

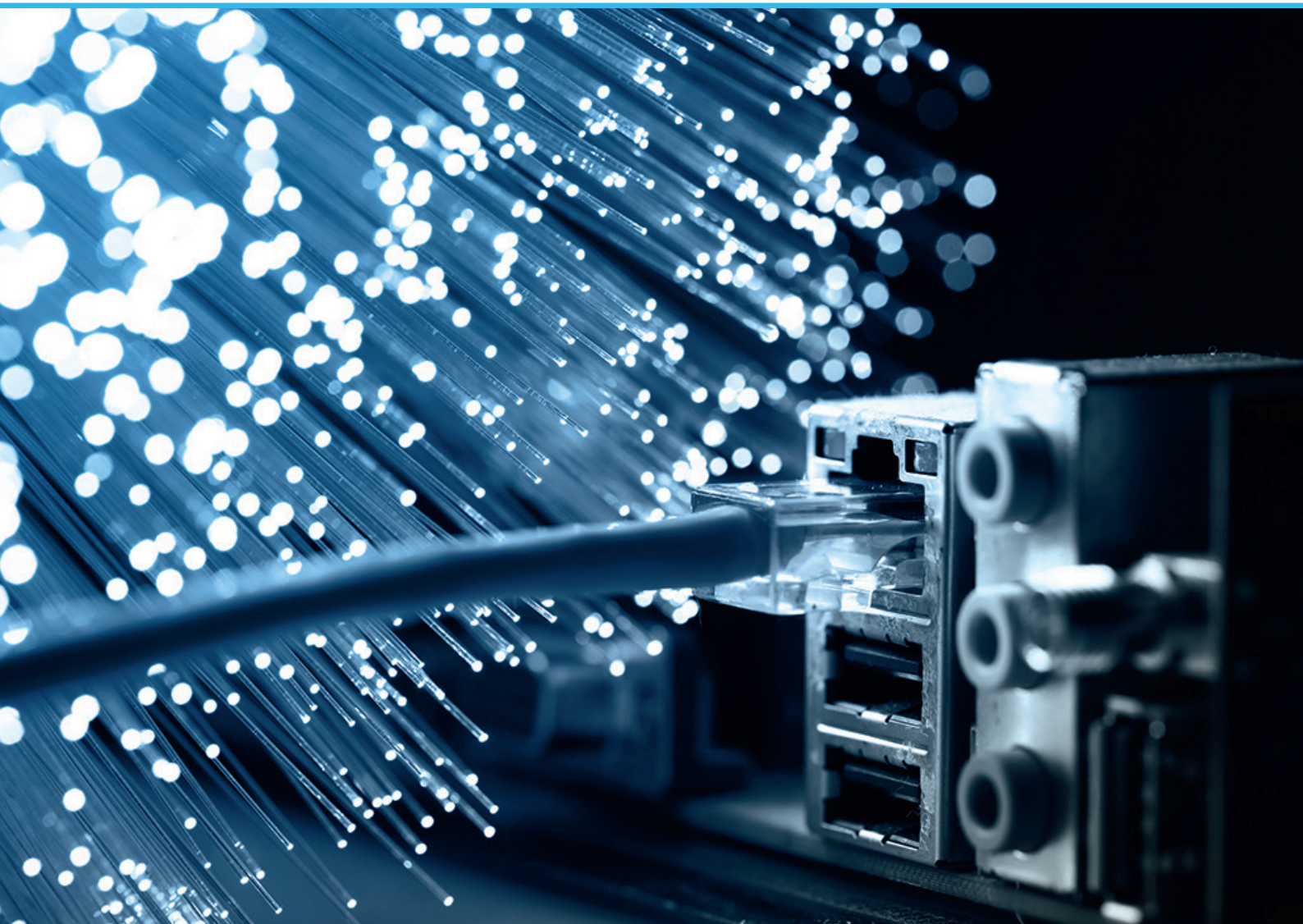


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Lilita Ģēgere

JAUNĀS PAAUDZES ŠĶIEDRU OPTISKO PASTIPRINĀTĀJU IZPĒTE UN NOVĒRTĒJUMS BLĪVĒTĀS SAKARU SISTĒMĀS

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Lilita Ģēgere

Doktora studiju programmas „Telekomunikācijas” doktorante

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

Promocijas darbs

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

Rīga 2021

ANOTĀCIJA

Darba nosaukums:

„Jaunās paaudzes šķiedru optisko pastiprinātāju izpēte un novērtējums blīvētās sakaru sistēmās”;

Darba autore:

Lilita Ģeģere;

Darba saturs:

Pēdējo gadu laikā notiek strauja informācijas tehnoloģiju nozares attīstība un novērojams straujš pārraidāmās informācijas apjoma palielinājums. Tas izskaidrojams ar interneta lietotāju, multimediju pakalpojumu un globālajā tīklā reģistrēto iekārtu pieaugumu. Pieaug pieprasījums pēc lielākām telekomunikāciju tīkla kapacitātēm, tāpēc nepieciešams palielināt kanālu skaitu un pārraides ātrumu viļņgarumdales blīvētajās pārraides sistēmās. Uzkrātā signāla vājinājuma kompensēšanai (platā viļņa garuma diapazonā) var izmantot dažādus optiskos pastiprinātājus. Populārākais pastiprinātāju tips ir ar erbija joniem leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EDFA*), kas darbojas ierobežotā C-frekvenču joslā (1530–1565 nm). Tāpēc ir nepieciešams meklēt jaunus pastiprināšanas risinājumus, kas ļautu paplašināt pastiprinājuma spektru un palielināt sasniedzamo optiskā signāla pastiprinājumu.

Promocijas darbā ir veikts pētījums par *EDFA*, Ramana, *FOPA* un kombinēto optisko pastiprinātāju izmantošanu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās. Pētījums veikts izmantojot datorsimulācijas programmas (*Rsoft OptSim* un *VPIphotonics Design Suite*). Darbā īpašs uzsvars ir likts uz erbija un iterbija leģējuma šķiedras ar apvalka pumpēšanas tehnoloģijas optiskā pastiprinātāja datormodeļa pētījumu. Šāda platjoslas pastiprinātāja izmantošana WDM pārraides sistēmās ļauj sasniegt lielāku un vienmērīgāku pastiprinājumu un uzlabot optisko šķiedru sakaru sistēmu veiktspēju. *EYDFA* datorsimulācijas iegūtie rezultāti turpmāk tiks izmantoti eksperimentāliem pētījumiem RTU ComTech pētniecības centrā. Promocijas darbā ir atspoguļoti pabeigtu pētījumu rezultāti, kurā novērtētas gan esošo, gan jaunu pastiprināšanas risinājumu darbības veiktspēja *WDM* sistēmās.

Darba apjoms:

126 lappuses, darbā ir 7 tabulas, 72 attēli, 175 literatūras avoti un 1 pielikums.

ANNOTATION

Title of the thesis:

„Research and evaluation of new generation fiber optic amplifiers in dense communication systems”;

Author of the thesis:

Lilita Gegere;

Content of the thesis:

In recent years, the information technology sector has developed rapidly and there has been a rapid increase in the amount of information transmitted. This can be explained by the increase in Internet users, multimedia services, and devices registered on the global network. The demand for larger telecommunication network capacities is growing, therefore it is necessary to increase the number of channels and transmission speed in wavelength division multiplexed transmission systems. Various optical amplifiers can be used to compensate for the attenuation of the accumulated signal (over a wide wavelength range). The most popular type of amplifier is the erbium ion-doped fiber amplifier (EDFA), which operates in the limited C-band (1530-1565 nm). Therefore, it is necessary to look for new amplification solutions that would allow to expand of the amplification spectrum and increase the achievable optical signal amplification.

The Doctoral Thesis did research on the use of EDFA, Raman, FOPA and combined optical amplifiers in wavelength division multiplexing systems. The study was performed using computer simulation programs (Rsoft OptSim and VPIphotonics Design Suite). In the work, special emphasis is placed on erbium and ytterbium alloy fibers with the study of computer modeling of optical amplifiers in cladding pumping technology. The use of such a broadband amplifier in WDM transmission systems makes it possible to achieve higher and more uniform gain and to improve the performance of fiber optic communication systems. The results obtained from the EYDFA computer simulation will be further used for experimental research in the RTU ComTech Research Center. The Doctoral Thesis reflects the results of completed research, which evaluates the performance of both existing and new amplification solutions in WDM systems.

Thesis contains:

126 pages, 7 tables, 72 figures, 175 literature sources, and 1 supplement.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	6
1. OPTISKO ŠKIEDRU PASTIPRINĀTĀJU NOVĒRTĒJUMS UN PIELIETOJUMS PASĪVOS OPTISKOS TĪKLOS.....	9
1.1. Pusvadītāju optisko pastiprinātāju novērtējums.....	10
1.2. Retzemju elementu leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju novērtējums.....	12
1.3. Pasīvo optisko tīklu tehnoloģiju analīze un novērtējums.....	17
1.4. Ramana optisko pastiprinātāju novērtējums.....	20
1.5. Optisko pastiprinātāju novērtējums, izmantojot Briljuēna izkliedi.....	22
1.6. Kombinēto optisko pastiprinātāju novērtējums.....	23
1.7. Parametrisko optisko pastiprinātāju novērtējums.....	25
1.8. Kopīgi leģētu šķiedru un apvalka pumpēšanas optisko pastiprinātāju novērtējums	26
1.9. Promocijas darbā paveiktā apkopojums.....	29
2. EDFA PASTIPRINĀTĀJA VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS ATKARĪBĀ NO TĀ EKSPLUATĀCIJAS APSTĀKĻIEM.....	33
2.1. EDFA pastiprinātāja veiktspējas izpēte, mainot pastiprinātāja izvietošanu pārraides sistēmā.....	33
2.2. EDFA pastiprinātāja veiktspējas izpēte, mainot kanālu intervālu.....	40
2.3. Pastiprinājuma apgabala garuma ietekmes izpēte uz EDFA pastiprinātāja veiktspēju.....	46
2.4. Kopsavilkums.....	51
3. WDM-PON PIEKĻUVES SISTĒMAS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS.....	54
3.1. Optiskās SS-WDM-PON piekļuves sistēmas novērtējums ar platjoslas gaismas avotu.....	54
3.2. Kombinēto risinājumu novērtējums WDM-PON pārraides sistēmā.....	59
4. RAMANA PASTIPRINĀTĀJU DARBĪBAS PRINCIPA IZPĒTE UN VEIKSTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS.....	68
4.1. Diskrētā Ramana pastiprinātāja darbības izpēte WDM pārraides sistēmā.....	68
4.2. Sadalītā Ramana pastiprinātāja darbības izpēte WDM sakaru sistēmā.....	72
4.3. Kopsavilkums.....	76
5. KOMBINĒTO OPTISKO PASTIPRINĀTĀJU DARBĪBAS IZPĒTE UN VEIKSTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS.....	77
5.1. Ramana-SOA un Ramana-EDFA kombinēto optisko pastiprinātāju efektivitātes salīdzināšana DWDM pārraides sistēmās.....	78
5.2. Ramana-FOPA kombinētā pastiprinātāja veikspēja 16 kanālu WDM pārraides sistēmā.....	85

6. KOPIĢI LEĢĒTAS ŒŒKIEDRAS UN APVALKA PUMPĒŒANAS OPTISKĀ PASTIPRINĀTĀJA PROTOTIPA IZSTRĀDE UN IZPĒTE.....	94
6.1. Izvēlētā leĢētā ŒŒkiedru pastiprinātāja apraksts	94
6.2. Optiskā savienotāja tehnika dubultapvalka leĢēto ŒŒkiedru pastiprinātājiem	98
6.3. Apvalka pumpēšanas erbija-iterbija ŒŒkiedru pastiprinātāja novērtējums C-frekvenču joslas optiskos tīklos.....	100
NOBEIGUMS	109
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	113
PIELIKUMU SARAKSTS	124

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

AM – *Amplitude Modulation* – amplitūdas modulācija
AON – *Active Optical Network* – aktīvais optiskais tīkls
APON – *ATM Passive Optical Network* – ATM pasīvais optiskais tīkls
ASE – *Amplified Spontaneous Emission* – pastiprinātā spontānā emisija
ATM – *Asynchronous Transfer Mode* – asinhronais pārraides režīms
AWG – *Arrayed Waveguide Gratings* – viļņvadu masīva režģis

B

BER – *Bir Error Rate* – bitu kļūdu attiecība
BLS – *Broadband Light Source* – platjoslas gaismas avots
BPON – *Broadband Passive Optical Network* – platjoslas pasīvais optiskais tīkls

C

CAPEX – *Capital Expenses* – darbības izdevumi
CB – *Conduction Band* – vadītspējas zona
CC-FWM – *Channel-Channel Four Wave Mixing* – starpkanālu četru viļņu mijiedarbe
CD – *Chromatic Dispersion* – hromatiskā dispersija
CW – *Continuous Wave laser* – nepārtraukta starojuma lāzers

D

DC – *Double-clad* – dubultapvalks
DCF – *Dispersion Compensating Fiber* – dispersiju kompensējoša šķiedra
DEMUX – *Demultiplexor* - demultipleksors
DFA – *Doped Fiber Amplifier* – leģētas šķiedras pastiprinātājs
DPSK – *Differential Phase Shift Keying* – diferenciālā fāzes manipulācija
DRA – *Distributed Raman Amplifier* – sadalītais Ramana pastiprinātājs
DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing* – blīvas viļņgarumdales blīvēšana

E

EBF – *Electrical Bessel Filter* – elektriskais Beseļa filtrs
EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier* – erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs
EF – *Electrical Filter* – elektriskais filtrs
EPON – *Ethernet Passive Optical Network* – Ethernet pasīvais optiskais tīkls
EYE – *Eye Diagram Oscilloscope* – acu diagrammu osciloskops
EYDFA – *Erbium-Ytterbium Doped Fiber Amplifier* – ar erbiju un iterbiju leģētas šķiedru optiskais pastiprinātājs

F

FBG – *Fiber Bragg Grating* – šķiedras Brega režģis
FOPA – *Fiber Optical Parametric Amplifier* – uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs
FP-SOA – *Fabry-Perot Semiconductor Optical Amplifier* – Fabri-Pero pusvadītāju optiskais pastiprinātājs
FTTB – *Fiber-To-The-Building* – šķiedra līdz ēkai
FTTC – *Fiber-To-The-Curb* – šķiedra līdz tīkla mezglam

FTTH – Fiber-To-The-Home – šķiedra līdz mājai
FWM – Four wave Mixing – četru viļņu mijiedarbe

H

HNLF – High Non-Linearity Fiber – paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

G

GPON – Gigabit Passive Optical Network – gigabitu pasīvais optiskais tīkls

I

IP – Internet Protocol – interneta protokols

ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication Sector – Starptautiska Telekomunikāciju Savienība – Telekomunikāciju Sektors.

L

LRA – Lumped Raman Amplifier – diskrētais Ramana pastiprinātājs

M

MLR – Mixed Line Rate – kombinētie līnijas ātrumi

MMF – Mixed Modulation Format – kombinētais modulācijas formāts

MZM – Mach-Zehnder Modulator – Maha-Cendera modulators

MUX – Multiplexor – multipleksors

N

NB-HA – Narrowband Hybrid Amplifier – šaurjoslas optisko signālu pastiprināšanas risinājums

NdDFA – Neodymium Doped Fiber Amplifier – neodīma leģētas šķiedras optiskais pastiprinātājs

NF – Noise Figure – ienesto trokšņu rādītājs

NG-PON – Next-Generation PON – nākamās paaudzes PON

NOE – Nonlinear Optical Effects – nelineārie optiskie efekti

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

O

OC – Optical Combiner – optiskais sazarotājs

ODN – Optical Distribution Network – optiskais sadales tīkls

OF – Optical Filter – optiskais filtrs

OGF – Optical Gaussian Filter – Gausa optiskais filtrs

OLT – Optical Line Terminal – optiskais līnijas terminālis

ONT – Optical Network Terminal – optiskais tīkla terminālis

ONU – Optical Network Unit – optiskā tīkla iekārta

OOK – On-Off Keying – signāla intensitātes modulācijas formāts

OPEX – Operational Expenses – ekspluatācijas izdevumi

OS – Optical Splitter – optiskais sadalītājs

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

P

PDFA – Praseodymium Doped Fiber Amplifier – prazeodīma leģētas šķiedras optiskais pastiprinātājs

PIN – PIN fotodiode

PM – Phase Modulation – fāzes modulācija

PMD – Polarization Mode Dispersion – polarizācijas modu dispersija

PP – Parametric Pump – parametriskā pumpēšana

PON – Passive Optical Network – pasīvais optiskais tīkls

Q

QAM - Quadrature-amplitude Modulation – kvadrātiskās amplitūdas modulācija

QPSK - Quadraturephase-shift Keying – kvadrātūras fāzes manipulācija

R

RP – Raman Pump – Ramana pumpēšana

RX – Receiver – uztvērējs

RZ – Return-to-Zero – kodēšana ar atgriešanos pie nulles

S

SBS – Stimulated Brillouin Scattering – stimulēta Briljuēna izkliede

SDH - Synchronous Digital Hierarchy – sinhronā datu hierarhija

SMF – Single Mode Fiber – vienmodas optiskā šķiedra

SOA – Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

SONET – Synchronous Optical Networking – sinhronais optiskais tīkls

SPM – Self-Phase Modulation – fāzes pašmodulācija

SRS – Stimulated Raman Scattering – stimulēta Ramana izkliede

SSMF – Standart Single Mode Fiber – standarta vienmodas optiskā šķiedra

STM – Synchronous Transport Module – sinhronas pārraides modulis

SS-WDM – Spectrum Sliced WDM – spektrāli sagriezts WDM

Š

ŠOPS – šķiedru optiskā pārraides sistēma

T

Te-EDFA – Tellurite-Erbium Doped Fiber Amplifier – telūrija un erbija leģētas šķiedras optiskais pastiprinātājs

TDFA – Thullium Doped Fiber Amplifier – tūlija leģētas šķiedras optiskais pastiprinātājs

TDM-PON – Time Division Multiplexed PON – laika dales blīvēts PON

TW-SOA – Travelling Wave Semiconductor Optical Amplifier – šķērssojoša viļņa pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

TX – Transmitter – raidītājs

V

VB – Valence Band – valentā zona

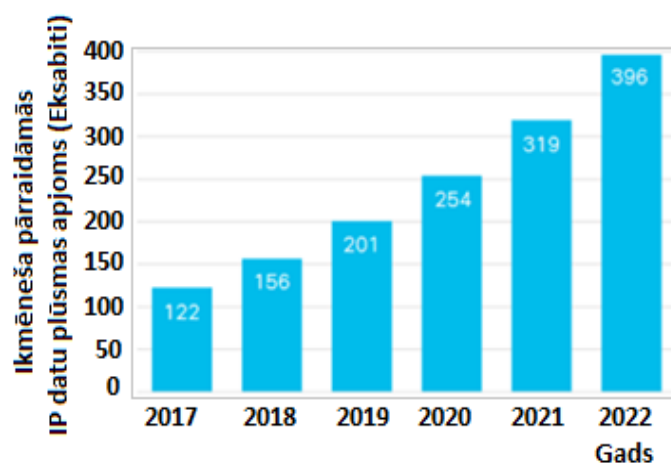
VOA – Variable Optical Attenuator – pārskāņojams optiskais vājinātājs

W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana

1. OPTISKO ŠKIEDRU PASTIPRINĀTĀJU NOVĒRTĒJUMS UN PIELIETOJUMS PASĪVOS OPTISKOS TĪKLOS

Ar katru gadu informācijas tehnoloģiju nozare attīstās un novērojams straujš pārraidāmās informācijas apjoma palielinājums. Informācijas apjoma pieaugums ir skaidrojams ar interneta lietotāju, globālajā tīklā reģistrēto iekārtu pieaugumu un piedāvāto pakalpojumu klāsta paplašināšanos: augstas izšķirtspējas video pārraide, videokonferences, mākoņdatošana, e-pakalpojumi, tīmekļa pārlūkošana, failu lejupielāde un *M2M* (angl. *machine to machine*). Tāpēc pieaug pieprasījums pēc lielākām telekomunikāciju tīkla kapacitātēm. Saskaņā ar Cisco prognozes datiem, globālā IP datu plūsmas apjoms līdz 2022. gadam sasniegs 4.8 Zetabitus salīdzinot ar 2017. gadu. 1.1. att. redzams, ka 2022. gadā ikmēneša pārraidāmā IP trafika apjoms sasniegs 396 Eksabiti [1]. Datu pārraides ātrumi turpina augt un 2023. gadā jau sasniegs 110,4 Mbit/s. Šādu pārraides ātrumu nodrošinās šķiedra līdz mājai (*FTTH*), kur galvenais risinājums ir nākamās paaudzes pasīvie optiskie (*NGPON2*) tīkli.



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

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

Optiskos jaudas zudumus rada vājinājums optiskajā šķiedrā (standarta vienmodas šķiedras (*SSMF*) vājinājums ir aptuveni 0,2 dB/km pie 1550 nm viļņa garuma). Vājinājumam ir zema vērtība, bet tā ietekme uzkrājas ar katru kilometru un pavājina pārraidāmo signālu vairāku simtu vai tūkstošu kilometru garās pārraides sistēmās. Ik pēc 50 līdz 100 km signāls ir novājināts par 10–20 dB un optisko signālu nepieciešams atjaunot vai pastiprināt [4]. Lai kompensētu uzkrāto

signāla vājinājumu, var izmantot reģeneratorus vai optiskos pastiprinātājus [5]. Optiskie reģeneratori uztver pārraidāmo signālu un pārveido to elektriskā signālā un tad to apstrādā un reģenerē ar raidītāju. Aktīvo elementu skaits pārraides sistēmās ar reģeneratoriem būtiski pasliktina sistēmas pieejamību kopumā [6]. *WDM* pārraides sistēmās reģeneratoru izmantošana ir dārgs un sarežģīts risinājums, jo pārraidāmā signāla kanāliem nepieciešama demultipleksēšana, detektēšana, pārveidošana elektriskajā strāvā, atjaunošana un beigās elektriskā signāla pārveidošana optiskajā signālā [2]. Optiskie pastiprinātāji ir otrs veids kā kompensēt vājinājumu. Optiskais pastiprinātājs ir optiskā ierīce, kas ietekmē ŠOPS attīstību, jo spēj pastiprināt optiskos signālus noteiktā frekvenču diapazonā un nodrošina pastiprināšanu bez optiski-elektriskās pārveidošanas [7-16]. Optiskie pastiprinātāji pastiprina vienlaicīgi vairākus pārraidāmos kanālu signālus. Optisko signālu pastiprināšana galvenokārt balstās uz enerģijas pāreju no pumpējošā starojuma vai no cita enerģijas veida uz pastiprināmo optisko starojumu. Dažādos optisko pastiprinātāju tipos šis process tiek īstenots dažādi. Pastiprinātāju izmantošana kļūva pieejama arī *WDM* sistēmās, kā arī veicināja optiskās komutācijas ieviešanu [6].

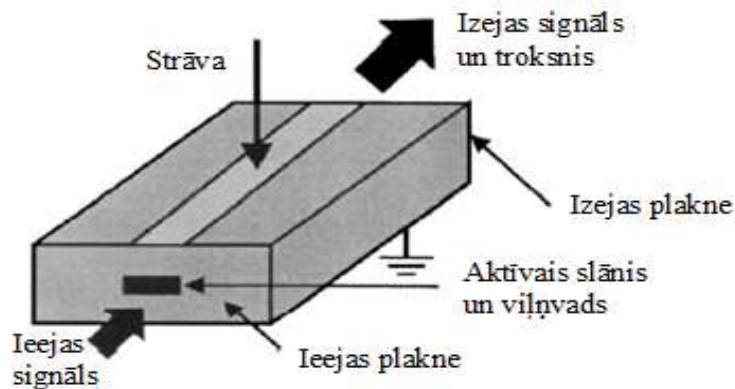
Visā pasaulē arvien vairāk un vairāk tiek pētītas šķiedru optiskās pārraides sistēmas (ŠOPS), kas ļautu palielināt pārraides ātrumu un uzlabot esošo pārraides sistēmu veiktspēju. Tiek pētītas jaunas optiskās šķiedras, jaunas pārraides sistēmu tehnoloģijas un jaunās paaudzes optiskie pastiprinātāji, kas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

Optiskajos pastiprinātājos izmanto atšķirīgus efektus signāla pastiprinājuma sasniegšanai [17]. Optiskā signāla pastiprināšanai var izmantot dažādus fiziskos principus, kas atbilst galvenajiem optisko pastiprinātāju veidiem:

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

1.1. Pusvadītāju optisko pastiprinātāju novērtējums

Pusvadītāju optiskie pastiprinātāji (*SOA*) ir ierīce, kas pastiprināšanas signāla nodrošināšanai izmanto pusvadītāju, kas piemērotos darbības apstākļos var pastiprināt ieejas gaismas signālu. Pusvadītāju optiskā pastiprinātāja pamata shēma ir parādīta 1.2. att. Ierīces aktīvais slānis veic ieejas signāla pastiprināšanu. Ārējā elektriskā strāva nodrošina enerģijas avotu, kas veic pastiprināšanu. Iebūvētais viļņvads tiek izmantots, lai ierobežotu izplatītā signāla vilni aktīvajā slānī. Tomēr optiskā ierobežošana ir vāja, tāpēc daļa signāla nokļūst apkārtējos slāņos ar zudumiem. Izejas signāls ir papildināts ar troksni. Šo troksni rada pats pastiprināšanas process un nevar pilnībā to izslēgt. Pastiprinātāja plaknes ir atstarojošas, izraisot pastiprinājuma spektra viļņus [18].



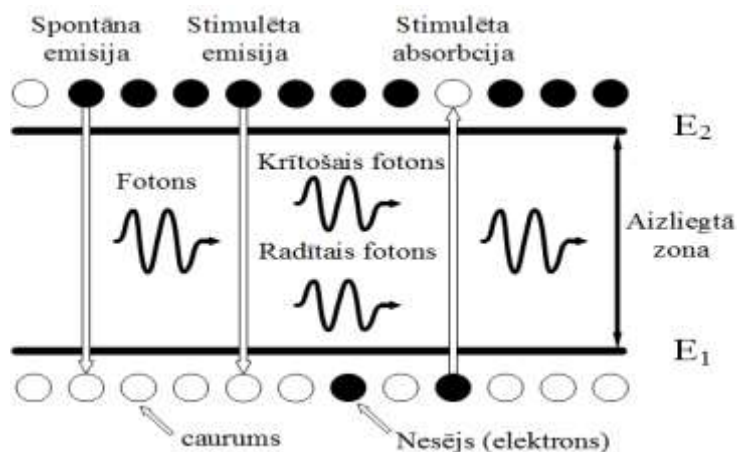
1.2. att. Pusvadītāju pastiprinātāju shematiska struktūra [18].

Pusvadītāju optiskos pastiprinātājus iedala divos veidos:

1. Fabri-Pero pastiprinātājs (*angl. Fabry-Perot SOA – FP-SOA*), kur atstarošanās no ieejas un izejas plaknēm ir nozīmīga;
2. Skrejviļņa pastiprinātājs (*angl. traveling-wave SOA – TW-SOA*), kur atstarošanās ir niecīga.

Var izmantot dažādus pret atstarošanās apvalkus, kas ļauj *SOA* pastiprinātājos iegūt atstarošanās koeficientu mazāku par 10^{-5} . Skrejviļņa pusvadītāju pastiprinātājs ir mazāk jūtīgs pret pumpējošās strāvas fluktuācijām, temperatūras un signāla polarizācijas nekā Fabri-Pero pastiprinātājs [18].

SOA nesēji tiek ievadīti no ārējās strāvas avota aktīvajā slānī. Šie nesēji ieņem stāvokli aktīvā slāņa vadītspējas zonā (*angl. conduction band – CB*) un atstāj caurumus valentajā zonā (*angl. valance band – VB*) [18]. Pusvadītājiem ir iespējami trīs izstarošanas mehānismi: spontānā emisija, stimulētā emisija un stimulētā absorbcija. Pie zemas populācijas inversijas līmeņa, stimulētās absorbcijās rezultātā krītošais gaismas fotons var stimulēt nesēja pāreju no *VB* uz *CB* zonu. Tas ir zudumu process, jo ienākošais signāls ir novājināts un varbūt pilnībā dzēsts. Ja pumpējošā strāva ir pietiekama, tad aktīvajā slānī notiks ienākošā signāla pastiprināšana, jo stimulētās emisijas varbūtība ir lielāka nekā stimulētās absorbcijas varbūtība. Spontānas emisijas procesā pastāv varbūtība, ka nesējs vadītspējas zonā ierosinātā stāvokļa dzīves laika garumā spontāni apvienojas ar valentās zonas caurumu un tādējādi izstaro fononu ar nejaušu fāzi un virzienu. Spontāni izstarotiem fotoniem ir plašs frekvenču diapazons. Spontāni izstarotie fotoni būtībā ir troksnis un arī piedalās nesēju populācijas samazināšanai, kas nepieciešami optiskajam pastiprinājumam. Spontānā emisija ir tiešas pastiprināšanas procesa sekas un no tās nevar izvairīties. Tāpēc nav iespējams izveidot pusvadītāju pastiprinātājus bez trokšņiem [18]. 1.3. att. parādīti izstarošanās mehānismi.

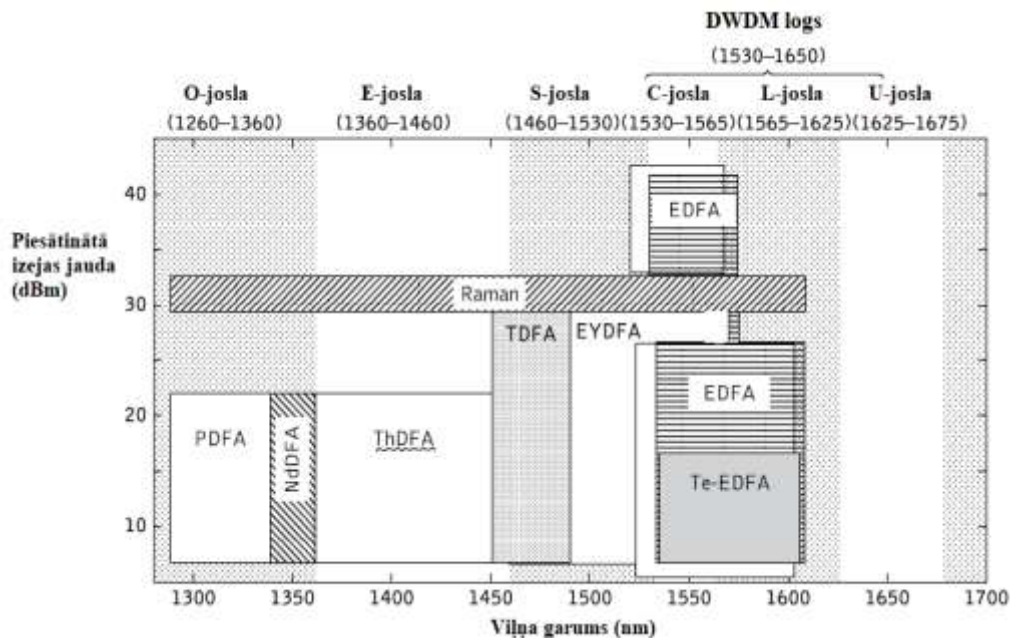


1.3. att. Spontānie un stimulētie procesi divu līmeņu sistēmā [18].

Pusvadītāju pastiprinātāji ir mazi un izmanto elektrisko pumpēšanu un nav nepieciešams atsevišķs pumpējošais lāzers. Tie ir lētāki nekā cita veida pastiprinātāji (vismaz potenciāli) un tos var integrēt ar pusvadītāju lāzeriem, modulatoriem un citām ierīcēm. Viena no galvenajām priekšrocībām ir plaša caurlaides josla, *SOA* var darboties no 1300 līdz 1600 nm viļņa garuma diapazonā. *SOA* var iedarbināt ar mazjaudas lāzeri. Tomēr, runājot par tehniskajiem parametriem, tie joprojām ir vājāki un nav salīdzināmi ar erbijs leģēto šķiedru pastiprinātājiem. *SOA* raksturīgs liels ienesto *ASE* trokšņu daudzums (no 7 līdz 12 dB), pastiprinājuma maksimums ir 30 dB, ir zināma jutība pret polarizāciju (nepārsniedz 2 dB) un ir ievērojama nelinearitāte [18]. Visi šie trūkumi padara *SOA* pastiprinātājus nepiemērotus daudzkanālu *WDM* pārraides sistēmās. Tomēr tie var būt izmantojami dažādām lietojumprogrammām, piemēram, viena kanāla pastiprinātājiem, kuriem nav nepieciešams liels pastiprinājums vai liela izejas jauda [19].

1.2. Retzemju elementu leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju novērtējums

Populārākie optiskie pastiprinātāji ir ar retzemju elementu leģēto šķiedru optiskie pastiprinātāji, jo ļauj optisko signālu pastiprināt platā spektrālā diapazonā. Šī tipa pastiprinātājos kā pastiprināšanas līdzekli izmanto leģētu optisko šķiedru. Pastiprinātais signāls un pumpēšanas lāzers ir multipleksēti leģētā šķiedrā un signāls tiek pastiprināts mijiedarbojoties leģētiem joniem. Pastiprinātājos var izmantot retzemju ķīmiskos elementus ar atomu numuriem no 58 līdz 71. Retzemju elementu joni kā erbijs, holmijs, neodīms, tūlijs, prazeodīms un iterbījs var tikt izmantoti, lai izgatavotu leģēto šķiedru pastiprinātājus [2, 20]. Pastiprinātāja pastiprinājuma joslas viļņa garuma diapazonu nosaka izmantotais retzemju elements, kas tiek izmantots pastiprinājuma vidē. 1.4. att. ir parādīts optiskais spektrs šķiedru pastiprinātājiem ar galvenajām retzemju elementu leģētām šķiedrām un to atbilstošā pastiprinājuma josla. Tas attēlo piesātināto izejas jaudu katram šķiedru pastiprinātāja tipam atkarībā no viļņa garuma. Tā kā katram retzemju elementam ir atšķirīgas absorbcijas – emisijas īpašības, lai absorbētu enerģiju vienā vai vairākos posmos, un emitētu gaismu vienā vai vairākos šaurjoslu spektrālos diapazonos, tad nevar izveidot vienotu optisko šķiedru pastiprinātāju ar retzemju elementu, kas nodrošinātu pastiprināšanu visās šķiedru joslās.

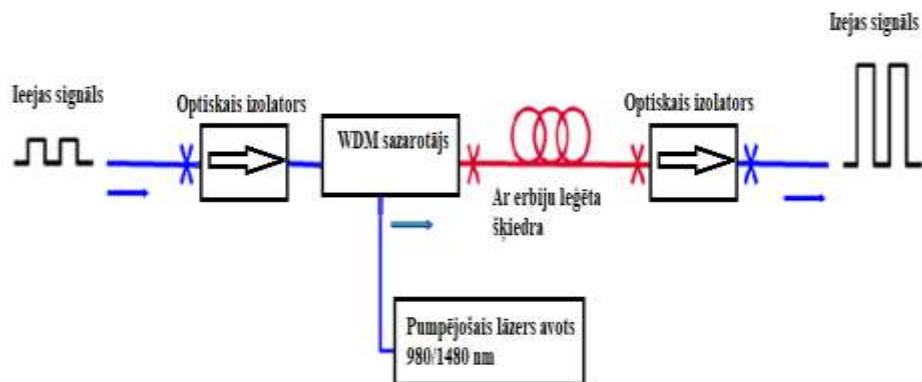


1.4. att. Optiskā pastiprinājuma viļņa garuma diapazoni šķiedru pastiprinātājiem [10].

Prazeodīmu leģētas šķiedru pastiprinātājs (*PDFA*) ir retzemju elementu leģēto šķiedru pastiprinātājs, kas nodrošina pastiprināšanu 1300 nm diapazonā. *PDFA* veiktspēja ir zemāka salīdzinot ar erbija leģēto šķiedru pastiprinātāju. Neodīma leģētas šķiedras pastiprinātājs (*NdDFA*) darbojas 1340 nm viļņa garuma diapazonā un pirmajā caurspīdības joslā pie 1310 nm ir maz efektīvs. Bet neodīma šķiedru ar dubultapvalku var izmantot, lai palielinātu lāzera avotu izejas jaudu līdz vairākiem kilovatiem. Erbija leģētas šķiedras optiskais pastiprinātājs (*EDFA*) nodrošina signāla pastiprināšanu C-joslā (1530 līdz 1565 nm). Erbija-iterbija leģētas šķiedras pastiprinātājs (*EYDFA*) nodrošina pastiprināšanu viļņa garuma diapazonā 1535 līdz 1567 nm, turpretī telūrija-erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs (*Te-EDFA*) var nodrošināt pastiprināšanu 1530 līdz 1608 nm diapazonā [10].

Visizplatītākie ir ar erbiju leģēto šķiedru optiskie pastiprinātāji, kur silīcija dioksīda šķiedras kodols ir leģēts ar erbija joniem. *EDFA* pastiprinātāji ļauj pastiprināt optisko signālu, nepārveidojot to elektriskajā signālā un otrādi. Tie spēj vienlaicīgi pastiprināt signālus ar dažādiem viļņa garumiem, ievieš nelielus trokšņus, gandrīz nejūtīgi pret signāla polarizāciju un tos var samērā vienkārši realizēt un iebūvēt ŠOPS. *EDFA* darbojas C-joslas diapazonā un labi piemēroti optiskā signāla pastiprināšanai DWDM sakaru sistēmās [2, 20, 21]. *EDFA* var pastiprināt arī L-joslas (1565–1625 nm) DWDM kanālus, izmantojot daudzpakāpju konfigurācijas, speciālos piemaisījumus u.c. metodes [22]. Galvenā atšķirība starp C un L-joslas pastiprinātājiem ir tā, ka L-joslas pastiprinātājos tiek izmantots garāks leģētas šķiedras garums. Garāks šķiedras garums ļauj izmantot zemāku inversijas līmeni, tādējādi nodrošinot garākus viļņu garumus, vienlaikus nodrošinot lietderīgo pastiprinājumu.

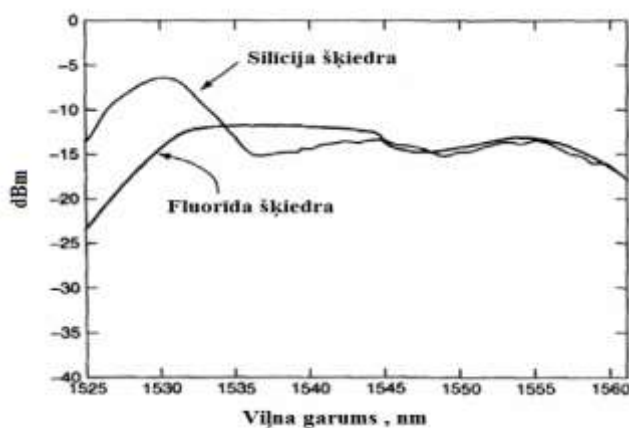
EDFA pastiprinātāja darbības princips ir līdzīgs lāzera principam un ir balstīts uz gaismas parādības pastiprināšanu uz stimulētās emisijas rēķina. *EDFA* pastiprinātāji nepārveido optisko signālu, bet palielina tā jaudu. Atšķirība no reģeneratoriem ir tāda, ka *EDFA* nav atkarīga no bitu pārraides ātruma un protokola un spēj optisko signālu pastiprināt jebkurā formātā [4]. 1.5. att. redzams vienkāršots *EDFA* pastiprinātāja modelis.



