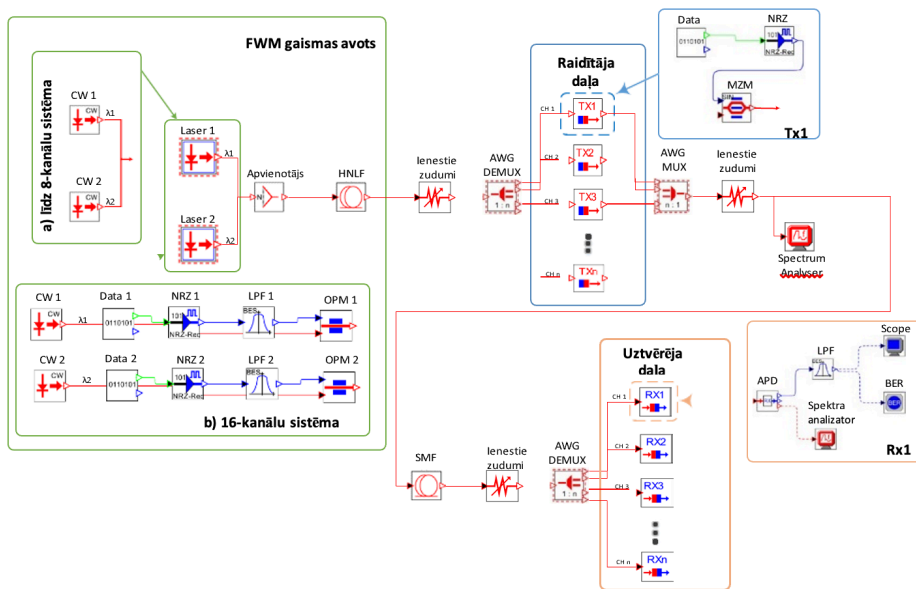
Šajā sadaļā pētīta FWM optiskā efekta izmantošana, lai izveidotu daudzviļņu gaismas avotu un darbinātu līdz 16 kanālu $DWDM-PON$ sakaru sistēmu. $RSoft$, $OptSim$ simulāciju programmatūras vidē tika izstrādāts eksperimentāls simulācijas modelis ar FWM daudzviļņu gaismas avotu $DWDM-PON$ pārraides sistēmai. Pumpēšanas lāzera jauda tika mainīta diapazonā no +15 dBm līdz +30 dBm. Tika pētīti arī dažādi paaugstinātas nelinearitātes šķiedras ($HNLF$) šķiedru laiduma garumi līdz 2 km garumā. FWM procesa rezultātā tika ģenerēta ceturrtā frekvence. Lai efektīvi FWM efekta ietekmi $HNLF$ šķiedrā, tika noteikti šādi $HNLF$ parametri: efektīvais laukums $11,6 \mu\text{m}^2$; nulles dispersijas viļņa garums 1552,32 nm; nelineārais koeficients $11,50 (W \times 1)^{-1}$. Šajā pētījumā izmantotās centrālās frekvences nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotiem CW bija 193,1 THz (1552,524 nm) un 193,15 THz (1552,123 nm), vājinājuma koeficients ģenerēšanai līdz 16 nesējiem $HNLF$ šķiedrā bija 0,8 dB/ng [36]. $DWDM-PON$ sistēmās izmantotie viļņvadu masīva režģa AWG multiplexera un demultiplexera parametri bija šādi: starpkanālu intervāls – 50 GHz; optiskās 3-dB joslas platums – 16,5 GHz; viļņvadu masīva režģa AWG multiplexera un demultiplexera zemākā kanāla centrālā frekvence tika mainīta atkarībā no izmantoto kanālu skaita (četriem kanāliem – 193,05 THz, astoņiem kanāliem – 192,95 THz, 16 kanāliem – 192,75 THz). Nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW pumpēšanas optimālā jauda un $HNLF$ laiduma garums tika noteikts eksperimentāli, izmantojot simulācijas modeli. Šie parametri tika atrasti, novērtējot optisko spektru uz pirmā viļņvadu masīva režģa AWG un demultiplexera izejas, ņemot vērā ģenerēto nesēju zemāko jaudas variāciju, kas nepārsniedza 3 dB diapazonu.

Eksperimentāli tika konfigurēti FWM daudzviļņu gaismas avoti, to parametri mainījās atkarībā no sistēmā izmantoto kanālu skaita: līdz astoņu kanālu, četru kanālu un 16 kanālu $DWDM-PON$ pārraides sistēmas eksperimentālais simulācijas modelis ar definētu FWM daudzviļņu garuma avotu.

Papildus viļņvadu masīva režģa AWG multiplexeram un demultiplexeram tika pievienots optiskais elements (optiskais vājinātājs), kas simulēja optisko vājinājumu, atbilstošu viļņvadu masīva režģa AWG multiplexera un demultiplexera pieejamajam risinājumam. Datu pārraides kanāli ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā jeb katrs raidītājs Rx sastāv no datu avota, NRZ līnijas koda un Maha-Zendera intensitātes modulatora MZM . Pētījuma laikā datu pārraides kanālu skaits svārstījās no četriem līdz 16 kanāliem. Kā optiskā tīkla segmenta daļa tika izmantota SMF , kas atbilst $ITU-T G.652$ standartam. Šķiedras garums bija 20 km, vājinājuma koeficients – 0,2 dB/km, dispersijas koeficients – 16 ps/nm/km pie 1550 nm viļņa garuma. $DWDM-PON$ sistēmas uztvērējs tika veidots no lavīna fotodiodes (APD) ar jutību –24 dBm pie

uztvērtā signāla kļūdas varbūtības 10^{-9} . Pēc *APD* uztvērēja tika izmantots zemfrekvenču elektriskais filtrs *LPF* ar 3-dB joslas platumu 7,5 GHz, lai samazinātu uztvērtā signāla troksni. Uztvērtā signāla novērtēšanai tika izmantota *BER* kļūdu skaitīšana.

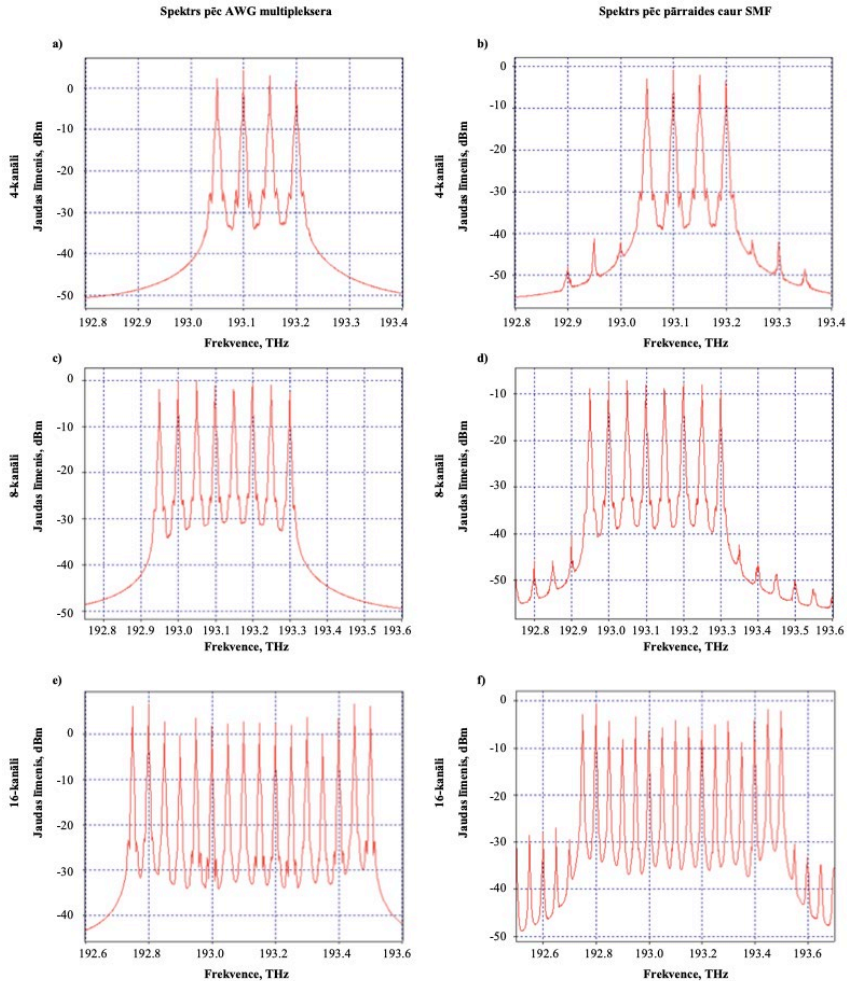
Veicot simulāciju (1. att.), tika izmantoti visi iepriekš definētie sistēmas komponentu un elementu parametri, bet optimālie parametri, piemēram, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota *CW* jauda un *HNLF* garums, tika definēti eksperimentālās simulācijas laikā. Rezultāti tika analizēti pēc iegūtā optiskā signāla spektra *HNLF* šķiedras izejā un pēc signāla optiskā spektra aiz viļņvadu masīva režģa *AWG* multiplexsiera, kā arī optiskā spektra pēc pārraides caur *SMF* (kur *SMF* laiduma garums – 20 km). Pārraidītā signāla kvalitāte tika novērtēta *DWDM-PON* pārraides sistēmas sliktākajam kanālam, pamatojoties uz acu diagrammu un *BER* rezultātiem (kur $BER \leq 10^{-10}$). Sliktākais kanāls, kas eksperimentā tika fiksēts, četru kanālu un 16 kanālu *DWDM* sistēmas risinājumā bija 4. kanāls, savukārt astoņu kanālu sistēmas risinājumā – 1. kanāls. Izmantojot definētos optimālos parametrus, tika iegūti dažādi optiskie spektri līdz 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmas risinājumā pirms un pēc pārraides caur *SMF* (2. att.).



1. att. Eksperimentālais simulācijas modelis: (a) līdz astoņu kanālu; (b) 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmai ar *FWM* daudzviļņu garumu avotu.