1.5. att. Vienkāršots *EDFA* pastiprinātāja modelis.

Novājināts ieejas signāls tiek apvienots ar pumpējošā lāzera staru. Pumpējošā avota staram jābūt ar noteiktu viļņa garumu, kuru nosaka erbija jonu absorbcijas spektrs, lai varētu iegūt erbija jonu ierosināšanu. Šī sajauktā gaisma tiek izplatīta neliela garuma šķiedrā, kura ir leģēta ar konkrētu erbija jonu daudzumu. Pumpējošais starojums ierosina erbija jonus. Kad signāla fotoni saduras ar ierosinātiem erbija joniem, erbija joni atdod savu enerģiju papildus fotonu veidā, kuriem ir tāds pats viļņa garums, fāze un virziens kā signāla fotoniem, un atgriežas savā zemākajā enerģētiskajā līmenī. Tādā veidā tiek iegūts pastiprināts izejas signāls, kura optiskā jauda var būt pat 1000 reizes lielāka, salīdzinot ar signālu pirms pastiprinātāja [23].

EDFA pastiprinātājos var izmantot šķiedras, kuru pamatā ir silīcija dioksīds vai fluorīdi. Abas šķiedras ir ļoti līdzīgas, atšķiras tikai ar darbojošos šķiedru, kura ir leģēta ar erbija joniem. Fluoru saturošu šķiedru izmantošana ļauj piesātināt erbija jonus un sasniegt vienmērīgāku signāla pastiprināšanu. *EDFA* pastiprinātāja izejas raksturlīkne abu tipu šķiedrām ir attēlota 1.6. att. Tomēr fluorīda šķiedrai ir viens trūkums: liels trokšņa līmenis, ja tiek izmantots 1480 nm pumpējošais starojums. Izmantojot fluorīda šķiedru ar 980 nm pumpējošo starojumu, *EDFA* pastiprinātājos ir neefektīva, jo notiek ierosinātā stāvokļa absorbēšanās. Visizplatītākie ir *EDFA* pastiprinātāji ar silīcija dioksīda šķiedru, jo ir zemāks trokšņu līmenis.

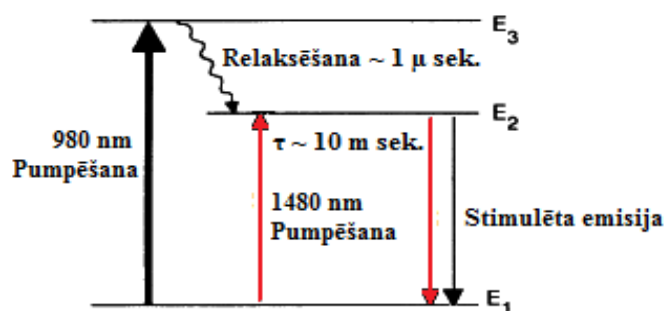


1.6. att. *EDFA* pastiprinātāja izejas līkne silīcija dioksīda un fluorīda šķiedrai [6].

Pastiprinātājā darbību ietekmē arī izvēlētais *EDF* šķiedras garums. *EDF* šķiedra ir pastiprinātāja aktīvā vide, kur notiek pumpējošā starojuma absorbcija un signāla pastiprinājums. *EDF* šķiedrai ir noteikta erbija jonu koncentrācija un pastiprinājums uz vienas *EDF* šķiedras garuma vienības ir ierobežots. Maksimāla pastiprinājuma sasniegšanai ir nepieciešams, lai vairāk erbija jonu atrastos ierosinātā stāvoklī. *EDF* šķiedras garums, pie kura

ir panākts maksimālais pastiprinājums, ir vienlaikus atkarīgs no erbija jonu koncentrācijas, pumpēšanas lāzera jaudas, viļņa garuma un ieejas signāla jaudas. Ja izvēlētais *EDF* šķiedras garums ir lielāks par *EDF* šķiedras garumu, pie kura ir maksimālais pastiprinājums, tad tālākajos šķiedras apgabalos būs novērojama signāla absorbcija, bet ja izvēlētais garums būs mazāks, tad pumpējošais starojums netiks izmantots pilnībā. *EDFA* pastiprinājums ir atkarīgs no viļņa garuma, tad *EDF* šķiedras garuma izvēle arī ir atkarīga no ieejas signāla viļņa garuma [20]. Izmantojot *EDFA* pastiprinātājus daudzkanālu *WDM* sistēmās, ir svarīgs vienmērīgs pastiprinājuma spektrs visā *EDFA* viļņu garuma diapazonā. Pie noteiktām pumpējošā starojuma konfigurācijām, var atrast tādu *EDF* šķiedras garumu, kas nodrošinātu nepieciešamo populācijas inversijas līmeni, lai iegūtu vienmērīgu pastiprinājumu.

EDFA pastiprinātajos tiek izmantota trīs vai divu līmeņu pumpēšana. 980 nm pumpēšanai ir raksturīga trīs līmeņu pumpēšana, bet 1480 nm pumpēšanai - divu līmeņu [21].



1.7. att. Signālu pastiprināšanas shēma *EDFA* pastiprinātajos ar 980 nm pumpēšanu (melns) un 1480 nm pumpēšanu (sarkans) [20].

Pumpēšanas lāzers ierosina erbija jonus, kā rezultātā elektroni no pamatstāvokļa (1. līmenis) nonāk uz augstāko enerģijas stāvokli (3. līmenis – 980 nm pumpēšanas gadījumā un 2. līmenis – 1480 nm pumpēšanas gadījumā). Šajā stāvoklī tie atrodas ļoti īsu laika periodu ($\tau \approx 1 \mu s$) un tad pāriet no 3. līmeņa līdz vidējam 2. līmenim, kas ir zemākais ierosinātās enerģijas līmenis. Šajā enerģētiskajā līmenī erbija joni uzturas salīdzinoši ilgi ($\tau \approx 10 ms$). Kad vidējā līmeņa populācijas līmenis kļūst pietiekoši augsts un veidojas 1. un 2. līmeņa populācijas inversija, tad sistēma sāk inductīvi pastiprināt ieejas optisko signālu noteiktā viļņa garuma diapazonā.

Ar 980 nm pumpēšanu var sasniegt augstāku populācijas inversijas līmeni, kas ļauj iegūt mazāku *ASE* trokšņu daudzumu. Savukārt kvantu efektivitāte ir lielāka 1480 nm pumpēšanai, jo enerģijas līmeņu starpība starp pumpējošo un pastiprināmo starojumu ir mazāka. Tāpēc no trokšņu viedokļa labāk izmantot 980 nm pumpēšanu, bet ar 1480 nm pumpēšanu var iegūt lielāku pastiprinājuma koeficientu [24]. Tipiska ienesto trokšņu rādītāja vērtība *EDFA* pastiprinātajiem ir ap 5-6 dB, bet reāli var tikt sasniegta arī 3 dB vērtība [20]. *EDFA* trokšnis ir proporcionāls iegūstamajam pastiprinājumam.

EDFA pastiprinātajos izmanto vairākas pumpēšanas shēmas:

- Tieši vērsta pumpēšana – nodrošina zemāku trokšņa līmeni, kad ir maza ieejas signāla jauda un liels pastiprinājums;
- Pretēji vērsta pumpēšana – nepieciešama mazāka pumpēšanas jauda nekā tieši vērstai pumpēšanai, lai varētu iegūt pastiprinātāja piesātinājumu;
- Abpusējā pumpēšana – iespējams palielināt kopējo pumpējošo jaudu, kā arī efektīvi var izmantot katras pumpēšanas shēmas stiprās puses. Ar abpusējo pumpēšanu var panākt

vienmērīgu augstāko enerģētisko līmeņu populācijas sadalījumu visā *EDF* garumā. Labāki rezultāti tiek sasniegti, kad tiek izmantota 980 nm tieši vērsta pumpēšana un 1480 nm pretēji vērsta pumpēšana, jo 1480 nm pretēji vērstai pumpēšanai ir augstāka efektivitāte un 980 nm tieši vērstai pumpēšanai ir raksturīgs mazāks trokšņu līmenis. Tāpēc izmantojot šādu abpusējās pumpēšanas konfigurāciju, iespējams iegūt lielāku pastiprinājumu un mazāku ienesto trokšņu daudzumu [20].

EDFA pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients G , kurš parāda optiskā signāla jaudu attiecību *EDFA* ieejā un izejā, ievērojot ienesto ASE troksni [25]:

$$G = \frac{P_{izejas}(\lambda_c) - P_{ASE}(\lambda_c)}{P_{ieejas}(\lambda_c)}, \quad (1.1)$$

kur $P_{izejas}(\lambda_c)$ – izejas signāla jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma (W);

$P_{ieejas}(\lambda_c)$ – ieejas signāla jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma (W);

$P_{ASE}(\lambda_c)$ – pastiprinātās spontānās emisijas jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma (W).

Vairumā gadījumu, signāla jaudas ir pietiekoši lielas un *ASE* trokšņa ietekme ir niecīga uz G koeficienta aprēķināšanu, tāpēc var neņemt vērā. Tāpēc pastiprinājums ir izteikts dB formā [25]:

$$G = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{izejas}(\lambda_c)}{P_{ieejas}(\lambda_c)} \right). \quad (1.2)$$

Gadījumā, ja pumpēšana notiek tikai vienā virzienā, ir iespējams panākt pastiprinājumu ap 17 dB. Ja tiek izmantota abpusējā pumpēšana, ir iespējams iegūt pastiprinājumu līdz pat 30 dB. Pastiprinājumu var iegūt arī lielāku, jo viss ir atkarīgs no attiecīgā risinājuma un nosacījumiem. Piemēram, pielietojot saliktu *EDFA* konfigurāciju, laboratorijā tika iegūts 54 dB pastiprinājums ar 3.1 dB trokšņu rādītāju [26].

Galvenais *EDFA* pastiprinātāju trokšņa avots ir pastiprinātā spontānā emisija (*ASE*). *ASE* troksnis var ļoti ietekmēt signāla kvalitāti. Tāpēc *EDFA* pastiprinātājiem ir svarīgs trokšņu rādītājs (*NF*), kas nosaka pastiprinātāja kvalitāti un raksturo optiskā signāls un troksnis attiecību (*OSNR*). *NF* var izteikt sekojoši [20]:

$$NF = 10 \cdot \lg \left(\frac{OSNR_{ieeja}}{OSNR_{izeja}} \right) [db], \quad (1.3)$$

kur $OSNR_{ieeja}$ - attiecība starp signālu un troksni *EDFA* ieejā;

$OSNR_{izeja}$ - attiecība starp signālu un troksni *EDFA* izejā.

Ideālā *EDFA* pastiprinātājā *NF* vērtība ir 3dB, bet komerciāli pieejamajiem *EDFA* ir aptuveni 5–6 dB [21].

ASE rodas viļņa garumu diapazonā, kas atbilst *EDFA* pastiprinājuma spektram. *WDM* sistēmās ir iespēja izfiltrēt *ASE* trokšņus, izmantojot optiskos filtrus. Bet *ASE* nav iespējams izfiltrēt pie viļņa garumiem, kas sakrīt ar izmantoto optisko filtru caurlaides joslu.

Pastiprinātās spontānās emisijas jauda ar pastiprinājuma koeficientu ir saistīta sekojoši [2]:

$$ASE = h\nu \cdot \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1), \quad (1.4)$$

kur h – Planka konstante, kas ir vienāda ar 6.6252×10^{-34} W·s²;

ν - frekvence (Hz), kas atbilst viļņu garumiem λ diapazonā 1525-1565 nm;

n_{sp} – spontānās emisijas koeficients, un η ir kvantu efektivitāte [2].

Papildus ASE, EDFA pastiprinās jebkuru troksni, kas ir pastiprināmā signāla joslā.

1.3. Pasīvo optisko tīklu tehnoloģiju analīze un novērtējums

Telekomunikāciju nozarē liela nozīme ir informācijas pārraides tehnoloģijām, kuras izmanto optisko šķiedru kā pārraides vidi. Strauji augošais pārraidāmās informācijas apjoms prasa ātrākas tehnoloģijas telekomunikāciju nozarē. Mūsdienās jaunu platjoslas pakalpojumu (augstas precizitātes televīzija, video pēc pieprasījuma, tiešsaistes spēles, telesakari, mākoņdatošana un citi) paplašināšana un dažādība kopā ar straujo progresu palielina lietotāju vajadzības attiecībā uz interneta trafiku. Līdz ar to interneta pakalpojumu sniedzējiem ir jāievieš jaunas tehnoloģijas, lai palielinātu esošās pārraides sistēmas caurlaides un kapacitātes prasības [27]. Tas kļūst par būtisku uzdevumu interneta pakalpojumu sniedzējiem. Jāuzsver, ka patērētājiem pieejamā interneta pieslēguma apjoms būtiski atkarīgs no piekļuves tīkla iespējas. Optiskā piekļuve iegūst lielāku interesi, jo pieaug pieprasījums pēc arvien lielāka joslas platuma. Galvenie lielākas joslas platuma virzītājspēki ir lietotāju termināļu pieaugoša apstrādes jauda un tādu pakalpojumu attīstība, kuriem nepieciešams ievērojami lielāks joslas platums nekā pieejams mūsdienu piekļuves tīklos. Tomēr pārraides attāluma un izmaksu ierobežojums ir palēninājis optiskās piekļuves izplatību. Izmaksu un tehnisko problēmu risināšanai ir izstrādātas vairākas alternatīvas pārraides koncepcijas, lielākoties tiek gaidīts, ka pasīvais optiskais tīkls (*angl. passive optical network, PON*) ir ekonomiski izdevīgākais risinājums. Turklāt piekļuves tīkla attīstībai ir svarīga nozīme, nodrošinot patērētājiem pieejamo interneta trafiku [28-29].

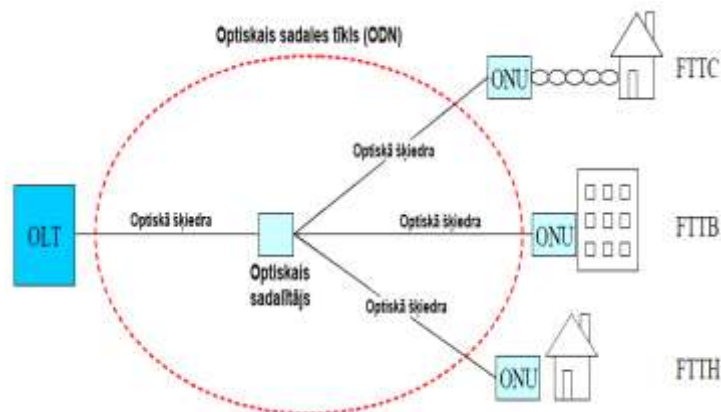
Piekļuves tīklus, kuru pamatā ir optika, iedala divās pamatgrupās: pasīvie optiskie tīkli un aktīvie optiskie tīkli. Galvenā atšķirība starp šiem piekļuves tīkliem ir tā, ka *PON* tā sadales tīkla daļā nav nepieciešamas aktīvas ierīces. Visi tīkla elementi, kuru darbībai nepieciešama elektriskā enerģija, tiek uzskatītas par aktīvām ierīcēm. Tas ir tieši tas, ka palielinās elektriskās enerģijas izmaksas pakalpojumu sniedzēja centrālajā ofisā (*CO*), pēc tam pieaug visas optiskās līnijas kopējās izmaksas. Jāatzīmē, ka ierīču pasivitāti nevar iegūt *PON* tīkla galos: optiskajā līnijas terminālī un optiskajā tīkla terminālī/iekārtā (*angl. Optical Line Terminal – OLT* un *angl. Optical Network Terminal/Optical Network Unit – ONT/ONU*). No otras puses, *AON* tīkli izmanto aktīvos elementus (optiskos pastiprinātājus, signālu reģeneratorus utt.) arī tīkla sadales daļā, kas ļauj sasniegt lielākus pārraides attālumus un lielāku galalietotāju skaitu. Pēdējo gadu laikā optisko tīklu jomā pētījumi galvenokārt vērsti uz pārraides attāluma, bitu pārraides ātruma palielināšanu, lielāku galalietotāju skaitu un galvenokārt jauno viļņu garumu dalīšanas tehnoloģiju izmantošanu. Optisko pastiprinātāju ieviešana ietekmē *WDM-PON* tīkla iespējamo pārraides attālumu. Optiskā pastiprinātāja pielietojums *PON* tīklos ir pieļaujams, ja pastiprinātājs tiek izvietots pakalpojumu sniedzēja *CO* telpās un tāpēc pārraides līnija paliek pasīva.

Lielākais datu apjoma pieaugums ir novērojams piekļuves tīklos. Tāpēc informācijas pārraide šādos optiskajos piekļuves tīklos (līdz klienta mājai) tiek nodrošināta pa vienu optisko šķiedru [30-31].

Eiropas Savienība 2010. gadā kā vienu no galvenajiem mērķiem digitālajā programmā ir noteikusi, ka visām Eiropas māsasaimniecībām gan pilsētās, gan laukos līdz 2025. gadam ir jānodrošina interneta pieslēgums ar vismaz 100 Mbit/s lejuplūsmas ātrumu, ar iespēju to

palielināt līdz Gbit/s ātrumam. Pēc projekta izvirzītajiem mērķiem līdz 2025. gadam galvenajiem sociālekonomiskajiem virzītājspēkiem (skolas, transporta mezgli, sabiedrisko pakalpojumu sniedzēji, uzņēmumi, kas izmanto digitālos resursus) ir jānodrošina interneta pieslēgums vismaz 1 Gbit/s datu pārraides ātrumu lejupplūsmai un augšupplūsmai [32–33].

Nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem (*NGPON*) vajag nodrošināt lielāku datu pārraides ātrumu, vienlaikus saglabājot *CAPEX* un *OPEX* iespējami zemu [34]. Ir divi galvenie faktori, kas ietekmē telekomunikāciju tīklus. Pirmais ir atbalstīt platjoslas datu pārraidi un otrs - izmantot arhitektūras, kas ir gan ekonomiskas, gan energoefektīvas [35–36]. Nākamās paaudzes ātrdarbīgo pasīvo tīklu (*NGPON2*) tehnoloģiju risinājumam atbilst viļņgarumdales blīvēšanas pasīvais optiskais tīkla (*WDM-PON*) un spektrāli sagrieztas *WDM-PON* sistēmas (*SS-WDM-PON*) [37-40].



1.8. att. Vispārēja vienkāršota *PON* arhitektūra [29].

PON koncepcija nosaka optisko sadales tīklu (*angl. Optical Distribution Network – ODN*), kur datu pārraide notiek starp optisko līnijas termināli (*OLT*) un vairākiem optiskā tīkla termināļiem/optiskā tīkla iekārtām (*ONT/ONU*), kā parādīts 1.8. att. Ir definētas trīs dažādas *PON* shēmas. Atkarībā no šķiedras beigu punkta tām ir nedaudz atšķirīgas pakalpojumu prasības. Šķiedra līdz tīkla mezglam (*angl. Fiber-To-The-Curb - FTTC*) - informācijas pārraide tiek nodrošināta pa optisko kabeli no pakalpojuma sniedzēja telpām līdz sadales skapim, kas atrodas apmēram 500 m attālumā no klienta telpām. Šķiedra līdz ēkai (*angl. Fibre-To-The-Building - FTTB*) - pienākošais optiskais kabelis terminējas ēkā, kur atrodas galalietotāji. Terminēšanas punkts parasti atrodas ēkas pagrabstāvā un savienojumi līdz telpām tiek nodrošināti ar vara kabeļiem. Šķiedra līdz mājai (*angl. Fibre-To-The-Home - FTTH*) - paredz optisko šķiedru pievadīt līdz klienta/galalietotāja telpām (māja, dzīvoklis). Šīs shēmas gadījumā optiskā šķiedra atrodas tuvāk klienta iekārtām nekā *FTTB* gadījumā un šobrīd ir populāra pasaulē [29].

ODN var ietvert noteiktu skaitu sadalīšanas posmu (parasti vienu vai divus). *PON* tīklā datu pārraide notiek starp *OLT* un klienta telpās izvietotajiem *ONT/ONU*. *PON* tīklos visas optiskās iekārtas, kuras izvietotas *ODN* ir pilnībā pasīvas [32]. Tas nozīmē, ka optiskā tīkla iekārtām (starp raidītāju un uztvērēju) nav strāvas un netiek izmantotas nekāda veida elektroierīces. Gan *ONT*, gan *OLT* ir aprīkoti ar optiskajiem uztvērējiem, kas nodrošina optisko signālu ģenerēšanu, modulēšanu, detektēšanu un demodulāciju.

Pasīvos optiskos tīklus iedala divos veidos pēc *ODN* optiskā signāla sadalīšanas:

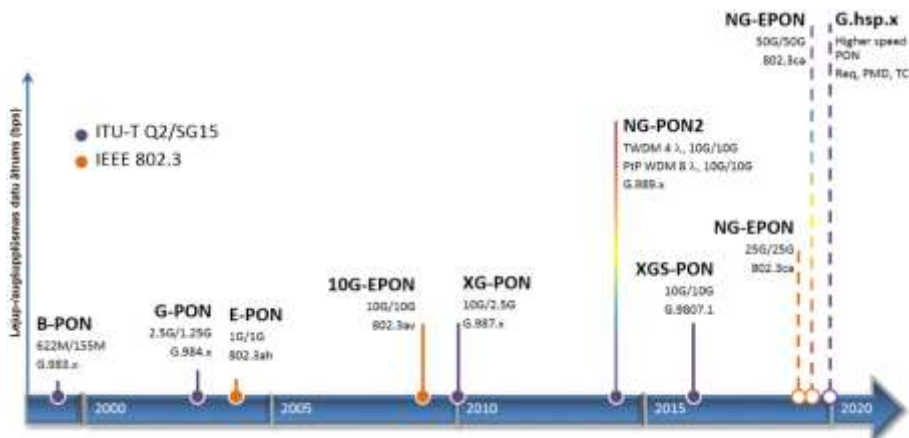
- *TDM-PON* (*angl. time division multiplexing PON*) – *ODN* pielieto optiskā signāla jaudas sadalītājus, bet daudzkanālu pārraidi nodrošina ar laukdales blīvēšanu. Dažādām optiskā tīkla iekārtām paredzētie signāli *OLT* multipleksējas laikā un tiek pārraidīti kā viens optiskais signāls. Tad jaudas sadalītājs sadala šo vienu optisko signālu uz *N* vienādiem signāliem (sadalīto signālu skaits = ar *ONU* skaitu). Visi sadalītie signāli tiek pārraidīti uz *ONU* un katrs *ONU* atpazīst savus datus pēc signālā iekļautās galvenes informācijas [41].

- *WDM-PON* (*angl. wavelength division multiplexing PON*) – *ODN* pielieto optiskos filtrus vai viļņa garuma sadalītājus un daudzkanālu pārraidi nodrošina ar viļņgarumdales blīvēšanu. *WDM* gadījumā signāli, kas tiek pārraidīti dažādiem *ONU*, tiek pārraidīti dažādos viļņu garumos [41]. Katram klientam lejuplūsma tiek nodrošināta izmantojot individuālu, klientam piesaistītu gaismas viļņa garumu, kas ļauj palielināt klientam piedāvāto datu pārraides ātrumu līdz pat 10 Gbit/s [42].

PON tehnoloģija strauji attīstās. Pirmā *PON* aktivitātes notika astoņdesmitos gados, kad daudzi lielākie mobilo sakaru operatori visā pasaulē strādāja kopā, lai savos tīklos ieviestu optiskās piekļuves risinājumus. Tomēr tie palika tikai kā izmēģinājuma pieteikumi tobrīd augsto izmaksu un salīdzinoši zemā pieprasījuma dēļ. 1990. gada sākumā tika standartizēta pirmā *PON* sistēma – *pi-PON* (*ITU-T G.982*), tad sekoja *A-PON* (*angl. ATM-PON*) (*ITU-T G.983*), kas ir pamats *BPON* (*ITU-T G.983*) standartam. *BPON* nodrošināja 1244,16 Mbit/s lejuplūsmas ātrumu. *G-PON* (*ITU-T G.984*) (*angl. gigabit PON*) standarts ir turpinājums uzlabotajam *BPON*, kas atbalsta vairāku datu pārraides ātrumu kombinācijas (izplatītākās ir 2,488 Gbit/s lejuplūsmā un 1,244 Gbit/s augšupplūsmā). Kā alternatīva *GPON*, paralēli attīstījās arī *EPON* (*IEEE 802.3* rekomendācija), kas atbalsta *Gigabit Ethernet* tehnoloģijas izmantošanu un datu pārraides ātrumi augšupplūsmā un lejuplūsmā ir vienādi (1,25 Gbit/s) [111]. Gan *GPON*, gan *EPON* nodrošina pārraidi 20 km. *E-PON* dominē Āzijā, bet *GPON* ir populārs Eiropā un Amerikā. 2009. gadā ienākot 10G-EPON (*IEEE 802.3 av*) un 2010. gadā *10G-PON* (*XG-PON*) (*ITU-T G.987*) nodrošināja lejuplūsmas datu pārraidi ar 10 Gbit/s ātrumu. [32, 43].

Nākamās paaudzes *PON* (*angl. Next Generation PON, NGPON*) ir pasīvais optiskais tīkls, kurš iedalās *NGPONI* un *NGPON2* tehnoloģijās. *NGPONI* vai *XGPON* (*ITU-T G.987*) paredz izmantot jau eksistējošo *GPON* infrastruktūru. *NGPON1* nodrošina datu pārraidi lejuplūsmā līdz 2,5 Gbit/s un augšupplūsmā 10 Gbit/s ātrumu.

NGPON2 tehnoloģija (*ITU-T G.989*) tiek realizēta uz pilnīgi jaunas infrastruktūras, kas pieļauj jauna *ODN* ieviešanu. Optiskos jaudas sazarotājus nomaina optiskā signāla sazarotāji pēc gaismas viļņa garumiem – *AWG* jeb sakārtots viļņvadu režģis (*angl. arrayed waveguide grating*). Kā jau tika minēts iepriekš, tad šim tehnoloģiskajam risinājumam atbilst *WDM-PON* vai *SS-WDM-PON* piekļuves sistēmas. *NGPON2* nodrošina datu pārraidi lejuplūsmā līdz 40 Gbit/s un augšupplūsmā 10 Gbit/s ātrumus.



1.9. att. Pasīvo optisko tīklu standartu progress [44].

Pašlaik izstrādes procesā ir arī jaunas *ITU-T* rekomendācijas (*G.hsp.req*, *G.hsp.comTC*, *G.hsp.50Gpmd*, *G.hsp.TWDMpmd*) lielākiem datu pārraides ātrumiem (virs 10 Gbit/s) [44].

PON tīklu tehnoloģijas līderis ir *WDM-PON*, kas izmanto *DWDM* viļņvadu režģi. *WDM-PON* piedāvā alternatīvu laika sadalījuma balstītai pārraides shēmai, kur katrs *ONT/ONU* pārraida un saņem datus noteiktā viļņa garumā. Tipiska *WDM-PON* arhitektūra aizstās pasīvos sadalītājus ar selektīviem viļņu filtriem, kas tiek īstenoti ar *AWG*. *AWG* ir pilnībā pasīva iekārta, kas pilda multipleksora/apvienotāja un demultipleksora/sadalītāja funkcijas.

WDM-PON ir daudz priekšrocību salīdzinot ar *TDM-PON* sistēmu, jo katram lietotājam ir piešķirts atsevišķs gaismas viļņa garums. Datu pārraide notiek uz sava viļņa garuma gan lejupplūsmai, gan augšupplūsmai un netiek dalīts laikā ar citiem *ONT/ONU* kā tas notiek *TDM-PON* gadījumā.

WDM-PON sistēmai ir vairākas priekšrocības [45]:

1. *ODN* optiskā signāla sadales iekārtas ir pasīvas, kas nodrošina vienkāršu *PON* tīkla uzturēšanu un augstu drošumu.
2. Galalietotājam tiek nodrošināts atsevišķs gaismas viļņa garums, tāpēc spēj nodrošināt augstu privātumu un datu aizsardzības līmeni.
3. Sistēma ir vienkārši uzlabojama. Katram galalietotājam ir iespējams iegūt dažādus datu pārraides ātrumus un protokolus, kā arī ir iespējams viegli mainīt datu pārraides ātrumus, neradot nekādus zudumus citiem galalietotājiem.
4. Attālums, kurā *WDM-PON* pārraida informāciju, ir lielāks nekā *GPON* sistēmā, jo signāla zudumi ir mazāki *AWG* dēļ.

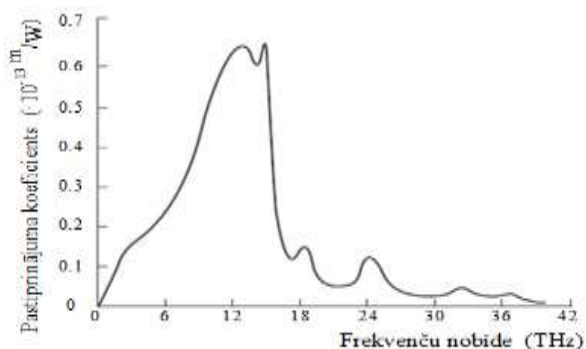
Pamatojoties uz augstām veikto pasīvo optisko tīklu tehnoloģiju analīzi, secināts, ka *WDM-PON* arhitektūra ir nākotnes tīklu progresīvs, ekonomisks un izdevīgs risinājums, kas nodrošina tīkla drošību.

1.4. Ramana optisko pastiprinātāju novērtējums

Optiskajās sistēmās, kurās izmanto optisko šķiedru kabeli, signālu pastiprināšanai var izmantot nelineāras parādības optiskajā šķiedrā, piemēram, stimulētās Ramana izkliedes (*SRS*) vai stimulētās Briljuēna izkliedes (*SBS*) efektus. Ramana izkliede ir fotonu izkļiedēšanās, ko izraisa stikla optiskie fotoni. Kad optiskajā šķiedrā izplatās jaudīgs optiskais starojums, tad tiek novērota Ramana izkļiedētā gaisma šķiedras izejā. Šo procesu sauc par spontāno Ramana

izkliedi un ir nevēlams nelineārs optiskais efekts. Daži fotoni tiek pārnesti uz jaunām, zemākām frekvencēm. Izkliedētie fotoni var zaudēt enerģiju (Stoksa emisija) vai iegūt enerģiju (anti-Stoksa emisija). Ja jau ir citu frekvenču fotoni, tad tiek palielināta izkliedes varbūtība uz šīm frekvencēm. Šis process ir pazīstams kā stimulēta Ramana izkliede (SRS) un tās pamatā ir stimulētā emisija ierosināto optisko fononu dēļ. Stimulētā Ramana izkliede ir nelineārie optiskie efekti, kuru izraisa stimulētā neelastīgā izkliede, kas izpaužas kā daļēja optiskā viļņa enerģijas pāreja uz nelineāro vidi. SRS parādība tiek izmantota Ramana pastiprinātājos. Ramana pastiprinātāji ir pirmās plaši izmantotās ierīces, kas ir bāzētas uz optisko šķiedru nelinearitāti [10, 22].

Ramana pastiprinājuma spektra maksimālā vērtība ir nobīdīta par 13,2 THz attiecībā pret pumpējošo avotu, kā tas ir attēlots 1.10. att. Šī vērtība ir raksturīga šķiedrām, kas izgatavotas no silīcija dioksīda un ir vienāds visā šķiedru caurspīdības viļņa garuma diapazonā, no 0,3 līdz 2 μm [46].



1.10. att. Ramana pastiprinājuma spektrs vienmodas SiO₂ šķiedrā salīdzinot ar no frekvenču nobīdes starp pumpējošo avotu un signālu [46].

Stimulētā Ramana izkliede izraisa signāla pasliktināšanos tikai tad, ja ir augsts optiskās jaudas līmenis. Efekts ir nedaudz līdzīgs Briljuēna izkliedei, bet gaismas emisija novirzās uz ievērojami zemāku frekvenču apgabalu (no 10 līdz 15 THz) 1550 nm logā. Turklāt nobīdītai zemfrekvences komponentei ir ievērojami plašāka josla nekā Briljuēna joslai (aptuveni 7 THz). WDM sistēmās šāda veida izkliede rada enerģijas sadali no īsviļņu uz garo viļņu kanāliem [6]. Šajā gadījumā šī parādība darbojas kā Ramana pastiprinātājs un garo viļņu kanāli tiek pastiprināti ar īsviļņu kanāliem, līdz atšķirība viļņu garumos atrodas Ramana pastiprināšanas frekvenču joslā. Šī parādība var rasties kvarca šķiedrā, kur pastiprināšanu var izraisīt, izmantojot soli starp kanāliem 200 nm. WDM sistēmās īsākā viļņa garuma kanāls galvenokārt tiek iztērēts, jo tā jauda var tik pumpēta uz daudziem kanāliem vienlaikus. Šādu jaudas pārdali starp kanāliem var noteikt ar sistēmas īpašībām, jo tas ir atkarīgs no bitu izvietojuma rakstura. Pastiprinājums notiek, ja binārais 1 ir vienlaicīgi abos kanālos. Šāda pastiprināšana, kas atkarīga no signāla rakstura, palielina jaudas svārstības, kas palielina uztvērēja trokšņu līmeni un pasliktina signāla īpašības. Lai izvairītos no Ramana šķērštraucējumiem, tad kanālu jaudai ir jābūt tik mazai, lai Ramana pastiprinājums ir nenozīmīgs visā šķiedras garumā. Īpaša uzmanība jāpievērš SRS, ja vairāki pastiprinātāji ir savienoti virknē viens aiz otra. Šie pastiprinātāji pievieno troksni, kas zaudē mazāk no Ramana izkliedes nekā vēlamais signāls. Rezultātā signāla un trokšņa attiecība uztvērēja tālākajā galā pasliktinās [12].

Ramana pastiprinātāji iedalās divos tipos: diskrētie Ramana pastiprinātāji (*angl. lumped Raman amplifier – LRA*) un sadalītie Ramana pastiprinātāji (*angl. distributed Raman amplifier*

- *DRA*). Diskrētie pastiprinātāji ir atsevišķs modulis, kas veic pastiprināšanu kādā līnijas posma beigās. Diskrētajos Ramana pastiprinātājos tiek izmantota 1 vai 2 km gara dispersiju kompensējošā šķiedra (*angl. dispersion compensating fiber – DCF*) vai arī paaugstinātas nelinearitātes šķiedra (*angl. high non-linearity fiber - HNLF*), kas kalpo kā pastiprinājuma vide. Šīs šķiedras ir nepieciešamas, lai samazinātu signāla intensitātes līmeni *SRS* izraisīšanai. Sadalītie Ramana pastiprinātāji ir optiskie pastiprinātāji, kuros kā pastiprinājuma vide tiek izmantota tā pati šķiedra, kura ir izmantota signālu pārraidei. Sadalītos pastiprinātājos pumpēšanas avotu izvieto vai nu līnijas posma beigās, vai līnijas sākumā, vai arī abos galos. Sadalīto Ramana pastiprinājumu pielietošanas gadījumā zudumi tiek kompensēti signālam izplatoties visā līnijā un ierobežo kopējo vājinājumu līnijā, tāpēc uzlabo signāla un trokšņa attiecību, salīdzinot ar diskrētajiem Ramana pastiprinātājiem [46].

Ramana pastiprinātājos tiek izmantotas tieši, pretēji un abpusēji vērstas pumpēšanas shēmas.

Lielākajā daļā šķiedras *SRS* procesa efektivitāte ir zema, kas nozīmē, ka, lai iegūtu signāla pastiprinājumu, ir nepieciešama liela pumpējošā starojuma jauda (parasti virs 1 W). Tādējādi vairumā gadījumu Ramana pastiprinātāji nevar efektīvi konkurēt ar *EDFA* pastiprinātājiem. No otras puses, Ramana pastiprināšana nodrošina divas priekšrocības salīdzinot ar citām pastiprināšanas tehnoloģijām. Pirmā priekšrocība ir tā, ka Ramana pastiprinātāja pastiprināšanas viļņa garuma joslu var pielāgot, mainot pumpēšanas viļņu garumus un tādējādi pastiprināšanu var sasniegt viļņu garumos, ko neatbalsta citas tehnoloģijas. Otrā priekšrocība ir tā, ka pastiprināšanu var sasniegt pašā pārraides šķiedrā. Šajā gadījumā šķiedrā tiek palaista liela pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu signāla pastiprināšanu, kad tas pārvietojas pa šķiedru.

Ramana pastiprinātāju darbību ietekmē daži ierobežojošie faktori. Kā pirmo var izcelt dubulto Releja izkliedi, kuras ietekmē maza daļa gaismas vienmēr tiek izkliedēta atpakaļvirzienā. Gaismas daļa, kura izkliedējas pretēji signāla izplatīšanās virzienam, ir niecīga, tomēr sistēmās ar Ramana pastiprinātājiem tā var tikt pastiprināta. Atpakaļ vērstais starojums dubultās Releja izklijes rezultātā parādīsies arī tiešajā virzienā, un no pastiprināmā signāla puses tas tiek interpretēts kā troksnis. Šīs Releja izklijes radītais troksnis tiek pastiprināts kopā ar signālu un rezultātā var būtiski iespaidot sistēmas darbību [2]. Otrs faktors, kas ietekmē Ramana pastiprinātāju darbību, ir pastiprinājuma atkarība no pastiprināmā signāla polarizācijas. Ramana pastiprinājuma samazināšanās parāda, kad pumpējošais starojums un pastiprināmais starojums ir ortogonāli polarizēti [22]. Šī faktora novēršanai mēdz izmantot divus ortogonāli polarizētus lāzerus.

Ramana pastiprinātāju risinājumos ir nepieciešamība izmantot jaudīgus pumpējošā starojuma avotus, jo Ramana pastiprinātājiem ir zema pastiprināšanas efektivitāte. Tāpēc attīstoties šķiedru optisko pārraides sistēmu tehnoloģijām, optiskā signāla pastiprināšanai, var izstrādāt hibrīdu optiskos pastiprinātājus, kas balstīsies uz Ramana, pusvadītāju vai *EDFA* pastiprinātāju savienojumiem.

1.5. Optisko pastiprinātāju novērtējums, izmantojot Briljuēna izkliedi

Stimulētās Briljuēna izklijes radīto optiskās šķiedras pastiprinājumu var izmantot, lai pastiprinātu vāju signālu, kura frekvence tiek nobīdīta no pumpēšanas frekvences par vērtību,

kas vienāda ar Brilljuēna nobīdi. Brilljuēna izkliede, tāpat kā Ramana izkliede, attēlo fotonu ar noteikto enerģijas līmeni pāriešanu fotonā uz zemāko enerģijas līmeni. Stimulētā Brilljuēna izkliede tiek novērota ar pumpējošā starojuma jaudu mazāku par 10 mW - tas ir nelineārs efekts, kas rodas silīcija dioksīda šķiedrā, kad optiskā viļņa enerģija ar frekvenci, teiksim f_1 , pārvēršas jaunā viļņa enerģijā pie nobīdītas frekvences f_2 . Ja f_1 frekvencē tiek veikta spēcīga pumpēšana, stimulēta Brilljuēna izkliede var pastiprināt vāju ieejas signālu f_2 . Galvenā atšķirība *SBS* un *SRS* gadījumā ir, ka Brilljuēna izkļiedes gadījumā enerģijas pārejā tiek izmantoti akustiskie fononi. Arī *SBS* izkļiedētās gaismas intensitāte eksponenciāli palielinās pēc tam, kad krītošās gaismas intensitāte pārsniedz noteikto vērtību – Brilljuēna sliekšņa vērtību. Abi šie stimulētās izkļiedes procesi ir līdzīgi, bet tomēr tiem ir sekojošas atšķirības:

- *SBS* parādās tikai pretējā virzienā, bet *SRS* var izpausties gan tiešajā, gan pretējā virzienā;
- Izkļiedētai gaismai *SBS* gadījumā frekvenču nobīde ir tikai ap 10-11 GHz. Šī frekvenču nobīde tiek definēta kā Brilljuēna nobīde;
- Brilljuēna pastiprinājuma spektrs ir ļoti šaurs un aizņem frekvenču joslu šaurāku par 100 MHz [2].