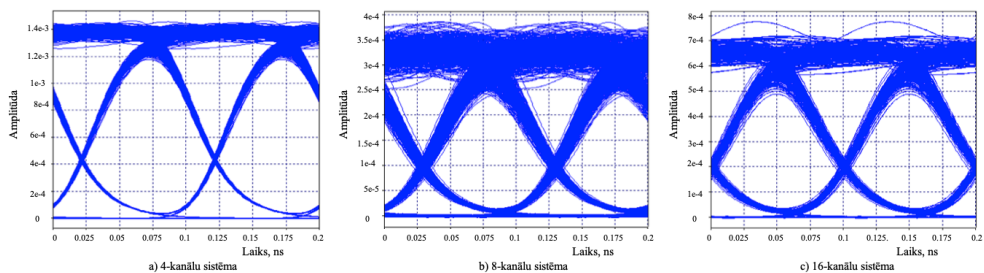
Salīdzinot optiskos spektrus pie *HNLF* un viļņvadu masīva režģa *AWG* multiplexsiera izejas, var secināt, ka kanālu izejas līmeņi pēc viļņvadu masīva režģa *AWG* multiplexsiera un demultiplexsiera ir vienmērīgi sadalīti. Savukārt 2. attēlā (b, c, e) atkarībā no kanālu skaita redzams, ka šajā gadījumā viļņvadu masīva režģa *AWG* demultiplexsiera atdalīja četrus, astoņus un 16 kanālus centrālajās frekvencēs no 192,75 THz līdz 193,5 THz ar starpkanālu intervālu 50 GHz. Vidējā aprēķinātā kanāla maksimālā izejas jauda četriem kanāliem bija 3,3 dBm. Lielākā atšķirība starp aprēķināto vidējo kanāla maksimālo jaudu un izmērītajiem kanāla jaudas līmeņiem bija 4. kanālā, kas bija 0,5 dBm. Tomēr astoņu kanālu sistēmā kanāla vidējā maksimālā jauda bija 0,7 dBm, kur starpība starp sliktāko kanālu bija 1,3 dBm (1. kanālam). 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmā kanāla vidējā maksimālā jauda bija 2,8 dBm, un starpība starp aprēķināto vidējo kanāla maksimālo jaudu un izmērīto kanāla maksimālo jaudu

bija 2,9 dBm (4. kanālam). Iegūtās vērtības ir pieņemamas, jo tās ietilpst 3 dBm diapazonā. 2. attēlā redzams spektrs *DWDM-PON* pārraides sistēmai ar: (a) četru kanālu; (c) astoņu kanālu; (e) 16 kanālu pēc *AWG* multiplexsora; (b) četru kanālu; (d) astoņu kanālu; f) 16 kanālu aiz pārraides līnijas daļas. 3. attēlā redzamas uztvertā signāla acu diagrammas: (a) četru kanālu, (b) 8 kanālu; (c) 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmā ar *FWM* daudzviļņu gaismas avotu.



2. att. *DWDM-PON* pārraides sistēmas izvades spektrs ar *FWM* daudzviļņu gaismas avotu: (a) četru kanālu; (c) astoņu kanālu; (e) 16 kanālu pēc *AWG* multiplexsora; (b) četru kanālu; (d) astoņu kanālu; (f) 16 kanālu pēc 20 km garas *SMF* pārraides līnijas.

Kā var redzēt 3. attēlā, acu diagrammas kvalitāte pasliktinās palielinātas dispersijas un nelineāro efektu dēļ, kad *FWM* daudzviļņu gaismas avotam tiek ģenerēts lielāks kanālu skaits (no četriem līdz 16 kanāliem).



3. att. *DWDM-PON* pārraides sistēmas acu diagrammas ar *FWM* daudzviļņu gaismas avotu: (a) četru kanālu; (b) astoņu kanālu; (c) 16 kanālu.

3. tabulā parādītas uztvertā signāla *BER* vērtības līdz 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmai, kur sliktākais fiksētais kanāls četru un 16 kanālu sistēmas risinājumā ir 4. kanāls, savukārt astoņu kanālu sistēmas risinājumā – 1. kanāls. Tomēr tiek uzskatīts, ka pārraides līnijas darbosies kvalitatīvi ar zemiem zudumiem, jo “acs” atvērums visos gadījumos ir atvērts un *BER* ir zem sliekšņa 1×10^{-10} . Saskaņā ar *ITU-T G.984.2* rekomendāciju saistībā ar ieteicamo *BER* vērtību optiskās šķiedras pārraides sistēmām ar bitu pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā *BER* jābūt mazākam par 10^{-10} [20].

3. tabula

BER vērtība līdz 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmā

	Četru kanālu sistēma	Astoņu kanālu sistēma	16 kanālu sistēma
<i>BER</i> vērtība sistēmas kanālam ar sliktāko veiktspēju (20 km garai <i>SMF</i> šķiedrai)	1×10^{-40}	$2,5 \times 10^{-23}$	$6,5 \times 10^{-14}$

Eksperimentālajā pētījumā tika izpētīta līdz 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēma ar *FWM* daudzviļņu garuma avotu. *FWM* efekts tika izmantots, lai ģenerētu vairāku nesēju (vairāku viļņu garuma) optiskos nesējus četru, astoņu un 16 kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmai. Pirmais solis bija atrast optimālo nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota *CW* pumpēšanas lāzera jaudu un *HNLF* šķiedras garumu *FWM* nesēja ģenerēšanai, ko varētu tālāk izmantot datu modulēšanai un modulēto optisko signālu pārsūtīšanai. Pētījuma rezultātā tika konstatēts, ka *DWDM-PON* pārraides sistēmai ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu, pārraides kanālā izmantojot 50 GHz starpkanālu intervālu, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota *CW* pumpēšanas jaudas līmenis abiem gaismas avotiem četru kanālu sistēmas gadījumā bija +20 dBm pie *HNLF* 0,9 km laidumā. Lai palielinātu *DWDM-PON* sakaru sistēmas kanālu skaitu no četriem kanāliem līdz astoņiem un 16 kanāliem un attiecīgi ģenerētu vairāk nesēju, bija nepieciešams palielināt pumpēšanas nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota *CW* jaudu. Tādējādi astoņu kanālu sistēmai nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota *CW* jauda sasniedza 24,1 dBm pumpējošā avota izejas jaudas līmeni, un *HNLF* garums sasniedza 1,39 km. Savukārt 16 kanālu sistēmai tas bija attiecīgi 26,3 dBm un 1,05 km., Lai palielinātu *FWM* ģenerēto nesēju skaitu *DWDM-PON* sistēmai ar astoņiem līdz 16 kanāliem, ir jāņem vērā *SBS* sliekšnis, pretējā gadījumā nesēja izejas jauda ir nevienmērīga un rezultātā nevar izveidot 16 kanālu sistēmu. *BER* vērtības un acu diagrammas tika novērtētas *DWDM-PON* sistēmas sliktākajam kanālam. Analizējot uztverto signālu pēc 20 km laiduma caur *SMF*, tika novērots, ka četru kanālu *DWDM* sistēmā vissliktākā kanāla *BER* vērtība bija 1×10^{-40} , astoņu kanālu sistēmā vissliktākā kanāla

BER vērtība bija $2,5 \times 10^{-23}$, savukārt 16 kanālu sistēmā vissliktākās veiktspējas kanāla *BER* vērtība bija $6,5 \times 10^{-14}$.

3.3. apakšnodaļā aprakstīts signāla reģenerācijas ietekmes novērtējums *DWDM* risinājumiem. Šajā eksperimentālajā pētījumā tika pētīts trīs visplašāk lietoto signālu modulācijas formātu jaudas efektivitāte *DWDM* sistēmās. Analītiskais modelis izstrādāts ar mērķi, lai signāla noteikšanas kļūdu varbūtības koeficients uztveršanas mezglā 2960 km no punkta uz punktu (*P2P*) pārraides attālumā būtu zemāks par 1×10^{-3} . Šim nolūkam ar simulācijas palīdzību, izmantojot *RSoft*, *OptSim* programmatūru, tika definēta pārraides sasniedzamība katram definētajam parametram, un, izmantojot iegūtos rezultātus, tika aprēķināts sistēmas jaudas patēriņš un efektivitāte. Tajā skaitā tika pārbaudīta signāla reģenerācijas procesa ietekme uz kopējo sistēmas enerģijas patēriņu katram simulācijas risinājuma iestatījumam. Rezultāti parādīti kā pārraidīto datu apjoma funkcijas, kas darbojas pie dažādām starpkanālu intervāla vērtībām, kas ļauj pielāgot rezultātus *WDM* realizācijās ar dažādām pieejamajām spektra joslām.

Pētījums sniedz jaudas efektivitātes vērtības un *DWDM* iestatījumu salīdzinājumu, kas darbojas pie 10 Gbit/s *NRZ-OOK*, 40 Gbit/s *NRZ-DPSK* vai 100 Gbit/s *DP-QPSK* pārraides signāliem, un ir iespējams fiksēt nepieciešamo jaudas attiecību. Pētījuma gaitā iegūtos rezultātus var izmantot energoefektīvas *DWDM* sistēmas projektēšanā.

Pamatojoties uz attiecīgiem pētījumiem [37, 38, 39], transponderu un 3R reģeneratoru jaudas patēriņa vērtības atkarībā no modulācijas (bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar ieslēgšanas-izslēgšanas manipulāciju (*NRZ-OOK*); bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar diferenciālās fāzes manipulāciju (*NRZ-DPSK*); bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar kvadrātūras fāzes manipulāciju (*NRZ QPSK*)) apkopotas 4. tabulā.

4. tabula

Transponderu un 3R enerģijas patēriņš, W

Pārraides ātrums, Gbit/s	Modulācijas formāts	Patērētājs	Jauda, W
10	<i>NRZ-OOK</i>	TP/3R	34,0 (<i>Typ.</i>)
40	<i>NRZ-DPSK</i>	TP/3R	85 (<i>Max</i>)
100	<i>DP-QPSK</i>	TP/3R	139 (<i>Typ.</i>)

Eksperimentālajā pētījumā enerģijas patēriņa vērtības katrai aplūkotajai sistēmas realizācijai tika novērtētas, izmantojot dažādus starpkanālu intervālus, pamatojoties uz to, ka kanāliem šķērsrunas traucējumi ir unikāli katram signāla veidam, kas darbojas vienā frekvenču diapazonā. Šī eksperimenta mērķis ir novērtēt reģenerācijas ietekmi uz jaudas efektivitāti un kopējo enerģijas patēriņu, tāpēc nav nepieciešams analizēt dažādas sistēmas, izmantojot vienādu kanālu sadalījumu. Eksperimenta analīzei paredzētā zemākā frekvenču intervālu robeža tika izvēlēta, balstoties augstākajā spektrālajā efektivitātē, ko iespējams sasniegt, nodrošinot definēto *BER* prasību izpildi. Augšējā robeža tika iegūta apstākļos, kad pārraides apjomi sasniedza maksimumu, kas nozīmē, ka turpmāka frekvences robežas palielināšana izraisītu tikai spektrālās efektivitātes samazināšanos, lietderīgi pozitīvi neietekmējot enerģijas patēriņu. Šajā pētījumā aplūkotas dažādas spektrālās efektivitātes dažādos frekvenču intervālos, tāpēc pārraides sasniedzamība kļuva atkarīga no starpkanālu intervāla. Saistība starp frekvenču intervālu jeb starpkanālu intervālu, spektrālo efektivitāti (SE) un pārraides sasniedzamību apkopota 5. tabulā.