Šajos pastiprinātājos tiek izmantoti pusvadītāju lāzeri, lai pumpētu Brilljuēna pastiprinātājus, jo to radītā starojuma frekvenču josla ir daudz mazāka par Brilljuēna pastiprinājuma joslu. Kā jau tika minēts augstāk, tad Brilljuēna pastiprinātāji izmanto pumpējošā starojuma jaudas, kas mazākas par 10 mW un šādi pastiprinātāji spēj nodrošināt 30 dB pastiprinājumu. Brilljuēna pastiprinājuma joslas platums ir ārkārtīgi šaurs (~100 MHz), salīdzinot ar Ramana pastiprinājuma joslas platumu (~5 THz). Tādējādi kanālu intervālam gandrīz precīzi jāsakrīt ar Brilljuēna nobīdi (aptuveni 10 GHz 1,55 μm reģionā). Lai notiktu Brilljuēna pastiprināšanās, diviem kanāliem nepieciešams pretēji izplatīties. Tāpēc optisko signālu pastiprināšanai, Brilljuēna optiskie pastiprinātāji netiek izmantoti šķiedru optikas pārraides sistēmās. Tos var izmantot, piemēram, lai uzlabotu uztvērēja jūtību, selektīvi pastiprinot signāla nesējfrequenci pirms detektēšanas, vai arī kā pārskanojamais šaurjoslas optiskais filtrs kanālu izvēlei blīvai daudzkanālu sistēmai ar dažu desmitu mega bitu sekundē pārraides ātrumu kanālā [2].

1.6. Kombinēto optisko pastiprinātāju novērtējums

WDM pārraides sistēmās tiek izmantoti šādi optisko pastiprinātāju veidi: optiskie pusvadītāju pastiprinātāji (*SOA*), leģētie šķiedru pastiprinātāji (*xDFA*), diskrētie un sadalītie Ramana pastiprinātāji (*LRA* un *DRA*) un parametriskie pastiprinātāji. Katram no šiem pastiprinātāju veidiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Galvenā problēma ar *SOA* ir tā, ka tie rada lielu daudzumu *ASE* un to pastiprinājuma dinamika var izraisīt nopietnus signālu traucējumus. *xDFA* var nodrošināt signāla pastiprināšanu ar ievērojami mazākiem signāla traucējumiem nekā *SOA* gadījumā. Ramana pastiprinātāji var nodrošināt beztrokšņa pastiprināšanu. Šajā gadījumā pastiprināšanas spektru var viegli mainīt, mainot pumpējošo starojumu avotu skaitu un to frekvences. Bet, lai sasniegtu pietiekami augstu pastiprinājuma koeficientu, ir nepieciešams ļoti spēcīgs pumpējošais avots, kura izmantošana nav ekonomiski pamatota [2].

Lai kompensētu trūkumus un apvienotu priekšrocības no dažāda tipa pastiprinātājiem, tie var tikt izmantoti kopā, veidojot hibrīdos/kombinētos pastiprinātājus. Mūsdienu pārraides

sistēmās var izmantot ļoti dažādas šāda veida kombinācijas. Pastiprinātāju kombinētie risinājumi balstās uz dažādu pastiprinājumu kaskādes slēgumu, kas tiek veidoti ar mērķi paplašināt pastiprinājuma spektru vai iegūt lielāku pastiprinājumu pie mazāka ienesto trokšņu daudzuma. Šādu kombinēto pastiprinātāju iegūtais pastiprinājums ir sistēmā izmantoto pastiprinātāju pastiprinājumu summa [47-48].

Optisko pastiprinātāju kombinētie risinājumi iedalās divās grupās:

- Šaurjoslas kombinētie risinājumi (*angl. narrow band hybrid amplifier – NB-HA*). Dažādi pastiprinātāji tiek izmantoti, lai iegūtu lielāku pastiprinājumu pie lielākas optiskā signāls-troksnis attiecības.

- Platjoslas kombinētie risinājumi (*angl. seamless and wideband hybrid amplifier – SWB-HA*). Šajā risinājumā pastiprinātāji tiek izmantoti, lai iegūtu plataku pastiprinājuma spektru kombinācijā ar zemāku ienesto trokšņu daudzumu.

Tipiskais pastiprinājuma spektra platums šaurjoslas kombinēto pastiprinātāju risinājumos ir ap 30-40 nm, bet platjoslas kombinēto pastiprinātāju risinājumos – aptuveni 70 līdz 80 nm [47].

Kombinēto pastiprinātāju risinājumi galvenokārt tiek veidoti izmantojot un apvienojot kaskādes slēgumos Ramana, pusvadītāju un ar retzemju elementiem leģētu šķiedru optisko pastiprinātājus:

➤ **Ramana un EDFA pastiprinātāju kombinācija**

Šīs kombinētais risinājums ir visplašāk izmantojamais, jo Ramana pastiprinājuma spektru var pielāgot, regulējot pumpējošā starojuma jaudu un viļņu garumu. Tādēļ šī īpatnība tiek izmantota, lai palielinātu EDFA joslas platumu.

➤ **Ramana un pusvadītāju pastiprinātāju kombinācija**

Pusvadītāju un Ramana pastiprinātāji var tikt izmantoti jebkurā viļņa garuma joslā, kas mūsdienās tiek pielietotas šķiedru optikas pārraides sistēmās [18]. Pusvadītāju pastiprinātāju gadījumā pastiprināmā josla ir atkarīga no izvēlēta pusvadītāju materiāla un tā īpašībām, bet Ramana pastiprinātāja gadījumā - no pumpējošā lāzera viļņa garuma.

➤ **TDFA un Ramana pastiprinātāju kombinācija**

Kombinētais Ramana un ar tūlīju leģētas šķiedras pastiprinātāju risinājums ir ļoti efektīva pieeja, jo Ramana pastiprinātājs var nodrošināt jebkuru pastiprinājuma joslas platumu, izvēloties atbilstošu pumpējošā starojuma viļņu garumu. Tomēr Ramana pastiprinātāju trūkums ir tāds, ka dubultā Releja izkliede pasliktina pastiprinātos signālus.

➤ **TDFA un EDFA pastiprinātāju kombinācija**

Kombinētie pastiprinātāji, kas sastāv no visiem retzemju elementu leģētu šķiedru pastiprinātājiem ir vienkāršāk izmantojami nekā Ramana pastiprinātāji, jo tie nesatur dubulto Releja izkliedi. Šiem kombinētiem pastiprinātājiem ir samērā viegla pastiprinājuma spektra kontrole. Šie pastiprinātāji ar atšķirīgām pastiprināšanas joslas platumiem ir radījuši lielu interesi, lai palielināt joslas platumu C un L-joslās tālsakaru pārraides sistēmās. Šādos kombinēto pastiprinātāju risinājumos ir iegūts pastiprinājums aptuveni no 20 līdz 25 dB un trokšņu rādītājs – mazāks par 7dB [49].

Pieejamā informācija par EDFA-SOA pastiprinātāja izmantošanu nav pārāk izplatīta. Tas ir skaidrojams ar to, ka SOA ir raksturīgs liels ienesto ASE trokšņu daudzums, savukārt EDFA pastiprinājuma spektram ir raksturīga noteikta viļņa garuma atkarība. Līdz ar to šādas kombinācijas veidošana dos sliktākus rezultātus.

1.7. Parametrisko optisko pastiprinātāju novērtējums

Pēdējo gadu desmitu laikā optisko šķiedru pārraides sistēmu caurlaidspēja nepārtraukti palielinās. Viens no visizplatītākajiem veidiem, kā palielināt pārraides sistēmu caurlaidību ar viļņgarumdales multipleksēšanu, ir kanālu skaita palielināšana. Un šādi pieejai nepieciešams paplašināt viļņa garuma joslu, ko izmanto pārraidīšanai [50].

Erbija leģētu šķiedru pastiprinātāji ir tāda veida pastiprinātāji, ko parasti izmanto *WDM* sistēmās un spēj nodrošināt pastiprināšanu ierobežotā viļņu garumu joslā - parasti no 1530 nm līdz 1565 nm [20]. Tāpēc kanālu skaita palielināšanai *WDM* sistēmās ir nepieciešamība meklēt alternatīvus signāla pastiprināšanas risinājumus. Šķiedru optiskie parametriskie pastiprinātāji (*FOPA*) ir daudzsoļi kandidāti parasto *EDFA* nomainīšanai, jo šāda veida pastiprinātāji spēj nodrošināt vienmērīgu pastiprinājumu platā viļņa garuma joslā [51–52].

Šķiedru optiskie parametriskie pastiprinātāji ir daudzfunkcionālas ierīces, kuras tiek plaši izmantotas, īpaši telekomunikācijās, kur tās ir izmantotas kā impulsa avoti, demultipleksori, priekšpastiprinātāji, viļņu garuma pārveidotāji [53]. *FOPA* var nodrošināt ļoti lielu pastiprinājumu plašā viļņa garuma joslā. Salīdzinot ar citiem diskrētiem pastiprinātājiem, tad *FOPA* pie optimizētas konfigurācijas rada ļoti mazu trokšņa līmeni. Maksimālais pastiprinājums, kas sasniegts ar *FOPA* pastiprinātājiem, izmantojot *HNL* šķiedras, ir 70 dB [54]. *FOPA* pastiprinājuma joslas platums var būt lielāks par 100 nm. Parametriskiem pastiprinātājiem ir nepieciešamas lielas pumpējošā starojuma jaudas (tipiski > 1W), kuru ir iespējams samazināt, izmantojot augstas nelinearitātes šķiedras (*HNL*). Pastiprinātāji ģenerē arī fāžu signālu, kas var būt noderīgs dispersijas kompensācijai [2].

Parametrisko pastiprināšanu (balstoties uz kubisko nelinearitāti) optisko šķiedru ierīcēs var aprakstīt kā kvantu-mehānisku procesu, kur notiek divu pumpējošo fotonu pārveidošanu signāla fotonos un tukšgaitas vilnī. Lai šis pastiprināšanas process notiktu, tad nepieciešama enerģijas taupīšanas un mijiedarbīgo fotonu impulsu izpilde. Optisko parametrisko pastiprinātāju darbība balstās uz četru viļņu mijiedarbes (*angl. four wave mixing – FWM*) efekta pastiprinājuma vidē. *FOPA* gadījumā par pastiprinājuma vidi kalpo optiskās šķiedras. Četru viļņu mijiedarbe ir viens no nelineārajiem optiskajiem efektiem, kas balstās uz to, ka viļņi, kas izplatās nelineārajā vidē, papildus lineārajai polarizējošai videi, kas ir proporcionāla pirmās pakāpes elektriskā lauka stiprumam, izraisa polarizāciju, kas ir proporcionāla otrajai, trešajai utt. pakāpei. Parametriskā pastiprināšana ir saistīta ar trešo nelinearitātes pakāpi. Mijiedarbojoties trīs viļņiem ar frekvencē, w_1, w_2, w_3 tiek uzģenerēts ceturtais vilnis ar frekvenci, kuru var aprēķināt:

$$w_4 = w_1 + w_2 - w_3. \quad (1.5)$$

Daļēji deģenerēto četru viļņu mijiedarbes (*angl. partially degenerate four-wave mixing - PDFWM*) gadījumā, pirmo divu viļņu lomu izpilda pumpēšanas vilnis w_p , tāpēc trešais vilnis ir signāla vilnis w_s , kura pastiprināšanas procesā rodas tā sauktais tukšgaitas vilnis w_l . Šajā gadījumā pārveidojot 1.5 vienādojumu:

$$w_s + w_l = 2w_p. \quad (1.6)$$

Parametriskie pastiprinātāji var būt balstīti uz deģenerēto *FWM* ar vienu pumpējošo starojuma avotu un uz nedeģenerēto *FWM* ar diviem pumpējošo starojumu avotiem [55]. *FOPA*

pastiprinājuma joslas platums ir atkarīgs no vides nelinearitātes parametra, pumpējošā starojuma jaudas un pastiprinājuma vides (*HNLF* šķiedras) garuma. Tāpēc palielinot *HNLF* šķiedras garumu, var iegūt lielāku pastiprinājumu, bet pastiprinājuma spektra platums samazināsies (jo garāka šķiedra, jo vairāk ir uzkrāto fāžu nesaskaņotību). Veidojot *FOPA* pastiprinātājus, nevajag izvēlēties pārāk garu *HNLF* šķiedru, jo ir nepieciešams iegūt pēc iespējas platāku pastiprinājuma spektru. Lai pastiprinājums tiktu uzturēts attiecīgajā līmenī un nodrošinātu platu pastiprinājuma spektru, jāizvēlas īsāku šķiedru, jāpalielina pumpējošā starojuma jauda vai arī jāizvēlas tāda šķiedra, kur ir augstāks nelinearitātes koeficients. Mainot pumpējošā starojuma jaudu, nepieciešams koriģēt arī viļņa garumu [55].

Parametriskos pastiprinātājus var vienlaicīgi izmantot gan akumulētās hromatiskās dispersijas kompensēšanai, gan pastiprināšanai [56]. Kā jau tika minēts augstāk, tad optiskajiem parametriskajiem pastiprinātājiem piemīt daudz priekšrocību: zems trokšņu faktors, piemīt signāla formas atjaunošanas funkcija, augsts pastiprinājuma koeficients (līdz 50 dB), raksturīgas lielas izejas jaudas (30–70 W). Neskatoties uz šīm priekšrocībām ir daži faktori, kas apgrūtina parametrisko pastiprinātāju attīstību un ieviešanu reālajos darba apstākļos. Piemēram, stimulētā Briljuēna izkliede, kas stipri ierobežo maksimāli pieļaujamo optiskās jaudas līmeni optiskajā šķiedrā; pastiprinājuma polarizācijas atkarība; stingri jākontrolē optiskās šķiedras garums; pumpējošā starojuma amplitūdas fluktuācijas, kas tiek pārnestas arī uz pastiprināmo signālu; kā arī nepieciešamība nodrošināt fāzes saskaņošanas nosacījumu un kontrolēt tā izpildīšanos [57].

1.8. Kopīgi leģētu šķiedru un apvalka pumpēšanas optisko pastiprinātāju novērtējums

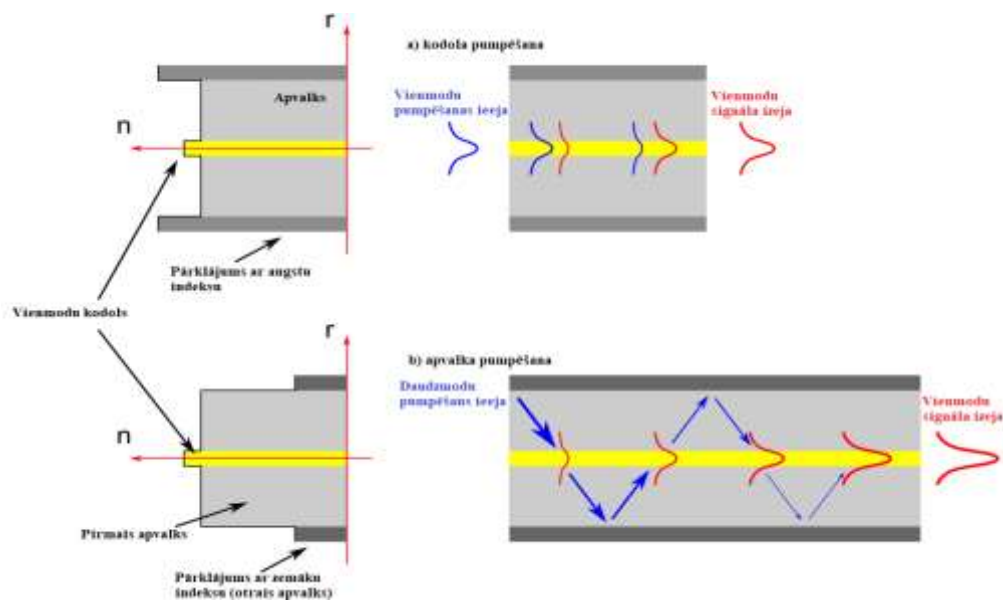
Šķiedru optisko pastiprinātāju aktualitāte attīstās un tas ir saistīts ar optisko pārraides sistēmu attīstību, jo palielinās pārraidīto datu apjoms, aug galalietotāju skaits, protams palielinās jauni un uzlaboti esošie pakalpojumi. Tāpēc ir nepieciešamība pēc lielākiem datu pārraides ātrumiem, lai nodrošinātu informācijas pārraidi reālā laikā. Tas rada jaunus izaicinājumus šķiedru optiskajās sakaru sistēmās, kur viena no tām ir optisko signālu pastiprināšana. Optiskie pastiprinātāji ir aktuāli arī signālu apstrādes metodēs, kuru pamatā ir nelineāru optisko efektu izmantošana. Tāpēc ir nepieciešamība pētīt jaunas, alternatīvas tehnoloģijas šķiedru optisko pastiprinātāju jomā.

Šķiedru optiskie pastiprinātāji, kas balstās uz vienmodas šķiedru (*SMF*), ir samērā ierobežoti pēc izejas jaudas, jo šādā šķiedrā ir grūti ievadīt lielu pumpēšanas jaudu. Lai šo problēmu atrisinātu, var izmantot dubultapvalka šķiedras un apvalka pumpēšanas tehnikas apvienojuma pielietošanu pastiprinātājos.

Apvalka pumpēšana, tā vietā, lai palaistu pumpēšanas gaismu šķiedras kodolā, lieljaudas pumpējošais starojums tiek palaists apvalkā ar daudz lielāku pēc izmēra un skaitliskās apertūras. Kad pumpēšanas gaisma izplatās daudzmodas šķiedru apvalkā, to pakāpeniski absorbē leģēto šķiedru kodols. Pēc pastiprināšanas process ir tāds pats kā kodola pumpēšanas gadījumā. Pumpēšanas starojuma absorbciju var uzlabot izmantojot dažādus šķiedru apvalka profilus, kas palielina apvalka režīma daļu, kas pārklājas ar leģētu kodolu. Pumpēšanas absorbcijas efektivitāti var palielināt arī izmantojot periodisku vai kvaziperiodisku leģētu šķiedru liekšanu, kas izraisa nepārtrauktu modu sajaukšanos. Tā rezultātā notiek apvalka modas

kodēšana un virzība uz aktīvo kodolu.

Optiskajos pastiprinātājos tiek izmantotas divu veidu šķiedru pumpēšanas shēmas: kodola pumpēšana un apvalka pumpēšana. 1.11. att. shematiski attēlotas abas šķiedru pumpēšanas shēmas.



1.11. att. Kodola (a) un apvalka pumpēšanas (b) shēmas [58].

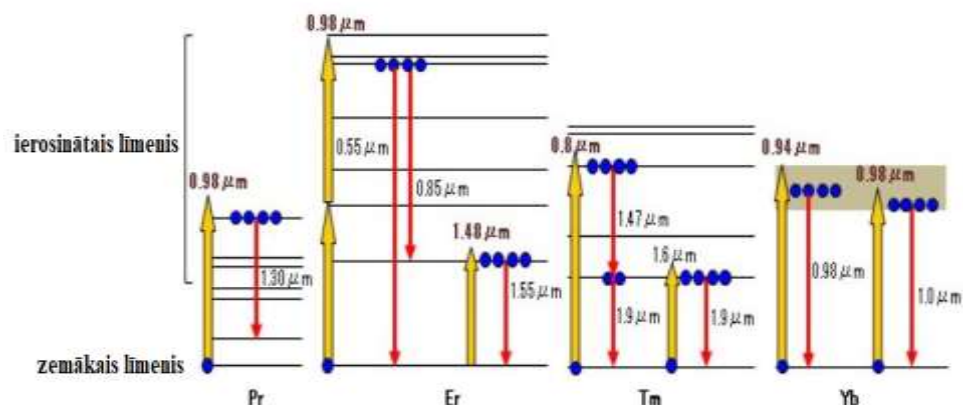
Šķiedras kodola pumpēšanas shēmā - gaismas pumpēšanas avots ir vienmodas un tiek palaists vienmodas kodolā signāla pastiprināšanai, un pastiprinātais signāls arī ir vienmodas. Polimēra pārklājuma atstarošanās koeficients ap apvalku ir augstāks nekā apvalkam, lai apvalkā netiktu pieļauta gaismas izplatīšanās. Šķiedras apvalka pumpēšanas shēmā - gaismas pumpēšanas avots ir daudzmodu un tiek palaists visā pirmajā apvalkā. Pirmo apvalku papildus ieskauj otrs apvalks, kuram ir zemāks atstarošanās koeficients. Tas ir nepieciešams, lai pumpēšanas avots, kas palaists pirmajā apvalkā darbotos tikai iekšējai atstarošanai. Pumpēšanas avots mijiedarbojas ar signālu, kad gaisma šķērso kodolu un signāls saglabā savu vienveidīgumu, jo kodols ir vienmodas. Šķiedra, kas tiek izmantota apvalka pumpēšanai, bieži tiek saukta par dubultapvalka šķiedru, jo tai ir divi apvalki (pirmais un otrs apvalks). Apvalka pumpētas un dubultapvalka šķiedras nodrošina augstāku efektivitāti un augstāku izejas jaudu, salīdzinot ar kodola pumpētu aktīvo šķiedru [58].

Tas, kas ir atzīts par aktuālu legētu šķiedru pastiprinātāju jomā, ir dažādu retzemju elementu legējuma vienlaicīga izmantošana vienā un tajā pašā šķiedrā (kopīgi legētās šķiedras), kā arī apvalka pumpēšana tehnika. Šie risinājumi lielā mērā tiek attiecināti uz daudzmodu šķiedru pastiprinātāju pielietojumu [59-60]. Kopīgi legētu šķiedru balstīti pastiprinātāji ir ļoti daudzsoļi risinājumi. Optiskā signāla pastiprināšana ārpus C un L-joslām, izmantojot legētu šķiedru pastiprinātājus, ir iespējama ar citiem trīsvērtīgiem retzemju elementiem (iterbiju, tūliju, neodīmu, holmiju utt.) un to kombinācijām. Tomēr retzemju legētu šķiedru izstarojuma viļņu garumi ir atkarīgi arī no stikla, ne tikai no paša retzemju elementa. Silikāta stikls ir vispiemērotākais stikls mehāniskās un apkārtējās vides stabilitātes ziņā, kaut arī dažus no emisijas viļņu garumiem nevar sasniegt, izmantojot silīcija dioksīda šķiedru. Piemēram, pastiprināšana šādos viļņu garumos nenotiek, izmantojot silikāta šķiedru, un tā vietā ir nepieciešama fluorīdu šķiedra [61]:

- 1,3 μm Pr (prazeodīms);

- 1,45 μm tūlijam;
- 0,85 μm Erbījam.

Tas attēlots zemāk, 1.12. att. un 1.1. tab. apkopoti dažādu retzemju elementu emisijas viļņa garumi.



1.12. att. Dažādu retzemju elementu enerģijas diagramma un pumpēšanas/emisijas viļņa garumi (bultiņa uz augšu: pumpēšana, bultiņa uz leju: emisija) [61].

1.1. tabula

Parastie lāzera aktīvie joni un stikls, kā arī svarīgs emisijas viļņa garums [62]

Retzemju elements	Leģējamās optiskās šķiedras materiāls	Emisijas viļņa garums
Neodīms (Nd ³⁺)	Silikāta un fosfāta stikls	0.9 – 0.95 μm 1.03 – 1.1 μm 1.32 – 1.35 μm
Iterbijs (Yb ³⁺)	Silikāta stikls	1.0 – 1.1 μm
Erbījs (Er ³⁺)	Silikāta, fosfāta un fluorīda stikls	1.5 – 1.6 μm 2.7 μm 0.55 μm
Tūlijs (Tm ³⁺)	Silikāta, germanīta un fluorīda stikls	1.7 – 2.1 μm 1.45 – 1.53 μm 0.48 μm 0.8 μm
Prazeodīms (Pr ³⁺)	Silikāta un fosfāta stikls	1.3 μm 0.6 μm 0.52 μm 0.49 μm
Holmijs (Ho ³⁺)	Silikāta un fluorcirkonāta stikls	2.1 μm 2.9 μm

Viens no zināmākajiem risinājumiem pastiprināšanai S-joslā (1450-1530 nm), ir izmantot ar tūliju leģētās šķiedras [63]. Galvenā problēma saistībā ar tūliju ir tāda, ka pastiprināšana balstās uz četrām līmeņu enerģijas pārejām, kur augšējā ierosinātā enerģijas līmeņa 3H₄ ilgums (1,23 ms) ir īsāks nekā apakšējā 3F₄ līmeni (10,8 ms). Tāpēc ir grūti izveidot inverso (apgriezto)

līmeņu apdzīvotību starp 3H4 un 3F4 līmeņiem, izmantojot pumpēšanas tikai ar vienu viļņa garumu. Ir jāizmanto dažādas pumpēšanas shēmas (800, 1050 un 1400 nm), lai uzlabotu jaudas pārejas efektivitāti [64].

Pastiprinātāji, kas veidoti uz kombinētā leģējuma šķiedru bāzes ir ļoti perspektīvs risinājums, piemēram, erbija kombinācija ar iterbiju (*Er/Yb* šķiedra). Iterbijam ir daudz plašāks absorbcijas spektrs (~200 nm pie 980 nm). Tātad ir plašāks izmantojamo pumpēšanas viļņu garums (915, 975, 1060 nm). *Er/Yb* kopīgi leģētā šķiedra nerada tik plakānu pastiprinājuma spektru kā *EDF* gadījumā. Tomēr *EDF* un *Er/Yb* šķiedru kombinācija divpakāpju pastiprinātāja konfigurācijā ar kopīgi leģētu šķiedru otrajā posmā samazina spektrālo ierobežojumu un to varētu izmantot *WDM* sistēmās [65]. Tiek pētīti arī citi kopīgi leģēti risinājumi, piemēram, erbija un tūlija kombinācija [66] un citi.

1.9. Promocijas darbā paveiktā apkopojums

Balstoties uz aprakstīto informāciju šajā nodaļā un optisko šķiedru pastiprinātāju attīstības virzieniem, tika izvirzīts **promocijas darba mērķis**:

Izpētīt un novērtēt optisko pastiprinātāju darbību *WDM* sakaru sistēmās, un datorsimulācijas programmā izstrādāt jauna tipa *EYDFA* optiskās ierīces modeli ar apvalka pumpēšanas tehnoloģiju.

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

1- Analizēt tehnisko un zinātnisko literatūru par esošo optisko pastiprinātāju darbību *WDM* sakaru sistēmās.

2- Izpētīt un novērtēt *EDFA* optiskā pastiprinātāja veiktspēju atkarībā no pastiprinātāja izvietojuma optiskajā līnijā, mainot starpkanālu intervālu sakaru sistēmā: 37,5 GHz, 50 GHz un 100 GHz un mainot pastiprinājuma apgabala diapazonu: 75 km, 100 km un 150 km.

3- Novērtēt 16 kanālu optiskās *WDM-PON* piekļuves sistēmas veiktspēju ar platjoslas *ASE* gaismas avotu un *DCM* moduli.

4- Novērtēt kombinētās sakaru sistēmas realizāciju 16 kanālu *WDM-PON* sistēmā, pielietojot kombinētos modulācijas formātus un kombinētos datu pārraides ātrumus.

5- Novērtēt diskreto un sadalīto Ramana pastiprinātāju veiktspēju.

6- Novērtēt kombinēto Ramana-*EDFA*, Ramana-*SOA* un Ramana-*FOPA* pastiprinātāju darbību *WDM* pārraides sistēmā.

7- Izstrādāt *EYDFA* šķiedru optiskā pastiprinātāja modeli datorsimulācijas programmā un novērtēt apvalka pumpēšanas tehnoloģijas pielietojumu signāla pastiprināšanai C-joslā.

Pētījumu metodika:

Promocijas darbā problēmu analīzei un izvirzīto uzdevumu īstenošanai izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentālie mērījumi. Skaitliskās simulācijas veiktas pielietojot šķiedru optisko sistēmu simulācijas programmatūru (*Rsoft OptSim* un *VPIphotonics Design Suite*). Skaitlisko simulāciju rezultāti iegūti izmantojot nelineāro Šrēdingera vienādojumu, kā arī tiešo un inverso diskreto ātro Furjē transformāciju, kā arī Monte Karlo metodi bitu kļūdu attiecību (BER) novērtēšanai. Optisko pastiprinātāju konfigurēšanai un parametru novērtēšanai iegūtas un izmantotas optiskās jaudas vērtības, jaudas spektrālie blīvumi un acu diagrammas, kā arī bitu kļūdu attiecības vērtības. *WDM*

pārraides sistēmu kvalitātes novērtēšanai izmantota visaugstākā BER starp visiem kanāliem (sistēmas sliktākais kanāls). Darbā aprakstītie zinātniskie eksperimenti realizēti RTU *ComTech* pētniecības centrā.

Promocijas darba jaunieguvumi:

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

Promocijas darba izstrādes laikā iegūti šādi galvenie secinājumi:

1. Pārraides sistēmās ar *EDFA* pastiprinātāju, kur kanālu intervāls ir zem 100 GHz, ir nepieciešama pumpēšanas jauda virs 60 mW, lai nodrošinātu atbilstošu pastiprināmā signāla kvalitāti un BER vērtības zem noteiktā līmeņa 10^{-9} . Ja intervāls ir zem 50 GHz, tad blakus kanālu spektru pārklāšanās ir neizbēgama un jaudas soda vērtība ir lielāka kā 0,20 dB.
2. Sistēmās ar vairākiem *EDFA* pastiprināšanas posmiem, optimālākais no enerģijas patēriņa viedokļa, ir sistēma ar 3 *EDFA* un 100 km pastiprināšanas diapazonu, jo kopējā sistēmas pumpēšanas jauda ir mazāka (105 mW) un pietiek ar 24 m *EDF* šķiedras, lai nodrošinātu vajadzīgo signāla kvalitāti un sistēmas *BER* būtu zem 10^{-9} . Jaudas sods *WDM* sistēmai ar 3 *EDFA* pastiprinātājiem attiecīgā pret sistēmu bez pastiprināšanas ir tikai 0,32 dB.
3. Pielietojot tikai vienu platjoslas *ASE* gaismas avotu visiem lietotājiem un *DCM* moduli dispersijas kompensācijai, pētāmā 16 kanālu *WDM* optiskās piekļuves sistēma nodrošināja datu pārraidi vairāk kā 20 km garā līnijā ar augstu sistēmas veiktspēju ar *BER* 10^{-10} . Šāds risinājums ir labs nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem.
4. Kombinētās konfigurācijas ietekmes novērtējums uz *WDM-PON* sistēmas spektrālo efektivitāti atklāja, ka *SE* efektivitāti var palielināt, optimizējot kanālu intervālu. Sistēmai ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMF*, *SE* (0,62 (bit/s)/Hz) ir par 6,2 reizes lielāka nekā tipiskai 100 GHz 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmai. *WDM-PON* sistēmai ar *MMF* un *MLR* spektrālā efektivitāte ir 0,27 (bit/s)/Hz un ir par 2,7 reizes lielāka nekā tipiskai sistēmai.
5. Diskrētā un sadalītā Ramana pastiprinātāju novietojot tālāk no raidītāja bloka (125 km), ir nepieciešama par 3% mazāka pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu pastiprināmā signāla kvalitāti zem *BER* 10^{-9} un arī kanālu pastiprinājums ir virs 21,5 dB. Diskrētā Ramana pastiprinātāja gadījumā pumpēšanas jauda (līdz 500 mW) ir vidēji par 50% mazāka nekā sadalītā Ramana pastiprinātāja gadījumā (minimālās pumpēšanas jauda ir 905 – 1020 mW atkarībā no izvietošanas pārraides līnijā).
6. Kombinētā Ramana-*FOPA* datormodeļa pastiprinājums ir vienmērīgāks un sasniedza 34,7 dB 16 kanālu 40 Gbit/s *WDM* sistēmā. Kombinētā pastiprinātāja pastiprinājums ir par 30% (8,2 dB) lielāks nekā Ramana un *FOPA* pastiprinājumu summa. Ramana-*FOPA* –3 dB pastiprināšanas joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā 682 mW *FOPA* gadījumā un 0,20 THz platāks nekā salīdzinot ar optimizēto 660 mW *FOPA*, kas

izskaidrojams ar tiešu signāla pastiprināšanu caur Ramana pumpēšanas avotu.

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

Darba praktiskā vērtība:

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

- Promocijas darba rezultāti izmantoti zinātniskās pētniecības projektu realizācijai:

1. ERAF projekts “Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde” (aktivitāte “Atbalsts zinātnei un pētniecībai”), Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/002.

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

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

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

Darbā izvirzītās aizstāvamās tēzes:

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

Promocijas darbā apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti un definēti iespējamie **turpmākie pētījumu virzieni:**

1. Iegūtie rezultāti par kombinēto Ramana-*FOPA* un *EYDFA* pastiprinātāju var tikt pielietoti esošo optisko piekļuves pārraides sistēmu uzlabošanai, kā arī jaunu sistēmu ieviešanai.
2. Matemātiskās modelēšanas rezultātā atklātie raksturlielumi tiks pielietoti, lai eksperimentāli izstrādāt *EYDFA* un apvalka pumpēšanas pastiprinātāja prototipu.

Promocijas darba apjoms ir 126 lappuses. Darbs sastāv no sešām nodaļām, literatūras saraksta un 1 pielikuma.

Ievadā tika pamatota veikto pētījumu aktualitāte un noteikti promocijas darba pētījumu virzieni.

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

Darba otrajā nodaļā ar *OptSim* simulācijas programmatūru [175] tika pētīta erbija legētas šķiedras optiskā pastiprinātāja veiktspēja *WDM* sakaru sistēmā. Pētījuma mērķis novērtēt optiskā signāla kvalitāti atkarībā no *EDFA* ekspluatācijas apstākļiem: pastiprinājuma izvietojuma pārraides līnijā, kanālu intervāla un pastiprināšanas diapazona garuma.

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

Darba ceturtajā nodaļā tika pētīti sadalītā un diskrētā Ramana pastiprinātāju veiktspēja *WDM* sakaru sistēmās. Mērķis atrast minimālās pumpēšanas starojuma jaudas, kas visos sistēmas kanālos nodrošinātu noteiktās sistēmas BER vērtības.

Darba piektajā nodaļā pētīti kombinētie optisko pastiprinātāju risinājumi *WDM* pārraides sistēmās. Pētītas *EDFA*, *SOA*, Ramana un *FOPA* pastiprinātāju kombinācijas. Kombinētā Ramana-*EDFA* pastiprinātājs izveidots, lai ne tikai izlīdzinātu *EDFA* pastiprinājuma spektru, bet arī palielināt pārraides līnijas garumu. Bet Ramana-*SOA* kombinētais risinājums ļauj samazināt *SOA* pastiprinātāja radītos signāla kropļojumus. Kombinētais Ramana-*FOPA* pastiprinātājs ir piemērots *WDM* sistēmās kā priekšpastiprinātājs un sistēmas kanālu pastiprina vienādi.

Darba sestās nodaļas mērķis ir attīstīt energoefektīvu un rentablu legētu optisko šķiedru pastiprinātāju prototipu, kas piemērots telekomunikāciju lietojumiem. Paredzētā pielietojumu joma ir *WDM* optiskās pārraides sistēmas, metro piekļuves tīkli un hibrīdi pasīvie optiskie tīkli paplašinātai sasniedzamībai. Visos gadījumos galvenā interese ir jaudas pastiprinātāja konfigurācijai. Pamatojoties uz iepriekš minēto, izvēlēta pastiprinātāja konfigurācija balstīsies uz apvalka pumpēšanas principu. Šī metode dod vairākas priekšrocības salīdzinot ar tradicionālo kodola pumpēšanu.

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

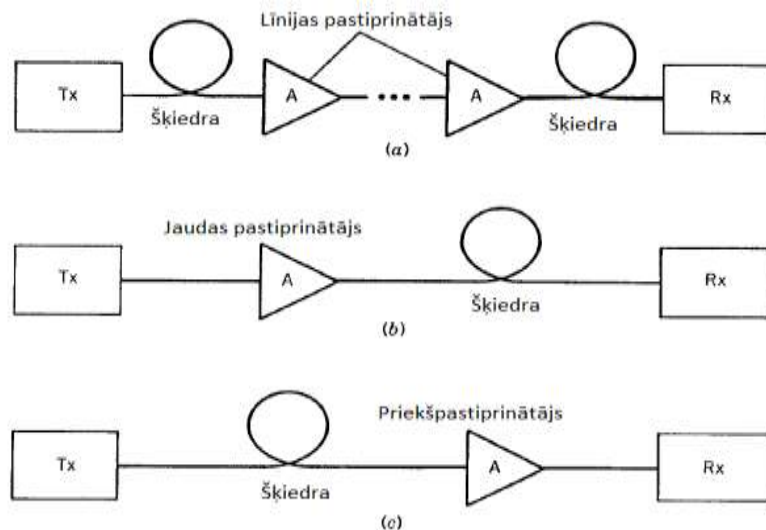
2. EDFA PASTIPINĀTĀJA VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS ATKARĪBĀ NO TĀ EKSPLOATĀCIJAS APSTĀKĻIEM

Šķiedru optisko sakaru sistēmu kapacitāte pēdējos gados piedzīvo strauju izaugsmi, jo ir liels pieprasījums datu pārraidei [1]. Kad notiek pārraide lielos attālumos, optiskais signāls ir ļoti novājināts, tāpēc, lai atjaunotu optiskās jaudas budžetu ir nepieciešams realizēt optiskā signāla pastiprināšanu. Izvēloties signāla pastiprināšanas metodes viļņgarumdales blīvēšanas (*WDM*) sistēmai, priekšroka tiek dota erbija leģētas šķiedras pastiprinātājiem (*EDFA*). Galvenie iemesli šādai *EDFA* pastiprinātāju popularitātei ir tas, ka šī tipa pastiprinātāji ir samērā viegli realizējami un to izmantošana ir ekonomiski izdevīga. *EDFA* pastiprinātāji ļauj pastiprināt optisko signālu, nepārveidojot to elektriskajā signālā un otrādi. Šie pastiprinātāji ir ar zemu trokšņa līmeni, raksturīga arī augsta energoefektivitāte ($> 50\%$), gandrīz nejutīgi pret signāla polarizāciju un var būt samērā vienkārši realizējami [67, 68]. Sistēmās ar *EDFA* ir nepieciešams piemeklēt tādu pastiprinātāju konfigurāciju, kura nodrošinātu labāko pārraidāmo signālu kvalitāti, nepasliktinātu kopējo sistēmas darbību un ļautu sasniegt pēc iespējas lielāku pārraides attālumu. *EDFA* pastiprinātāju veiktspēja atkarīga no tādiem pastiprinātāja parametriem kā ieejas signāla optiskās jaudas, pumpējošā starojuma jaudas, viļņa garuma un pumpēšanas izplatīšanās virziena, *EDF* šķiedras garuma un erbija jonu populācijas inversijas sasniedzamā līmeņa. Šie pastiprinātāja parametri ietekmē *EDFA* pastiprināšanas līmeni, pastiprinājuma spektra formu un saražoto trokšņa daudzumu [20, 69].