Spektrālā efektivitāte un sistēmas sasniedzamība ar dažādām kanālu atstatuma vērtībām

Kanālu atstatums, GHz	SE, bit/Hz	Sasniegtais attālums, km
10 Gbit/s NRZ-OOK		
12,50	0,80	160
18,75	0,53	1680
25,00	0,40	5700
31,25	0,32	8720
40 Gbit/s NRZ-DPSK		
50,00	0,80	160
56,25	0,71	240
62,50	0,64	560
75,00	0,53	960
87,50	0,46	1440
100,00	0,40	2080
112,50	0,36	2080
100 Gbit/s DP-QPSK		
31,25	3,20	160
37,50	2,67	400
43,75	2,29	1040
50,00	2,00	1360

3.4. apakšnodaļā aparastīts jaudas efektivitātes izmaiņas novērtējums *DWDM* sakaru sistēmas risinājumā atkarībā no lietotā optiskā pastiprinātāja veida. Iestatījumu definēšanai un informācijas vākšanas un apstrādes metodoloģija ir līdzīga iepriekšējās apakšnodaļās aprakstītajam. Atbilstoši pētījuma mērķiem tika mainīti tikai ievades dati un sistēmas parametri. Šajās simulācijās fokuss vairāk tika likts uz parametru definēšanas pamatojumu. Vispirms tika simulēta *DWDM* pārraides saistība ar *EDFA* un *SOA* pastiprinājumiem vairākiem pārraides attālumiem, izmantojot *RSoft*, *OptSim*, *WDM* komponentu tehniskās datu lapas un jaunāko pētījumu rezultātus attiecībā uz specifiskām *SOA* parametru definīcijām. Izstrādātajā pārraides sistēmā netika iekļautas turpverstās labošanas kodu (*FEC*) shēmas. Attiecīgi tāpēc šīs simulācijas galvenais mērķis ir sasniegt uztvērējā *Q* faktora līmeni, kas lielāks par 16 dB, kas atbilst 1×10^{-9} bitu kļūdu attiecībai *BER*, kas tika mērīta visvairāk degradētajā kanālā – centrālajā kanālā.

Šajā eksperimentālajā simulācijā centrālais viļņa garums tika iestatīts uz 193,0 THz standarta 193,1 THz vietā. Tas tika darīts, lai ņemtu vērā iespējamus papildu traucējumus, piemēram, lielākus zudumus OŠ [40].

Nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avots *CW* tika sadalīts četros konstantos staros ar jaudas līmeni 0 dBm, kur katru no tiem pārvaldīja 25 Gbit/s pseidogadījuma bitu secības (*PRBS*) ģeneratori, izmantojot elektrisko impulsu ģeneratorus un amplitūdas modulatorus. 90° fāzes modulācija tika veikta diviem modulētiem optiskajiem stariem, kuros pēc fāzes modulācijas tika apvienoti divi signāli ar ortogonālām fāzēm turpmākai polarizācijas modulācijai. Visi četri optiskie signāli tika apvienoti un pārraidīti caur divpusējo optisko Gausa filtru, t. i., 3-dB joslas platums ir 35 GHz.

Kanālu skaits tika noteikts ar nelineāro kropļojumu statistisko aprēķinu [41], kas parādīja, ka *XPM* ietekme uz konkrētu pārraides kanālu pret četriem nākamajiem kanāliem sasniedza ~ 97 % no maksimālā iespējamā. Pēc tam ģenerētie un kombinētie optiskie signāli tika pastiprināti ar *EDFA* pastiprinātāja modeli ar fiksētu optisko izejas jaudu 14 dBm (ienestais trokšņu rādītājs $NF = 4,5$ dBm) vai ar *SOA* pastiprinātāja modeli ar 8 dBm signāla pastiprinājumu (ienestais trokšņu rādītājs $NF = 8$ dBm, tipiskā piesātinājuma jauda $P_{sat} = 14$ dBm).

Jāpiebilst, ka *SOA* veiktspējai var būt divi režīmi – statiskais, pieņemot, ka nav pastiprinājuma svārstību, un dinamiskais. Statisko režīmu var atrast, izmantojot 1. formulu [42]:

$$h(t) = \ln(G_0) - \left[\frac{P_{in}(t)}{P_{sat}} \right] \cdot [e^{h(t)} - 1], \quad (1)$$

kur $h(t)$ – *SOA* pastiprinājuma eksponente;

G_0 – *SOA* mazs signāla pastiprinājums;

$P_{in}(t)$ – *SOA* ieejas jauda.

Šī pētījuma galvenais mērķis bija novērtēt ietekmi uz energoefektivitātes līmeni, aizstājot *EDFA* ar *SOA*, ņemot vērā jaunākos atklājumus par *SOA*. Balstoties pētījumos, kas vērsti uz *SOA* veiktspējas novērtēšanu, kā alternatīvu zemu izmaksu pastiprināšanas komponentu *DWDM* sistēmām aizstājot *EDFA* ar *SOA* un ņemot vērā jaunākos atklājumus par *SOA*, bija nepieciešams veikt iepriekš veikto eksperimentālo simulāciju, lai atrastu labāko kombinēto risinājumu izstrādi tālākiem pētījumiem. Lai sasniegtu šo mērķi, pašreizējā pētījumā tika izvērtēti un salīdzināti jaudas efektivitātes līmeņi piedāvātajā aizstāšanas scenārijā, kad *EDFA* pastiprinātā optiskā savienojuma, kur tiek izmantota 86 kanālu C josla. Kopējā jauda tika dubultota, tā vietā izmantojot *SOA*, nodrošinot 182 pārraides kanālus, pateicoties plašākai pastiprināšanas joslai. Abās konfigurācijās tika izmantoti 100 Gbit/s *DP-QPSK* pārraides signāli, kas atdalīti ar 50 GHz kanālu atstarpi.

Pirmajā simulācijas solī tika parādīts, ka, ņemot vērā korelāciju starp nelineārajiem kropļojumiem un pusvadītāju pastiprinātāja ieejas jaudas $P_{in}(t)$ un piesātinājuma jaudas P_{sat} attiecību, bija iespējams pielāgot pārraides parametrus tā, lai Q faktors ir lielāks par 16 dB līdz 640 km garā OŠ līnijā.

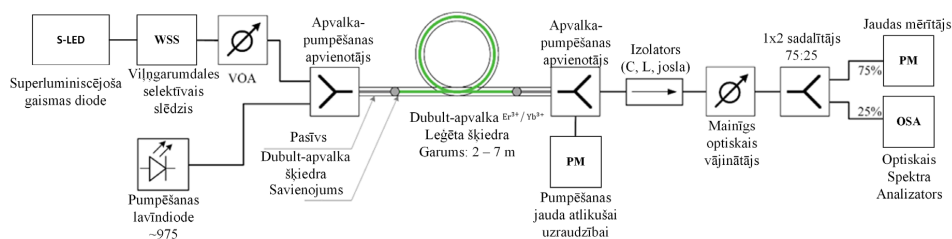
Tālāk, pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem un pieejamajiem pārraides sistēmas komponentu parametriem, tika aprēķināti energoefektivitātes līmeņi. Aprēķināto vērtību salīdzinājums parādīja, ka sistēmai ar *SOA* pastiprinājumu viena bita pārraidei bija nepieciešams mazāk enerģijas un šī atšķirība kļuva ievērojamāka lielākiem pārraides attālumiem – no 1,6 % līdz 12,6 %, attiecīgi 80 km un 640 km garām OŠ līnijām. Tas pierāda, ka *SOA* kopā ar salīdzinoši zemajām komponentu izmaksām varētu sniegt papildu ekoloģiskos un finansiālos ieguvumus.

Jāatzīmē, ka, ņemot vērā to, ka šis ir pirmais solis, lai novērtētu enerģijas patēriņa apjomus *SOA* pastiprinātajām sistēmām, vairāki potenciāli kritiski sistēmas parametri, fiziski traucējumi un aparatūras pieejamības un saderības jautājumi šajā pētījumā neietilpst.

3.5. apakšnodalā aprakstīta jauna inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru izveide un novērtējums ŠOPS.

Šī eksperimenta galvenais mērķis ir izpētīt risinājumu optiskajam pastiprinātājam, kura pamatā tiek izmantota dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētā šķiedra, t. i., salīdzināt optisko nesēju pastiprinājuma izmaiņas atkarībā no leģētās šķiedras laiduma garuma (2–7 m), izmantotās daudzmodu pumpēšanas avota izejas jaudas (0,6–2,0 W) un viļņa garuma (C josla). Rezultējoši tiek noteikts pastiprinājuma “gain” darbības josla, balstoties optisko nesēju jaudas stabilitātē.

4. attēlā redzama eksperimentālā shēma, kas izmantota inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru pastiprinājuma mērījumiem šajā eksperimentālajā daļā. Eksperimentālā shēma sastāv no dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētas optiskās šķiedras, kas abos galos savienota ar dubultapvalka apvienotāju/sadalītāju, nodrošinot pumpējošā avota un optisko nesēju ievades/izvades pieslēguma funkcionalitāti. Šķiedras iekšējā ar retzemju materiāliem leģētā daļa ir zieda formā, lai panāktu gaismas fokusēšanas efektu, kas veicina pārklāšanos starp daudzmodu pumpēšanas avotu un leģētās šķiedras serdeni. Primārais pastiprināšanas procesa virzītājspēks ir retzemju elementu koncentrācija, kas ir ļoti būtiska šādu pastiprinātāju kombinācijai. Šajā risinājumā izmantotās šķiedras kodols ir leģēts ar erbiju un iterbiju, un tas tika noteikts kā atomu procentuālā izteiksme, kas attiecīgi ir 0,06 % un 1,21 % [43]. Tā ir Yb^{3+} un Er^{3+} attiecība 20,17, kas parāda, ka Yb^{3+} ir galvenā nozīme pumpēšanas gaismas absorbēšanā un šīs enerģijas nodošanā Er^{3+} joniem. Atbilstošie absorbcijas un emisijas šķērsriezumi, kas aprēķināti absorbcijas mērījumos, redzami 4. attēlā. Šie dati tika ievadīti modelī, lai noteiktu sākotnējo šķiedru garuma diapazonu un pumpēšanas jaudas līmeņus, kas varētu atbalstīt platjoslas pastiprināšanu C joslā [44].



4. att. Eksperimentālā shēma, kas tiek izmantota inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru kanāla pastiprinājuma mērījumiem.