2.1. EDFA pastiprinātāja veiktspējas izpēte, mainot pastiprinātāja izvietojumu pārraides sistēmā

Labi zināms, ka pēc katriem 50 līdz 100 km šķiedru optiskajā sistēmā notiek optiskā signāla pavājināšanās uz 10–20 dB, kurus nepieciešams atjaunot. Optiskie pastiprinātāji ir tīkla elementi, kuru darbība var nopietni ietekmēt visas pārraides sistēmas darbību. Daudzi faktori var ietekmēt optiskā pastiprinātāja darbību, taču visnozīmīgākais no tiem ir ieejas signāla jauda, ko var mainīt, mainot pastiprinātāja izvietojumu optiskajā līnijā. Pēdējos gados pētījumi tiek koncentrēti uz iespējām palielināt sakaru sistēmas ātrumu optiskajos tīklos. To var sasniegt palielinot kanālu skaitu vai palielinot pārraides ātrumu katrā kanālā. Abas iespējas rada stingrākas prasības attiecībā uz tīkla elementiem. Tas attiecas arī uz optiskajiem pastiprinātājiem, jo tie ir galvenie trokšņa avoti optiskās pārraides sistēmās [70]. Tāpēc ir jāoptimizē pastiprinātāju parametri un to novietojums.

Optiskie pastiprinātāji var kalpot vairākiem mērķiem optisko šķiedru sakaru sistēmu projektēšanā. *EDFA* pastiprinātāji var būt pielietoti dažādos veidos un izvietoti dažādi optiskajā līnijā. Katram izvietojumam ir atšķirīgas parametru prasības. 2.1. att. ir parādīti izplatītākie pastiprinātāju izvietojumi sistēmā.



2.1. att. Trīs optisko pastiprinātāju izvietojami sakaru sistēmās: (a) līnijas pastiprinātājs; (b) jaudas pastiprinātājs; (c) priekšpastiprinātājs.

➤ **Līnijas pastiprinātājs** (angl. *in-line amplifier*). Izmantojot *EDFA* kā līnijas pastiprinātāju, tas aizstāj reģeneratorus garajās ŠOPS. Tie tiek izvietoti līnijas starpposmos (30 - 100 km), lai kompensētu signāla vājinājumu, kas rodas signālam izplatoties optiskajā šķiedrā, kā arī optisko sazarotāju, atzarotāju, *WDM* multipleksoru u.c. elementu dēļ, kuri vājina optisko signālu. Tādam pastiprinātājam ir nepieciešams nodrošināt pietiekami augstu pastiprinājumu (parasti pastiprinājums ir 18-23 dB robežās) un labus trokšņu rādītājus. *WDM* sakaru sistēmās šādiem pastiprinātājiem ir jānodrošina pastiprinājuma līknes vienmērīgums visā darbības diapazonā. Tas ir īpaši svarīgi, kad līnijā ir vairāki pastiprinātāji, jo bez vienmērīga pastiprinājuma rodas ievērojamas kanālu līmeņu atšķirības, kas ietekmē sekmīgu sistēmas darbību. Vissvarīgākais tālsakaru sistēmu pielietojums ir pastiprinātāju izmantošana kā līnijas pastiprinātāju, izmantojot optiskās līnijas starpposmos. Optisko pastiprinātāju izmantošana ir īpaši svarīga *WDM* sistēmās, jo visus kanālus var pastiprināt vienlaicīgi.

➤ **Jaudas pastiprinātājs** (angl. *booster*). *EDFA* ir izvietots uzreiz pēc optiskā raidītāja un paredzēts, lai vēl vairāk pastiprinātu signālu līdz līmenim, ko nevar sasniegt ar lāzerdiodes palīdzību. Tāds pastiprinātājs ir īpaši noderīgs, kad tiek izmantota ārējā modulācija ar lieliem ienestiem zudumiem (3 līdz 10 dB). Pastiprinātāja izejas jauda var būt ap 100 mW liela. Trokšņa līmenim nav īpaši lielas nozīmes, jo tas ir ievērojami zemāks par ieejas signāla līmeni.

➤ **Priekšpastiprinātājs** (angl. *pre-amplifier*). *EDFA* tiek izvietots tieši pirms optiskā uztvērēja (*WDM* sistēmas gadījumā pirms demultipleksora), lai uzlabotu uztvērēja jūtību. Pastiprinājums var būt 15-20 dB robežās. Būtiska nozīme ir zēmam pastiprinātāja trokšņa līmenim, jo pastiprinātāja ieejā nonāk optiskais signāls ar ļoti zemu jaudas līmeni. Lai nodrošinātu zemu trokšņa līmeni, ir nepieciešams uzturēt augstu populācijas inversijas līmeni jau pašā pastiprinātāja sākumā. [2, 71].

EDFA optisko pastiprinātāju parametru salīdzinājums atkarībā no to izvietošanas optiskajā līnijā ir apskatāms 2.1. tab.

EDFA pielietojuma veidu parametru salīdzinājums [72]

EDFA parametrs	Priekš-pastiprinātājs	Līnijas pastiprinātājs	Jaudas pastiprinātājs
Pastiprinājuma koeficients	augsts	vidējs	zems
Trokšņu rādītājs	zems	vidējs	zems
Piesātinājuma jauda	zema	vidēja	augsta
Pastiprinājuma darbības zona	šaura	plata	plata
Pastiprinājuma spektra vienmērīgums	netiek norādīts	augsta linearitāte	augsta linearitāte

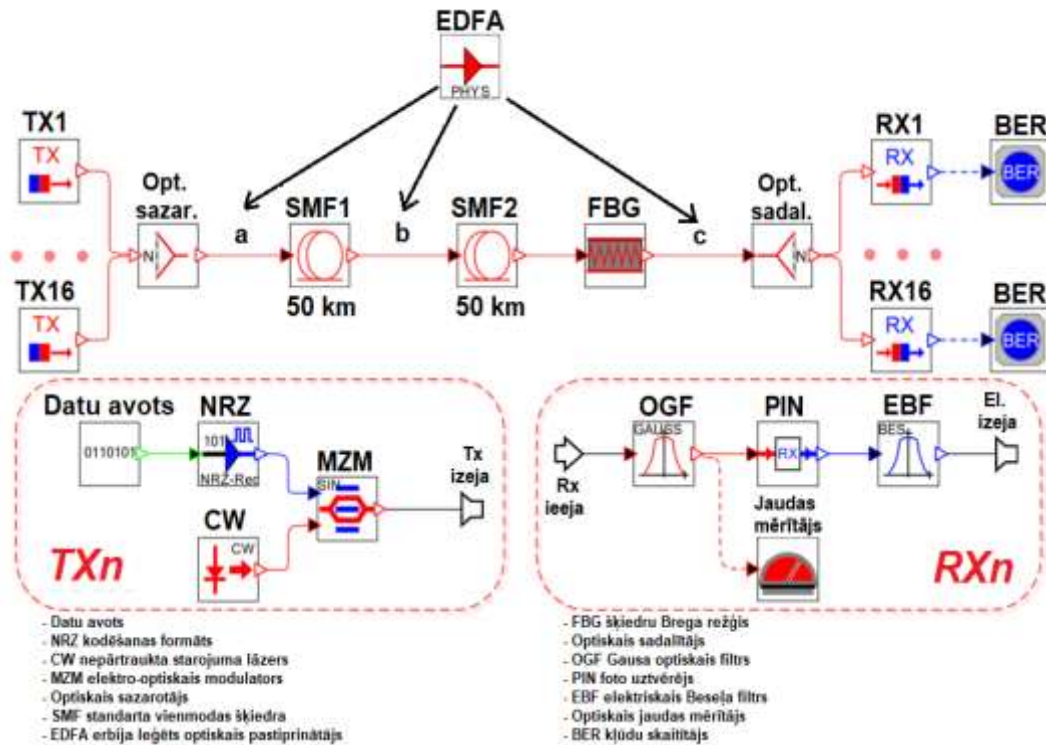
Lai izpētītu *EDFA* optisko pastiprinātāju pozicionēšanas ietekmi uz pastiprinātā signāla kvalitāti blīvas viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmās (*DWDM*), tika pielietoti augstāk aprakstītie pastiprinātāju izvietojumi optiskajā līnijā. Visos trīs gadījumos tika iegūtas tādas *EDFA* pastiprinātāja konfigurācijas, kas varētu nodrošināt vajadzīgo signāla kvalitāti, izmantojot pēc iespējas mazāku pumpēšanas jaudu. *EDFA* radītā trokšņa daudzums un pastiprinājums ir ļoti atkarīgs no izvēlēta pastiprinātāja konfigurācijas, kas savukārt vienlaikus ir atkarīgs no sistēmas parametriem, ieskaitot *EDFA* izvietojuma līnijā [20].

Simulācijas modelis, kas tika izmantots pētījumā, tika izveidots, izmantojot simulācijas programmatūru *OptSim 5.2* [175]. Šis simulācijas rīks tika izvēlēts, jo tas ļauj izveidot shēmas augstas sarežģītības optiskām pārraides sistēmām un veic augstas precizitātes mērījumus, kas ir tuvu reālās dzīves eksperimenta rezultātiem [55]. Lai izpētītu *EDFA* pastiprinātāja darbību atkarībā no izvietojuma optiskajā līnijā, tika pētīta 16 kanālu *WDM* pārraides sistēma. Simulācijas modelis attēlots 2.2. att.

Izveidotais modelis ir 16 kanālu *WDM* pārraides sistēma ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu katrā kanālā, bez atgriešanās pie nulles bināro amplitūdas modulācijas formātu (*NRZ-OOK*). Frekvences apgabals, kas šajā sistēmā tika izmantots pārraidīšanai, ir no 193,00 THz līdz 193,75 THz, un 16 raidītāju izejošā starojuma centrālās frekvences tika izvēlētas, izmantojot 50 GHz starpkanālu intervālu atbilstoši *ITU-T G.694* režģim blīvas viļņgarumdales blīvēšanai (*DWDM*).

Katrs no 16 raidītājiem sastāv no datu avota, kas ģenerē datu secību ar ātrumu 10 Gbit/s, kas atbilst *SONET OC-192* standartiem [6], *NRZ* kodētāja, kas apstrādā ģenerēto datu secību, nepārtraukta viļņa (*CW*) lāzera, kas rada optisko starojumu ar noteiktu centra frekvenci ar 6 dBm izejas jaudu un ārējā Mach-Zehnder optiskā modulatora (*MZM*), kas modulē *CW* starojuma intensitāti, ar 30 dB vājinājuma koeficientu un 3 dB ienestiem zudumiem. Pēc apstrādes caur atbilstošo *MZM*, visu 16 raidītāju izejas starojums tiek apvienots vienā optiskā plūsmā, izmantojot sakārtotu viļņvadu režģa multipleksoru (*AWG MUX*) ar 6 dB ienestiem zudumiem. Tad kombinētais optiskais signāls tiek nosūtīts caur diviem 50 km gariem standarta vienmodas šķiedru (*SSMF*) apgabaliem ar vājinājumu 0,2 dB/km un hromatisko dispersiju 16 ps/nm/km pie 1550 nm etalona viļņa garuma. Hromatiskās dispersijas kompensācijai otrā *SSMF* apgabala beigās tiek izmantots šķiedru Brega režģis (*FBG*) ar 3 dB ienestiem zudumiem.

Kopējais kompensētās hromatiskās dispersijas daudzums pie 1550 nm etalona viļņa garuma ir 1600 ps/nm.



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

Šajā sistēmā tika apskatīti trīs dažādi EDFA pastiprinātāja pozicionēšanas scenāriji:

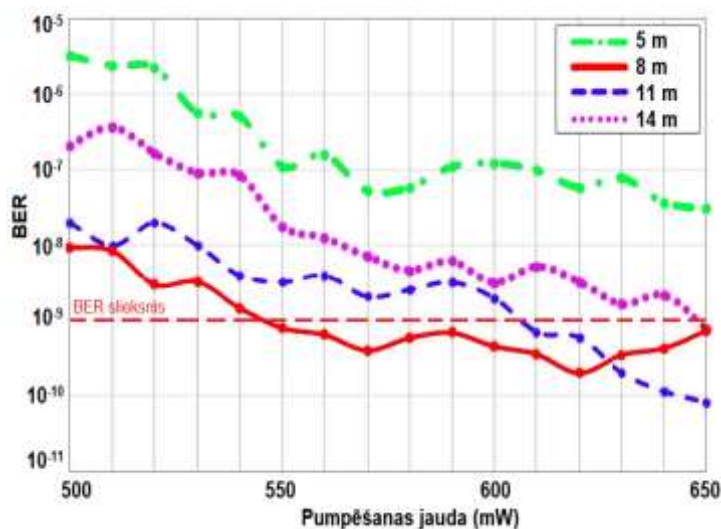
- jaudas pastiprinātājs - kad EDFA novietots raidītāja bloka izejā uzreiz aiz AWG MUX (2.2. att. A);
- līnijas pastiprinātājs - kad EDFA novietots pārraides līnijas vidū starp diviem 50 km garumā esošiem SSMF apgabaliem (2.2. att. B);
- priekšpastiprinātājs - kad EDFA ievietots uztvērēja bloka ieejā tieši pirms sakārtota viļņvadu režģa demultipleksora (AWG DEMUX) (2.2. att. C).

Pēc tam visos trīs iepriekš aprakstītajos scenārijos pārraidītais signāls tiek sadalīts starp 16 optiskajiem uztvērējiem, izmantojot AWG DEMUX ar 6 dB ienestiem zudumiem. Katrs uztvērējs sastāv no PIN fotodiodes ar -20,5 dBm jūtīgumu ar 10^{-9} etalona bitu kļūdas koeficienta (BER) vērtību un elektriskā Besela filtra (EBF) ar 7,5 GHz -3 dB joslas platumu.

Lai novērtēt un izpētīt EDFA pastiprinātāja veiktspēju visos trijos gadījumos, izvēlēti pumpēšanas starojuma parametri un ar erbiju legētas šķiedras (EDF) garums, lai iegūtu minimālu pumpēšanas avota jaudu, kas varētu nodrošināt nepieciešamo signāla kvalitāti (BER zem 10^{-9} sliekšņa) visos WDM sistēmas kanālos. Katrā EDFA pozicionēšanas scenārijā novērtētas jaudas soda vērtības kanāliem ar augstāko BER, ņemot vērā risinājumu bez pastiprināšanas.

Vispirms tika atrastas minimālās pumpēšanas avota jaudas vērtības noteiktā EDF šķiedras garumā, kas varētu nodrošināt BER vērtības visos sešpadsmit kanālos, kas ir zemākas par 10^{-9} sliekšni, kad EDFA izmantots kā jaudas pastiprinātājs, līnijas pastiprinātājs un priekšpastiprinātājs. Pēc tam novērtēta pastiprinātā signāla kvalitātes atkarība no EDFA

pozicionēšanas. Izmantots tieši vērsta pumpēšanas lāzers, jo tas ir vēlams zema trokšņu rādītāja (NF) vērtību iegūšanai, salīdzinot ar pretēji vērsta un abpusējo pumpēšanas konfigurāciju [20, 67]. $EDFA$ maksimālā pastiprinājuma efektivitāte sasniegta pie 980 nm un 1480 nm pumpēšanas viļņa garuma. Ņemot vērā to, ka tādos pašos apstākļos 980 nm pumpēšana ar samērā nelielu EDF garumu nodrošina zemākas NF vērtības salīdzinot ar 1480 nm pumpēšanu, nolemts izmantot 980 nm pumpēšanas viļņa garums [20, 73]. EDF garums visos trīs scenārijos izvēlēts, lai atrastu minimālo pumpēšanas avota jaudu, kas nodrošinātu kanālu BER zem 10^{-9} .



2.3. att. Sistēmas maksimālās BER vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas 5, 8, 11 un 14 m garām EDF šķiedrām sistēmā ar jaudas $EDFA$ pastiprinātāju.

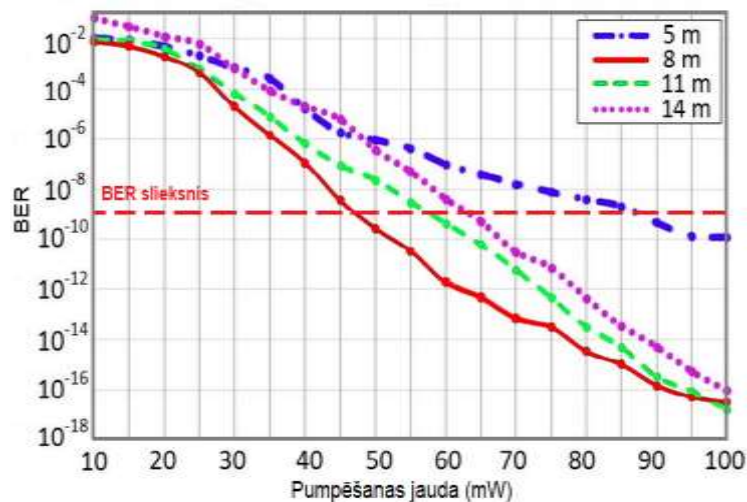
Izvēloties $EDFA$ konfigurāciju kā jaudas pastiprinātāju, ņemtas vērā dažādas pumpējošā starojuma jaudas un EDF garumu kombinācijas. Pumpējošā starojuma jauda mainīta no 300 mW līdz 650 mW, bet EDF šķiedras garums - no 5 līdz 15 metriem. Visiem 16 kanāliem maksimālās BER vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas iegūtas katram EDF garumam. Rezultāti atspoguļoti attēlā 2.3.

2.3. att. redzams, ka mazākā pumpējošā starojuma jauda, kas nodrošinātu BER vērtības zem 10^{-9} sliekšņa, bija 550 mW un novērota 8 metri garā EDF šķiedrā. Augstākā BER vērtība novērota 15. kanālā ($7,92 \times 10^{-10}$). Tāpēc EDF garums 8 metri un 550 mW 980 nm pumpēšanai izvēlēta gadījumā, kad $EDFA$ tika izmantota kā jaudas pastiprinātājs. Šāda $EDFA$ konfigurācija nodrošināja pastiprinājumu no 12,74 dB līdz 12,94 dB un trokšņa faktors (NF) no 5,03 dB līdz 5,19 dB visiem 16 kanāliem WDM sistēmā.

Kad $EDFA$ tika izmantots kā jaudas pastiprinātājs, kopējā signāla jauda pie $EDFA$ ieejas bija 9,06 dBm. EDF garumam, kas mazāks par 8 metriem, nepieciešamo pastiprināšanas līmeni nevarēja sasniegt, jo ar tik lielu ieejas signāla jaudu pastiprinātājs darbojas piesātinājuma režīmā ierobežotas erbija jonu koncentrācijas dēļ. EDF garumā, kas lielāks par 8 metriem, var sasniegt augstāku pastiprināšanas līmeni, taču tam ir vajadzīgas lielākas pumpējošā starojuma jaudas, lai nodrošinātu nepieciešamo kanāla pastiprinājumu visiem kanāliem pastiprināšanas spektra slīpuma dēļ. Novērota šāda tendence - jo garāks ir EDF , jo lielāks ir pastiprinājuma spektra slīpums. Tāpēc šī pastiprinājuma spektra slīpuma dēļ, daži kanāli ieguva mazāku pastiprinājumu ar tādu pašu pumpējošā starojuma jaudu nekā ar īsāku EDF garumu un bija nepieciešama papildus pumpējošā starojuma jauda, lai nodrošinātu BER vērtības zem 10^{-9}

sliekšņa šiem kanāliem.

Pētot līnijas *EDFA* konfigurāciju, pumpējošā starojuma jauda mainīta no 10 līdz 100 mW un *EDF* garums - no 5 līdz 15 metriem. Katram *EDF* šķiedras garumam iegūta sistēmas maksimālā *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas. Rezultātiem parādīti 2.4. att.



2.4. att. Sistēmas maksimālās *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas 5, 8, 11 un 14 m garām *EDF* sistēmā ar līnijas *EDFA* pastiprinātāju.

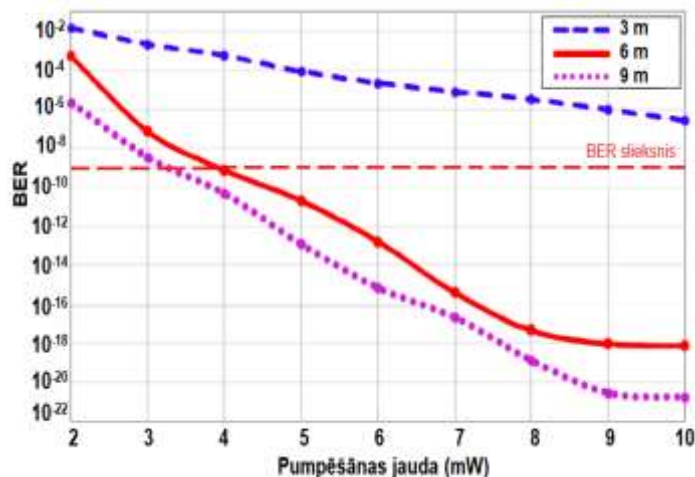
Kā redzams 2.4. att., līnijas *EDFA* bija nepieciešama 50 mW pumpējošā starojuma jauda un 8 metrus garš *EDF*, lai nodrošinātu *BER* vērtības zem 10^{-9} sliekšņa. Augstākā *BER* vērtība novērota 13. kanālā ($2,70 \times 10^{-10}$). Nolemts, ka līnijas *EDFA* scenārijā jāizmanto 50 mW 980 nm pumpēšana un 8 metrus garš *EDF*. Šajā gadījumā pumpējošā starojuma jauda ir 11 reizes mazāka ar tādu pašu *EDF* šķiedras garumu nekā gadījumā, kad *EDFA* tika izmantots kā jaudas pastiprinātājs (sk. attēlā 2.3.). Šāda *EDFA* konfigurācija nodrošināja pastiprinājumu no 12,00 dB līdz 12,88 dB un *NF* vērtības no 5,12 dB līdz 5,30 dB visiem 16 kanāliem.

Pumpējošā starojuma jaudas atšķirības abos risinājumos ar aptuveni vienādu pastiprinājumu var būt izskaidrojama ar to, ka kopējā signāla jauda līnijas *EDFA* ieejā ir -0,96 dBm – tas ir par 10,02 dB mazāka nekā jaudas pastiprinātāja gadījumā. Kaut arī pastiprinājums abos gadījumos bija no 12 līdz 13 dB, līnijas *EDFA* kopējā signāla jauda palielinājās par 12,83 mW (no 1,24 mW līdz 14,07 mW), bet jaudas pastiprinātāja gadījumā - par 148,95 mW (no 8,05 mW līdz 156,50 mW). Parasti ieejas signālam ar lielāku jaudu ir nepieciešama lielāka populācijas inversija *EDF* šķiedrā, lai iegūtu tādu pašu pastiprinājumu dB kā ieejas signālam ar mazāku jaudu. Lai sasniegtu tik augstu populācijas inversiju, nepieciešama lielāka pumpējošā starojuma jauda [20].

Tāpat kā jaudas pastiprināšanas scenārija gadījumā, palielinot *EDF* garumu, pastiprinājuma spektra slīpums palielinās, lai sasniegtu pastāvīgu jaudu ieejas signālam, tāpēc, lai nodrošinātu noteiktu pastiprinājumu visiem kanāliem, ir nepieciešama samērā liela pumpējošā starojuma jauda (11 un 14 metrus gariem *EDF* (2.4. att.)). *EDF* garumam, kas ir mazāks par 8 metriem, izmantojot līnijas scenāriju, erbijas populācijas inversija, kas sasniegta ar 50 mW pumpējošā starojuma jaudu, vienkārši nav pietiekama, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprināšanas līmeni, tāpēc ir vajadzīgas lielākas pumpējošā starojuma jaudas.

Noslēgumā tiek novērtēta konfigurācija, kad *EDFA* izmanto kā priekšpastiprinātāju. Pumpējošā starojuma jauda mainīta no 2 mW līdz 10 mW un *EDF* garums ir no 3 līdz 9

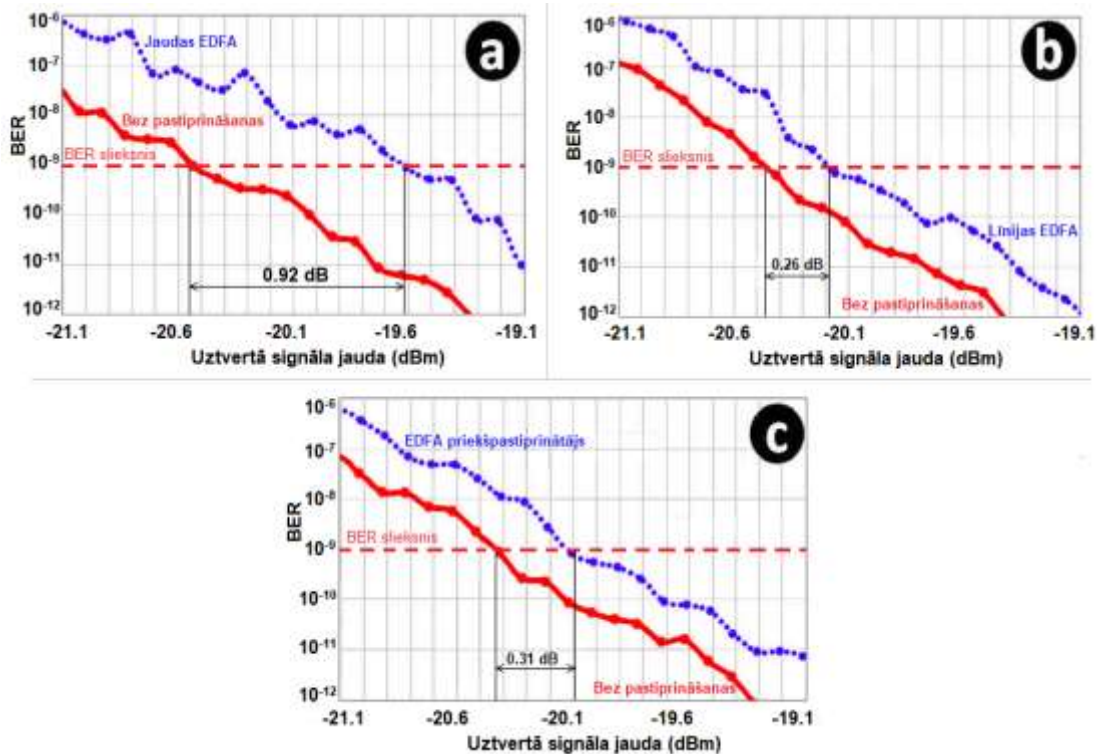
metriem. 2.5. att. ir attēlotas sistēmas maksimālās *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas.



2.5. att. Sistēmas maksimālās *BER* vērtības atkarība no *EDFA* pumpējošā starojuma jaudas 3, 6 un 9 m garām *EDF* sistēmā ar *EDFA* priekšpastiprinātāju.

2.5. att. redzams, ka priekšpastiprinātājam ir nepieciešams vismaz 4 mW pumpējošā starojuma jauda un 6 metrus garš *EDF*, lai nodrošinātu *BER* vērtības visos kanālos zem 10^{-9} . Augstākā *BER* vērtība novērota 4. kanālā ($7,59 \times 10^{-10}$). *EDFA* priekšpastiprinātājs ar izvēlēto konfigurāciju pastiprināja signālu no 12,43 dB – 12,66 dB un nodrošināja *NF* vērtības no 5,26 dB līdz 5,48 dB. Signāla kopējā jauda pie priekšpastiprinātāja ieejas bija tikai -13,94 dBm. Tas izskaidro, kāpēc pietiek ar tik mazu pumpējošā starojuma jaudu, lai pastiprinātu ieejas signālu par vairāk nekā 12 dB. Kopējā signāla jauda palielinājās tikai par 0.7152 mW (no 0.0404 mW līdz 0.7556 mW). Rezultātā tika izvēlēts 4 mW 980 nm pumpēšana un 6 metrus garš *EDF*. *EDF* garumam, kas mazāks par 6 metriem, 4 mW pumpējošā starojuma jauda ir nepietiekama, lai nodrošinātu nepieciešamo populācijas inversiju, tāpēc nepieciešama lielāka pumpējošā starojuma jauda. *EDF* garumam no 7 metriem līdz 9 metriem arī pietiek ar 4 mW pumpēšanas jaudu, lai nodrošinātu vajadzīgās *BER* vērtības, bet, tā kā šajos garumos tika novērotas augstākas *NF* vērtības, nolemts izmantot 6 metrus garu *EDF* šķiedru.

Lai novērtētu *EDFA* pozicionēšanas ietekmi uz pastiprinātā signāla kvalitāti, visiem trim *EDFA* pozicionēšanas scenārijiem iegūtas *BER* vērtību atkarība kanālos ar sliktāko signāla kvalitāti (augstākās *BER* vērtības) no uztvertā signāla jaudas un šie rezultāti salīdzināti ar rezultātiem, kas iegūti tādā pašā *WDM* sistēmā, bet bez pastiprināšanas. Iegūtie rezultāti ir parādīti 2.6. att., kur a) attēlā - jaudas pastiprinātāja, b) attēlā - līnijas *EDFA* un c) attēlā - priekšpastiprinātāja scenārijā.



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

Jaudas pastiprinātāja gadījumā novērots 0,92 dB jaudas sods attiecībā pret sistēmu bez pastiprināšanas, līnijas *EDFA* - 0,26 dB un priekšpastiprinātāju - 0,31 dB. Visos gadījumos galvenā jaudas soda līmeņa daļa ir saistīta ar *EDFA* radīto pastiprināto spontāno emisijas (*ASE*) troksni. Jaudas pastiprinātāja gadījumā lielākā daļa jaudas soda, izņemot *ASE*, ir saistīta ar starpkanālu šķērsrunu, ko izraisa starpkanālu četru viļņu mijiedarbības (*CC-FWM*) un fāzes pašmodulācijas (*SPM*) nelineārie efekti, kas radušies dēļ lielas signāla jaudas *EDFA* izejā. Līnijas un priekšpastiprinātāju scenārijos šķiedru nelinearitātes klātbūtne nav novērota, jo signāla jauda bija par mazu. *EDFA* priekšpastiprinātāja gadījumā jaudas soda attiecībā uz sistēmu bez pastiprināšanas bija nedaudz lielāka (par 0,05 dB) nekā līnijas *EDFA* gadījumā, kad pastiprinātājs izvietots starp diviem SMF posmiem. Tas ir izskaidrojams ar zemāku priekšpastiprinātāja ieejas signāla jaudu (par 13 dB), kā rezultātā iegūts lielāks *EDFA* saražotais *ASE* daudzums, jo nevarēja efektīvi patērēt sasniegto populācijas inversiju.

2.2. *EDFA* pastiprinātāja veikspējas izpēte, mainot kanālu intervālu

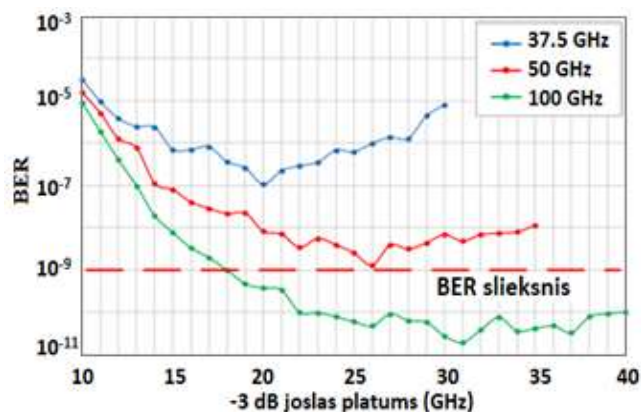
Strauji augošais interneta lietotāju pieaugums un pakalpojumu attīstība veicina pārsūtītas informācijas apjoma pieaugumu, tāpēc nepieciešams pētīt optisko šķiedru pārraides sistēmas ar viļņgarumdales blīvēšanu (*WDM*) [74-75]. Šis paņēmieni ļauj palielināt sistēmas kapacitāti, pārraidot kanālus, izmantojot vairākus viļņu garumus, no kuriem katrs nes optisko signālu, vienā optiskajā šķiedrā, izmantojot noteiktus kanālu intervālus. Kā jau iepriekš minēts, tad populārākais optisko šķiedru pastiprinātāju tips ir ar erbiju legētu šķiedru pastiprinātāji (*EDFA*). *EDFA* pastiprinājums un radītā trokšņa daudzums ir ļoti atkarīgs no izvēlētajā pastiprinātāja konfigurācijas, kas vienlaikus ir atkarīga arī no sistēmas parametriem [20, 76-77]. Sakarā ar to,

ka *EDFA* pastiprinājuma joslas platums ir ierobežots (parastajiem *EDFA* risinājumiem tas ir 35 nm) un tā kā nepieciešams palielināt *WDM* pārraides sistēmu kapacitāti, acīmredzams risinājums esošo sistēmu kopējā pārraides ātruma palielināšanai ir samazināt kanālu intervālu, lai vienlaikus pārraidītu lielāku kanālu skaitu ierobežotā *EDFA* joslas platumā. Starpkanālu intervālu izmaiņas ietekmē kopējo sistēmas darbību, kā arī *EDFA* konfigurāciju, kas būtu optimāla apskatītajai sistēmai. Tāpēc novērtēsim kanālu intervāla maiņas ietekmi *WDM* pārraides sistēmu uz *EDFA*.

Izveidots simulācijas modelis 16 kanālu 10 Gbit/s *WDM* pārraides sistēma ar līnijas *EDFA* pastiprinātāju. Simulācijas modelis ir attēlots 2.2. b attēlā. Šajā sistēmā izmantoti trīs dažādi kanālu intervāli: 37,5 GHz, 50 GHz un 100 GHz. 16 raidītājiem izmantotās vidējās frekvences bija šādos frekvenču diapazonos: no 193.10 līdz 193.6625 THz sistēmā ar 37,5 GHz kanālu intervālu, no 193.00 līdz 193,75 THz sistēmā ar 50 GHz intervālu, un no 192,6 līdz 194,1 THz sistēmā ar 100 GHz kanālu intervālu. Katrs no 16 raidītājiem sastāv no datu avota, *NRZ* kodētāja, nepārtrauktā viļņa (*CW*) lāzera un ārējā Mach-Zehnder modulatora (*MZM*). Datu avots ģenerē 10 Gbit/s datu ātrumu, kas atbilst *SONET OC-192* un *SDH STM-64* standartiem [78]. Šo secību apstrādāja *NRZ* kodētājs. *CW* lāzera izejas jauda ir 6 dBm un tā darbojas ar noteiktu frekvenci atkarībā no *WDM* sistēmas kanālu intervāla. *MZM*, kas modulē *CW* starojuma intensitāti, ir 30 dB vājinājuma koeficientu un 3 dB ienestie zudumi.

Pēc apstrādes caur *MZM*, visas 16 optiskās plūsmas tiek apvienotas vienā optiskā plūsmā, izmantojot optisko kombinētāju (*OC*) un pārraidīts caur 100 km garu standarta vienmodas šķiedru (*SMF1*). Vienmodas šķiedras vājinājums ir 0,2 dB/k, un hromatiskā dispersija - 17 ps/nm/km pie 1550 nm viļņa garuma. Pēc apstrādes caur šo *SMF1* novājināto signālu pastiprināja ar līnijas *EDFA*, kura pumpēšanas starojuma parametri ir izvēlēti, lai iegūtu minimālu pumpēšanas avota jaudu, kas varētu nodrošināt vajadzīgo signāla kvalitāti (bitu kļūdas koeficients (*BER*) zem 10^{-9} sliekšņa) visos *WDM* sistēmas kanālos. Pēc pastiprināšanas optiskais signāls tika pārraidīts caur citu vienmodas šķiedru (*SMF2*), kuras garums ir 50 km. Dispersijas kompensācijai izmantots šķiedru Brega režģis (*FBG*) ar 3 dB ienestiem zudumiem. Kopējais kompensētās dispersijas daudzums pie 1550 nm viļņa garuma ir 2550,0 ps/nm. Pēc apstrādes caur *FBG*, pārraidītā optiskā plūsma sadalīta starp 16 optiskajiem uztvērējiem, izmantojot optisko sadalītāju (*OS*). Katrs uztvērējs sastāv no Gausa optiskā filtra (*OGF*), *PIN* fotodiodes un elektriskā Besela filtra (*EBF*). *OGF* -3dB joslas platums speciāli noregulēts katrai no trim atšķirīgajām kanālu intervālu vērtībām. Pēc apstrādes caur *OGF* optiskais signāls uztverts, izmantojot *PIN* fotodiodes ar jūtīgumu -20,5 dBm attiecībā uz 10^{-9} *BER* vērtību. Lai filtrētu augstfrekvences troksni no pārveidotā elektriskā signāla, tika izmantots *EBF* ar 7,5 GHz -3 dB joslas platumu.

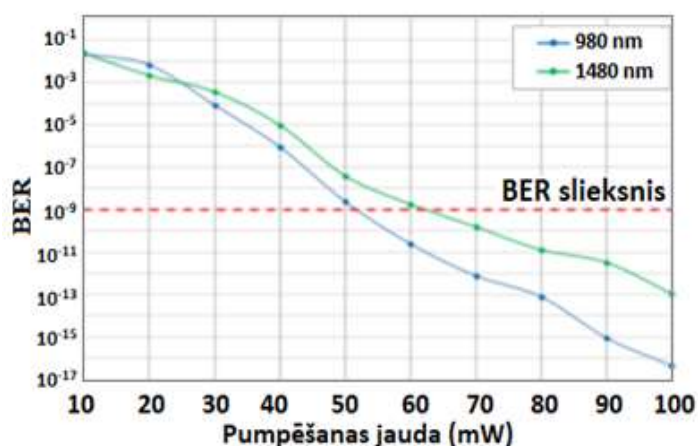
Pirmkārt vajag atrast minimālās pumpējošā starojuma jaudas vērtības, kas nodrošinātu *BER* vērtības visos kanālos zem 10^{-9} sliekšņa pie dažādām starpkanālu intervālu vērtībām (37,5 GHz, 50 GHz un 100 GHz), un tad pētīt līnijas *EDFA* pastiprinātāja veiktspēja *WDM* sistēmā atkarībā no kanālu intervāla. Vispirms vajag noregulēt optiskā filtra joslas platumu. Šim nolūkam katrā 16 kanālu maksimālā *BER* (sistēmas maksimālā *BER*) atkarība no -3 dB optisko filtru joslas platumā iegūta katrā kanālu intervālā sistēmā bez pastiprināšanas un ar 40 km pārraides attālumu. Iegūtie rezultāti parādīti 2.7. att.



2.7. att. Sistēmas maksimālā *BER* vērtības atkarība -3 dB optiskā Gausa filtra joslas platumam kanālu intervāliem 37,5 GHz (zils), 50 GHz (sarkans) un 100 GHz (zaļš) sistēmā bez pastiprināšanas.

2.7. att. parādīts, ka sistēmas maksimālā *BER* vērtība pie starpkanālu intervāla 37,5 GHz sasniedz minimālo 20 GHz optiskajam filteram -3 dB joslas platumā ($BER=1,07 \times 10^{-7}$ 4. kanālā). 50 GHz starpkanālu intervālam šis minimums novērots pie 26 GHz ($BER=2,98 \times 10^{-9}$ 8. kanālā), bet 100 GHz minimālās *BER* vērtības iegūtas 31 GHz joslas platumā ($BER=1,96 \times 10^{-11}$ 13. kanālā). Minimālās vērtības esamība visos trīs gadījumos ir izskaidrojama ar to, ja optiskā filtra -3 dB joslas platums ir pārāk mazs, tad daļa no pārraidītā signāla enerģijas tiks izfiltrēta un radīs nopietnu signāla kvalitātes pasliktināšanu, bet, ja tas ir pārāk liels – daļa blakus kanālu enerģijas tiks uztverta ar signālu un arī pasliktinās signāla kvalitāti.

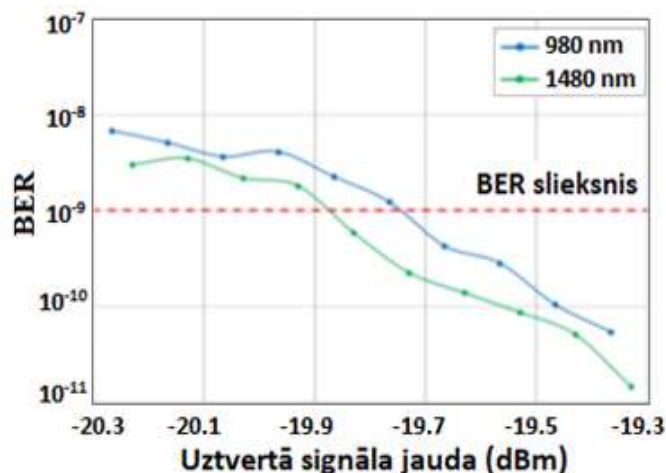
Izvēlēta *EDFA* konfigurācija: *EDF* šķiedras garums - 12 m viena pumpējošā starojuma avota *EDFA* risinājumam (šāds *EDF* garums izvēlēts pamatojoties uz pētījumu rezultātiem [79]). Pielietosim tieši vērsto pumpēšanu (pamatojoties uz pētījumu rezultātiem [20]). Maksimālā *EDFA* pastiprināšanas efektivitāte tiek sasniegta pie 980 nm un 1480 nm pumpēšanas viļņa garumiem [77]. Lai izvēlētos piemērotu pumpēšanas viļņa garumu, sistēmas maksimālās *BER* vērtības novērotas pie dažādu jaudu 980 nm un 1480 nm pumpēšanas sistēmā ar 50 GHz kanālu intervālu. Iegūtie rezultāti parādīti 2.8. att.



2.8. att. Sistēmas maksimālās *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas pie 980 nm (zilā krāsā) un 1480 nm (zaļā) pumpēšanas viļņu garuma sistēmā ar 50 GHz kanālu intervālu.

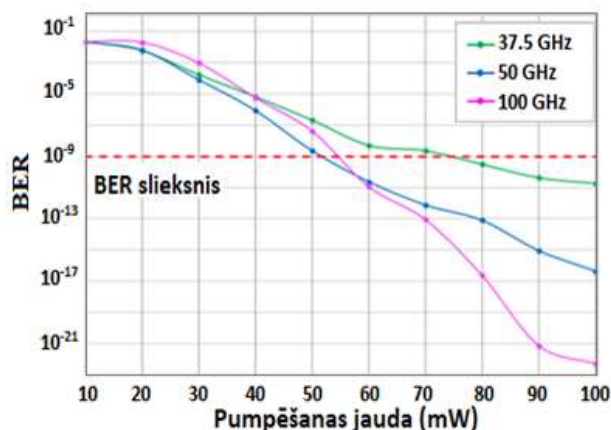
Kā redzams 2.8. att., 980 nm pumpēšanai ir nepieciešama mazāka jauda, lai nodrošinātu *BER* vērtību zem 10^{-9} sliekšņa, nekā 1480 nm pumpēšanai. 60 mW ir pietiekama, lai 980 nm pumpēšana nodrošinātu *BER* vērtības zem noteiktā sliekšņa visos kanālos. Visaugstākais *BER* novērots 12. kanālā ($2,43 \times 10^{-11}$). Šāda konfigurācija nodrošina no 22,38 dB līdz 23,33 dB pastiprinājumu frekvences apgabalā, ko izmanto pārraidīšanai (193.00 - 193.75 THz). 1480 nm pumpēšanai bija jābūt vismaz 70 mW, lai nodrošinātu *BER* zem 10^{-9} atzīmes. Augstākā *BER* vērtība novērota 7. kanālā ($1,54 \times 10^{-10}$). 70 mW 1480 nm pumpēšana nodrošināja pastiprinājuma pieaugumu no 22,53 dB līdz 23,47 dB starp kanāliem. Tas ir izskaidrojams ar to, ka 980 nm pumpēšana spēj sasniegt augstāku populācijas inversijas līmeni ar salīdzinoši lielām pumpēšanas jaudām (30–100 mW) nekā 1480 nm pumpēšana ar šo pašu *EDF* garumu. Tāpēc ne visu sasniegto populācijas inversiju izmanto signāla pastiprināšanai [20, 74, 79]. Pārraides frekvences apgabalā trokšņa rādītāja vērtības 70 mW 1480 nm pumpēšanai ir lielākas, salīdzinot ar 60 mW 980 nm pumpēšanu (attiecīgi 5.42-5.63 dB un 4.50-4.54 dB).

Tas izskaidro arī 2.9. att. parādītos rezultātus, kur attēlota *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas kanāliem ar sliktāko signāla kvalitāti. Var redzēt, ka 1480 nm pumpēšanai signāla jaudai jābūt vismaz par 0,16 dB lielākai, lai nodrošinātu *BER* zem 10^{-9} sliekšņa, nekā 980 nm pumpēšanas gadījumā. Tāpēc sistēmai ar 50 GHz kanālu intervālu izvēlēts 60 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšana.



2.9. att. Kanālos ar sliktāko signāla kvalitāti *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas 60 mW 980 nm (zils) un 70 mW 1480 nm pumpēšanai (zaļš) sistēmā ar 50 GHz kanālu intervālu.

Pēc tam, kad izvēlēts *EDFA* pumpēšanas viļņa garums, sistēmas maksimālās *BER* vērtības noteiktas pie 980 nm tieši vērsta pumpēšanas dažādām pumpējošā starojuma jaudām, visiem kanālu intervāliem: 37,5 GHz, 50 GHz un 100 GHz. Rezultāti atspoguļoti 2.10. att.



2.10. att. Sistēmas maksimālās BER vērtības atkarība no 980 nm pumpējošā starojuma jaudas sistēmā ar 37,5 GHz (zaļa), 50 GHz (zila) un 100 GHz (rozā) kanālu intervāliem.

2.10. att. redzams, ka 37,5 GHz kanālu intervāla gadījumā minimālā pumpēšanas jauda, kas nodrošinātu BER vērtību $< 10^{-9}$ sliekšņa, ir 80 mW, bet 100 GHz kanālu intervāla gadījumā - 60 mW, kas ir tāds pats kā WDM sistēmā ar 50 GHz kanālu intervālu. Fakts, ka minimālā pumpēšanas avota jauda, kas nodrošina vajadzīgo signāla kvalitāti, sistēmās ar 50 GHz un 100 GHz kanālu intervāliem ir vienāda, liecina, ka zemākām pumpēšanas jaudas vērtībām EDFA nodrošinātais pastiprinājums nav pietiekams, lai kompensētu visu uzkrātā signāla vājinājumu. Konfigurācija ar 100 GHz kanālu intervālu parāda augstākas BER vērtības nekā 50 GHz. Tas ir saistīts ar EDFA pastiprinājuma spektra slīpumu - 100 GHz konfigurācijā pārraidei izmantotais viļņa garuma diapazons ir divas reizes lielāks nekā 50 GHz intervāla gadījumā. Tā kā EDFA pastiprinājums ir nevienmērīgs, 100 GHz kanālu intervālu gadījumā daži kanāli iegūs mazāku pastiprinājumu nekā 50 GHz intervālu gadījumā. Sakarā ar šo pastiprinājuma atšķirību, šiem kanāliem tiek novērotas augstākas BER vērtības. Pie lielākas pumpēšanas jaudas, kanālu jauda kļūst pietiekami nozīmīga, lai izraisītu šķiedras nelinearitāti. Jo mazāks intervāls starp kanāliem, jo skaidrāk rodas četru viļņu mijiedarbība (FWM), kā rezultātā tiek radīts lielāks starpkanālu šķērsruna daudzums, ko rada starpkanālu FWM (CC-FWM). Tāpēc, palielinot pumpēšanas jaudu augstākām kanālu intervāla vērtībām, BER vērtības samazinās straujāk nekā sistēmās ar zemāku kanālu intervālu.

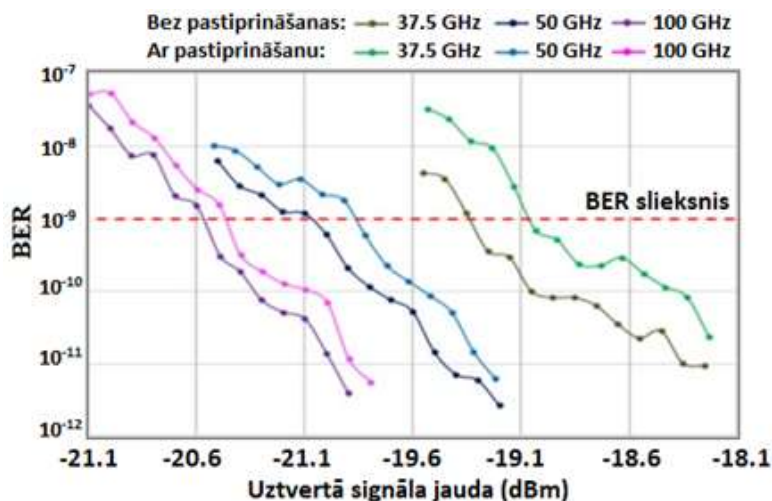
Izvēlētajā pastiprinātāja konfigurācija nodrošināja šādas pastiprinājuma un trokšņa skaitļa (NF) vērtības:

- Sistēma ar 37,5 GHz kanālu intervālu: 80 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšanas avots nodrošina pastiprinājumu no 23.98 dB līdz 24.53 dB un NF no 4.47 līdz 4,5 dB.
- Sistēma ar 50 GHz kanālu intervālu: 60 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšanas avots nodrošina pastiprinājumu no 22.38 dB līdz 23.33 dB un NF no 4.5 līdz 4,54 dB.
- Sistēma ar 100 GHz kanālu intervālu: 60 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšanas avots nodrošina pastiprinājumu no 21.7 dB līdz 23.94 dB un NF no 4.48 līdz 4,56 dB.

Šie rezultāti parāda, ka WDM sistēmai ar 37,5 GHz intervālu nepieciešams lielāks pastiprinājums, neskatoties uz zemākajām NF vērtībām, lai nodrošinātu BER vērtību zem 10^{-9} sliekšņa, salīdzinot ar sistēmām ar lielāku kanālu intervālu. Tas izskaidrojams ar to, ka pie 37,5 GHz kanālu intervāla, lai izvairītos no starpkanālu šķērsrunas no blakus kanāliem, optisko filtru joslas platumam jābūt tik mazam, ka tas izfiltrē daļu attiecīgā kanāla signāla enerģijas. Tāpēc jāiegūst lielāks pastiprinājums, lai nodrošinātu vajadzīgo signāla jaudu fotodetektora ieejā. Papildus tam, pat pie optiskā filtru 20 GHz -3 dB joslas platumā, nelielu blakus esošo kanālu

enerģijas daļas, viļņa garums sakrīt ar attiecīgā signāla viļņa garumu un tāpēc izraisa starpkanālu šķērsrunas [80]. Šāda papildu pastiprināšana nav nepieciešama 50 GHz un 100 GHz kanālu intervālu gadījumā, jo šie intervāli ir pietiekami augsti, lai izvairītos no iepriekš aprakstītās starpkanālu šķērsrunas. Turklāt lielāks optiskā filtra joslas platums uztvērējā ļauj izvairīties no attiecīgā signāla enerģijas filtrēšanas, neizlaižot daļu blakus kanālu enerģijas.

Lai novērtētu *EDFA* veiktspēju pie dažādām starpkanālu intervālu vērtībām, iegūtas *BER* vērtību atkarība kanāliem ar sliktāko signāla kvalitāti no uztvertā signāla jaudas. Šie rezultāti ir salīdzināti ar tiem pašiem rezultātiem, kas iegūti *WDM* sistēmā bez pastiprināšanas ar atbilstošo kanālu intervālu. Iegūtie rezultāti parādīti 2.11. att.

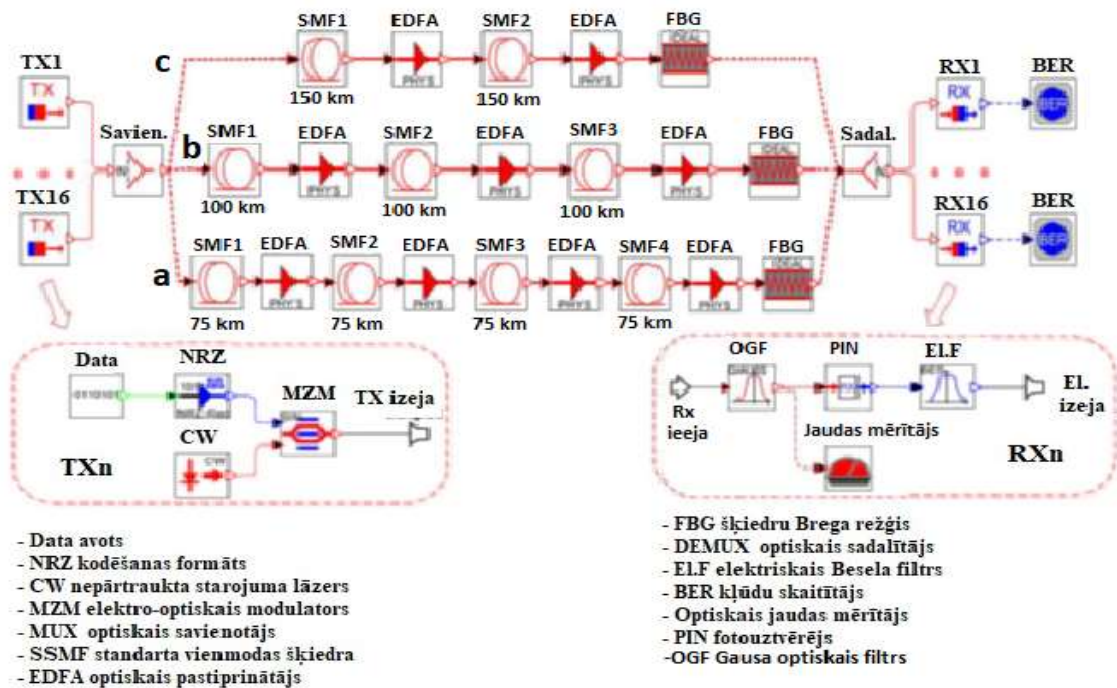


2.11. att. *BER* vērtību atkarība kanāliem ar sliktāko signāla kvalitāti no uztvertā signāla jaudas *WDM* sistēmā ar pastiprinājumu (37,5 GHz - zaļa, 50 GHz - zila, 100 GHz - rozā) un bez pastiprināšanas (37,5 GHz - olīvu, 50 GHz - tumši zils, 100 GHz - violets).

Kā redzams 2.11. att., ka izmantojot *WDM* sistēmā *EDFA* pastiprinātāju ir 0,1 dB jaudas sods attiecībā uz risinājumu bez pastiprināšanas un 100 GHz kanālu intervālam, 0,18 dB - 50 GHz kanālu intervāla gadījumā un 0,22 dB - gadījumā, ja 37,5 GHz kanālu intervāls. Jo mazāks ir kanālu intervāls, jo lielāks ir jaudas sods. Visos trijos gadījumos lielākā daļa jaudas soda ir saistīta ar pastiprināto spontāno emisijas (*ASE*) troksni, ko rada *EDFA*. Bet tomēr saražotā *ASE* daudzums dažādiem kanālu intervāliem ir līdzīgs un nevar izraisīt šādas atšķirības jaudas sodos. Šīs atšķirības jaudas sodos ir cēlonis šķērsrunai no blakus kanāliem, ko izraisa šķiedru nelinearitāte. Jo mazāks ir kanālu intervāls, jo lielāka blakus kanālu enerģijas daļa netiek izfiltrēta, tāpēc ir lielāka jauda, kas nepieciešama uztvertā signāla noteiktās *BER* vērtības nodrošināšanai. Šī tendence ir saistīta arī ar sistēmām, kurās pastiprināšana netika izmantota. Ja signāla jauda ir pietiekami augsta, pārraides laikā rodas šķiedru nelinearitāte, ieskaitot četru viļņu mijiedarbību (*FWM*) un fāzes pašmodulācijas (*SPM*) nelineāros efektus. *FWM* efektivitāte palielinās, ja samazinās viļņu garuma starpība starp mijiedarbīgajiem spektrālajiem komponentiem. Tāpēc, jo mazāks ir attālums starp kanāliem, jo augstāka ir novērotā *FWM* efektivitāte, kas rodas starp kanāliem, un jo lielāks ir starpkanālu šķērsrunas daudzums. *SPM* klātbūtne rada arī starpkanālu šķērsrunu ar salīdzinoši nelielām kanālu intervālu vērtībām, jo tas izraisa kanālu spektra paplašināšanos un blakus kanālu spektru pārklāšanos [81].

2.3. Pastiprinājuma apgabala garuma ietekmes izpēte uz EDFA pastiprinātāja veiktspēju

Tālsakaru sistēmās ir neizbēgama vairāku pastiprinājuma iecirkņu izmantošana, kas noved pie pārraidītā signāla kvalitātes pasliktināšanās. Šādu pastiprinājuma apgabalu garuma izvēle ir sarežģīta problēma, kur katrai pārraides sistēmai nepieciešama individuāla pieeja. No vienas puses, *EDFA* nevienmērīgais pastiprinājuma spektrs noved pie papildus šķiedras nelinearitātes rašanās kanālos ar lielāku pastiprinājumu. Turklāt katrs nākamais *EDFA* ne tikai rada *ASE* trokšņus, bet pastiprina arī iepriekšējo pastiprināšanas iecirkņu trokšņus. Šie divi faktori var dramatiski pasliktināt pārraidītā signāla kvalitāti, tādējādi ierobežojot arī sasniedzamo pārraides attālumu. No otras puses, ja pastiprinātāju skaits tiek samazināts, palielinot pastiprinājuma apgabala garumu, *EDFA* pastiprinātājam ir nepieciešamas garākas ar erbiju legētas šķiedras (*EDF*), lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājumu. Tas noved pie tā, ka veidosies lielāks *ASE* daudzums un līdz ar to pasliktinās signāla kvalitāte [20, 69, 77, 82]. Tāpēc izpētīsim pastiprinājuma apgabala garuma ietekmi uz signāla kvalitāti *WDM* pārraides sistēmā, kur signāla pastiprināšanai izmanto *EDFA* pastiprinātājus.

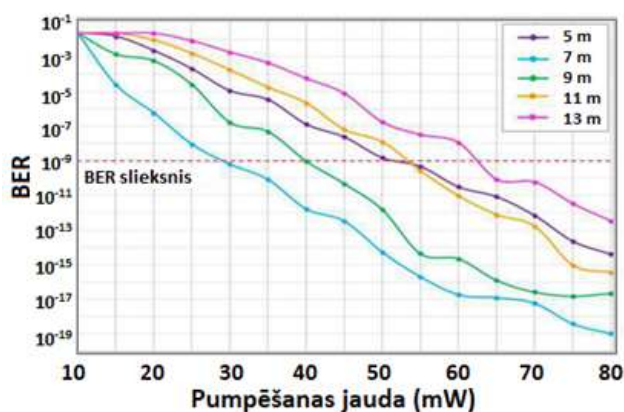


2.12. att. 16 kanālu 10 Gbit/s *WDM* pārraides sistēmas modelis ar trim dažādiem atšķirīgiem pastiprinājuma apgabala garumiem: (a) 75 km; b) 100 km un (c) 150 km.

Lai izpētītu pastiprinājuma apgabala garuma ietekmi, izveidots 16 kanālu *WDM* pārraides sistēmas ar līnijas *EDFA* pastiprinātājiem, simulācijas modelis *OptSim 5.2* programmatūras rīkā [175]. Simulācijas modelis attēlots 2.12. att. Modelis attēlo 16 kanālu *WDM* pārraides sistēmu ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu katrā kanālā ar bez atgriešanās pie nulles bināro amplitūdas modulācijas formātu (*NRZ-OOK*). Pārraidei izmantotais frekvences apgabals ir no 193.00 THz līdz 193.75 THz. 16 raidītāju izejošā starojuma centrālās frekvences izvēlētas atbilstoši *ITU-T G.694* blīvas viļņgarumdales multipleksēšanas režģim ar 50 GHz kanālu intervālu. Katrs no 16 raidītājiem sastāv no datu avota, kas ģenerē 10 Gbit/s datu plūsmu (atbilst *SONET OC-192* standartiem), *NRZ* kodētāja, kas apstrādā ģenerēto datu secību, nepārtraukta starojuma (*CW*)

lāzera, kas rada optisko starojumu ar 6 dBm izejas impulsa un centrālo frekvenci atkarībā no kanālu skaita un ārējā *Mach-Zehnder* modulatora (*MZM*) ar 30 dB vājinājuma koeficientu un 3 dB ienestiem zudumiem, kas modulē *CW* radīto intensitātes starojumu. Pēc apstrādes caur atbilstošo *MZM* visas optiskās plūsmas, kuras radītas 16 raidītājos, apvienotas vienā optiskajā plūsmā, izmantojot optisko sazarotāju (*OC*) un nosūtītas caur 300 km garu optisko pārraides līniju. Šajā pārraides optiskajā vidē izmantota standarta vienmodas šķiedra (*SSMF*) ar vājinājumu 0,2 dB/km un hromatisko dispersiju 16 ps/nm/km pie 1550 nm viļņa garuma. Apstrādājot šo *SSMF*, novājināto signālu pastiprina *EDFA*. Izvēlēti trīs dažādi pastiprinājuma apgabala garumi ar *EDFA* pastiprinātāju katra apgabala beigās: ar *EDFA* pastiprinātāju pēc katriem 75 km (2.12. att. C), 100 km (2.12. att. B) un 150 km (2.12. att. A). *SSMF* beigās dispersijas kompensēšanai izmanto šķiedru Brega režģi (*FBG*) ar 3 dB ienestiem zudumiem. Kopējais kompensētās dispersijas daudzums pie 1550 nm viļņa garuma bija 4800,0 ps/nm. Tad ar *FBG* optiskais signāls sadalīts starp 16 optiskajiem uztvērējiem, izmantojot optisko sadalītāju (*OS*). Katrs no 16 uztvērējiem sastāv no optiskā Gausa filtra (*OGF*), kura centrālā frekvence ir noregulēta atbilstoši kanālu skaitam, PIN fotodiode ar -20,5 dBm jūtīgumu pie 10^{-9} BER vērtības un elektriskā Besela filtra (*EBF*).

Izvēlējos viena pumpējošā starojuma avota *EDFA* risinājumu, jo divu pumpējošo starojuma avotu risinājuma gadījumā nepieciešama lielāka kopējā pumpējošā starojuma jauda, lai nodrošinātu noteiktu pastiprinājuma līmeni. Izvēlēta tieši vērsta pumpēšana, jo ir priekšroka zemākām trokšņu faktora vērtībām. Tādos pašos apstākļos ar relatīvi īsu *EDF* garumu 980 nm pumpēšana nodrošina zemākas *NF* vērtības salīdzinot ar 1480 nm pumpēšanu, tāpēc tika izmantots 980 nm pumpēšanas viļņa garums [20]. Pastiprinātāja konfigurācija izvēlēta tāda, lai visos trīs gadījumos pie noteiktās minimālās pumpējošā starojuma jaudas un *EDF* garuma, nodrošinātu $BER < 10^{-9}$ visos 16 sistēmas kanālos. *EDF* garums un pumpējošā starojuma jauda vienlaicīgi palielināta (attiecīgi no 4 līdz 15 metriem un no 10 mW līdz 80 mW) visiem *EDFA* pastiprinātājiem, kas izvietoti optiskajā pārraides līnijā. Sistēmas maksimālās *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas iegūta katram *EDF* garumam. 2.13. att. parādīti rezultāti 75 km garā pastiprināšanas apgabalā.



2.13. att. Sistēmas maksimālā *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas 5, 7, 9, 11 un 13 m garam *EDF* šķiedrai visiem sistēmas *EDFA* pastiprinātājiem ar 75 km garo pastiprinājuma apgabalu.

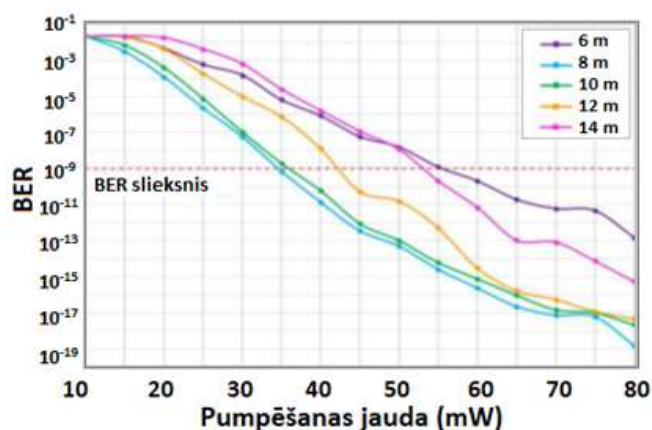
2.13. att. var redzēt, ka zemākās pumpējošā starojuma jaudas un īsākā *EDF* garuma kombinācija, kas nodrošina *BER* vērtības zem 10^{-9} sliekšņa uztvērēja galā, ir attiecīgi 30 mW

un 7 metri. Augstākā BER atbilst 13. kanālam ($5,23 \times 10^{-10}$). Šī konfigurācija izvēlēta pastiprinājuma apgabala garumam 75 km (sistēma ar 4 $EDFA$ pastiprinātājiem). Kad tika izmantota iepriekš minētā $EDFA$ konfigurācija, signālu jaudas līmenis PIN fotodiožu ieejā svārstījās no -21,00 līdz -19,86 dBm. Pirmais $EDFA$ pastiprināja kanālus par 12,36–12,90 dB un nodrošina trokšņu faktora (NF) no 5,02 līdz 5,15 dB, 2. $EDFA$ - no 14,64 līdz 14,93 dB pastiprinājumu un 4,76–4,83 dB NF , 3. $EDFA$ - no 14,84 līdz 15,10 dB pastiprinājumu un 4,74–4,81 dB NF , bet pēdējais $EDFA$ - no 14,86 līdz 15,13 dB pastiprinājumu un 4,74–4,81 dB NF .

Kad EDF garumi ir mazāki par 7 m, tad pumpēšanas jauda 30 mW nebija pietiekama, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājuma līmeni nepietiekamas erbija jonu populācijas dēļ. Ja EDF ir garāks par 7 m, lielāka kanāla pastiprināšanas spektra slīpuma dēļ (ar ieejas signāla nemainīgu jaudu), bija nepieciešama lielāka pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu noteiktu pastiprinājuma līmeni visiem kanāliem. Daži kanāli bija mazāk pastiprināti nekā pārējie un papildu pumpēšanas jauda bija nepieciešama, lai nodrošinātu šiem kanāliem nepieciešamo pastiprināšanas līmeni, nekā īsākā EDF šķiedras garuma gadījumā. Tas izskaidrojams ar to, ka noteikts populācijas inversijas līmenis un līdz ar to arī noteikts pastiprinājuma spektra slīpums, sasniegts ar augstākām saražotām vērtībām garos EDF diapazonos. Turklāt jaudas starpība starp 1. un 16. kanālu palielinās pēc katra $EDFA$ pastiprinātāja. Jāņem arī vērā, ka garākām EDF šķiedrām ir vajadzīgas lielākas pumpēšanas jaudas, lai sasniegtu noteiktu populācijas inversiju EDF šķiedras tālākajā galā. Tas ir svarīgi, lai izvairītos no pastiprinātā signāla absorbcijas šajā EDF daļā.

100 km gara pastiprinājuma apgabala gadījumā (kur tika izmantoti tikai 3 $EDFA$ pastiprinātāji), tāpat kā ar 4 $EDFA$ scenārijā, pumpēšanas jaudas mainījās no 10 mW līdz 80 mW un EDF garumi no 4 metriem līdz 15 metriem.

Kā redzams 2.14. att., zemākās pumpēšanas jaudas un īsākā EDF kombinācija, kas nodrošina BER vērtības zem 10^{-9} sliekšņa, 100 km garā pastiprinājuma apgabalā ir 35 mW un 8 m. Augstākā BER vērtība novērota 7. kanālā ($7,04 \times 10^{-10}$). Šī specifiskā $EDFA$ konfigurācijā signāla jaudas līmenis PIN fotodiožu ieejā svārstījās no -20,86 līdz -20,60 dBm. Pirmais $EDFA$ kanālus pastiprināja par 17,31–17,61 dB un nodrošināja 4,61–4,65 dB NF vērtības, 2. $EDFA$ - par 19,71–19,76 dB un nodrošināja 4,52–4,55 dB NF , bet 3. $EDFA$ - par 19,90–19,92 dB un nodrošināja 4,51–4,54 dB NF .

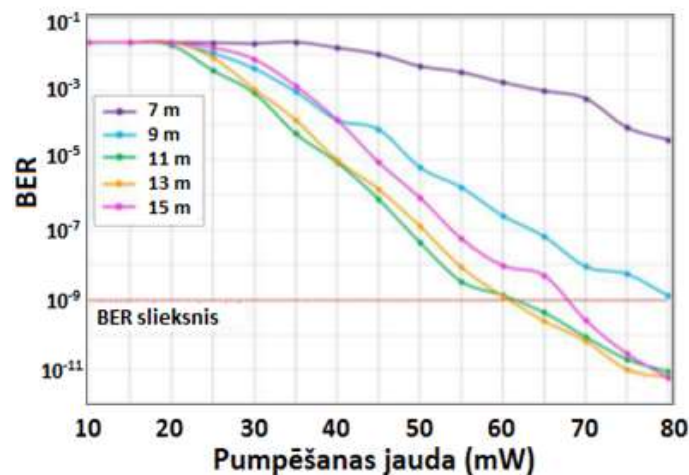


2.14. att. Sistēmas maksimālā BER vērtības atkarība no pumpēšanas jaudas 6, 8, 10, 12 un 14 m garām EDF visiem sistēmas $EDFA$ ar 100 km garu pastiprinājuma apgabalu.

Atšķirība starp minimālo pumpēšanas jaudu, kas nodrošinātu BER zem 10^{-9} , gadījumos ar

8, 9 un 10 metrus garu *EDF*, bija neliela. Tāpēc izmantosim 8 m garo *EDF* šķiedru, jo tā ir īsākā, kas nodrošina vajadzīgo signāla kvalitāti un šajā garumā novērotas zemākās *NF* vērtības. Tāda pati tendence kā 75 km pastiprinājuma apgabala garumam novērota 100 km garā pastiprinājuma apgabala scenārijā. *EDF* garumam, kas mazāks par 8 m, 35 mW pumpēšana nebija pietiekama, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājuma līmeni ierobežotā erbija jonu populācijas dēļ (6 m garš *EDF* pat 55 mW pumpēšana nespēj nodrošināt *BER* zem noteiktā sliekšņa). Kad *EDF* ir garāks par 8 m - tāpat kā 75 km garā pastiprinājuma diapazona gadījumā, bija nepieciešama lielāka pumpēšanas jauda, lai visiem kanāliem nodrošinātu noteiktu pastiprinājuma līmeni, jo pastiprinājuma spektra slīpums palielinās pie konstantas ieejas signāla jaudas. Lai uzturētu noteiktu populācijas inversijas līmeni *EDF* tālajā galā, nepieciešama arī lielāka pumpēšanas jauda (12, 14 m gariem *EDF* 2.14. att.). Fakts, ka tikai par 5 mW lielāka pumpējošā starojuma jauda un tikai par 1 metru garāks *EDF* nekā 75 km apgabala garumā, ir pietiekams, lai nodrošinātu vajadzīgo signāla kvalitāti 100 km apgabalā, kaut arī izmantoti trīs pastiprinātāji. Signāls pie *EDFA* ieejas 100 km garā pastiprinājuma apgabalā ir ievērojami mazāks (par 5 dB 1. *EDFA*), tāpēc, lai iegūtu noteiktu pastiprinājuma līmeni dB, ir nepieciešama mazāka populācijas inversija un līdz ar to arī mazāka pumpējošā starojuma jauda. No otras puses, 75 km garā pastiprinājuma apgabalā ir nepieciešams mazāks signāla vājinājums, lai kompensētu pastiprinājuma apgabalu, tāpēc vajadzīgs arī mazāks pastiprinājums.

Konfigurējot *EDFA* pastiprinātājus sistēmā ar 150 km garu pastiprinājuma apgabalu (viens līnijas *EDFA* un *EDFA* priekšpastiprinātājs), pumpējošā starojuma jauda mainās no 10 mW līdz 80 mW un *EDF* garumi ir no 4 metriem līdz 15 metriem.



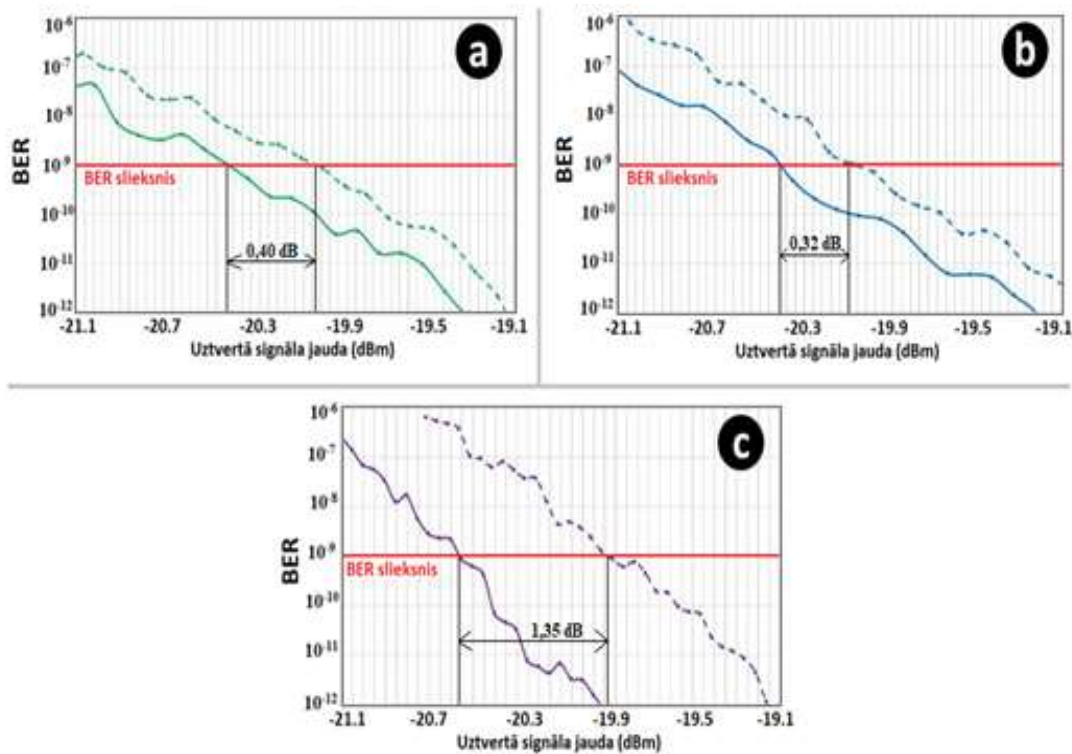
2.15. att. Sistēmas maksimālā *BER* vērtības atkarība no pumpējošā starojuma jaudas 7, 9, 11, 13 un 15 m garām *EDF* visiem sistēmas *EDFA* ar 150 km garu pastiprinājuma apgabalu.

Kā redzams 2.15. att., zemākās pumpēšanas jaudas un īsākā *EDF* kombinācija, kas nodrošina sistēmas *BER* vērtības $< 10^{-9}$ sliekšņa, 150 km garā pastiprinājuma apgabalā, ir 65 mW un 11 m. Augstākā *BER* vērtība novērota 8. kanālā ($4,40 \times 10^{-10}$). Šajā specifiskajā *EDFA* konfigurācijā signālu jaudas līmenis *PIN* fotodiožu ieejā svārstās no -19,59 līdz -19,21 dBm. Pirmais *EDFA* kanālus pastiprina par 29,00–29,17 dB un nodrošināja 4,70–4,78 dB *NF* vērtības, bet 2. *EDFA* - par 29,25–29,36 dB un nodrošināja 4,83–4,93 dB *NF*. 65 mW pumpēšanas jauda ir pietiekama, lai nodrošinātu nepieciešamo signāla kvalitāti arī 12 un 13 metrus garas *EDF* šķiedras gadījumā, taču kā iepriekš rakstīts, ka jāizvēlas īsākais *EDF* šķiedras

garums.

Lai novērtēt pastiprinājuma apgabala garuma ietekmi uz signāla kvalitāti, salīdzināti *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas sistēmai ar un bez pastiprināšanas. Iegūtie rezultāti parādīti 2.16. att.

Kā redzams 2.16. att., ja tiek izmantoti 4 *EDFA* pastiprinātāji (75 km garš pastiprināšanas apgabals) attiecībā uz sistēmu bez pastiprināšanas, ir novērots 0,40 dB jaudas sods, 0,32 dB jaudas sods - 3 *EDFA* pastiprinātāju scenārijā (100 km garš pastiprinājuma apgabals) un 1,35 dB jaudas sods - 2 *EDFA* pastiprinātāju scenārijā (150 km garš pastiprinājuma apgabals).



2.16. att. *BER* vērtību atkarība no uztvertā signāla jaudas kanāliem ar sliktāko signāla kvalitāti sistēmā bez pastiprināšanas (nepārtraukta līnija) un ar pastiprināšanu (punktētā līnija) pie pastiprinājuma apgabala garuma (a) 75 km; (b) 100 km un c) 150 km.

Kad pastiprinājuma apgabals ir 75 un 100 km garš, tad lielākā daļa jaudas soda ir saistīta ar *EDFA* radīto *ASE* trokšni. Kā redzams 2.16. att., 100 km garā pastiprinājuma apgabalā, jaudas sods ir par 0,08 dB mazāks nekā 75 km garā pastiprinājuma apgabalā. Tas izskaidrojams ar to, ka 75 km garā pastiprinājuma apgabalā izmantoto *EDFA* pastiprinātāju skaits ir par vienu lielāks un katrs sekojošais *EDFA* pastiprina iepriekšējā *EDFA* radīto trokšni. Tāpēc, pat ja saražotais *ASE* daudzums uz vienu pastiprinātāju, kad tika izmantoti četri *EDFA*, bija mazāks nekā sistēmā ar 3 *EDFA* (100 km garā pastiprinājuma apgabalā), sistēmā ar četriem *EDFA* kopējais *ASE* daudzums uztvērējā ieejā būs lielāks, lielāka pastiprinātāju skaita dēļ. Lielākais jaudas sods novērots 150 km garā pastiprinājuma apgabalā (divi *EDFA* pastiprinātāji). Šajā gadījumā lielākais jaudas sodu apmērs, izņemot *ASE*, ir saistīts ar neatbilstībām, ko rada šķiedru nelinearitāte, īpaši ar starpkanālu šķērsrunu, ko izraisa četru viļņu mijiedarbība (*FWM*) un fāzes pašmodulācija (*SPM*), kas radās lielas signāla jaudas dēļ *EDFA* izejā (pēc pirmā *EDFA* - kopējā optiskā jauda bija 11,68 dBm (14,7 mW) un pēc otrā - 11,70 dBm (14,8 mW)). 75 km garā un 100 km garā pastiprinājuma apgabala scenārijā šķiedru nelinearitāte nav novērota un nebija skaidri izteikta, jo signāla jauda ir par mazu.