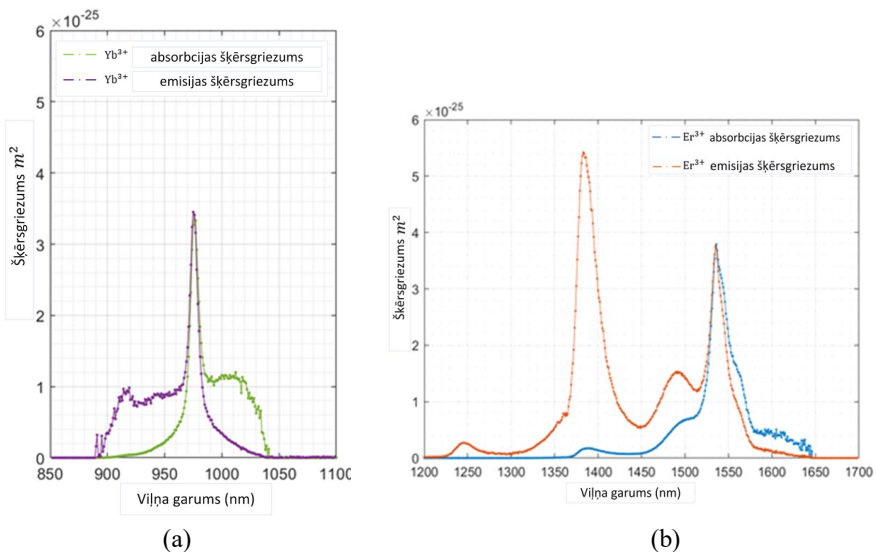
Eksperimentālās shēmas ieejas pusē ir lielas jaudas pumpēšanas avots (d daudzmodu pumpēšanas avots) ar centrālo viļņa garumu 975 nm un joslas platumu 6 nm, kas tiek uzturēts 30 °C temperatūrā ar termoelektrisko dzesētāju (ar *peltier* termokontrolieri uz lāzera diodei atbilstošas platformas), lai novērstu tā izejas viļņa garuma un jaudas svārstības. Ieejas signāls tiek ģenerēts, filtrējot gaismu, ko rada superluminescences gaismas diode (*S-LED*) ar –10 dB maksimālo optisko izejas jaudu un optiskā signāla joslas platumu robežās no 1526 nm līdz 1630 nm. Viļņgarumdales selektīvais slēdzis (*WSS*) tiek izmantots, lai filtrētu *S-LED* un radītu spektru, kas ierobežots ar C joslu, kas savukārt sastāv no 48 kanāliem ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 37,5 GHz joslas platumu, kas atbilst iestatījumiem iespējošajam *WSS*. Šis optisko nesēju signāls saturošs 48 kanālu interpretāciju tiks izmantots visām turpmākajām izpētēm, un tā jauda tiks regulēta ar mainīgu optisko vājinātāju (*VOA*).

Eksperimentālajā risinājumā dubultapvalka sadalītājs/apvienotājs leģētās šķiedras izejas pusē tiek izmantots, lai atdalītu pumpēšanas gaismu no pastiprinātā signāla. Neabsorbētā pumpēšanas gaisma tiek uzraudzīta ar siltuma jaudas sensoru. Tālāk pastiprinātais optiskais

signāls ar optisko jaudas sadalītāju (jaudas dalījuma procentuālā proporcija ir 50 pret 50) tiek sadalīts starp fotodiodes bāzētu optiskās jaudas mērītāju (*PM*) un optiskā spektra analizatoru (*OSA*), ko izmanto attiecīgi vidējotā pastiprinājuma “*gain*” un katra individuālā kanāla pastiprinājuma mērījumiem.

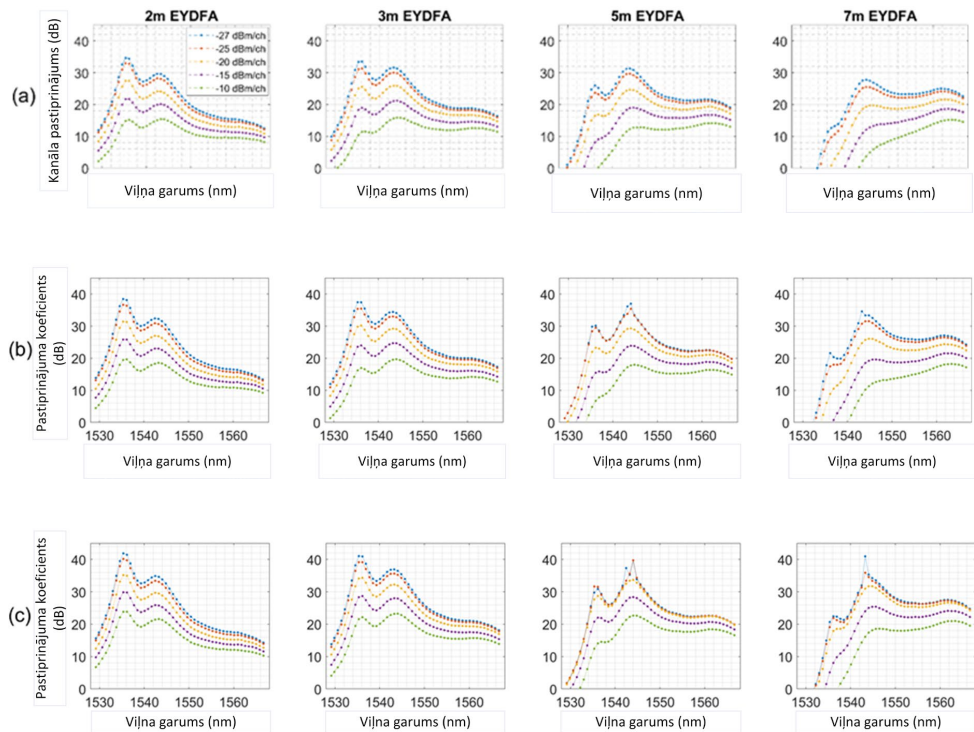
Lai pārbaudītu pastiprinātāju, tika kontrolēti un mainīti šādi trīs parametri konkrētajos diapazonos:

- 1) $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ dubultapvalka līdzlēģētās šķiedras garums – no 2 m līdz 7 m;
- 2) optisko nesēju signāla optiskās jaudas līmenis – no -27 dBm līdz -10 dBm (kanālā);
3. 975 nm pumpēšanas avota izejas optiskās jaudas līmenis no 0,6 W līdz 2,0 W.



5. att. Absorbcijas un emisijas šķērsgriezuma spektri, kas aprēķināti no: (a) Yb^{3+} ; (b) Er^{3+} jonu absorbcijas mērījumiem.

6. a attēlā pumpēšanas avots ir iestatīts uz zemāko izejas jaudas līmeni 0,6 W, kas rada ievērojamu maksimālo pieaugumu pie 1536 nm, sasniedzot 34 dB pastiprinājumu, izmantojot 2 m garu dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu ar optisko nesēju ieejas jaudu -27 dBm. Palielinot dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu, šis maksimums samazinās, otrais maksimums pie 1544 nm kļūst pamanāmāks, kā arī palielinās pastiprinājums lielākiem viļņu garumiem. Pie 7 m garas dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras sākas trešais maksimums, kas izpaužas pie 1563 nm, bet maksimums pie 1544 nm tiek samazināts. Tas rada relatīvi lineāru pastiprinājumu starp iepriekš minētajiem diviem viļņa garumiem.



6. att. Pastiprinājums atkarībā no dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garuma robežās no 2 m līdz 7 m pie ieejas nesēju signālu jaudas robežās no -27 dBm līdz -10 dBm, izmantojot 976 nm daudzmodu pumpēšanas avotu ar izejas optisko jaudu, kas iestatīta uz: (a) 0,6 W; (b) 1,0 W; c) 2,0 W.

Ja pumpēšanas jauda tiek palielināta no 0,6 W līdz 1,0 W (6. b att.), pastiprinājums tiek palielināts visiem kanāliem, bet maksimālais pastiprinājums kļūst vēl pamanāmāks. Tomēr pie 5 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garuma ieejas nesēja optiskais signāls -27 dBm un -25 dBm kanālā rada pastiprinājuma profilus, kas būtībā pārklājas, un pastiprinājuma maksimumos pie 1536 nm un 1544 nm viļņa garumiem ir redzami daži strauji lēcieni. Tas ir parazītiskās lāzerēšanas rezultāts, kas ir pamanāmāks ar mazāku ieejas signāla jaudu. Šis lāzerēšanas ietekmē radītais efekts ir nestabils un var īslaicīgi sasniegt jaudas līmeni, kas pārsniedz 10 dB virs pastiprinātā ieejas signāla. Šī spontānā lāzera noteikšana kļūst pamanāmāka garākiem dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma posmiem maksimālās jaudas un viļņa garuma izmaiņu izteiksmē. Sniegtie dati ir katra kanāla vidējais pastiprinājums (6. att.), tāpēc parazītiskās lāzerēšanas efekts nav tik redzams, kā tas būtu optiskā spektra analizatorā *OSA*, tomēr, salīdzinot ar blakus esošajiem kanāliem, tas parādās kā atšķirīgi lēcieni.

Ja pumpēšanas avota jaudu palielina vēl vairāk (līdz 2,0 W), īsākiem dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumiem robežās no 2 m līdz 3 m, kanāla pastiprinājums kopumā turpina palielināties ar nelielu uzsvāru uz pastiprinājuma maksimumiem. Tomēr ar 5 m un 7 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumiem pastiprinājuma nostiprināšana kļūst acīmredzama ar ieejas nesēju signāla jaudu robežās no -27 dBm līdz -20 dBm kanālā, kur kanāla pastiprinājums ir gandrīz identisks visā optiskajā spektrā.

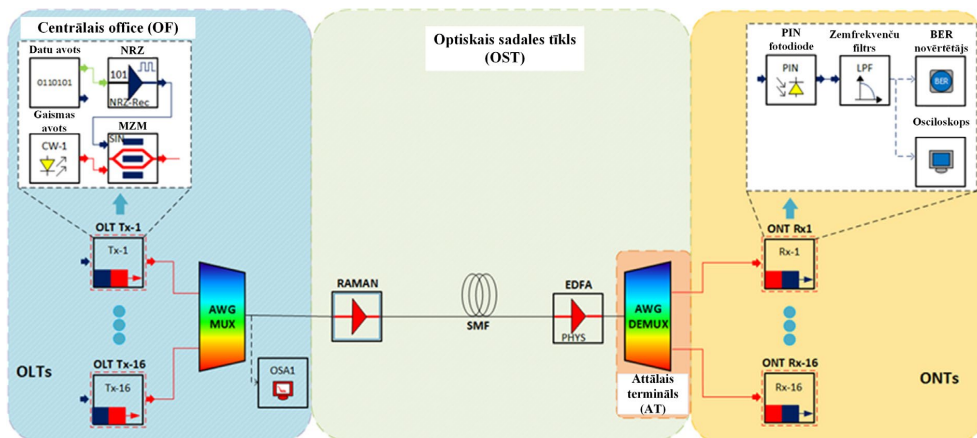
Pastiprinājuma līknes nevienmērību (lēcienu optiskajā spektrā), iespējams, izraisa palielināts parazītiskās lāzēšanas efekts, kas redzams 6. c attēla diagrammā. Turklāt, iestatot kanāla jaudu vēl zemākā līmenī, tiek panākta intensīvāka parazītiskā lāzēšana pat īsākiem šķiedru laidumiem. Precīzi faktori, kas ir atbildīgi par lāzēšanas ierosināšanu, nav skaidri, taču, ņemot vērā to, ka garāki 5 m laidumi palielina nevēlamo lāzera starojumu, šķiet, ka tas ir saistīts ar šķiedras iekšējo apvalka ģeometriju, kas virza daudzmodu pumpēšanas lāzeru uz leģēto serdi.