2.4. Kopsavilkums

Šajā nodaļā pētīta *EDFA* pastiprinātāju veiktspēja 16 kanālu *WDM* sistēmā pie dažādiem ekspluatācijas apstākļiem, kādos pastiprinātājs darbojas. Pētīts, kā mainās pastiprinātā signāla kvalitāte, kad tiek mainīts starpkanālu intervāls (37,5 GHz, 50 GHz, 100 GHz), pastiprinājuma apgabala garums (75 km, 100 km un 150 km) un *EDFA* izvietojums (jaudas, līnijas un priekšpastiprinātājs) *WDM* pārraides sistēmā. *EDFA* konfigurācijas izvēlētas tā, lai visos sistēmas kanālos nodrošinātu *BER* vērtības zemākas par 10^{-9} . Veicot *EDFA* pastiprinātāja darbības izpēti uz pastiprinātā signāla kvalitāti, izmantots viena pumpējošā lāzera *EDFA* risinājums ar tieši vērsto 980 nm pumpēšanu, jo nodrošina zemākas trokšņa rādītāja vērtības.

EDFA jaudas un līnijas pastiprinātājam izmantota 8 m gara *EDF* šķiedra, bet pumpējošā starojuma jauda līnijas *EDFA* gadījumā ir 11 reizes mazāka nekā jaudas pastiprinātāja gadījumā (jaudas pastiprinātājam – 550 mW un līnijas pastiprinātājam – 50 mW pumpējošā starojuma jauda). Abos gadījumos pastiprinājums ir aptuveni vienāds. Iemesls pumpēšanas jaudas atšķirībai ir fakts, ka ieejas signāla jauda līnijas *EDFA* ir par 10,02 dB mazāka nekā jaudas pastiprinātāja gadījumā. Lai iegūtu tādu pašu pastiprinājuma līmeni dB signālam, kas ir vairāk nekā 8 reizes jaudīgāks, ir nepieciešama vairākas reizes lielāka populācijas inversija, tāpēc vajadzīgā pumpēšanas jauda būs ievērojami lielāka. Tāpēc *EDFA* priekšpastiprinātāja gadījumā pumpēšanas jauda, kas nodrošināja *BER* vērtības zemākas par 10^{-9} , ir 12,5 reizes mazāka nekā līnijas *EDFA* gadījumā: 4 mW pie 980 nm tieši vērsta pumpēšanas un 6 m gara *EDF*.

No pumpēšanas enerģijas patēriņa viedokļa, labāk izmantot *EDFA* kā priekšpastiprinātāju, bet ieejas signāla mazās jaudas dēļ sasniegtā populācijas inversija netiek izmantota efektīvi kā līnijas pastiprinātāja gadījumā. Kā rezultātā priekšpastiprinātājs rada vairāk *ASE* trokšņu nekā līnijas *EDFA* konfigurācija. Tas rada papildu jaudas sodu attiecībā uz sistēmu bez pastiprināšanas. Jo zemāka ir ieejas signāla jauda, jo vairāk *EDFA* rada *ASE*, un jo augstāks ir jaudas sods. Līnijas pastiprinātāja risinājumam jaudas sods attiecībā uz sistēmu bez pastiprināšanas ir tikai 0,26 dB, bet priekšpastiprinātājam - 0,31 dB. Augstākais jaudas sods novērots jaudas pastiprinātāja scenārijā - 0,92 dB attiecībā uz nepastiprināto signālu. Tas izskaidrojams ar šķiedras nelinearitātes ietekmi, jo pastiprinātā signāla kopējā jaudas pastiprinātāja izejā ir sasniegusi 156,5 mW. Tik augsta signāla jauda ir radījusi šķiedru nelinearitāti, kā rezultātā *FWM* rada starpkanālu šķērsrunas un *SPM* izraisīja signāla spektra paplašināšanos.

Izpētot *EDFA* pozicionēšanas ietekmi uz vēlamo *EDFA* konfigurāciju un tās darbību, ir izdarīti šādi secinājumi:

- *WDM* sistēmā ar jaudas *EDFA* pastiprinātāju bija nepieciešama 550 mW pumpēšanas jauda salīdzinot ar līnijas un priekšpastiprinātāju, tas izskaidrojams ar lielu signāla jaudu *EDFA* ieejā (9,06 dBm). Šāds signāls ir 8 reizes jaudīgāks un ir nepieciešama vairākas reizes lielāka populācijas inversija, lai sasniegtu līdz 13 dB kanālu pastiprinājumu.
- Augstākais jaudas sods tika novērots sistēmā ar jaudas *EDFA* pastiprinātāja - 0,92 dB attiecībā uz nepastiprināto signālu. Tas izskaidrojams ar šķiedras nelinearitātes ietekmi, jo pastiprinātā signāla kopējā jauda pastiprinātāja izejā ir 156,5 mW. Tik augsta signāla jauda ir radījusi šķiedru nelinearitāti, kā rezultātā *FWM* rada starpkanālu šķērstraucējumus un *SPM* izraisīja signāla spektra paplašināšanos.

- No pumpēšanas enerģijas patēriņā viedokļa (pumpēšanas jauda - 4 mW) sistēma ar *EDFA* priekšpastiprinātāju ir optimāla, bet zemās signāla jaudas *EDFA* ieejā (-13,94 dBm), populācijas inversija netiek efektīvi izmantota un rodas papildus ASE trokšņu un jaudas sods (0,31 dB) ir augstāks nekā līnijas *EDFA* gadījumā (0,26 dB).

EDFA pastiprinājuma joslas platums ir ierobežots un, lai palielinātu *WDM* sakaru sistēmas kapacitāti, nepieciešams palielināt kopējo sistēmas pārraides ātrumu. To var izdarīt samazinot kanālu intervālu, lai pārraide notiktu lielākā kanālu sistēmā. Kanālu intervālu izmaiņas ietekmē *WDM* sistēmas veiktspēju. Izpētes rezultātā atklāts, ka, ja pastiprinājuma spektrs ir salīdzinoši vienmērīgs vēlamajā viļņa garuma joslā, sistēmām ar mazāku kanālu intervālu, ir nepieciešams lielāks pastiprinājums (tāpēc arī lielāka pumpējošā starojuma jauda), lai nodrošinātu *BER* vērtības zem noteiktā sliekšņa, salīdzinot ar sistēmām ar lielāku kanālu intervālu. Ja kanālu intervāls ir pārāk mazs (piemēram, zem 50 GHz 10 Gbit/s pārraides ātrumu vienā kanālā), blakus kanālu spektru pārklāšanās ir neizbēgama un optisko filtru joslas platumam jābūt pietiekami mazam, lai izfiltrētu šo pārklājošo daļu no spektra. Tādēļ daļa signāla enerģijas tiek izfiltrēta un, lai kompensētu optiskās enerģijas zudumus, ir nepieciešams lielāks pastiprinājuma līmenis. Salīdzinot *EDFA* veiktspēju dažādās kanālu intervālu vērtībās, konstatēts, jo mazāks ir kanālu intervāls, jo lielāks ir jaudas sods attiecībā uz sistēmu bez pastiprināšanas.

Izpētot kanālu intervālu izmaiņu ietekmi uz vēlamo *EDFA* konfigurāciju un tās veiktspēju, izdarīti šādi secinājumi:

- Lai nodrošinātu noteiktu signāla kvalitāti kanālu intervālam līdz 37,5 GHz, var būt nepieciešama papildu pumpēšana, lai kompensētu attiecīgā kanāla signāla enerģijas daļu filtrēšanu, jo blakus esošajiem kanāliem ir starpkanālu šķērsruna.

- Izvēloties kanālu intervālu pārraides sistēmās ar *EDFA*, jāņem vērā *EDFA* pastiprinājuma spektra slīpuma atkarība no sasniegtā populācijas inversijas līmeņa un šķiedras nelinearitātes ietekmes uz signāla kvalitāti. Pastiprinājuma spektra slīpumu dēļ, pie zemām pumpēšanas jaudām sistēmā ar 100 GHz kanālu intervālu, ir novērotas augstākas *BER* vērtības nekā sistēmās ar mazāku kanālu intervālu. Tomēr, palielinoties pumpēšanas jaudai, situācija kļūst pilnīgi pretēja, jo pastiprinājuma spektrs kļūst vienmērīgāks un šķiedru nelinearitāte rodas skaidrāk pie mazākām kanālu intervāla vērtībām.

- Signāla jauda pēc pastiprināšanas ir pietiekoši liela, kā rezultātā rodas šķiedras nelinearitāti. *WDM* sistēmā izmantojot mazāku kanālu intervālu, tiek novērota lielāka *FWM* radītā starpkanālu šķērsruna, tāpēc lielāks jaudas sods novērots attiecībā pret sistēmu bez pastiprināšanas. 100 GHz kanālu intervālam, jaudas sods bija vienāds ar 0,1 dB, 50 GHz kanālu intervālam - 0,18 dB un 37,5 GHz kanālu intervālam - 0,22 dB.

Trešais faktors, kas pētīts un ietekmē signāla kvalitāti, ir pastiprinājuma apgabala garums. *EDFA* konfigurācijas izvēlētas tā, lai visos sistēmas kanālos nodrošinātu *BER* vērtības zemākas par 10^{-9} , izmantojot pēc iespējas mazāku pumpēšanas jaudu un pēc iespējas īsāku *EDF* šķiedras garumu.

Sistēmā ar 75 km garu pastiprinājuma diapazonu un 4 *EDFA* pastiprinātājiem izvēlēta 30 mW 980 nm tieši vērsta pumpēšana un 7 m garš *EDF*. 100 km garā pastiprinājuma diapazonā un 3 *EDFA* pastiprinātājiem izvēlēts 35 mW pumpēšanas jauda un 8 m garš *EDF*, bet 150 km garā pastiprinājuma diapazonā un tikai 2 *EDFA* pastiprinātājiem - 65 mW pumpēšanas jauda un 11 m garš *EDF*. Visos 3 gadījumos novērotas vienādas tendences, kad *EDF* garumu ir īsāki nekā izvēlētajās konfigurācijās, nepieciešama augstāka pumpējošā starojuma jauda, jo novērota nepietiekama ierosināto erbija jonu populācija, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājumu.

Kad *EDF* garums ir lielāks nekā izvēlētajā konfigurācijā, nepieciešama lielāka pumpējošā starojuma jauda, lai visiem kanāliem nodrošinātu noteiktu pastiprinājuma līmeni, jo pastiprinājuma spektra slīpums palielinās pie ieejas signāla nemainīgās jaudas. Daži kanāli ir mazāk pastiprināti un, lai nodrošinātu šiem kanāliem vajadzīgo pastiprināšanas līmeni, nepieciešama papildus pumpēšanas jauda. Tas ir izskaidrojams, ka, noteikts populācijas inversijas līmenis un līdz ar to arī noteikts pastiprinājuma spektra slīpums garām *EDF*, sasniegts, izmantojot augstāku saražotā pastiprinājuma līmeni. Jāņem vērā arī tas, ka garākiem *EDF* ir nepieciešama lielāka pumpēšanas jauda, lai sasniegtu noteiktu populācijas inversijas līmeni *EDF* tālajā galā, kas ir svarīgi, lai izvairītos no pastiprinātā signāla jaudas absorbcijas šajā leģētās šķiedras daļā.

Raugoties no enerģijas patēriņa viedokļa, energoefektīvākā ir sistēma ar trim *EDFA* pastiprinātājiem un 100 km garu pastiprināšanas apgabalu (105 mW pumpēšanas jauda un 24 m *EDF*) nodrošina vajadzīgo signāla kvalitāti. Sistēmā ar 75 km garu pastiprināšanas apgabalu un 4 *EDFA* pastiprinātājiem, kopējā pumpēšanas jauda un *EDF* kopējais garums ir 120 mW un 28 m un, izmantojot tikai divus *EDFA* pastiprinātājus (150 km garš pastiprināšanas apgabals) - 130 mW pumpēšanas jauda un 22 m *EDF*. Risinājums ar trim pastiprinātājiem un 100 km garu pastiprināšanas apgabalu rada vismazākos pastiprinātā signāla traucējumus. 100 km garā pastiprināšanas apgabalā jaudas sods ir 0,32 dB, kas ir par 0,08 dB mazāk nekā sistēmā ar 75 km garu pastiprināšanas apgabalu (0,40 dB) un par 1,03 dB mazāks, nekā sistēmā ar 150 km garu pastiprināšanas apgabalu (1,35 dB). Jaudas sods sistēmā ar trim *EDFA* pastiprinātājiem ir mazāks nekā sistēmā ar četriem *EDFA* pastiprinātājiem, kaut arī saražotais *ASE* daudzums uz katru pastiprinātāju gadījumā, ja tika izmantoti četri *EDFA* pastiprinātāji, bija mazāks nekā sistēmā ar trim *EDFA* pastiprinātājiem. Tas ir saistīts ar faktu, ka katrs nākamais pastiprinātājs ne tikai rada savu *ASE*, bet arī pastiprina iepriekšējā *EDFA* pastiprinātāja radīto *ASE*, tāpēc sistēmā ar četriem *EDFA*, kopējais *ASE* daudzums uztvērēja ieejā ir lielāks, jo ir lielāks pastiprinātāju skaits. Liela jaudas sodu vērtība sistēmā ar 150 km garu pastiprināšanas diapazonu (divi *EDFA* pastiprinātāji) ir saistīta ar neatbilstībām, ko rada šķiedru nelinearitāte.

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

3. WDM-PON PIEKĻUVES SISTĒMAS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS

Pēdējo desmitu gadu laikā telekomunikāciju nozares lielā izaugsme ir palielinājusi vajadzību pēc liela joslas platuma [83]. Pašreizējā vajadzība pēc lietojumprogrammām ir uzlikusi tīkla inženieriem atrast risinājumus vai metodes, lai tiktu galā ar mūsdienu paaudzes pieprasījumu, kas prasa lielāku datu pārraides ātrumu. Tikai optiskā šķiedra var nodrošināt tik ātrdarbīgu datu pārraidi kā vairāki Gbit/s par izdevīgu un ekonomisku cenu [84].

Datu pārsūtīšanai ar vairākiem multipleksēšanas paņēmieniem tiek izmantota pasīvos optisko tīklos, lai palielinātu datu pārraides ātrumu, sākot no pakalpojumu sniedzēja centrālā biroja, kuram ir optiskās līnijas terminālis (*OLT*), izmantojot optisko sadales tīklu (*ODN*), līdz galalietotāju mājai, kurā ir optiskā tīkla iekārta (*ONU*) [85-86]. Galvenās izmantotās multipleksēšanas metodes ir *TDM-PON*, taču tagad šī metode ir sasniegusi tādus posmus, kad nespēj nodrošināt lietotāju un tirgus prasības. Tāpēc izstrādātāji sāk izmantot *WDM-PON* risinājumus. *WDM-PON* metode ir fiziski dārga (infrastruktūra, aprīkojums un tehnoloģija), bet elastīga datu jaudas prasību ziņā. No otras puses, tā ir kļuvusi par ārkārtīgi pieņemamu metodi jebkura tīkla vārtejai, jo tai ir milzīga efektivitāte un augsta drošība [87].

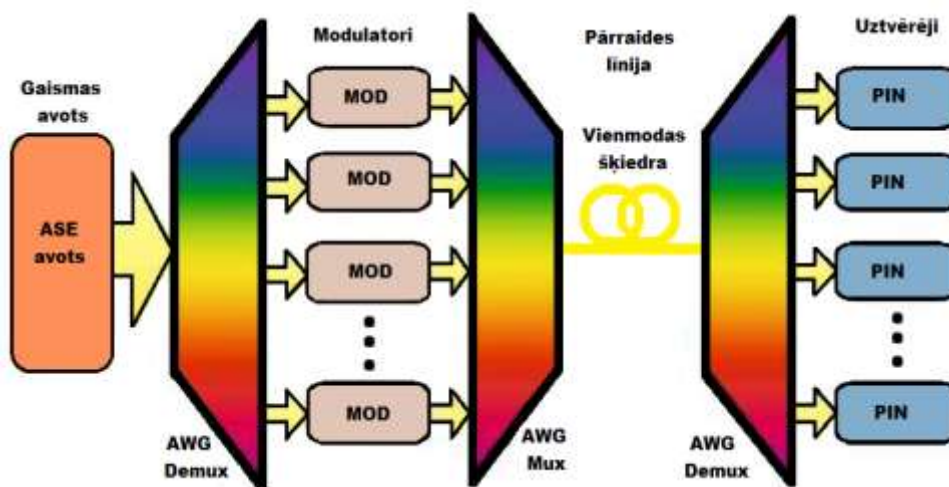
3.1. Optiskās SS-WDM-PON piekļuves sistēmas novērtējums ar platjoslas gaismas avotu

Palielinoties interneta lietotāju skaitam un aplikāciju skaitam, piemēram, straumēšanas video, tiešsaistes spēles, failu koplietošana, video konferences un citas, parādās dažādi izaicinājumi tīklu operatoriem un spiež tiem pāriet uz jaunākām arhitektūrām un tehnoloģijām [88]. Nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem (*NG-PON*) vajag nodrošināt lielāku datu pārraides ātrumu, vienlaikus saglabājot *CAPEX* un *OPEX* iespējami zemu [34]. Ir divi galvenie faktori, kas varētu ietekmēt telekomunikāciju tīklus nākotnē. Pirmais ir atbalstīt platjoslas datu pārraidi un otrs - izmantot arhitektūras, kas ir gan ekonomiskas, gan energoefektīvas [35-36]. Daudzsološa tehnoloģija, kas apmierinātu augošās joslas platuma prasības, visā pasaulē ir spektrāli sagriezts viļņgarumdales blīvēšanas pasīvais optiskais tīkls, tiek saukts *SS-WDM-PON*. Šīs tehnoloģijas priekšrocība ir tās spēja izvietot elektriskos un optikas elementus vienā centrālajā birojā (*CO*) un vienkāršot *NG-PON* tīkla arhitektūru, kā arī lietot tikai vienu platjoslas gaismas avotu (*BLS*) visiem lietotājiem [34, 89-90]. *SS-WDM-PON* optiskā sistēma ir energoefektīva un pēc izmaksām ekonomiska, jo viens gaismas avots tiek dalīts starp vairākiem lietotājiem, nevis izmanto individuālo gaismas avotu katram no tiem [91].

SS-WDM-PON sistēmai ir tādas pašas priekšrocības kā tradicionālai *WDM-PON* sistēmai, vienlaikus izmanto zemas izmaksas nekoherentu gaismas avotu, piemēram tādu kā pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) avotu vai gaismas diodi (*LED*). *SS-WDM-PON* pārraides sistēmas darbība ir ierobežota ar hromatisko dispersiju (*CD*) [90, 92]. Dispersija izraisa optiskā signāla impulsu paplašināšanos un zaudē savu formu pārvietojoties optiskajā šķiedrā. Tāpēc tas ierobežo pārraidītā signāla kvalitāti, maksimālo sasniedzamo datu pārraides ātrumu un

pārraides sistēmas pieejamību [2, 93]. Optiskās joslas platums vienam kanālam *SS-WDM-PON* sistēmā ir liels salīdzinot ar bitu pārraides ātrumu, tāpēc *CD* būtiski degradē sistēmas veiktspēju vairāk nekā tas ir novērots parastajām uz lāzera balstītām sistēmām, līdzīgi kā *WDM-PON* [37, 91]. Dažādas *CD* kompensācijas metodes var izmantot fiziskajā slānī *NGPON* sistēmām [92]. Tās var būt dispersijas kompensējošā šķiedra (*DCF*) vai šķiedra Brega režģis (*FBG*). Pētījumos [37] un [94] *FBG* nodrošināja labāku sniegumu nekā *DCF*, kas tika izmantots *CD* kompensācijai, tāpēc *FBG* arī tiek izmantots kā efektīva *CD* kompensācijas metode šajā pētījumā. Pētīsim 16-kanālu *SS-WDM-PON* sistēmas darbību ar tipisku piekļuves tīkla 20 km pārraides līnijas garumu.

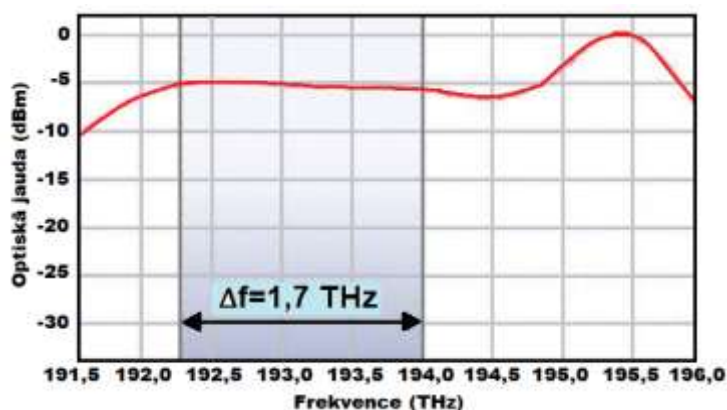
Spektra sagriešanas tehnika ir viena no pieejamajām metodēm *WDM-PON* sistēmās, lai samazinātu komponentu izmaksas un vienkāršotu *PON* tīkla arhitektūru [91]. Kā jau tika minēts iepriekš, tad šī tehnika izmanto vienu *BLS*, ko paredzēts pārraidīt uz lielu skaitu viļņa garuma kanālu. *BLS*, piemēram kā *LED* vai *ASE*, var tikt izmantota datu pārraidei spektra sagriešanas sistēmās. Kā parādīts 3.1. att., nekoherētā *BLS* (piemēram kā *ASE*) tiek sagriezta vienādi izvietotos vairāku viļņa garumu kanālos [39]. *BLS* parasti tiek sagriezts ar sakārtotu viļņvadu režģa masīvu (*AWG*). Pēc tam optiskās daļas modulējas ar optisko modulatoru un multipleksējas ar otro *AWG*, lai pārraidītu pa vienmodu optiskās šķiedras (*SMF*) diapazonu. Optiskie kanāli tiek demultipleksēti ar pēdējo *AWG*, kas atrodas pēc *SMF* šķiedras intervāla un tiek saņemti tiešā detektēšanas optiskajā uztvērējā, kurā tiek ieviesta *PIN* fotodiode vai lavīnas fotodiode (*APD*). Jāņem vērā, ka lielais griezuma platums ne tikai palielinās kanāla kopējo jaudu, bet arī palielinās dispersijas ietekmi uz raidītāja optisko signālu un šķēršļiem starp kanāliem [40].



3.1. att. *SS-WDM-PON* pārraides sistēmas darbības princips ar *N* kanāliem.

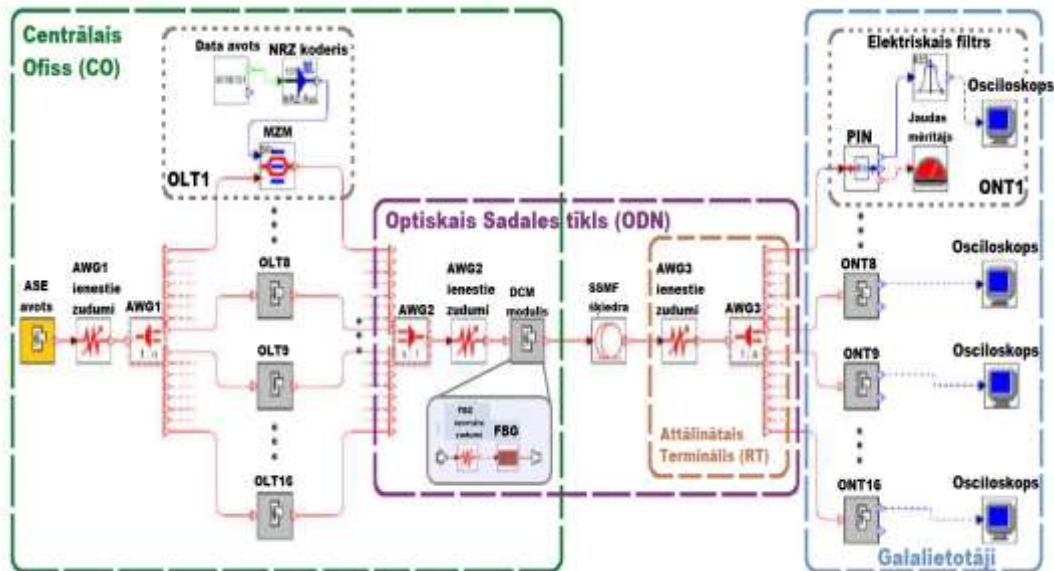
Pētāmajā *SS-WDM-PON* sistēmā izmantosim iepriekš izstrādātu [40] *ASE* avotu, jo tam ir pietiekoši liela optiskā izejas jauda un vienmērīgs jaudas sadalījums pārraides sistēmas darbības diapazonā. Šim *ASE* avotam ir samērā plats frekvenču spektra diapazons no 192,3 THz līdz 194,0 THz. Vienmērīgs *ASE* gaismas avots izveidots no diviem kaskādē saslēgtiem *EDFA* pastiprinātājiem, jo šī metode ļauj sasniegt vienmērīgāku *ASE* izejas spektru, jo Er^{3+} joni tiek labāk izmantoti vairākos pastiprinātājos. Jāņem vērā, ka pēc noklusējuma iegūtais *ASE* spektrs *EDFA* izejā nav vienmērīgs un jāveic manipulācijas ar *EDFA* parametriem, lai padarītu to vienmērīgu diapazonā, kas nepieciešams *WDM* sistēmas realizācijai. Tādi parametri kā *EDFA* pumpēšanas lāzera jauda, tā viļņa garums un ar erbiju leģētās šķiedras garums ietekmē Er^{3+}

inversiju - attiecību starp ierosinātā erbija jonu skaitu un zemes stāvokli. Šī inversija tieši ietekmē formu, kā rezultātā rodas ASE spektrs. Tāpēc, vienlaikus palielinot pumpēšanas jaudu no 100 mW līdz 600 mW visiem pumpēšanas lāzeriem (pirmais *EDFA* pumpēts ar 1480 nm un otrs *EDFA* pumpēts ar 980 nm un 1480 nm), autori [40] atrada optimālu pumpēšanas jaudu, kas ir 400 mW, lai ASE avotam būtu vienmērīgs spektrs. Izmantojot šo divu kaskādes *EDFA* pastiprinātāju konfigurāciju, izveidots ASE platjoslas gaismas avots ar +23 dBm (200 mW) izejas jaudu un vienmērīgu izejas spektru diapazonā no 192,3 THz līdz 194,0 THz frekvencē (viļņu garums diapazonā no 1545,32 nm līdz 1558,98 nm), kuru sadala, izmantojot *AWG* demultipleksoru, tādā veidā iegūstot 16 kanālus ar kanālu intervālu 100 GHz *SS-DWDM PON* sistēmā. Realizētā platjoslas ASE gaismas avota izejas spektrs attēlots 3.2. att. Kā tika minēts iepriekš, tad pasīvo optisko tīklu arhitektūra paredz tikai pasīvo elementu pielietojumu optiskajā sadales tīklā, tāpēc *EDFA* pastiprinātāja izvietojums centrālajā ofisā ir pieļaujams un pārraides līnija ir pasīva.



3.2. att. Realizētā platjoslas ASE gaismas avota izejas spektrs.

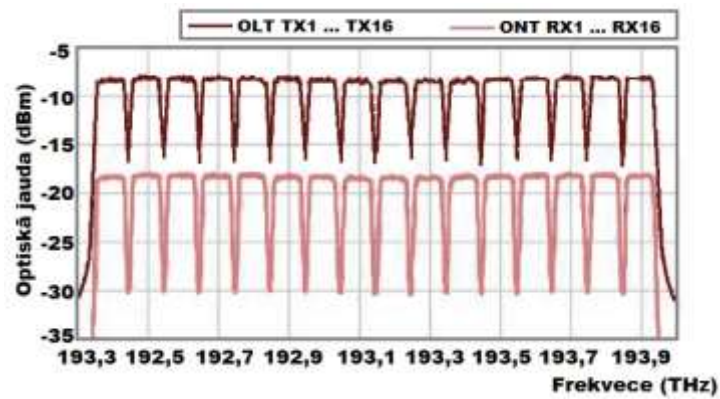
Realizējam *NGPON* 16 kanālu spektra sagrieztu *WDM-PON* piekļuves sistēmu OptSim simulācijas programmatūrā [175], kas ir uzticama un plaši izmantota augstas veiktspējas optisko sakaru sistēmu projektēšanā [95]. Intensīvi modulētā *SS-WDM-PON* sistēma ar *NRZ* līnijas kodu un tiešo detektēšanu, pārraides ātrums (2,5 Gbit/s) ir ierobežots pārāk intensīva trokšņa dēļ, kas rodas no nekoherēta ASE avota [37, 39]. Simulētās shēmas darbību novērtējam ar iegūto bitu kļūdu koeficientu (*BER*) vērtību katram *WDM* kanālam optiskās šķiedras galā katrā optiskā tīkla terminālī (*ONT*). *BER* sliekšnis šai pārraides sistēmai ir iestatīts $< 10^{-10}$. *SS-WDM-PON* sistēmai (skat. 3.3. att.) ir tikai viens *BLS* gaismas avots (*ASE*), ko kopīgi izmanto visi *ONT*. Platjoslas ASE gaismas avots ir spektrāli sagriezts, izmantojot 16 kanālu plakānu *AWG* filtru ar 100 GHz kanāla intervālu. Pēc spektra sagriešanas, ko realizē pirmais *AWG1*, optiskās šķiedras tiek pārraidītas uz optiskās līnijas termināļa (*OLT*) raidītājiem, kas atrodas centrālajā ofisā (*CO*).



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

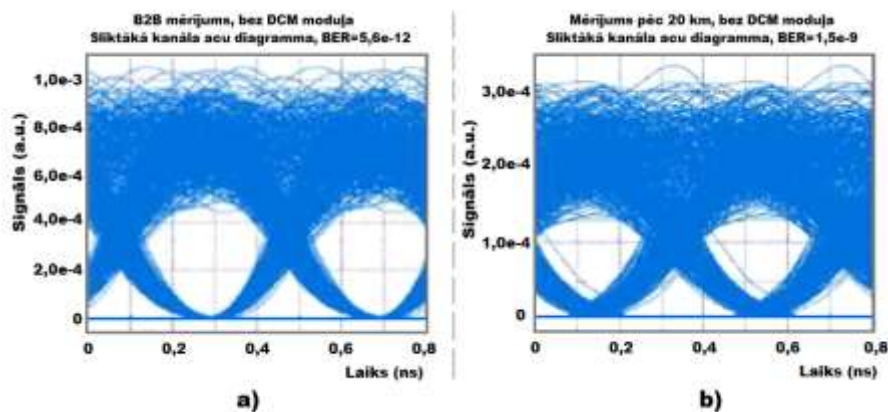
Katrs *OLT* sastāv no elektriskā datu avota, NRZ koderis un ārējā MZM modulatora. Ģenerētā bitu secība no datu avota tiek nosūtīta uz elektriskā signāla koderi, kur tiek veidoti NRZ impulsi. Pēc tam izveidotie elektriskie NRZ impulsi tiek pārraidīti uz Mach-Zehnder modulatoru. Katram MZM ir 5 dB ienestie zudumi, 20 dB izdīšanas attiecība, modulācijas spriegums ir 5 V un maksimālais caurlaidības nobīdes spriegums ir 2,5 V. Optiskie signāli no visiem *OLT* raidītājiem ir savienoti ar optisko multipleksoru (AWG2) un pārraidīti pa ITU-T G.652 standarta vienmodu optisko šķiedru (SMF), kas atrodas optiskajā sadales tīklā (ODN). AWG bloka ienestie zudumi tiek simulēti, izmantojot papildus vājinātājus. ODN ietver fiziskās šķiedras un optiskās ierīces, kas PON tīkla lietotājiem izplata optiskos signālus no centrālā ofisa (CO). Hromatiskās dispersijas kompensēšanai ODN izmanto hromatiskās dispersijas moduli (DCM) ar šķiedru Brega režģi (FBG). Papildu vājinātājs tiek izmantots FBG ienesto zudumu simulācijai. Katrs ONT sastāv no PIN fotodiodes (jūtība ir -25 dBm pie $BER=10^{-10}$), Besēļa elektriskā zemfrekvences filtra (-3 dB elektriskā joslas platums $BE=1,6$ GHz) un elektriskā osciloskopa, kas novērtē saņemtā optiskā datu signāla kvalitāti (piemēram, parādīt acu diagrammu) [95]. Pārraides sistēmas darbība tiek novērtēta pa 20 km pārraides līniju, jo šāds optiskās šķiedras intervāla garums ir noteikts ITU-T G.984.2 rekomendācijā, kā šķiedru attāluma augšējā robeža starp optiskās līnijas termināli (OLT) un optiskā tīkla termināli (ONT) Gigabitu pasīvā optiskā tīklā (GPON) [39, 94].

SS-WDM-PON optisko signālu spektrs visu *OLT* raidītāju izejā (*OLT TX1* līdz *TX16*) un spektrs *ONT* ieejā (*ONT RX1* līdz *RX16*) attēlots 3.4. att. Pētījumā tika noskaidrots, ka AWG bloka optimālā 3-dB joslas platuma vērtība, maksimālai saņemtā signāla kvalitātei un minimālo šķērstraucējumu vērtībai starp kanāliem, ir 90 GHz spektra sagrieztā optiskā piekļuves sistēmā [39, 95]. Jo lielāks ir spektrālās joslas platums, jo augstāku veiktspēju var iegūt līdz noteiktam punktam, kad rodas šķērstraucējumi starp kanāliem [91]. Attiecīgi pastāv kompromiss starp optiskā filtra joslas platumu un šķērstraucējumu starp spektra sagriežtiem kanāliem, kas var izraisīt optiskās piekļuves sistēmas veiktspējas kritumu.



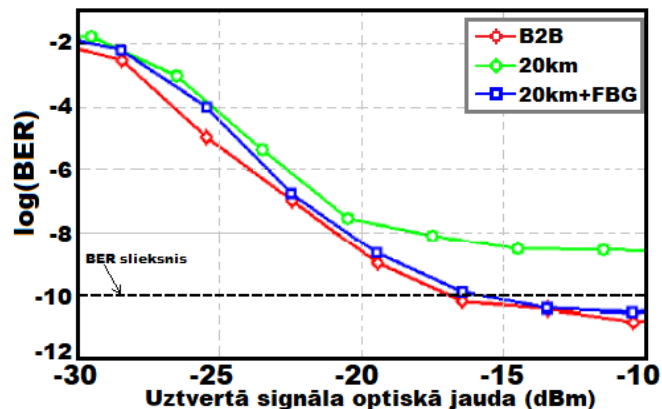
3.4. att. Pārraidīto signālu optiskās jaudas spektri *OLT* raidītāju izejā un *ONT* uztvērēju ieejā pēc 20 km pārraides.

Spektra sagrieztā *WDM-PON* sistēmā acu diagrammās var redzēt signāla kropļojumus. 3.5. b) att. redzams, ka pēc 20 km pārraides bez *CD* kompensācijas *SS-WDM-PON* sistēmas veiktspēja ir slikta un datu pārraide ar $BER < 10^{-10}$ nav iespējama. Tāpēc *CD* kompensēšanai un piedāvātās 16 kanālu *SS-WDM-PON* sistēmas veiktspējas uzlabošanai izmantots šķiedru Brega režģa dispersijas kompensācijas modulis. Noskaidrots, ka optimālais *CD* daudzums, kas ir jākompensē ar *FBG DCM* 20 km *SMF* šķiedras diapazonam, ir 310 ps/nm pie 1550 nm viļņa garuma.



3.5.att. 16 kanālu *SS-WDM-PON* pārraides sistēmas sliktākā uztvertā kanāla acs diagrammas un *BER* vērtības bez *DCM* moduļa, a) *B2B* signālam un b) signālam pēc 20 km pārraides līnijas.

Minimālajai saņemtajai jaudai, lai iegūtu $BER < 10^{-10}$, jābūt lielākai par -17,9 dBm *B2B* konfigurācijai (bez pārraides līnijas) un -16 dBm - 20 km *SMF* pārraides līnijai ar *CD* kompensāciju. Bez *CD* kompensācijas nav iespējama datu pārraide vairāk nekā 20 km šķiedras diapazonā ar $BER < 10^{-10}$. Kā redzams 3.6. att., jaudas zudumi, saņemot optisko signālu 16 kanālu *SS-WDM-PON* sistēmai ar $BER < 10^{-10}$ pēc 20 km pārraides un *CD* kompensācijas ar *FBG DCM*, ir 1,9 dB. Šos zudumus ievieš *ASE* platjoslas gaismas avota šķērstraucējumu efekti, dispersija un trokšņiem līdzīgs raksturs.



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

Šajā apakšnodaļā realizēta un izpētīta *SS-WDM-PON* 16 kanālu pārraides sistēmas darbība, kas ir piemērots *NGPON* tehnoloģijas risinājums. Realizētā sistēma nodrošina datu pārraidi vairāk kā 20 km šķiedru diapazonā. Lai nodrošinātu augstu sistēmas veiktspēju ar $BER < 10^{-10}$ piekļuves sistēmā tika izmantots *DCM* modulis (ar šķiedru Brega režģi) hromatiskās dispersijas kompensācijai. *SS-WDM* sistēmas arhitektūra ir labs risinājums nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem, lai atbalstītu liela joslas platuma datu pārraidi no *OLT* uz *ONT*.

3.2. Kombinēto risinājumu novērtējums *WDM-PON* pārraides sistēmā

Tā kā palielinās pārraidāmo datu apjoma pieaugums *PON* tīklos, tad pakalpojumu sniedzējiem ir jāievieš jaunas tehnoloģijas, risinājumi, lai palielinātu esošās sakaru sistēmas caurlaides un kapacitātes prasības.

Pārraides tīkla informācijas kapacitāti var palielināt: palielinot pārraides kanāla ātrumu vai samazinot kanālu intervālu. Tomēr abus šos risinājumus nevar izmantot, ja tiek izmantoti tradicionālie optisko signālu modulācijas formāti, piemēram, *NRZ-OOK* [96]. Lai gan modulācijas formāta maiņa nozīmē iekārtu nomaiņu, kā arī būtiskus papildus izdevumus interneta pakalpojumu sniedzējiem. Tādēļ šie izdevumi var kļūt par kritisku šķērslī pārraides sistēmas uzlabošanai. Šī iemesla dēļ ir svarīgi atrast risinājumu, kas nodrošinās pakāpenisku pāreju uz augstāku datu pārraides ātrumu kanālā ar pakāpenisku izdevumu pieaugumu. Šis pārejas risinājums ir nepieciešams arī tad, ja dažādi interneta pakalpojumu sniedzēji kopīgi izmanto infrastruktūru [97].

Viens no vairāk pētītajiem risinājumiem, kā palielināt *WDM* pārraides sistēmas kopējo kapacitāti, ir palielināt tās spektrālo efektivitāti (*SE*) [27, 98].