Lielākā daļa no kopējā pastiprinājuma tiek sasniegta pirmajos dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras metros pēc izplatīšanās pastiprinātājā. Ievadītā jauda kanālā un pumpēšanas jaudas kopējā signāla jauda pastiprinātāja izejā paliek efektīva robežās no 2 m līdz 7 m dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laiduma garuma robežās. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras garuma palielināšana izmanto vairāk pumpēšanas gaismas, lai saglabātu sasniegto jaudas līmeni un pārdaļītu jaudu uz garākiem viļņu garumiem, savukārt zemāki viļņu garumi pakāpeniski tiek absorbēti, kad pumpēšanas jauda samazinās un nespēj nodrošināt pietiekami daudz enerģijas, lai uzturētu jau sasniegto jaudas līmeni. Zemas ieejas signāla jaudas un lielas pumpēšanas jaudas kombinācija var izraisīt ļoti pamanāmu pastiprinājuma fiksāciju parazītiskās lāzēšanas efekta rezultātā, kas kļūst intensīvāka proporcionāli leģētās šķiedras garumam. Tas pats lāzers var samazināt tuvējo kanālu sasniedzamo jaudas līmeni. No tā var izvairīties, nodrošinot, ka ieejas signāls ir pietiekami spēcīgs, pārsniedzot lāzera sliekšni.

3.6. apakšnodalā aprakstīta hibrīda *Raman-EDFA* pastiprinātāja izveide un veikspējas analīze *WDM* pārraides sistēmā.

Aplūkoti divi galvenie optisko pastiprinātāju risinājumi – ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji *EDFA* un Ramana šķiedras pastiprinātāji *RFA*. Ramana pastiprinātāju *RFA*, kuru pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra *DCF*, ir potenciāls lietojums nākotnes optiskās sakaru sistēmās, jo hromatiskās dispersijas *CD* kompensāciju šķiedru pārraides līnijas daļā var iegūt vienlaikus ar labvēlīgo optisko signālu pastiprinājumu. Lai sasniegtu pastiprinātāja optimālāko darbību, ir iespējams izveidot hibrīdu Ramana un erbija šķiedru optisko pastiprinātāju (*Raman-EDFA*) risinājumu, lai uzlabotu optiskā signāla-troksņa attiecības *OSNR* veikspēju optiskās pārraides sistēmās. Līdz ar to, lai nodrošinātu optimālo arhitektūras risinājumu hibrīda *Raman-EDFA* pastiprinātāja izveidei, tika veikta eksperimentālā matemātiskā modelēšana *RSoft OptSim* programmatūras vidē. Izpētes gaitā tika izmantots eksperimentālās shēmas variants ar erbija pastiprinātāju *EDFA* sākumā un Ramana pastiprinātāju līnijas beigās. 7. attēlā redzasi sistēmas shematiskais attēlojums *RSoft OptSim* programmatūras vidē.

Kā redzams 7. attēlā, *WDM* pārraides sistēma ir sadalīta trīs daļās: centrālais ofiss (*CO*), optiskais sadales tīkls (*ODN*) un optiskā tīkla galiekārta (*ONT*).

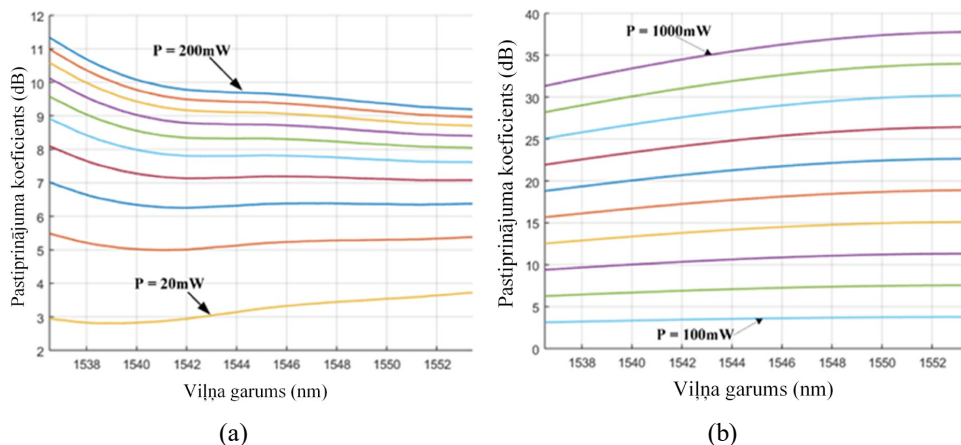


7. att. 16 kanālu ar 100 GHz starpkanālu intervālu WDM pārraides sistēmas ar Raman-EDFA pastiprinātāja risinājumu simulācijas shēma.

Katrs no 10 Gbit/s optiskās līnijas termināļa (OLT) raidītājiem Tx jeb (OLT-Tx) sastāv no datu avota, NRZ-OOK kodētāja, nepārtraukta viļņa garuma CW lāzera un Maha-Cendera modulatora MZM. CO sastāv no optiskās līnijas termināļa OLT ar 16 raidītājiem (OLT_Tx), 16 nepārtraukta viļņa garuma CW lāzēriem, optiskā 16 x 1 jaudas apvienotāja, kur signāls tiek pārraidīts uz AWG multiplekseri, un AWG demultiplekseri ar ienestajiem zudumiem 6 dB. Eksperimentāli optimālā jauda nepārtraukta viļņa garuma CW lāzēriem tika noteikta 4 dBm. Centrālās frekvences nepārtraukta viļņa garuma CW lāzēriem tika iestatītas robežās no 193,3 THz līdz 198,4 THz ar 100 GHz starpkanālu intervālu. Optiskais sadales tīkls ODN sastāv no Ramana pastiprinātāja, dispersijas kompensējošās šķiedras DCF 6 km garumā ar ienestajiem zudumiem 0,55 dB/km.

Ramana pastiprinātājs izmanto pumpēšanas jaudu 500 mW (26,98 dBm), kā arī pumpēšanas viļņa garumu 1455,30 nm, t. i., 206 THz pumpēšanas frekvences. Vienmodas optiskā šķiedra SMF, kas atbilst ITU-T G.652 rekomendācijai un kura optiskā sadales tīkla segmentā ir ≥ 40 km gara, saskaņā ar ITU-T G.989.2 rekomendāciju [160] ir ar vājinājuma koeficientu 0,2 dB/km un dispersijas koeficientu 16 ps/nm/km pie 1550 nm. EDFA pastiprinātājs izmanto pumpēšanas avotu ar 980 nm viļņa garumu, t. i., centrālo frekvenci 305,91 THz. Ar erbiju leģētās šķiedras garums ir līdz 6 m. Katrs ONT uztvērējs Rx jeb (ONT Rx) sastāv no optiskā uztvērēja, kura pamatā ir PIN fotodiode ar jutības līmeni -20 dBm pie 10 Gbit/s bitu pārraides ātruma. Pēc tam uztvertais modulētais signāls tiek filtrēts ar zemfrekvenču elektrisko filtru LPF (3-dB joslas platums 7,5 GHz). Ar bitu kļūdu skaitītāju tiek novērtēta uztvertā signāla kvalitāte. Saskaņā ar IEEE P802.3CS standartu BER sliekšnis atbilst 1×10^{-9} .

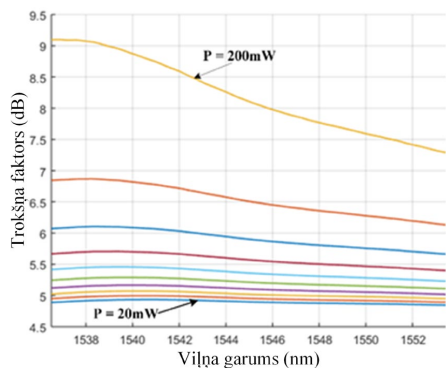
Mērķis ir novērtēt hibrīda Raman-EDFA pastiprinātāja veiktspēju iegūtā globālā pastiprinājuma (GN), trokšņa rādītāja NF un bitu kļūdu BER izteiksmē. Tika analizēti divi dažādus pumpēšanas lāzēru gadījumi, ņemot vērā hibrīda pastiprinātāja konfigurāciju ar diviem posmiem (Raman un EDFA). Šī hibrīda pastiprinātāja konfigurācijai ir divi posmi, no kuriem pirmais ir Ramana pastiprinātājs, otrs – EDFA pastiprinātājs. Ramana pastiprinātājā tiek izmantota tiešā pumpēšana “co-propogating”, savukārt EDFA pastiprinātājā tiek izmantota pumpēšana pretējā virzienā “counter-propogating”.



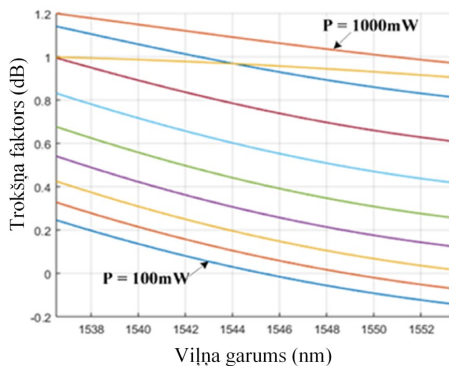
8. att. Izmērītais *EDFA* pastiprinātāja globālais pastiprinājums: (a) izvēloties pumpēšanas avota jaudu no 20 mW līdz 200 mW ar 20 mW soli, *Raman* pastiprinātāja trokšņa rādītājs; (b) izvēloties pumpēšanas avota jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli.

Lai analizētu Ramana pastiprinātāja optisko pastiprinājumu, tika veikti vairāki eksperimenti. Kā redzams 8. a attēlā, rezultāti atspoguļo stabilitāti visā viļņu garumu diapazonā ar dažām novirzēm. Lai analizētu ieguvuma stabilitāti, tika izmantotas dažādas jaudas. Ramana pastiprinātāja jauda svārstījās no 100 mW (apakšējā līkne) līdz 1000 mW (augšējā līkne). Var novērot, ka pie mazām jaudām optiskais pastiprinājums ir tikai neliels atkarīgs no signāla viļņa garuma. Lai gan, palielinot Ramana pastiprinātāja jaudu, var redzēt, ka lielāks viļņa garums rada lielāku pastiprinājumu un arī pie lielākām jaudām pastiprinājuma atkarība no viļņa garuma ir acīmredzamāka.

Kā redzams 8. b attēlā, *EDFA* pastiprinātāja pastiprinājums iegūts, veicot vairākus eksperimentus ar mainīgu viļņa garumu un dažādām jaudām (apakšējā līkne atbilst *EDFA* jaudai 20 mW, augšējā līkne – 200 mW). Tika novērots, ka optiskajam pastiprinājumam ir līdzīga uzvedība pie dažādām jaudām un, jo lielāka ir *EDFA* pastiprinātāja izeja, jo lielāks ir pastiprinājums. Ir arī novērots, ka signāla viļņa garums zināmā mērā ietekmē pastiprinājumu. Viļņa garuma diapazonā no 1536 nm līdz 1542 nm tiek novērots pastiprinājuma kritums, savukārt diapazonā no 1542 nm līdz 1554 nm pastiprinājuma grafika darbība ir stabilāka un dažos gadījumos pastiprinājums palielinās līdz ar viļņa garumu, it īpaši, ja *EDFA* pastiprinātāja jauda ir mazāka par 40 mW (8 attēla (b) diagrammas pēdējās divas līknes).



(a)

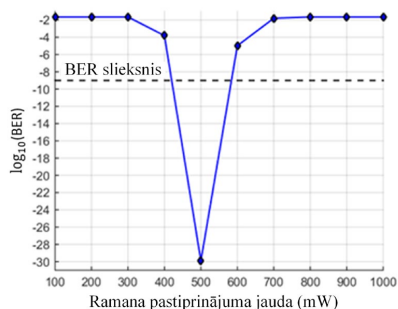


(b)

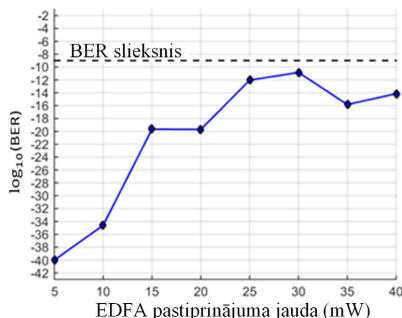
9. att. a) Izmērītais *EDFA* pastiprinātāja troksņa rādītājs, izvēloties pumpēšanas jaudu no 20 mW līdz 200 mW ar 20 mW soli; b) Ramana pastiprinātāja globālais pastiprinājums, izvēloties pumpēšanas jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli.

Kā redzams 9. a attēlā, *EDFA* pastiprinātāja troksņu rādītājs kopumā parāda, ka pie zemām jaudām, t. i., zem 140 mW, tas ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma. Pie lielākām jaudas vērtībām, piemēram, 200 mW vai 180 mW, troksņa rādītājs parāda ievērojamu kritumu, palielinot viļņa garumu. Veicot virkni eksperimentu, tika noskaidrots, ka ir iespējams iegūt zemu troksņa rādītāju, t. i., vērtība ir zem 5dB, izmantojot *EDFA* pastiprinātāju ar jaudu, kas ir mazāka par 60 mW. Turklāt zemas jaudas troksņa rādītājs ir tikai nedaudz atkarīgs no viļņa garuma. Savukārt pie lielām jaudām, izmantojot dažādus viļņu garumus, var novērot ievērojamu kritumu.

Kā redzams 9. b attēlā, Ramana pastiprinātāja troksņu rādītājs apraksta eksperimentus, kas veikti ar dažādām jaudas vērtībām (no 100 mW apakšējai līknei līdz 1000 mW augšējai līknei). Novērots, ka troksņa līmenis ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma – signāla viļņa garuma palielināšana samazina troksņa līmeni. Dažos gadījumos troksņu līmenis tiek pazemināts līdz negatīvām vērtībām, īpaši, ja Ramana pastiprinātāja jauda ir zema (mazāka par 200 mW). Interesanta uzvedība tiek novērota pie Ramana pastiprinātāja jaudas, kas vienāda ar 800 mW. Šajā gadījumā troksņa kritums ir minimāls (mazāk par 20 %). Visos citos gadījumos tiek novērots lielāks troksņa kritums.



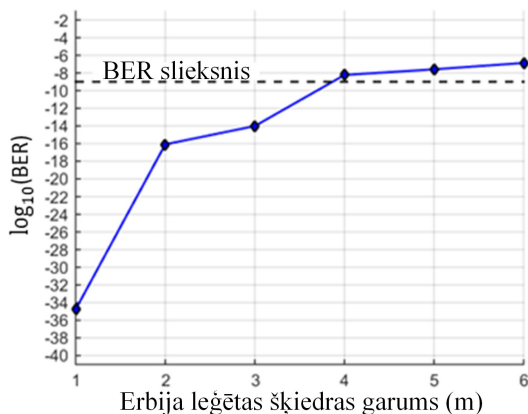
(a)



(b)

10. att. a) *BER* pret Ramana pastiprinātāja pumpēšanas jaudu, kas izmērīta piedāvātās *WDM* sistēmas visliktākajam 8. kanālam, izvēloties pumpēšanas jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli; b) *BER* pret *EDFA* pumpēšanas jaudu, kas izmērīta piedāvātās *WDM* sistēmas sliktākajam 8. kanālam, izvēloties pumpēšanas jaudu no 5 mW līdz 40 mW ar 5 mW soli.

Pēc simulācijas rezultātiem var uzskatīt, ka maksimālais pārraides attālums (a) Ramana pastiprinātāja pumpēšanas jauda (100 mW līdz 600 mW) un (b) *EDFA* pastiprinātājs (5 m līdz 40 m) pie *BER* sliekšņa 1×10^{-9} ir galvenie kritēriji sistēmas novērtējums. *BER* sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides, kas pārsniedz 500 mW Ramana diapazonu, un sistēma ir darbināma ar jebkuru *EDFA* jaudas pumpēšanu no 5 mW līdz 40 mW, jo *BER* līknes šajā diapazonā ir zem 1×10^{-9} sliekšņa.



11. att. *BER* atkarībā no *EDF* šķiedras garuma.

Tika izstrādāti optisko pastiprinātāju un hibrīdu optisko pastiprinātāju modeļi. Hibrīda *EDFA-Raman* pastiprinātāja veiktspējas optimizācija ievērojami uzlabojās, ņemot vērā vienmērīgu pastiprinājuma joslas platumu, kā arī lielāku pārraides sistēmas pastiprinājumu. Lai iegūtu plašu pastiprinājumu un labāku trokšņu veiktspēju, bija ļoti svarīgs optimālu hibrīda pastiprinātāju dizains. Parametri, kas optimizēja *EDFA* veiktspēju trokšņa skaitļa un pastiprinājuma ziņā, ir *EDF* šķiedras garums, ievades signāla jauda, pumpēšanas jauda un pumpēšanas viļņa garums, savukārt parametri, kas optimizēja Ramana pastiprinātāju, ir *SMF* šķiedras garums un pumpēšanas jauda. *WDM* pārraides sistēma Ramana pastiprinātāja gadījumā darbojas ar 500 mW pumpēšanas jaudu, *EDFA* pastiprinātāja pumpēšanas avota jauda tika izmantota visā diapazonā no 5 mW līdz 40 mW. *BER* sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides vairāk nekā 3,8 m *EDF* laiduma un ≥ 60 km *SMF* laiduma.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

1. Veicot *EDFA* un *SOA* pastiprinātāju novērtējuma lietojumu maksimālā pārraides attāluma sasniegšanai *DWDM* sistēmas risinājumos, tika izveidots matemātiskais skaitļošanas modelis *Matlab* programmatūrā, kas tika salāgots ar *Rsoft Optsim* simulācijas vidi. Atbilstoši tika izveidota pārraides sistēma, kas ietvēra *CW* lāzera avotu, kas tika sadalīts četros konstantos optiskajos nesējos ar jaudas līmeni 0 dBm, kur katru no tiem pārvaldīja 25 Gbit/s pseidogadījuma bitu secības *PRBS* ģeneratori, izmantojot elektrisko impulsu ģeneratorus un amplitūdas modulatorus, kur 90° fāzes modulācija tika veikta diviem modulētiem optiskajiem nesējiem, kur pēc fāzes modulācijas tika apvienoti divi signāli ar ortogonālām fāzēm turpmākai polarizācijas modulācijai. Visi četri optiskie signāli tika apvienoti un pārraidīti caur divpusējo optisko Gausa filtru, t. i., 3-dB joslas platums ir vienāds ar 35 GHz (raidītāja un uztvērēja daļas segmentos). Ģenerētie un kombinētie optiskie signāli tiek pastiprināti ar *EDFA* pastiprinātāja modeli ar fiksētu optisko izejas jaudu 14 dBm un $NF = 4,5$ vai ar *SOA* pastiprinātāja modeli ar 8 dBm signāla pastiprinājumu, $NF = 8$ un 14 dBm tipiskā piesātinājuma jaudu (P_{sat}). Pastiprinātais optiskais signāls tika raidīts caur SMF šķiedru atbilstoši *ITU-T G.652* rekomendācijai (izmantojot 40 km laidumu *SOA* sistēmām un 80 km *EDFA* sistēmām), kur ienestais vājinājums $\alpha = 0,2$ dB/km, efektīvais laukums = 80 μm^2 , dispersijas koeficients $D = 16$ ps/nm/km pie viļņa garuma 1550 nm, Kerra nelineārais koeficients $\gamma = 1,26$ 1/W/km.

Akumulētā *CD* šķiedras segmenta daļā tika pilnībā kompensēta ar elektroniskās dispersijas kompensācijas *EDC* moduli uztvērēja pusē. Pārraides garums tika emulēts, izmantojot iterācijas cilpas funkciju un norādot vairākus šķiedru laidumus *EDFA* un *SOA* pastiprināšanas sistēmām. Tika izmantoti pieci pārraides garumi – 80 km, 160 km, 240 km, 320 km un 640 km, lai izpildītu *Q* faktora prasību > 16 dB, izmantojot standarta starpkanālu intervālu $\Delta f = 50$ GHz.

Pēc pārraides 100 Gbit/s *DP-QPSK* signāls tika sadalīts četros 25 Gbit/s signālos ar 4×4 *QPSK* sadalītāju, pamatojoties uz fāzi un polarizāciju, un pēc tam ar *PIN* fotodiodi pārveidots elektriskos signālos, izvadīts caur *LPF* filtru *EDC* un noteikts ar *Q* faktora novērtētāju (veikta *BER* analīze).

Izmantotie pastiprinātāju joslas platumi tika noteikti atsevišķi *EDFA*, kas bija standarta C josla (1530–1565 nm) ar 86 kanāliem, un *SOA* pastiprināšanas sistēmām – 1530–1605 nm, kam kopumā ir 182 pārraides kanāli, ko pastiprina *SOA*. Šāda sadale nodrošināja $\approx 2,12$ reizes lielāku pārraides jaudu (18,2 TBit/s) un par 7 % lielāku spektrālo efektivitāti, salīdzinot ar *EDFA* (attiecīgi $SE = 2,10$ un 1,96 bit/Hz).