Pastāv divi populāri risinājumi esošo *WDM* pārraides sistēmu *SE* palielināšanai. Izmantojot augstāku datu pārraides ātrumu un pielietojot samērā šaurāku kanālu intervālu, abi risinājumi ļauj pārraidīt lielāku bitu skaitu, izmantojot vienu hercu no pieejamās joslas platuma [27, 99]. Šie koncepti tiek uzskatīti par visrentablākajiem, jo spēj maksimāli uzturēt jau izmantoto infrastruktūru [98]. Tomēr, ieviešot iepriekšminētās koncepcijas, rodas vairākas tehnoloģiskas problēmas. Pirmkārt, datu pārraides ātruma palielināšanai ir nepieciešamas jaunas un dārgākas iekārtas, kā arī palielināt jaudas patēriņu *WDM* pārraides sistēmai [96, 100]. Svarīgi ņemt vērā,

ka tradicionāli izmantotā *NRZ* kodēšana nespēj nodrošināt pietiekamu signāla kvalitāti, vienlaikus palielinot datu pārraides ātruma vai samazinot kanālu intervālu. Tas var izraisīt arī īsāku sasniedzamību, jo palielinās optiskie pārraides traucējumi [96, 99-100]. Līdz ar to, dažos gadījumos jāņem vērā modulācijas metodes ar labāku spektrālo efektivitāti un sasniedzamību. Izmantojot dažādus modulācijas formātus, ir nepieciešams nomainīt optiskos raidītājus un dažos modulācijas formātos nomainīt arī uztvērējus. Līdz ar to tas rada izdevumu pieaugumu tīkla uzlabošanai.

Kombinētās pārraides sistēmas metodes izmantošana ir efektīvs risinājums attiecībā uz *SE* un izdevumiem pārraides sistēmas attīstībā. Kombinētās pārraides sistēmas gadījumā jauni datu pārraides ātrumi vai modulācijas formāti var būt piemēroti tikai daļai kanālu, kas nodrošinātu mazākus izdevumus. Tāpēc kombinētās pārraides sistēmas ieviešana ļauj nodrošināt maksimālu *SE*, saglabājot nepieciešamo signāla kvalitāti ar ierobežotām izmaksām. Tas garantē procentuālas izmaiņas kanālos ar augstu datu ātrumu, citu modulācijas formātu vai minimālu kanālu intervālu. Tādējādi kombinēto *WDM* sistēmu var uzskatīt par starpposmu pakāpeniskai pārejai uz augstāku datu pārraides ātruma sistēmu, kā arī pāreju uz citu modulācijas formātu. Nepieciešamība izmantot pārraidi kanālos ar kombinētiem modulācijas formātiem (*angl. Mixed Modulation Format - MMF*) vai kombinētiem līnijas ātrumiem (*angl. Mixed Line Rate - MLR*) dod atspērienu interneta pakalpojumu sniedzējiem pārraides tīkla infrastruktūras attīstībā [98-99].

Šīs apakšnodaļas uzdevums ir novērtēt *MMF* un *MLR* līdzās pastāvēšanu, kas tiek izmantoti pārejas posma gadījumā, lai nodrošinātu augstāku datu pārraides ātrumu ar mazākām izmaksām. Tiks pētīts, kā *MMF*, *MLR* un nevienmērīgo kanālu intervāli ietekmē *WDM-PON* pārraides sistēmas darbību, salīdzinot kombinēto konfigurāciju sistēmas darbību ar *WDM-PON* pārraides sistēmas darbību ar vienādiem kanālu intervāliem. Novērtēsim spektrālo efektivitāti kombinētā *WDM-PON* sistēmā salīdzinot ar *WDM-PON* ar vienādiem modulācijas formātiem, datu pārraides ātrumiem un kanālu intervāliem visos kanālos.

Atsevišķi novērtēsim *MLR* sistēmas darbību un sistēmu ar nevienādiem kanālu intervāliem, abos gadījumos izmantojot *MMF*. Tas ļauj izpētīt katras koncepcijas ietekmi.

Duobinārais (*DB*) intensitātes modulācijas formāts izmantots kā otrs modulācijas formāts. *DB* formāts tiek izmantots, lai piemērotu minimālo kanāla intervālu kombinētā pārraides sistēmā ar nevienādiem kanāla intervāliem tikpat labi kā 40 Gbit/s datu ātruma *MLR WDM-PON* sistēmā. Izmantojot *DB* modulācijas formātu tradicionālajā *NRZ* sistēmā, realizējam konceptu kombinētā pārraides sistēmā ar *MMF*.

DB kodēšanas izvēle kombinēto risinājumu ieviešanai balstās arī uz iepriekš veiktajiem pētījumiem. Liels skaits pētījumu demonstrē, ka *DB* modulācijas formāts ir perspektīvs risinājums, nodrošinot augstāku datu pārraides ātrumu un mazāku kanālu intervālu, jo tas ir ļoti izturīgs pret hromatisko dispersiju un ir ierobežots platuma spektrs. Piemēram, autori [101] atklāj, ka *DB* parādīja savu pārākumu salīdzinot ar citiem pētītajiem intensitātes formātiem (*NRZ*, *RZ*, *CSRZ*), sasniedzot minimālu kanālu intervālu, kas vienāds ar 12.5 GHz ar 10 Gbit/s *WDM* sistēmu. *DB* bija arī efektīvāks nekā citi formāti ar 40 Gbit/s pārraides ātrumu. Turklāt saskaņā ar rezultātiem, kas parādīti [103], *DB* ir visizdevīgākais formāts izmantošanai *MLR* sistēmās, salīdzinot ar *NRZ* un *DPSK*. Turklāt ziņojumā [102] autori norāda, ka *DB* nodemonstrēja augstu *SE* līmeni salīdzinot ar *NRZ*, *RZ* un *CSRZ* ātrgaitas datu sistēmā ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMFs*. Turklāt *DB* raidītājs ir daudz vienkāršāks salīdzinot ar moderniem modulācijas formātiem, piemēram, *PAM*, *QAM* un *QPSK*. Kā teikts [104], *DB*

modulācijas formāts piedāvā vislabāko uztvērēja jūtību un ir efektīvāks salīdzinot ar *PAM-4* 40 Gbit/s *WDM-PON* pārraides sistēmās. Ir arī svarīgi atzīmēt, ka *DB* neprasa mainīt uztvērēju, jo ir iespējams izmantot to pašu uztvērēju, kā tas ir *NRZ* kodēšanas gadījumā.

Pirmajā posmā izpētām pamata pārraides sistēmas darbību. Novērtēsim 10 Gbit/s *DB* pārraides sistēmas darbību, pētot *DB WDM-PON* priekšrocības salīdzinot ar *NRZ WDM-PON*. Abām sistēmām noteiksim minimālo pieļaujamo un vienādu frekvenču intervālu, kā arī izpētīsim sistēmas darbību ar lielāku datu pārraides ātrumu (40 Gbit/s). Tas tiek darīts, lai pamatot *DB* ieviešanas lietderību pētītajā *WDM-PON* sistēmā, kā arī izpētīt abu formātu iespējas, lai varētu realizēt kombinētās pārraides sistēmas.

Otrajā pētījuma posmā mainām pusei kanālu *NRZ* kodēšanu uz *DB*. Sākumā pielietojam kombinēto pārraides sistēmu ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMF*. Pēc tam pētām kombinēto pārraides sistēmu ar *MLR* un *MMF*. Novērtēsim kā sistēmas darbība mainās salīdzinot ar *NRZ* sistēmu un gadījumā ar sistēmu ar *MLR*, ar *MMF* un gadījumā ar sistēmu ar nevienādiem kanāla intervāliem. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, pētām kombinēto pārraides sistēmu piemērošanas ietekmi, salīdzinot ar pirmā posma izpētīto sistēmu darbību.

Rezultāti iegūti, izmantojot *OptSim* simulācijas programmatūru. *OptSim* aprēķini tiek veikti, izmantojot laika apgabala sadalītā soļa metodi (*TDSS*), kuras pamatā ir šķiedras sadalīšana nelielos intervālos, lai atsevišķi aprēķinātu lineāro un nelineāro efektu ar nelielu kļūdas varbūtību [175].

Novērtējam izvēlētajās pārraides sistēmas darbību no *Q*-faktora viedokļa, kas raksturo saņemtā signāla kvalitāti. Vienādojumā (3.1.) tiek noteikts *Q*-koeficienta signālu vidējās vērtības un standarta novirzes izteiksmē.

$$Q = \frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.1.)$$

kur *m* un *σ* ir saņemtā signāla vidējā un standarta novirze parauga ņemšanas momentā, kad tiek pārraidīti loģiskie "1" un "0" [76]. Tomēr, saskaņā ar [139], pieņemam, ka uztvērēja troksnis ir Gausa. *BER* var aprēķināt, izmantojot *Q*-koeficientu, kas izmantojot vienādojumu (3.2.).

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.2.)$$

Saskaņā ar vienādojumu (3.2), *BER* 10⁻⁹ atbilst *Q*-koeficientam, kas vienāds ar 15,57 dB, *BER* 10⁻¹⁰ - *Q*-koeficients ir 16,06 dB, *BER* 10⁻¹² ir 16,95 dB un *BER* 10⁻¹⁶ ir 18,3 dB [104].

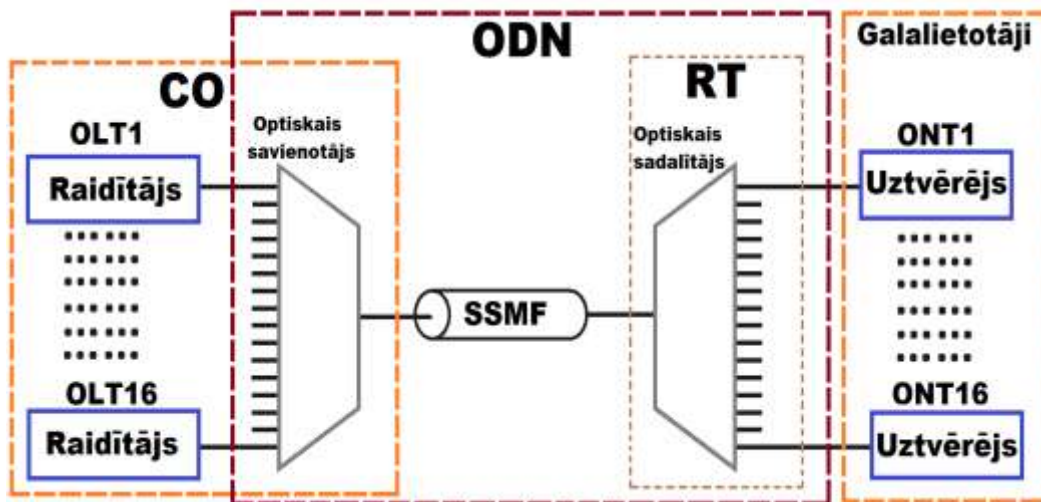
SE tiek aprēķināts šādi:

$$SE = \frac{(\text{Kanālu skaits} * \text{Kanāla datu pārraides ātrums})}{(f_{\text{pēdējais}} - f_{\text{pirmais}})} \quad (3.3.)$$

kur *f*_{pēdējais} un *f*_{pirmais} ir pēdējā un pirmā kanāla frekvences.

Vienādojums (3.3.) nodrošina *SE* novērtēšanu, ņemot vērā atšķirīgus kanālu datu pārraides ātrumus un nevienādas atstarpes starp kanāliem.

3.7. att. parādīta simulācijas sistēmas struktūra, kas atbilst tipiskajai *WDM-PON* struktūrai lejupplūsmas pārraidei.



3.7. att. Pētīto 16 kanālu *WDM-PON* pārraides sistēmas struktūra.

Optiskais līnijas terminālis (*OLT*) sastāv no optiskā raidītāja. Raidītāja struktūra ir atkarīga no modulācijas formāta. Tomēr abi raidītāji ir balstīti uz nepārtrauktā starojuma (*CW*) lāzera ar 6 dBm izejas jaudu un 0,1 MHz līnijas platumu [105]. Optiskā tīkla terminālis (*ONT*) sastāv no optiskā uztvērēja, kura pamatā ir *PIN* fotodiode ar -18,5 dBm jūtību [106]. Optiskajā sadales tīklā (*ODN*) ietilpst optiskā šķiedra (*G.652.D*), *WDM* savienotājs un sadalītājs. Attiecībā uz sistēmām ar vienādiem kanāliem tiek izmantots sakārtots viļņvadu režģa (*AWG*) savienotājs un sadalītājs. Kombinēto sistēmu gadījumā ir nepieciešams izmantot optiskos filtrus, kā arī sadalītājus un kombinētājus, lai nodrošinātu dažādus kanālu intervālus un atbilstošu joslas platumu katram modulācijas formātam. Kā liecina simulācijas rezultāti, *AWG* savienotāja maiņa uz optiskā filtra un optiskā kombinētāja kombināciju, kā arī *AWG* savienotāja maiņa uz optiskā filtra un optiskā sadalītāja kombināciju būtiski neietekmē sistēmas darbību.

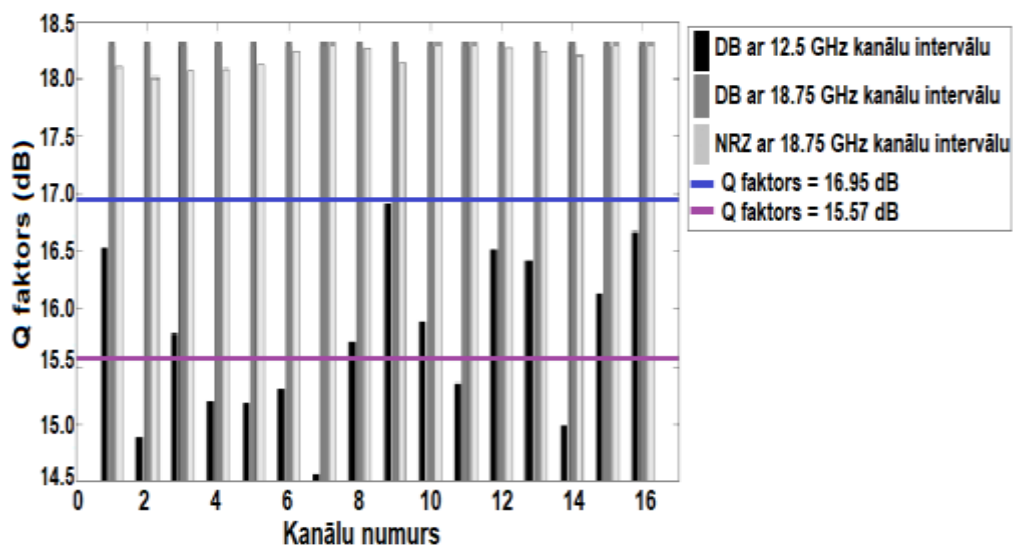
Pirmā posma sākumā noskaidrojam minimālos kanālu intervālus, kas tika realizēti sistēmā ar *NRZ* kodēšanu un sistēmā ar *DB* kodēšanu. Abu sistēmu veiktspēja tika novērtēta *Q*-koeficienta izteiksmē. Kā sākotnējo sliekšni izvēlējās *Q*-koeficientu, kas vienāds ar 16,95 dB, kas atbilst *BER* vienādam ar 10^{-12} [98]. Tomēr, tā kā *Q*-koeficienta apmierinošā vērtība ir atkarīga no prasībām attiecībā uz sistēmas izturību, jāņem vērā, ka dažās aplikācijās ir pieļaujama zemākā *Q*-koeficienta vērtība [99].

Pētām pārraidi 20 km attālumā, izmantojot fiksētu kanālu intervālu, kas norādīti *ITU-T G.694.1* rekomendācijā. 100 GHz, 50 GHz un 25 GHz kanālu intervāli, gan *NRZ*, gan *DB* kodēšanai demonstrēja apmierinošu veiktspēju (*Q*-koeficients pārsniedz 16,95 dB). Tomēr 12,5 GHz kanālu intervāls *NRZ* formātā uzrādīja pārāk zemu *Q*-koeficienta vērtību (*Q*-koeficients ir vienāds ar 6,02 dB). *DB* demonstrētie rezultāti ir ievērojami labāki (*Q*-koeficients sliktākajam kanālam ir vienāds ar 14,56 dB). Tas atbilst rezultātiem, kas iegūti [78], kur izmantojot fiksēto *ITU-T G.694* frekvenču režģi, minimālais sasniedzamais kanālu intervāls *NRZ* bija 25 GHz, bet *DB* - 12,5 GHz.

Kā redzams 3.8. att., rezultāti, kas parādīti pie dažādiem kanālu intervāliem *DB* pārraides sistēmā, ir atšķirīgi (*Q*-koeficients ir diapazonā no 14,56 līdz 16,91 dB). Šie rezultāti ļauj uzskatīt, ka *DB* modulācija formāta izmantošana ar 12,5 GHz kanālu intervālu sistēmā ar nevienādiem kanālu intervāliem var uzlabot veiktspēju, jo ne visiem kanāliem ir tik mazs intervāls.

Lai sasniegtu maksimāli iespējamo SE , tika noteikts minimālais kanāla intervāls, piemērojot, ka abas sistēmas darbosies ar pietiekami augstu Q-koeficientu, izmantojot elastīgu WDM frekvenču režģi, kas aprakstīts $ITU-T G.694.1$. Samazinām 25 GHz intervālu par 6,5 GHz. Rezultātā izpētām, ka NRZ sistēmas minimālais intervāls starp kanāliem ir 18,75 GHz.

3.8. att. attēlotas Q-koeficienta vērtības visiem kanāliem NRZ un DB sistēmās.



3.8. att. Q-koeficienta veiktspēja pētāmajā DB pārraides sistēmā ar kanālu intervālu 12,5 GHz un DB un NRZ pārraides sistēmām ar kanālu intervālu 18,75 GHz 20 km attālumā.

Visas Q-koeficienta vērtības, kas ir augstākas par 18,30 (atbilst $BER=10^{-16}$), tiek noapaļotas līdz šai vērtībai. Kā var redzēt, DB modulācijas formāta veiktspēja ir labāka, bet abos formātos Q-koeficients ir lielāks par 16,95 dB, tādēļ varam pieņemt, ka NRZ modulācijas formāta veiktspēja ir apmierinoša pie 18,75 GHz kanālu intervāla.

Spektrālā efektivitāte, kas aprēķināta NRZ pārraides sistēmai ar 18,75 GHz kanālu intervālu, ir 0,61 (bit/s)/Hz, bet DB sistēmai ar 12,5 GHz kanālu intervālu ir vienāda ar 0,85 (bit/s)/Hz.

Pirmā posma otrajā daļā novērtējam, kā pārraides ātruma pieaugums līdz 40 Gbit/s ietekmē pētīto pārraides sistēmu darbību. Pētījumā izmantojām nemainīgu 100 GHz kanālu intervālu 40 Gbit/s pārraides sistēmai. Gan NRZ , gan DB pārraides sistēmas ir parādījušas zemu Q-koeficientu (vienāds ar 6,02 dB) 20 km pārraides attālumā. Tomēr, samazinot attālumu, abu sistēmu darbības atšķirība ir nozīmīga. Sistēma ar DB kodēšanu parādīja spēju nodrošināt pārraidi 12 km attālumā ar Q-koeficientu, kas pārsniedz 16,95 dB. Lai gan NRZ modulācijas formāts parādīja zemākas Q-koeficienta vērtības arī tad, kad sasniedzamība samazinās. Šie rezultāti atbilst NRZ un DB modulācijas formātu teorētiskajiem raksturlielumiem: DB formātam ir labāka dispersijas tolerance salīdzinot ar NRZ , kas ļauj nodrošināt pārraidi ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu, neizmantojot dispersijas kompensāciju. Tomēr maksimālā sasniedzamība ir ierobežota pat DB pārraides sistēmām.

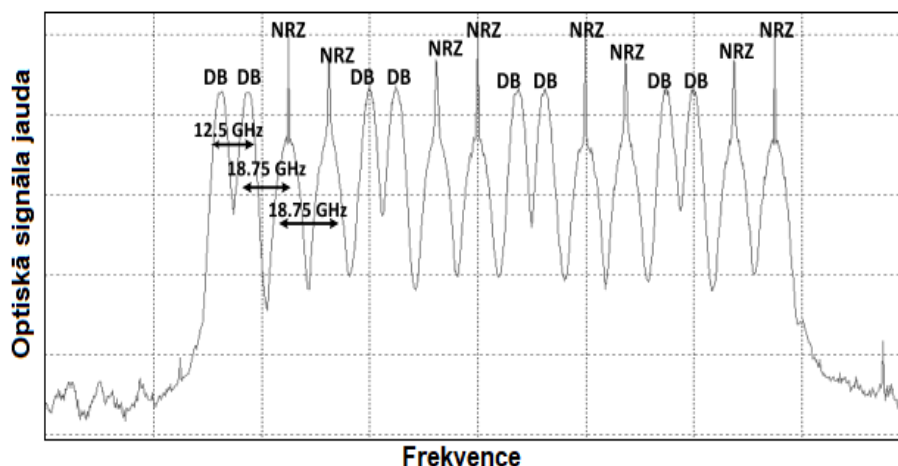
3.1. tab. apkopoti pirmā posma rezultāti, kas attēlo Q-koeficienta vērtības sliktākajiem kanāliem.

Vienād-kanālu *NRZ* un *DB* pārraides sistēmu veiktspēja

Kodēšana	Datu pārraides ātrums (Gbit/s)	Kanālu intervāli (GHz)	Pārraides distance (km)	Q-koeficients (dB)
<i>NRZ</i>	10	12.5	20	6.02
<i>DB</i>	10	12.5	20	14.56
<i>NRZ</i>	10	18.75	20	18.01
<i>DB</i>	10	18.75	20	18.38
<i>NRZ</i>	40	100	20	6.02
<i>DB</i>	40	100	20	6.02
<i>NRZ</i>	40	100	12	6.02
<i>DB</i>	40	100	12	17.64

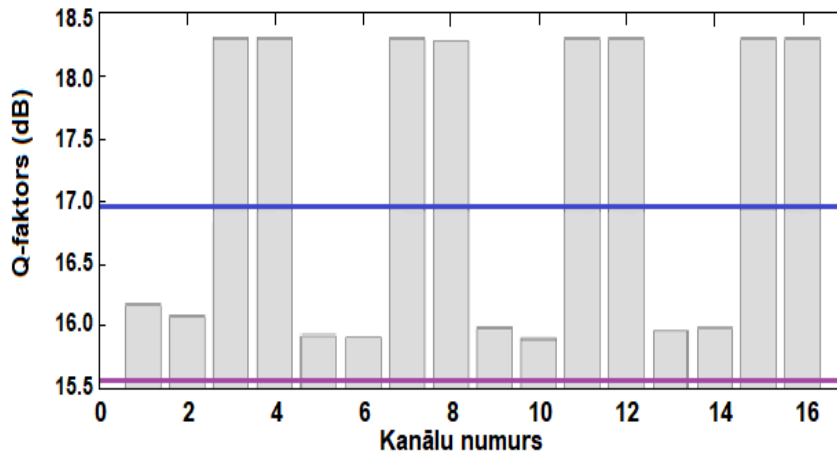
Pamatojoties uz pirmo posmu, iesaku divus kombinētos *WDM-PON* risinājumus.

Pirmais risinājums ir *MMF* sistēma ar nevienmērīgiem kanāla intervāliem. Piedāvātās *MMF* konfigurācija un kanālu intervāli ir attēloti 3.9. att.



3.9. att. Izejas spektrs kombinētai *WDM-PON* sistēmai ar *MMF* un nevienmērīgiem kanālu intervāliem.

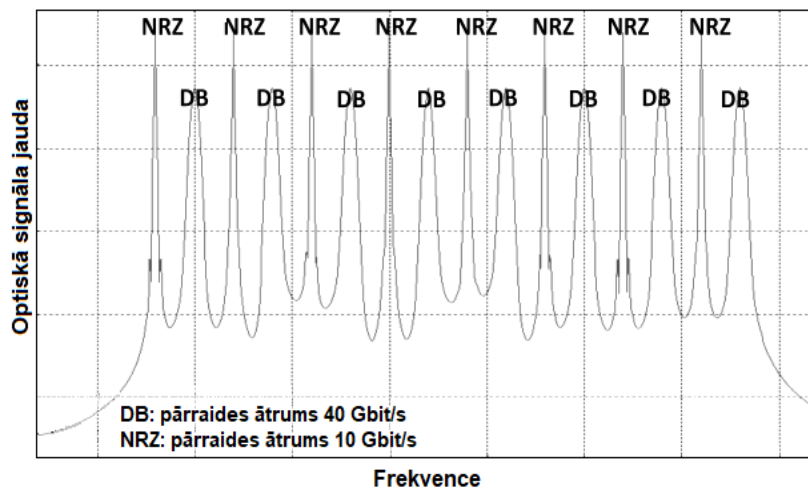
Konfigurācija, kurā divi *DB* kanāli seko diviem *NRZ* kanāliem, ļauj nodrošināt 12,5 GHz kanālu intervālu starp diviem blakus esošajiem *DB* kanāliem, saglabājot 18,5 GHz intervālu starp *NRZ* un *NRZ-DB* pāriem. Kā tika izpētīts ar simulācijām, nav iespējams nodrošināt mazāku kanālu intervālu starp *NRZ* pāri vai starp *NRZ* un *DB*, bez būtiskas *NRZ* kanāla kvalitātes samazināšanās. Šīs sistēmas *SE* ir vienāda ar 0,62 (bit/s)/Hz, bet kanālu Q-koeficienta vērtības ir attēlotas 3.10. att.



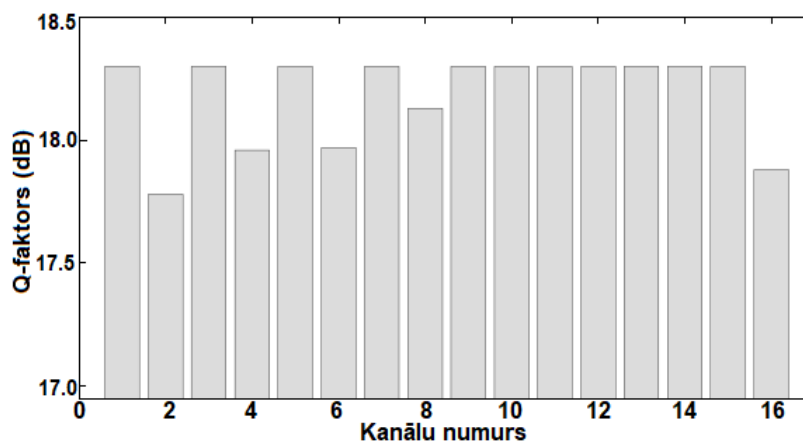
3.10. att. Q-koeficienta veiktspēja kanāliem ar kombinēto sistēmu ar *MMF* un nevienmērīgiem kanālu intervāliem 20 km attālumā.

Kā var redzēt, rezultāti ir uzlabojušies gan *DB*, gan *NRZ*. Kombinētās sistēmas Q-koeficients sliktākajam *DB* kanālam ir 15,9 dB, salīdzinot ar Q-koeficientu sliktāko kanālu, kas ir vienāds ar 14,56 dB *DB* sistēmai ar 12,5 GHz kanālu intervālu. Visbiežākais skaidrojums par Q-koeficienta pieaugumu ir kombinēto kanālu intervālu piemērošana, kas nozīmē, ka intervāls 12,5 GHz ir tikai viens no diviem sānu kanāliem. Q-koeficients *NRZ* kanālu kombinētajai sistēmai nav mazāks par 18,28 dB, salīdzinot ar Q-koeficientu 18,01 dB, ko demonstrē *NRZ* 18,75 GHz sistēma. To var izskaidrot, izmantojot šaurā spektra *DB* modulācijas formātu vienam no diviem sānu kanāliem.

3.11. att. attēlots izejas optiskais spektrs otrajam piedāvātajam risinājumam kombinētai *WDM-PON* sistēmai, simulācijā pielietojot daļēji 40 Gbit/s kanālu scenāriju *NRZ* 10 Gbit/s sistēmā. Šajā sistēmā viens 40 Gbit/s *DB* kanāls seko vienam *NRZ* 10 Gbit/s kanālam.



3.11. att. Izejas spektrs kombinētai *WDM-PON* sistēmai ar *MMF* un *MLR*.



3.12. att. Q-koeficienta veiktspēja kanāliem kombinētajā sistēmā ar *MMF* un *MLR* 20 km attālumā.

Kā redzams 3.12. att., minimālā Q-koeficienta vērtība starp *DB* kanāliem ir 17,78 dB, salīdzinot ar 17,64 dB, kas novērota sistēmai ar visiem 40 Gbit/s *DB* kanāliem. Tas nozīmē, ka *DB* modulācijas formāta veiktspēja ir kļuvusi labāka nekā kombinēto līniju ātrumu sistēmā. *NRZ* kanālu veiktspēja ir ļoti laba, *DB* kanālu klātbūtne to neietekmēja. Tomēr sistēmas *SE* ir tikai 0,27 (bit/s)/Hz, pateicoties samērā lielam 100 GHz kanālu intervālam. Saskaņā ar rezultātiem, kas iegūti [136] attiecībā uz tālsakaru *MLR WDM* sistēmu, ir iespējams sasniegt augstāku *SE* (0,68 (bit/s)/Hz), piemērojot nevienmērīgu kanālu intervālu *MLR* sistēmai. Tomēr *SE*, ko demonstrē vienāda kanāla *NRZ* pārraides sistēma, ir pat zemāka (līdz 0,1 (bit/s)/Hz) nekā nodemonstrētajā *MLR* sistēmā, kas nozīmē, ka augstas datu pārraides kanālu ieviešana var ievērojami uzlabot sistēmas spektrālo efektivitāti. Turklāt ļoti augstas Q-koeficientu vērtības kanālos nozīmē to, ka kanāla intervāli var samazināties.

Šajā apakšnodaļā tika novērtētas un pētītas divas kombinēto pārraides sistēmu koncepcijas - sistēma ar *MMF* un nevienmērīgiem starpkanālu intervāliem un *MLR* sistēma ar dažādiem *MMF*.

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

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

Kombinētās konfigurācijas ietekmes novērtējums uz *WDM-PON* spektrālo efektivitāti atklāja, ka gan sistēma ar nevienādu kanālu intervālu, gan *MLR* sistēmu parāda *SE* pieaugumu salīdzinot ar sistēmām ar vienādiem kanāliem. *SE*, piedāvātai 10 Gbit/s sistēmai ar nevienādiem kanālu intervāliem, ir 0,62 (bit/s)/Hz, kas ir par 6,2 reizes lielāka nekā *SE* tipiskajā 100 GHz 10

Gbit/s *WDM-PON* sistēmā (vienāds ar 0,1 (bit/s)/Hz). Tomēr pielietojot fiksēto, bet minimāli iespējamo kanālu intervālu, kas vienāds ar 18,75 GHz, ļauj sasniegt tikai nedaudz sliktāku *SE* nekā kombinētā konfigurācija (vienāda ar 0,61 (bit/s)/Hz). Tas nozīmē, ka *SE* palielināšana tiek nodrošināta, optimizējot kanālu intervālu. Spektrālā efektivitāte pētāmai *MLR* sistēmai ir vienāda ar 0,27 (bit/s)/Hz, kas ir par 2,7 reizes lielāka salīdzinot ar 10 Gbit/s *WDM-PON* (0,1 (bit/s)/Hz). Turklāt *MLR* sistēmas Q-koeficienta pietiekami augstā vērtība (vienāda ar 17,78 dB) ļauj secināt, ka sistēmas *SE* var palielināt, samazinot kanāla intervālus, kas joprojām atbilst minimālajām Q-koeficienta prasībām.

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

4. RAMANA PASTIPRINĀNTĀJU DARBĪBAS PRINCIPA IZPĒTE UN VEIKSTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS

Ramana pastiprināšana ir bijusi viena no optisko pastiprinātāju tehnoloģijām, kurai bija lēns sākums, bet pēc tam to sāka plaši izmantot, palielinoties optisko tīklu veiktspējas vajadzībām. Ramana pastiprinājums notiek pateicoties Ramana efektam. Ramana efekts ir nelineārs optiskais efekts. Ramana pastiprinātāji ir pirmās plaši komercializētās nelineārās optiskās ierīces telekomunikācijās un ir pozicionēti kā viens no daudz sološākajiem visu optisko signālu pastiprināšanas risinājumiem. Ramana pastiprinātājiem ir raksturīgs salīdzinoši plašs pastiprinājuma spektrs, kura formu var mainīt, mainot pumpēšanas parametrus un ir zināms, ka tie rada ļoti mazu traucējumu attiecībā uz citiem pastiprinātāju veidiem, piemēram kā ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji. Tas ir iemesls, kāpēc Ramana pastiprinātājus lielākoties ievieš maģistrālās optiskajās pārraides sistēmās [22, 107].

Līdztekus iepriekšminētajām priekšrocībām Ramana pastiprinātājiem ir viens būtisks trūkums - slikta pumpēšanas efektivitāte pie zemām ieejas signāla jaudām. Ir divu veidu Ramana pastiprinātāji: diskrētie (*LRA*) un sadalītie Ramana pastiprinātāji (*DRA*). Diskrētais Ramana pastiprinātājs ir modulis, kas satur uztītu augstas nelinearitātes šķiedru (*HNLF*) vai dispersijas kompensējošo šķiedru (*DCF*). *DCF* vai *HNLF* šķiedru izmanto kā pastiprinājuma vide, jo tajās Ramana pastiprinājuma efektivitāte ir lielāka nekā parastai vienmodas šķiedrai. Sadalītos pastiprinātājos par pastiprinājuma vidi kalpo pati vienmodas šķiedra (pārraides līnija). Pārsvārā izmanto sadalītos pastiprinātājus, jo tiem ir labāki parametri. Sadalītiem pastiprinātājiem ir labāka signāla un trokšņa attiecība [13, 46]. Sakarā ar mazāku *HNLF* un *DCF* serdeņa efektīvo laukumu un augstāku nelinearitātes koeficienta vērtību, *LRA* ir nepieciešama mazāka pumpēšanas jauda nekā *DRA* gadījumā, lai sasniegtu noteiktu ieejas signāla pastiprināšanas līmeni ar noteiktu jaudu. Bet, ja tiek izmantota pretēji vērsta pumpēšana, *DRA* gadījumā signāls sāk pastiprināties tuvāk raidītājam nekā *LRA* gadījumā, un signāls tiek pastiprināts efektīvāk [108-109].

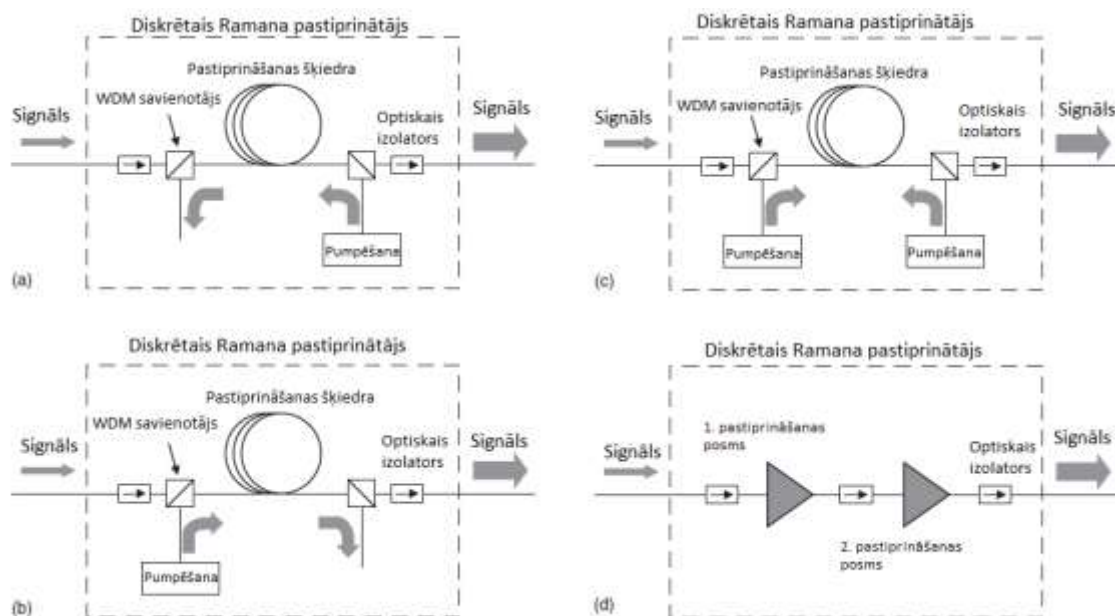
4.1. Diskrētā Ramana pastiprinātāja darbības izpēte WDM pārraides sistēmā

Pēdējo desmit gadu laikā attīstība pieejamo multimediju pakalpojumu jomā radījusi nepieciešamību pēc lielākas kapacitātes tīkliem. Mūsdienās viens no efektīvākajiem risinājumiem tīkla kapacitātes palielināšanai ir ieviest viļņgarumdales blīvēšanu (*WDM*). Viens no galvenajiem faktoriem, kas ierobežo šādas pārraides sistēmas ir optiskā signāla vājināšana, jo īpaši *WDM* sistēmās, kurās tiek izmantotas optiskās jaudas sadalītājelementi. Tāpēc šādās pārraides sistēmās ir nepieciešama optiskā signāla pastiprināšana. Pastiprinātāji ir galvenais trokšņa avots, it īpaši garo un ļoti garo viļņu pārraides sistēmās, kurās izmanto vairāku etapu pastiprināšanu. Tāpēc ir svarīgi izvēlēties tādu pastiprinātāja konfigurāciju, kas varētu ģenerēt pēc iespējas zemāku optisko troksni [22, 76, 110-111].

Sadalītie Ramana pastiprinātāji ir zināmi kā mazāk trokšņaini, taču šāda veida pastiprinātājiem ir slikta pumpēšanas efektivitāte pie zemām ieejas signāla jaudām, tāpēc to

vieta varētu izmantot diskrētos (saliktos) Ramana pastiprinātājus (*LRA*). Diskrētie Ramana pastiprinātāji galvenokārt tiek izmantoti, lai palielinātu optisko šķiedru tīklu kapacitāti.

4.1. att. parādītas diskrēto Ramana pastiprinātāju pamata konfigurācijas. Tas parasti satur pastiprināšanas šķiedru, *WDM* savienotāju pumpēšanas avota un signāla apvienošanai un optiskos izolatorus ieejas un izejas galos. Izmanto gan tieši vērsto, gan pretēji vērsto, gan abpusējo pumpēšanu. Parasti dažādiem pielietojumiem ir vairāki šo vienkāršo konfigurāciju atvasinājumi vai kombinācijas. Divpakāpju Ramana pastiprinātājā tiek savienotas divas pastiprinātāja pakāpes.



4.1. att. Shematiskas konfigurācijas: a) vienkāpju tieši vērstā pumpēšana; b) vienkāpju pretēji vērstā pumpēšana; c) vienkāpju abpusējā pumpēšana un (d) divpakāpju diskrētie Ramana pastiprinātāji [46].

Svarīgi parametri, kas raksturo diskrētos Ramana pastiprinātājus:

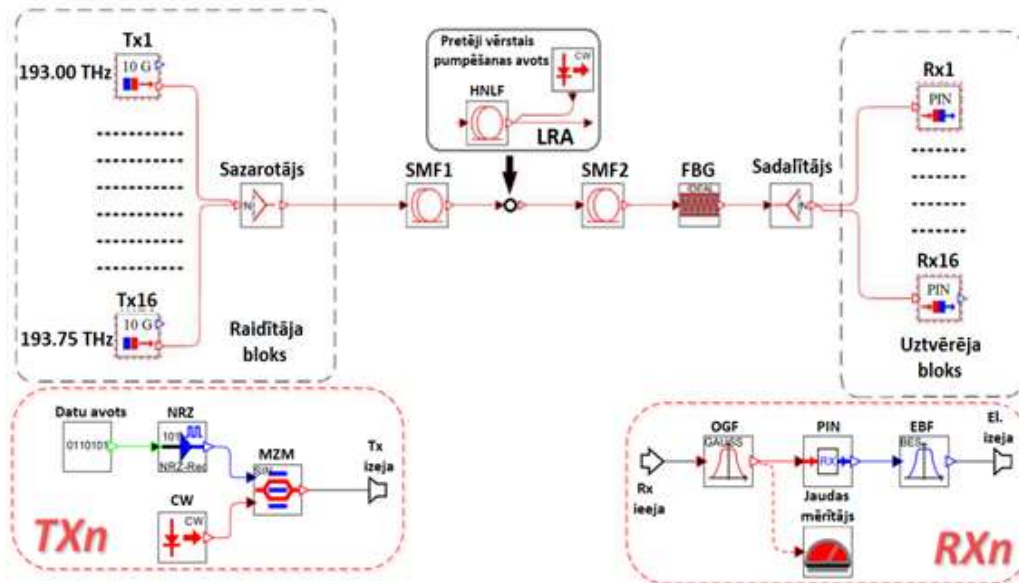
- signāla viļņa garums un ieejas jaudas līmenis,
- pumpēšanas avota viļņa garums un ieejas jaudas līmenis,
- pastiprināšanas šķiedras tips un garums.

Attiecībā uz pastiprināšanas šķiedru, lai sīki izstrādātu pastiprinātāju, ir vajadzīgas šādas signāla un pumpēšanas viļņa garuma joslu īpašības:

- vājinājuma koeficients,
- Ramana pastiprinājuma koeficients dotajiem pumpēšanas viļņa garumiem,
- Releja atpakaļ izkliedes koeficients,
- nelineārais koeficients.

Diskrētā Ramana pastiprinātāja galvenie raksturlielumi ir pastiprinājums, trokšņa rādītājs, izejas signāla jaudas līmenis, optiskā signāla un trokšņa attiecība (*OSNR*), dubultās Releja izkliedes trokšņa jauda, nelineārā fāzes nobīde un pumpēšanas un signāla jaudas pārveidošanas efektivitāte. *WDM* signāliem ir jāoptimizē arī iepriekšminēto raksturlielumu atkarība no signāla viļņa garuma vai kanāla.

Šīs apakšnodaļas mērķis ir izpētīt diskrētā Ramana pastiprinātāja darbību *WDM* pārraides sistēmā. 4.2. att. attēlota simulācijas shēma 16 kanālu *DWDM* sakaru sistēmai ar līnijas *LRA* pastiprinātāju un pretēji vērsto pumpēšanas avotu.



4.2. att. 16 kanālu 10 Gbit/s DWDM pārraides sistēmas modelēšanas modelis ar līnijas LRA un pretēji vērsto pumpēšanas shēmu.

Simulācijas modeļa raidītāju bloks sastāv no 16 NRZ-OOK raidītājiem. Katrs no šiem raidītājiem darbojas ar savu frekvenci diapazonā no 193,00 THz līdz 193,75 THz ar 50 GHz kanālu intervālu starp blakus kanāliem un tā izejas jauda ir 2 mW (3 dBm). Šo raidītāju izejas starojums apvienots un pārraidīts caur standarta vienmodas šķiedru (SMF1). Diskrētā Ramana pastiprinātāja gadījumā augstas nelinearitātes šķiedra (HNLF) izmantota kā pastiprinājuma vidi. Spēcīgais pumpēšanas avots ir novietots HNLF tālajā galā un tā starojuma izplatīšanās virziens ir pretējs attiecībā uz pastiprināmā signāla izplatīšanās virzienu. Pēc tam pastiprinātais signāls tiek pārraidīts caur otro SMF (SMF2), kura izejā signāls tiek apstrādāts caur šķiedru Brega režģi (dispersijas kompensācijas vajadzībām) un tas sadalīts starp 16 uztvērējiem, izmantojot viļņvadu masīvo režģa (AWG) optisko filtru ar 6 dB zudumiem.

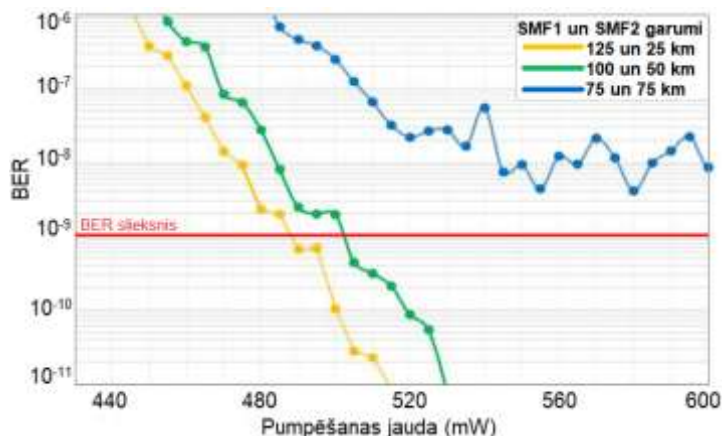
SMF1 un SMF2 garumi mainīti, lai mainītu pastiprinātāja novietojumu optiskajā līnijā un tādējādi mainītu signāla jaudu SMF1 beigās. Izmantotas trīs dažādas SMF1 un SMF2 šķiedru garuma kombinācijas, saglabājot kopējo pārraides attālumu attiecīgi 150 km: 75 un 75 km, 100 un 50 km un 125 un 25 km.

Pirms pumpēšanas starojuma konfigurācijas izvēles ir jāizvēlas pumpēšanas izplatīšanās virziens un augstās nelinearitātes šķiedras garums, kas izmantots kā pastiprinājuma vide LRA. Kā jau minēts iepriekš, tad izmantosim pretēji vērsto pumpēšanas konfigurāciju (attiecībā uz signāla izplatīšanās virzienu), jo šāds risinājums ir tolerantāks pret relatīvās intensitātes troksni [112]. Izvēloties HNLF garumu, jāņem vērā 2 galvenie faktori: pirmkārt, jo garāks ir HNLF, jo mazāka pumpēšanas jauda ir nepieciešama, lai nodrošinātu noteiktu pastiprināšanas līmeni, bet otrkārt, jo garāks ir HNLF, jo būtiskākas ir pastiprinātā signāla neatbilstības, ko izraisa šķiedru nelinearitāte. Tāpēc ir svarīgi atrast līdzsvaru starp pastiprināšanas efektivitāti un pastiprinātā signāla kropļojumu daudzumu. Beigās nolemts, ka esošajā sistēmā izmantosim 3 km garu HNLF [113].

Pastiprinātājs novietots 75 km, 100 km un 125 km attālumā no raidītāja bloka. Šādā veidā var novērtēt pastiprinātāja veiktspēju pie dažādām ieejas signāla jaudas vērtībām. Pirms pumpēšanas jaudas izvēles katrā no trim pozicionēšanas scenārijiem jāizvēlas pumpēšanas

starojuma centrālais viļņa garums. Pumpēšanas viļņa garums izvēlēts tādā veidā, lai nodrošinātu pēc iespējas lielāku pastiprinājumu un pēc iespējas mazāku pastiprinājuma starpību starp visiem 16 kanāliem. Šādu pastiprinājumu var iegūt, ja pastiprināšanas spektra maksimumu novieto starp diviem centrālajiem kanāliem. Tas panākts, kad pumpēšanas starojuma viļņa garums bija vienāds ar 1452,096 nm (206,455 THz).

Galvenais kritērijs, izvēloties pumpēšanas jaudu, nodrošināt bitu kļūdu attiecības (*BER*) vērtības zem 10^{-9} sliekšņa visos 16 kanālos, izmantojot pēc iespējas mazāku pumpēšanas jaudu. Tāpēc visos trīs *LRA* pozicionēšanas scenārijos novērota maksimālās *BER* vērtības atkarība starp visiem 16 kanāliem no pumpēšanas jaudas. Iegūtie rezultāti parādīti 4.3. att.



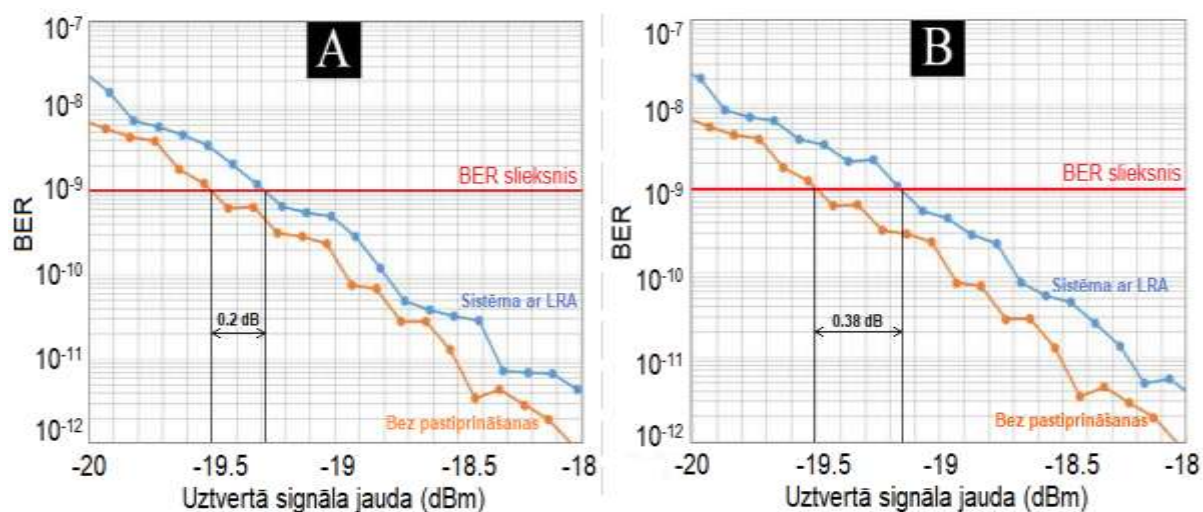
4.3. att. Sistēmas maksimālā *BER* vērtības atkarība no *LRA* 206.455 THz pumpēšanas jaudas trīs dažādiem *SMF1* un *SMF2* garumiem: attiecīgi 125 un 25 km (dzeltenā krāsā), 100 un 50 km (zaļā krāsā) un 75 un 75 km (zilā krāsā).

Kā redzams 4.3. att., 490 mW ir pietiekami, lai nodrošinātu *BER* vērtības zem 10^{-9} sliekšņa visos kanālos, ja *LRA* novietots 125 km attālumā no raidītāja bloka (*SMF1* un *SMF2* garumi: 125 un 25 km). Pastiprinājums, ko *LRA* nodrošināja ar 490 mW 206,455 THz pretēji vērsto pumpēšanu, svārstījās no 21,43 līdz 21,56 dB. Kad pastiprinātājs novietots 25 km tuvāk raidītāja blokam (*SMF1* un *SMF2* garumi: 100 un 50 km), minimālā pumpēšanas jauda, kas varētu nodrošināt iepriekšminēto stāvokli, ir par 15 mW lielāka (505 mW). Pastiprinājums, ko nodrošināja 505 mW pumpēšana, svārstījās no 21,58 līdz 21,71 dB. 4.3. att. arī skaidri parāda, ka, *LRA* novietojot 75 km attālumā no raidītāja bloka, nepieciešamās *BER* vērtības un līdz ar to arī vēlamā signāla kvalitāte nav sasniegta.

Tik augstas *BER* vērtības iemesls pēdējā gadījumā ir izskaidrojams: ja *LRA* novietots 75 km attālumā no raidītāja bloka, signāla jauda pastiprinātāja ieejā (-2,95 dBm kopumā) ir nozīmīgāka nekā pārējos divos pozicionēšanas scenārijos (par aptuveni 5 dB un 10 dB), tāpēc signāla jauda arī pēc pastiprināšanas ir ievērojami augstāka un ar to kopumā pietiek, lai radītu šķiedru nelinearitāti. Tā kā rodas tādi nelineāri efekti kā fāzes pašmodulācija (*SPM*) un četru viļņu mijiedarbība (*FWM*) pastiprināšanas vidē, signāla spektrs ir izkropļots (paplašināts) un novērots augstāks starpkanālu šķērsrunu līmenis [114]. Šajā gadījumā šāda šķiedru nelinearitātes rašanās notika gan pastiprināšanas laikā (*HNL*), gan signāla pārraidīšanas laikā caur *SMF2* šķiedru. Tā kā vajadzīgo signāla kvalitāti nevarēja sasniegt, nolemts turpmākos eksperimentos izslēgt scenāriju ar vienādiem *SMF1* un *SMF2* garumiem (75 km).

Lai novērtētu *LRA* pastiprinātāja darbību ar izvēlēto konfigurāciju diviem pastiprinātāja pozicionēšanas scenārijiem, kur sasniegta vēlamā signāla kvalitāte, iegūta *BER* atkarība no

uztvērtā signāla jaudas kanālā ar sliktāko signāla kvalitāti. Abos *LRA* pozicionēšanas scenārijos apskatīts 13. kanāls. Šie rezultāti salīdzināti ar rezultātiem, kas iegūti tajā pašā sistēmā, bet bez pastiprināšanas un ar pārraides attālumu tikai 51 km. Iegūtās atkarības ir parādītas 4.4. att.



4.4. att. Sistēmas maksimālās *BER* vērtības atkarība no uztvertā signāla jaudas sistēmas 13. kanālā ar *LRA* (zilu) un sistēmu bez pastiprināšanas (oranža) šādiem *SMF1* un *SMF2* stiprinājumu garumiem: (a) 125 un 25 km, b) 100 un 50 km.

4.4. att. redzams, ka jaudas sods ir 0,2 dB starp sistēmu bez pastiprināšanas un sistēmu ar *LRA* izvēlēto konfigurāciju, kad *LRA* novietots 125 km attālumā no raidītāja bloka. Kad *LRA* bija novietots 100 km attālumā no raidītāja bloka, tad jaudas sods ir 0,38 dB.

Šādas jaudas soda atšķirības iemesls ir tāds pats kā sliktas signāla kvalitātes iemesls sistēmā ar vienādu garumu *SMF1* un *SMF2*: ja pastiprinātājs ir novietots tuvāk uztvērējam, signāla jauda pie *LRA* ieejas ir augstāka (attiecīgi -7,96 un -12,96 dBm). Tā kā nepieciešamais pastiprinājuma līmenis ir salīdzinoši augsts (21,58–21,71 dB) un *HNLf* šķiedrai ir nepieciešama ievērojami zema signāla jauda, lai izraisītu šķiedru nelinearitāti, nekā standarta vienmodas šķiedrās, tad scenārijā, kurā *LRA* novietots 100 km attālumā no raidītāja bloka, signāls pie *HNLf* izejas ir nedaudz kropļots, pateicoties šķiedru nelinearitātei, nekā scenārijā, kad *LRA* atradās 125 km attālumā no raidītāja bloka. Šie papildus 0,18 dB jaudas soda ir iemesls, kāpēc gadījumā, kad *LRA* novietots 100 km attālumā no raidītāja, par 15 mW nepieciešama lielāka pumpēšanas jauda (nepieciešams aptuveni 0,15 dB lielāka pastiprināšana), lai nodrošinātu *BER* zem 10^{-9} sliekšni visos 16 kanālos.

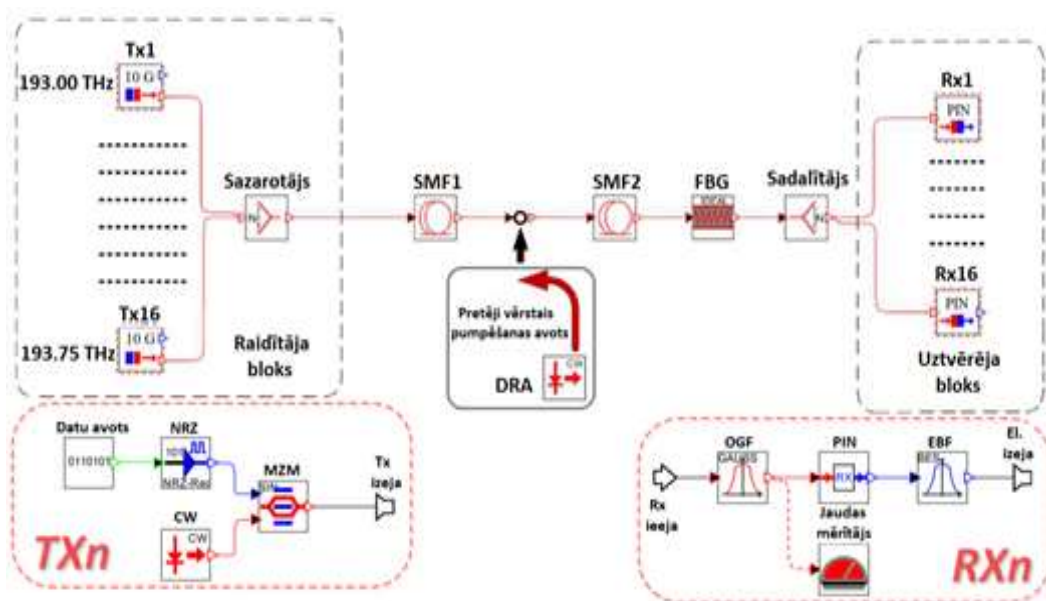
4.2. Sadalītā Ramana pastiprinātāja darbības izpēte WDM sakaru sistēmā

Sadalītie Ramana pastiprinātāji (*DRA*) ir pazīstami ar savu zemo trokšņa rādītāja vērtību, kas parasti ir ievērojami zemāka nekā citu komerciāli lietoto optisko pastiprinātāju tipos. Vēl viens nozīmīgs ieguvums izmantojot *DRA* ir spēja mainīt pastiprinātā spektra formu, manipulējot ar pumpēšanas avota parametriem. Diemžēl šāda veida pastiprinātājiem ir arī daži trūkumi, tai skaitā zema pastiprināšanas efektivitāte pie zemām jaudām ieejas signālā. Šī problēma rodas, izmantojot dārgus jaudīgus optiskos avotus, kas spēj nogādāt lielas jaudas

vienmodas šķiedrā. Ja pumpējošā starojuma parametri, ieskaitot pumpēšanas izplatīšanās virzienu attiecībā uz pastiprināto signālu, ir izvēlēti nepareizi, šķiedras nelinearitāte var izsaukt stipru degradāciju visā sistēmā [22, 112].

Pētīsim līnijas sadalītā Ramana optiskā pastiprinātāja darbību *WDM* pārraides sistēmā ar pretēji vērsto pumpēšanas konfigurāciju pie dažādām ieejas signāla jaudas vērtībām. Ar datorsimulācijas *OptSim* programmu ieviests 16 kanālu 10 Gb/s blīvas *WDM* (*DWDM*) pārraides sistēmas simulācijas modelis ar bez atgriešanās pie nulles bināro amplitūdas modulācijas formātu (*NRZ-OOK*) [175]. Sistēmas simulācijas modelis parādīts 4.5. att.

Simulācijas modeļa raidītāju bloks sastāv no 16 *NRZ-OOK* raidītājiem. Katrs no šiem raidītājiem darbojas ar savu frekvenci diapazonā no 193,00 THz līdz 193,75 THz ar 50 GHz kanālu intervālu starp blakus kanāliem, un tā izejas jauda ir 2 mW (3 dBm). Šo raidītāju izejas starojums tiek apvienots un nosūtīts caur standarta vienmodas šķiedru (*SMF1*). Pumpēšanas avots novietots tieši pie *SMF1* izejas, un tā starojums tiek sūtīts caur *SMF1* pretēji signāla izplatīšanās virzienam. Tādā veidā pārraides šķiedra pati kļūst par pastiprinājuma nesēju. Pēc tam pastiprinātais signāls tiek nosūtīts caur otro vienmodas šķiedru (*SMF2*), kuras izejā signāls tiek apstrādāts caur šķiedru Brega režģi (dispersijas kompensācijas vajadzībām), un tas tiek sadalīts starp 16 uztvērējiem, izmantojot masīvo viļņvadu režģa (*AWG*) optisko filtru ar 6 dB zudumiem.



4.5. att. 16 kanālu 10 Gb/s *DWDM* pārraides sistēmas simulācijas modelis ar līnijas *DRA* un pretēji vērsto pumpēšanas avotu.

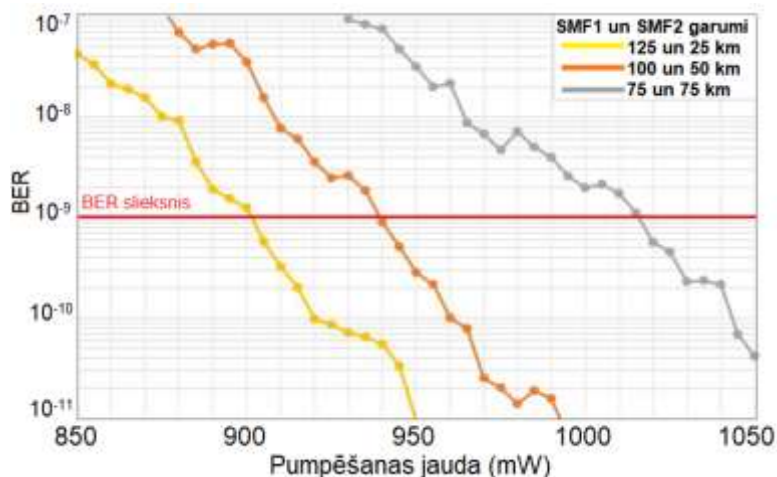
SMF1 un *SMF2* garumi tiek mainīti, lai mainītu pastiprinātāja novietojumu optiskajā pārraides līnijā un tādējādi mainītu signāla jaudu *SMF1* beigās. Izmantotas trīs dažādas *SMF1* un *SMF2* šķiedru garuma kombinācijas, saglabājot kopējo pārraides attālumu attiecīgi 150 km: 75 un 75 km, 100 un 50 km un 125 un 25 km.

Tika nolemts izmantot pretēji vērsto pumpēšanas konfigurāciju (attiecībā uz signāla izplatīšanās virzienu), jo šāds risinājums ir tolerantāks pret relatīvās intensitātes troksni [109].

Sadalītais Ramana pastiprinātājs tiks novērots trīs atšķirīgos pozicionēšanas scenārijos 150 km garajā optiskajā linkā: ja pastiprinātājs tiek novietots 75 km, 100 km un 125 km attālumā no raidītāja bloka. Šādā veidā var novērtēt pastiprinātāju veiktspēju pie dažādām ieejas signāla

jaudas vērtībām. Pirms pumpēšanas jaudas izvēles katrā no trim pozicionēšanas scenārijiem jāizvēlas pumpēšanas starojuma centrālais viļņa garums. Pumpēšanas viļņa garums tika izvēlēts tādā veidā, lai nodrošinātu pēc iespējas lielāku pastiprinājumu un pēc iespējas mazāku pastiprinājuma starpību starp visiem 16 kanāliem. Šādu pastiprinājumu var iegūt, ja pastiprināšanas spektra maksimumu novieto starp diviem centrālajiem kanāliem. Tas tiek panākts, kad pumpēšanas starojuma viļņa garums ir vienāds ar 1452,096 nm (206,455 THz).

Galvenais kritērijs, izvēloties pumpēšanas jaudu, bija nodrošināt bitu kļūdu attiecības (*BER*) vērtības zem 10^{-9} sliekšņa visos 16 kanālos, izmantojot pēc iespējas mazāku pumpēšanas jaudu. Iegūtie rezultāti ir attēloti 4.6. att.



4.6. att. Sistēmas maksimālā *BER* vērtības atkarība no *DRA* 206.455 THz pumpēšanas jaudas trīs dažādiem *SMF1* un *SMF2* garumiem: attiecīgi 125 un 25 km (dzeltenā krāsā), 100 un 50 km (oranžā krāsā) un 75 un 75 km (pelēkā krāsā).

Kā redzams 4.6. att., jo tuvāk ir pastiprinātāja pumpēšanas avots raidītāja blokam, jo lielāka pumpēšanas jauda ir nepieciešama, lai nodrošinātu *BER* vērtības zem 10^{-9} sliekšņa. *DRA* gadījumā vēlamā signāla kvalitāte tika sasniegta visiem trim pozicionēšanas scenārijiem.

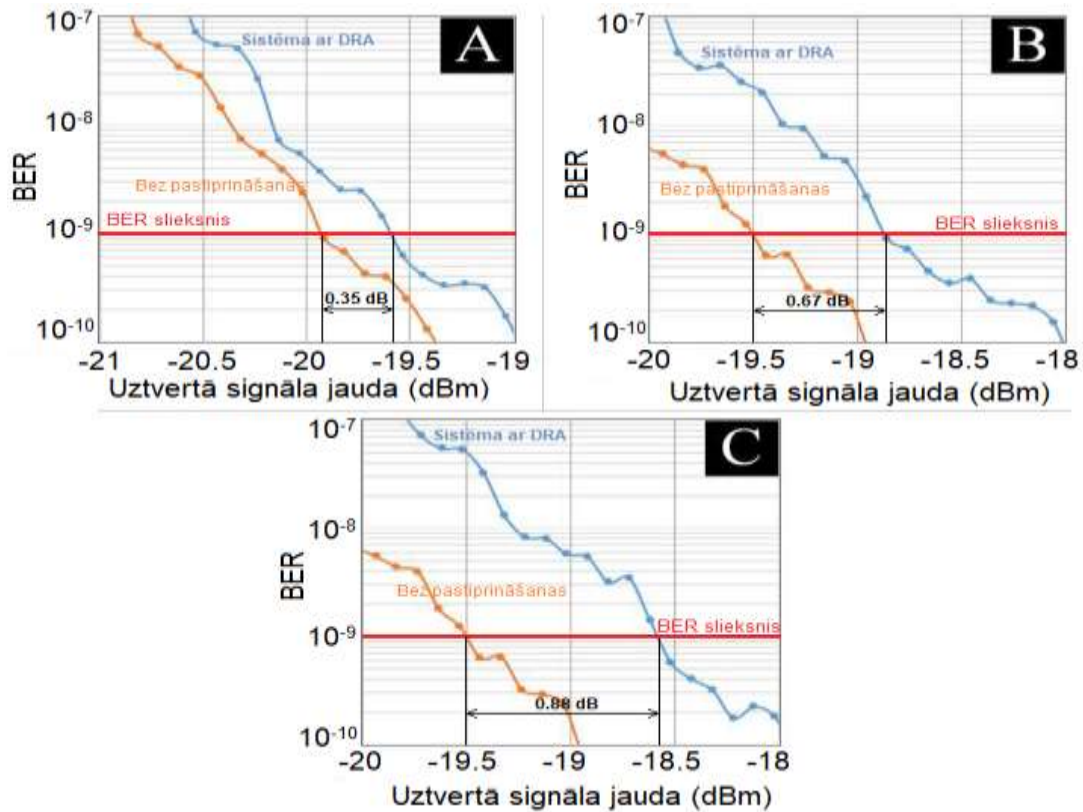
Kad *SMF1* šķiedras garums ir 125 km, 905 mW ir pietiekami, lai nodrošinātu sistēmas maksimālo *BER* vērtību zem 10^{-9} sliekšņa (pastiprinājums sasniedza 19,96–20,08 dB), uz 100 km garu *SMF1* - 940 mW ir nepieciešama (20,32–20,44 dB pastiprinājums), un gadījumā, kad *SMF1* ir 75 km garš, 1020 mW (20,71–20,83 dB pastiprinājums). Šādas lielas pumpēšanas jaudas atšķirības aptuveni tādā pašā pastiprinājuma līmenī izskaidrojamas ar to, ka jaudīgāka signāla pastiprināšanai pie noteikta dB daudzuma nepieciešamas lielākas pumpēšanas jaudas.

Sistēmā ar *DRA* pastiprinātāju, vajadzīgā signāla kvalitātes nodrošināšanai bija nepieciešams apmēram par 1,2 dB mazāks pastiprinājums nekā ar diskretā Ramana pastiprinātāju. Tas ir saistīts ar faktu, ka *LRA* gadījumā papildus vājinājumam, kas uzkrājas pārraides laikā, pastiprinātājam bija nepieciešams arī kompensēt pašas *HNLF* šķiedras ienestos zudumus, bet *DRA* kā pastiprināšanas vidi izmantoja pārraides šķiedru. Var novērot arī to, ja sakaru sistēmā ar sadalīto Ramana pastiprinātāju signāls sāka pastiprināties, kamēr tā jauda bija lielāka nekā sistēmā, kurā tika izmantota *LRA* pastiprinātājs, *DRA* bija nepieciešams divas reizes jaudīgāka pumpēšana, lai nodrošinātu aptuveni tādu pašu līmeņa pastiprināšanu. Tas izskaidrojams ar to, ka *SMF* šķiedra ir daudz izturīgāka pret nelinearitāti nekā *HNLF* šķiedra (tas ir saistīts ar augstāku *HNLF* vidējā un zemākā kodola efektīvās zonas nelinearitātes koeficientu). Lielāka šķiedru nelinearitātes noturība izskaidro, kāpēc *DRA* sistēmas gadījumā

sasniegta atbilstošā signāla kvalitāte, ja pastiprinājums izvietots 75 km no raidītāja, bet sistēmā ar *LRA* to nevarēja sasniegt.

Lai novērtētu *DRA* darbību ar izvēlēto konfigurāciju trim pastiprinātāja pozicionēšanas scenārijiem, kur tika sasniegta vēlamā signāla kvalitāte, tika iegūta BER atkarība no uztvertā signāla jaudas kanālā ar sliktāko signāla kvalitāti.

Sistēmā ar *DRA SMF1* garumam 100 km un 75 km sliktākā signāla kvalitāte tika novērota 13. kanālā, bet *SMF1* garumam 125 km - 2. kanālā. Šie rezultāti tika salīdzināti ar tiem pašiem rezultātiem, kas iegūti tādā pašā sistēmā, bet bez pastiprināšanas. Iegūtās atkarības ir attēlotas 4.7. att.



4.7. att. Sistēmas maksimālā BER vērtības atkarība no uztvertā signāla jaudas 2. sistēmas kanālā ar *DRA* (zils) un sistēmu bez pastiprināšanas (oranža) *SMF1* un *SMF2* šķiedra (a) 125 un 25 km, un 13. kanāls *SMF1* un *SMF2* garumam (b) attiecīgi 100 un 50 km un (c) attiecīgi 75 un 75 km.

4.7. att. var redzēt, ka jaudas sods starp sistēmu bez pastiprināšanas un sistēmu ar *DRA* un izvēlēto konfigurāciju ir tikai 0,35 dB, kad *SMF1* garums ir 125 km. Kad *SMF1* šķiedras garums ir 100 km, tad jaudas sods sasniedza 0,67 dB un kad *SMF1* garums ir tikai 75 km – 0,88 dB. Tāpat kā sistēmā ar *LRA*, *DRA* gadījumā jaudas soda palielinājums, pastiprinātāja pumpēšanas avotam atrodoties tuvāk raidītāja blokam, ir izskaidrojams ar šķiedras nelinearitāti - jo tuvāk pumpēšanas avots ir raidītāja blokam, jo garāka ir *SMF2* šķiedra, jo lielāks ir tā kopējais optiskais vājinājums.

4.3. Kopsavilkums

Šajā nodaļa ar datorsimulācijas *OptSim* programmu pētīti sadalīto un diskrēto Ramana līnijas pastiprinātāju veiktspēja *WDM* sakaru sistēmās pie dažādām pastiprinātāju pozīcijām 150 km garajā optiskajā līnijā: 75 km, 100 km un 125 km attālumā no raidītāja bloka. Visos trīs pozicionēšanas scenārijos gan *LRA*, gan *DRA* tika izmantots pretēji vērtais pumpēšanas avots (pumpēšanas frekvence 206,455 THz). Mērķis bija atrast minimālās pumpēšanas starojuma jaudas, kas visos sistēmas kanālos nodrošinātu noteiktās sistēmas *BER* vērtības.

Konfigurējot Ramana pastiprinātāju pumpēšanas jaudu, tika novērota šāda tendence - jo tālāk ir pastiprinātājs vai tā pumpēšanas avots no raidītāja bloka, jo mazāka pumpēšanas jauda ir nepieciešama, lai nodrošinātu vajadzīgo signāla kvalitāti. Sistēmā ar sadalīto Ramana pastiprinātāju, kad *SMF1* šķiedras garums bija 125 km, bija nepieciešama vismaz 905 mW pumpēšanas jauda, lai iegūtu *BER* zem 10^{-9} sliekšņa, kad *SMF1* garums samazināts līdz 100 km un *SMF2* palielināts līdz 50 km, tad nepieciešama 940 mW pumpēšanas jauda, un, kad *SMF1* un *SMF2* šķiedru garumi bija vienādi ar 75 km – 1020 mW. Sistēmā ar diskrēto Ramana pastiprinātāju nepieciešama 490 mW pumpējošā starojuma jauda, kad *LRA* pastiprinātājs novietots 125 km attālumā no raidītāja bloka. Ja šis attālums samazināts līdz 100 km, bija nepieciešama 505 mW pumpējošā starojuma jauda. *LRA* pastiprinātājam bija nepieciešama 505 mW pumpēšanas jauda un vēlamā signāla kvalitāte vispār netika sasniegta, ja *LRA* tika novietots tieši 150 km garā optiskā savienojuma vidū (*SMF1* un *SMF2* garumi ir 75 km).

Tas izskaidrojams ar to, ka, lai nodrošinātu noteiktu signāla pastiprināšanas līmeni dB signālam ar lielāku jaudu pastiprinātāja ieejā, ir nepieciešama lielāka pumpējošā starojuma jauda. Gluži pretēji iegūtajiem rezultātiem, Ramana pastiprinātāji ir pazīstami ar zemu pastiprināšanas efektivitāti pie ieejas signāla mazām jaudām. Iegūtie rezultāti parādīja, ka pat tad, kad signāls tiek nosūtīts caur 125 km garu *SMF1*, tā jauda joprojām ir pietiekami liela, lai signālu varētu efektīvi pastiprināt ar Ramana pastiprinātājiem. Tas ir pārsteidzoši, jo īpaši *LRA* pastiprinātāja gadījumā, jo *DRA* pastiprinātāja gadījumā signāls tiek pastiprināts visā *SMF1* šķiedrā, bet *LRA* pastiprināšana notiek tikai pēc signāla apstrādes visā *SMF1* un signāla jauda *LRA* ieejā sasniedza 12,96 dBm (signāls jaudas līmenis ir aptuveni 28,5 dBm).

Kā jau tika minēts iepriekš, sistēmā ar diskrēto Ramana pastiprinātāju, ja *SMF1* un *SMF2* garums ir vienāds ar 75 km, vēlamā signāla kvalitāte vispār netika sasniegta. Tas ir izskaidrojams ar šķiedru nelinearitātes rašanos, kas ir izraisījusi ievērojamus pastiprinātā signāla traucējumus. Šāda situācija radās tāpēc, ka signāla jauda pastiprinātāja ieejā un nepieciešamais pastiprināšanas līmenis ir pārāk augsts.

Šķiedru nelinearitātes rašanās ir neizbēgama, jo ir nepieciešams augsts pastiprināšanas līmenis. Šķiedru nelinearitāte ir novērota arī salīdzinot jaudas soda vērtības *LRA* un *DRA* pastiprinātājiem dažādiem pozicionēšanas scenārijiem - jo tuvāk bija pastiprinātājs vai tā pumpēšanas avots raidītāja blokam - jo augstāks bija jaudas sods. Jaudas sods starp sistēmu bez pastiprināšanas un sistēmu ar *LRA* ar izvēlēto konfigurāciju gadījumā, kad *LRA* tika novietots 125 km attālumā no raidītāja bloka, bija 0,2 dB, un kad *LRA* tika novietota 100 km attālumā no raidītāja bloka - 0,38 dB. Jaudas sods starp sistēmu bez pastiprināšanas un sistēmu ar *DRA* ar izvēlēto konfigurāciju bija tikai 0,35 dB, kad *SMF1* garums bija 125 km, kad šī *SMF1* garums bija 100 km, jaudas sods sasniedza 0,67 dB un kad *SMF1* garums bija tikai 75 km – 0,88 dB.

5. KOMBINĒTO OPTISKO PASTIPRINĀTĀJU DARBĪBAS IZPĒTE UN VEIKSTPĒJAS NOVĒRTĒJUMS

Viļņgaruma dalīšanas multipleksēšanas (*WDM*) sistēmas caurlaides spēju iespējams palielināt, palielinot datu pārraides ātrumu kanālos vai kanālu skaitu. Viļņa garuma josla, kas izmantota pārraidīšanai *WDM* sistēmās, ir ierobežota, ņemot vērā optiskā signāla vājinājuma atkarību no viļņu garuma optiskajās šķiedrās [2, 115]. Mūsdienu pārraides sistēmās minimālais vienmodas optiskās šķiedras vājinājums ir 0,2 dB un tas novērots C viļņa garuma joslā, kas atbilst viļņu garumam no 1530 līdz 1565 nm. Neatkarīgi no tā, ka vājinājuma vērtība ir tik zema, tomēr vājinājuma ietekme uzkrājas ar katru nākamo kilometru. Garās maģistrālās pārraides sistēmās, kur pārraides līniju garums ir vairāki simti un pat tūkstoši kilometru, vājinājums ievērojami pasliktina saņemtā signāla kvalitāti, jo fotodetektora jūtība ir ierobežota [116-118]. Palielinoties kanālu skaitam, palielinās arī optiskā signāla dalītāja vājinājums, īpaši gadījumos, kad izmantoti jaudas dalītāji. Tomēr, palielinot datu pārraides ātrumu, ir nepieciešams samazināt optisko troksni, ko rada optiskie komponenti (gaismas avoti, modulatori, pastiprinātāji, uztvērēji utt.), jo signālos ar lielu pārraides ātrumu ir zemāka trokšņa izturība.

Tādēļ ir nepieciešami risinājumi, lai kompensētu arvien pieaugošo uzkrāto signāla vājinājumu arvien plašākā viļņu garuma diapazonā. Pašlaik visā pasaulē visbiežāk izmanto ar erbiju legētu šķiedru pastiprinātājus (*EDFA*), lai kompensētu optiskā signāla vājinājumu. Pusvadītāju optiskie pastiprinātāji (*SOA*) ir visrentablākā alternatīva *EDFA* pastiprinātājiem, taču *SOA* rada lielu daudzumu pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) trokšņa un citus signāla traucējumus [81]. Salīdzinot ar *SOA* un *EDFA*, sadalītais Ramana pastiprinātājs (*DRA*) nodrošina plašu pastiprinājuma spektru, radot ļoti nelielus pastiprinātā signāla kropļojumus un iespējams iegūt negatīvas trokšņa rādītāja vērtības [69]. Galvenā Ramana pastiprinātāju priekšrocība ir tā, ka jaudas spektrs ir ļoti plašs un tā formu var mainīt, mainot pumpēšanas avotu skaitu un viļņu garumu [119]. Salīdzinoši zemais Ramana pastiprinātāju trokšņa rādītājs arī ir ievērojams ieguvums. Bet Ramana tipa pastiprinātājiem nepieciešami jaudīgi pumpēšanas avoti. Tāpēc jāmeklē jauni risinājumi optisko signālu pastiprināšanai, paplašinot pastiprināto viļņu garumu diapazonu un palielinot sasniedzamo pastiprināšanas līmeni jau esošajiem optisko signālu pastiprināšanas risinājumiem. To var panākt, apvienojot dažādu veidu pastiprinātājus. Tādā veidā ir iespējams apvienot pozitīvās īpašības un daļēji kompensēt dažādu veidu pastiprinātāju trūkumus.

Daudzsološāki risinājumi ir pastiprinātāji, kuru joslas platumu var mainīt, izmantojot piemērotus pumpēšanas lāzerus. *