Pētījumā tika izvērtēti un salīdzināti jaudas efektivitātes līmeņi piedāvātajā aizstāšanas scenārijā, kur *EDFA* pastiprinātā optiskā savienojumā tiek izmantots 86 kanāli C joslā. **Kopējā jauda tika dubultota, tā vietā izmantojot *SOA*, nodrošinot 182 pārraides kanālus, pateicoties plašākai pastiprināšanas joslai.** Enerģijas patēriņa līmeņi tika definēti, pamatojoties uz pieejamajām komponentu tehniskajām datu lapām: *DP-QPSK* raiduztvērējiem $P_{tx} = 19$ W; *SOA* $P_{soa_amp} = 4$ W; *EDFA* jaudas patēriņš $P_{edfa_amp} = 30$ W. **Energoefektivitātes līmeņi parāda, ka sistēmai ar *SOA* pastiprinājumu viena bita pārraidei bija nepieciešams mazāk enerģijas un šī atšķirība kļuva ievērojamāka lielākiem pārraides attālumiem – no 1,6 % līdz 12,6 %, attiecīgi 80 km un 640 km garām OŠ līnijām.** Tas pierāda, ka *SOA* kopā ar salīdzinoši zemajām komponentu izmaksām varētu sniegt papildu ekoloģiskos un finansiālos ieguvumus. **Tika pierādīts, ka, ņemot vērā korelāciju starp nelineārajiem kropļojumiem un pusvadītāju pastiprinātāja ieejas jaudas $P_{in(t)}$ un piesātinājuma jaudas P_{sat} attiecību,**

bija iespējams pielāgot pārraides parametrus tā, lai Q faktors ir lielāks par 16 dB 640 km garā OŠ līnijā.

2. Tika izpētīts inovatīva optiskā pastiprinātāja, kura pamatā tiek izmantota dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētā šķiedra, risinājums, t. i., salīdzinātas optisko nesēju pastiprinājuma izmaiņas atkarībā no leģētās šķiedras laiduma garuma (2–7 m), kur izmantotās daudzmodu pumpēšanas avota izejas jauda ir (0,6–2,0 W) C joslā. Inovatīva pastiprinātāja risinājuma izstrādē izmantotās šķiedras kodols ir leģēts ar erbiju un iterbiju, un tas tika noteikts kā atomu procentuālā izteiksme, kas attiecīgi ir 0,06 % un 1,21 %. Tika izmantots lielas jaudas pumpēšanas avots (daudzmodu pumpēšanas avots) ar centrālo viļņa garumu 975 nm un joslas platumu 6 nm, kas tiek uzturēts 30 °C temperatūrā ar termoelektrisko dzesētāju, lai novērstu tā izejas viļņa garuma un jaudas svārstības. Ieejas signāls tiek ģenerēts, filtrējot gaismu, ko rada superluminiscences gaismas diode (*S-LED*) ar –10 dB maksimālo optisko izejas jaudu un optiskā signāla joslas platumu robežās no 1526 nm līdz 1630 nm. Viļņgaruma selektīvais slēdzis (*WSS*) tiek izmantots, lai filtrētu *S-LED* un radītu spektru, kas ierobežots ar C joslu, kas savukārt sastāv no 48 kanāliem ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 37,5 GHz joslas platumu, atbilstošu uzstādījumiem iespējojamam *WSS*. Šis optisko nesēju signāls ietver 48 kanālu interpretāciju, emulējot optiskos nesējus (modulēto signālu datu kanālus *WDM* risinājumā). Eksperimentālajā risinājumā dubultapvalka sadalītājs/apvienotājs leģētās šķiedras izejas pusē tiek izmantots, lai atdalītu pumpēšanas gaismu no pastiprinātā signāla.

Pumpēšanas avots ar zemāko izejas jaudas līmeni 0,6 W rada ievērojamu maksimālo pieaugumu pie 1536 nm viļņa garuma, sasniedzot 34 dB pastiprinājumu izmantojot 2 m garu dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu ar optisko nesēju ieejas jaudu –27 dBm. Palielinot dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu, šis maksimums samazinās, un otrais maksimums pie 1544 nm viļņa garuma kļūst pamanāmāks, kā arī palielinās pastiprinājums lielākiem viļņu garumiem. Pie 7 m garas dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras sākas trešais maksimums, kas izpaužas pie 1563 nm viļņa garuma, bet maksimums pie 1544 nm tiek samazināts. Tas rada relatīvi lineāru pastiprinājumu starp iepriekš minētajiem diviem viļņa garumiem.

Ja pumpēšanas jauda tiek palielināta no 0,6 W līdz 1,0 W, pastiprinājums tiek palielināts visiem kanāliem, bet maksimālais pastiprinājums kļūst vēl pamanāmāks. Tomēr pie 5 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garuma ieejas nesēja optiskais signāls –27 dBm un –25 dBm kanālā rada pastiprinājuma profilus, kas būtībā pārklājas, un pastiprinājuma maksimumos pie 1536 nm un 1544 nm viļņa garumiem, kur ir redzami daži strauji lēcieni.

Ja pumpēšanas avota jaudu palielina līdz 2,0 W, īsākiem dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumiem robežās 2 m un 3 m, kanāla pastiprinājums kopumā turpina palielināties, nelielu uzsvāru uz pastiprinājuma maksimumiem. Tomēr ar 5 m un 7 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumiem pastiprinājuma nostiprināšana kļūst acīmredzama ar ieejas nesēju signāla jaudu robežās no –27 dBm līdz –20 dBm kanālā, kur kanāla pastiprinājums ir lineārs visā optiskajā spektrā.

Lielākā daļa no kopējā pastiprinājuma optiskajiem nesējiem tiek sasniegta pirmajos dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras metros pēc izplatīšanās. Ievadītā jauda kanālā

un pumpēšanas jaudas kopējā signāla jauda pastiprinātāja izejā paliek efektīva robežās no 2 m līdz 7 m dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laiduma garuma robežās.

3. Viļņgarumdales blīvētajai *WDM* optisko šķiedru pārraides sistēmai ar līdz 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā pietiek ar *CD* kompensāciju, izmantojot vienu dispersijas kompensācijas moduli *DCM*. Problēma ar *DWDM* sistēmu ir tāda, ka *CD* vērtība katram kanālam mainās atkarībā no centrālā viļņa garuma un tāpēc nav iespējams vienmērīgi kompensēt *CD* visai *WDM* sistēmai. Lai šo problēmu risinātu, **eksperimentālajā daļā tiek ieviests papildu kompensācijas posms – hromatiskās dispersijas slīpuma CD_{SL} kompensācija.** Šīs problēmas risināšanā tiek izmantoti divi visizplatītākie “ieslēgt-izslēgt” manipulācijas *OOK* signāla līniju kodi – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods *NRZ* un ar atgriešanos pie nulles līnijas kods *RZ*, kur *NRZ* kodētais signāls 1 bita attēlojumam aizņem visu bitu intervālu, savukārt *RZ* signāls aizņem tikai daļu no bitu intervāla, kas ir atkarīgs no darba cikla, tāpēc *NRZ* kodētā signāla joslas platums ir aptuveni uz pusi mazāks, salīdzinot ar *RZ* kodēto signālu.

WDM ŠOPS atkarība no CD_{SL} kompensācijas, izmantojot divas dažādas optiskās šķiedras: standarta vienmodas optiskā šķiedra *SMF*, kas atbilst *ITU-T G.652* rekomendācijai, un šķiedra ar nobīdītu ne nulles dispersiju *NZDSF*, kas atbilst *ITU-T G.655* rekomendācijai. Abas šīs šķiedras ir plaši izplatītas *WDM* skaru sistēmas risinājumos, konkrētāk, tiek noteikta *CD SL* kompensācijas ietekme, lai saprastu, kā tās kompensācija ietekmē 16 kanālu *WDM* pārraides sistēmas darbību ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā.

Ir vairākas metodes, kā kompensēt CD_{SL} . **Viena no CD_{SL} kompensācijas metodēm** tiek saukta par hibrīda šķiedru dizainu *HFD*, kas nozīmē, ka šķiedra tiek sadalīta vairākos laidumos, kur katrs laidums sastāv no divām šķiedrām. **Otrs CD_{SL} kompensācijas risinājums** nodrošina *CD* kompensāciju katram *WDM* kanālam atsevišķi uztvērēja daļā pēc kanālu demultipleksēšanas. Šajā metodē katru kanālu pēc *WDM* sadalītāja var uzskatīt par atsevišķu pārraides līniju, tāpēc ir nepieciešama tikai *CD* kompensācija. **Trešo metodi** sauc par vidējā diapazona spektrālo inversiju *MSSI*, un šajā metodē impulss tiek apgriezts šķiedras laiduma vidū. **Ceturtnā un pēdējā metode** ir arī visizplatītākā metode, kurā CD_{SL} kompensācija tiek panākta, izmantojot dispersijas kompensācijas moduli *DCM*. *DCM* modulis, var būt arī no dispersijas kompensējošās šķiedras *DCF* vai šķiedras Brega režģa *FBG* atbilstoši *FBG-DCM*. Atšķirība ir tāda, ka, lai sasniegtu CD_{SL} kompensāciju, ŠOPS ir jāievieto papildu *DCM* vienība. Vairumā gadījumu pārraides līnija sastāv no OŠ un divām *DCM* vienībām – viena *CD* kompensācijai, bet otra CD_{SL} kompensācijai.

Eksperimentālās realizācijas ietvaros, izmantojot *RSoft OptSim* simulāciju programmatūrā izveidoto 16 kanālu *DWDM* sistēmas modeli ar datu pārraides ātrumu kanālā 40 Gbit/s, tika noskaidrots, kā *DCM* atrašanās vieta mainīs atsevišķu kanālu veiktspēju 16 kanālu *WDM* sistēmā.

Augstāko veiktspējas uzlabojumu 40 Gbit/s 16 kanālu *WDM* sistēmā var sasniegt, ja CD_{SL} kompensācija tiek piemērota kopā ar *CD* kompensāciju. Tika secināts, ka, izmantojot *DCF CD* kompensācijai un *FBG CD_{SL}* kompensācijai un izvietojot tos simetriskajai kompensācijai, tiks nodrošināta 16 kanālu ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s kanālā *WDM* pārraides sistēmas augstākā veiktspēja, nepārsniedzot uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$.

4. Hibrīda *Raman-EDFA* pastiprinātāja risinājuma izveidē tiek aplūkoti divi galvenie optisko pastiprinātāju risinājumi – ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji *EDFA* un Ramana šķiedras pastiprinātāji. Ramana pastiprinātāju, kuru pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra *DCF*, ir potenciāls lietojums nākotnes optiskās sakaru sistēmās, jo hromatiskās dispersijas *CD* kompensāciju šķiedru pārraides līnijās daļā var iegūt vienlaikus ar labvēlīgo optisko signālu pastarpinājumu. *Raman-EDFA* risinājums uzlabo optiskā signāla-trokšņa attiecību *OSNR* un veiktspēju optiskās pārraides sistēmās.

Lai novērtētu validētu *Raman-EDFA* risinājumu, tika izveidota 16 kanālu *DWDM* pārraides sistēma, kas sadalīta trīs daļās: centrālais birojs *CO*; optiskais sadales tīkls *ODN*; optiskā tīkla galiekārta *ONT*, kas darbojās robežās no 193,3 THz līdz 198,4 THz (viļņu garums no 1550,9 nm līdz 1538,9 nm) ar 100 GHz starpkanālu intervālu. Optiskais sadales tīkls *ODN* sastāv no Ramana pastiprinātāja, dispersijas kompensējošās šķiedras *DCF* 6 km garumā ar ienestajiem zudumiem 0,55 dB/km.

Ramana pastiprinātāja daļa izmanto pumpēšanas jaudu 500 mW (26,98 dBm), kā arī pumpēšanas viļņa garumu 1455,30 nm, t. i., 206 THz. Vienmodas optiskā šķiedra (*SMF*), kas atbilst *ITU-T G.652* rekomendācijai, optiskā sadales tīkla segmentā ir ≥ 40 km gara saskaņā ar *ITU-T G.989.2* rekomendāciju ar vājinājuma koeficientu 0,2 dB/km un dispersijas koeficientu 16 ps/nm/km . *EDFA* pastiprinātāja daļa izmanto pumpēšanas avotu ar 980 nm viļņa garumu, t. i., 305,91 THz. *EDF* šķiedras garums ir līdz 6 m garumā. Katrs *ONT* uztvērējs *Rx* jeb *ONT Rx* sastāv no optiskā uztvērēja, kura pamatā ir *PIN* fotodiode (*PIN*) ar jutības līmeni -20 dBm pie 10 Gbit/s bitu pārraides ātruma.

***EDFA* pastiprinātāja daļas trokšņu rādītājs kopumā parāda, ka pie zemām jaudām, t. i., zem 140 mW, tas ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma. Pie lielākām jaudas vērtībām, piemēram, 200 mW vai 180 mW, trokšņa rādītājs parāda ievērojamu kritumu, palielinot viļņa garumu. Tika noskaidrots, ka ir iespējams iegūt zemu trokšņa rādītāju (vērtība – zem 5 dB), izmantojot *EDFA* pastiprinātāju ar jaudu, kas ir mazāka par 60 mW. Savukārt pie lielām jaudām, izmantojot dažādus viļņu garumus, var novērot ievērojamu kritumu. Ramana pastiprinātāja daļas trokšņu rādītājs ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma – signāla viļņa garuma palielināšana samazina trokšņa līmeni. Pie Ramana pastiprinātāja jaudas, kas vienāda ar 800 mW, trokšņa kritums ir minimāls (mazāks par 20 %).**

Atbilstoši tika noteikts, ka **maksimālais pārraides attālums atkarīgs no: (a) Ramana pastiprinātāja pumpēšanas jaudas (100 mW līdz 600 mW); (b) *EDFA* pastiprinātāja *EDF* leģētas šķiedras garuma (5 m līdz 40 m) pie *BER* sliekšņa 1×10^{-9} . *BER* sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides, kas pārsniedz 500 mW Ramana diapazonu, un sistēma ir darbināma ar jebkuru *EDFA* jaudas pumpēšanu no 5 mW līdz 40 mW, jo šajā diapazonā *BER* līknes ir zem 1×10^{-9} sliekšņa.**

DWDM pārraides sistēma hibrīda *Raman-EDFA* pastiprinātāja gadījumā darbojas ar 500 mW pumpēšanas jaudu, un *EDFA* pastiprinātāja pumpēšanas avota jauda tika izmantota visā diapazonā no 5 mW līdz 40 mW. *BER* sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides vairāk nekā 3,8 m *EDF* laiduma un ≥ 60 km *SMF* laiduma.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Ericsson, Ericsson Mobility Report – November 2020, Ericsson. (2020) 36.
- [2] C. Knittle, IEEE 50 Gb/s EPON (50G-EPON), Opt. InfoBase Conf. Pap. Part F174- (2020) 2020–2022. <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.Th1B.2>.
- [3] E. Desurvire, Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications, Wiley, New York, 1994.
- [4] Hecht, J. Understanding Fiber Optics. Fourth Edition. – NJ: Prentice Hall, 2002. – 780 p. ISBN: 978-0-1302-7828-9.
- [5] Фриман, Р. Мир связи. Волоконно-оптические системы связи. 4-ое, дополнительное издание. – Москва: Техносфера, 2007. – 512 с. ISBN: 978-5-94836-154-3.
- [6] Horak, R. Webster's New World Telecom Dictionary. – NY: John Wiley & Sons, 2007. – 568p. ISBN: 978-0-4717-7457-0.
- [7] Thyagarajan, K., Ghatak, A. *Fiber Optic Essentials*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. – 86-259 p. ISBN: 978-0-470-09742-7.
- [8] Richardson, D. J., Fini, J. M., Nelson, L. E. Space-division multiplexing in optical fibres // *Nature Photonics*. – Vol. 7, 2013, pp. 354-362.
- [9] Chomyecz, B. Planning Fiber Optics Networks. – USA: McGraw Hill Professional, 2009. 320 p. ISBN: 978-0-07-164269-9.
- [10] Bobrovs, V., Ivanovs, G. Parameter Evaluation of Dense optical Network // *Electronics and Electrical engineering*. – Vol. 68, No. 4, 2006, pp. 33–54.
- [11] Основные принципы технологии DWDM. https://t8.ru/?page_id=10788_
- [12] Agrawal, G. P. *Fiber-Optic Communications Systems*. Third Edition. – NY: John Wiley & Sons, 2002. – 561 p. ISBN: 0-471-22114-7.
- [13] Gumaste, A., Antony, T. *DWDM Network Designs and Engineering Solutions*. – USA: Cisco Press, 2002. – 368 p. ISBN: 978-1-58705-074-9.
- [14] Agrawal G. P. *Fiber-optic communication systems*. – New York etc: John Wiley & Sons, 1997. – 555 p.
- [15] Azadeh M. *Fiber Optic Engineering* – USA: Springer, 2009. – pp. 376.
- [16] Freeman R.L. *Telecommunication System Engineering*. – Geneva: Wiley-Interscience, 2004. – pp. 1024.
- [17] Agrawal G. *Fiber-Optic Communication Systems*. – USA: John Wiley and Sons, 2002. – 561 p.
- [18] Bob Chomyecz. *Planning Fiber Optic Networks*. – USA: The McGraw-Hill Companies Inc., 2009, 401 p.
- [19] ITU-T G.957. Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy// International Telecommunication Union. – 2006. – pp. 1–38.
- [20] ITU-T G.984.2. Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification// International Telecommunication Union. – 2003. – pp. 1–28.
- [21] Thyagarajan K. S., Ghatak A. *Fiber Optic Essentials* – USA: Wiley-IEEE Press, 2007. – pp. 259.
- [22] ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid// International Telecommunication Union. – 2012. — pp. 1–16.
- [23] ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid// International Telecommunication Union. – 2003. – pp. 1–12.
- [24] Becker P. C., Plsson N. A. and Simpson J. R. “Erbium Doped Fiber Amplifiers”, Academic Press, USA, 1999, 481 p.
- [25] Islam M. N. “Raman amplifiers for telecommunications 2”, Springer, USA, 2004, 298-463 p.
- [26] Dutta A. K., Dutta N. K. and Fujiwara M. “WDM technologies active optical

- components”, Academic Press, 2002, 710 p.
- [27] 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.
- [28] Лохманов, П. Мощный волоконно-оптический эрбиевый усилитель для для многоканальных DWDM систем. Магистерская диссертация. – Москва: МГТУ МИРЭА, 2014. – 48 с.
- [29] Лазеры накачки. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10386>.
- [30] Kenneley P. L., Kaminow I. P., Agrawal G. P. “Nonlinear Fiber Optics. Third Edition”, USA: Academic Press, 2001, p. 481.
- [31] Felinskyi G. S., Korotkov P. A. “Raman Threshold and Optical Gain Bandwidth in Silica Fibers”, *Quantum Electronics & Optoelectronics*, Vol. 11, No. 4, 2008, pp. 360–363.
- [32] Zhang T., Zhang X., Zhang G. “Distributed fiber Raman amplifiers with incoherent pumping”, *Photonics Technology Letters, IEEE*, Vol. 17, No. 6, 2005, pp. 1175–1177.
- [33] Connelly M. J. «Semiconductor optical amplifiers», University of Limerick, Ireland, 2004, 177 p. ISBN 978-0-306-48156-7.
- [34] 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.
- [35] Reichmann K. C., Iannone P. P., Zhou X., Frigo N. J., Hemenway B. R. “240-km CWDM Transmission Using Cascaded SOA Raman Hybrid Amplifiers With 70-nm Bandwidth” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 328–330.
- [36] OFS Specialty Photonics Division. (2013). Highly Non-Linear Fiber (HNLF). Product Sheet, Version: 20131210, Denmark, 1, 2013.
- [37] Pavlovs, D., & Bobrovs, V. (2016). Relationship between spectral efficiency and energy efficiency in 10 Gbps NRZ-OOK, 40 Gbps NRZ-DPSK and 100 Gbps DP-QPSK WDM transmission systems. In *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2016)*, 8–11 August 2016 (pp. 1434–1438). Shanghai, China. doi:10.1109/PIERS.2016.7734673.
- [38] Van Heddeghem, W., Idzikowski, F., Vereecken, W., Colle, D., Pickavet, M., & De-meester, P. (2012). Power consumption modeling in optical multilayer networks. *Photonics Network Communications*, 24 (2), 86–102. doi:10.1007/s11107-011-0370-7.
- [39] Iyer, S., & Singh, S. P. (2016). Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (WDM) networks. *Photonics Network Communications*. doi:10.1007/s11107-016-0618-3.
- [40] Agrawal, G. P. (2007). *Nonlinear Fibre Optics*. New York, NY, USA: Academic.
- [41] Velasco, L., Jirattigalachote, A., Ruiz, M., Monti, P., Wosinska, L., & Junyent, G. (2012). Statistical approach for fast impairment-aware provisioning in dynamic all-optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4 (2), 130–141. DOI: 10.1364/JOCN.4.000130.
- [42] Bendimerad, D. F., & Frignac, Y. (2017). Numerical Investigation of SOA Nonlinear Impairments for Coherent Transmission Systems Based on SOA Amplification. *Journal of Lightwave Technology*, 35 (24), 5286–5295. DOI: 10.1109/JLT.2017.2772223.
- [43] Zakis K, Olonkins S, Udalcovs A, et al. Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation. *Photonics* 2022; 9: 457.
- [44] Supe A, Olonkins S, Udalcovs A, et al. Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks. *Appl Sci* 2021; 11: 1702.
- [45] ITU-T Recommendation G.989.2, “Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks-40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification”, 2012.



Mareks Parfjonovs dzimis 1983. gadā Liepājā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Inženierekonomikas un vadības fakultātē ieguvis sociālo zinātņu maģistra grādu ekonomikā (2010). Patlaban ir RTU Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētnieks.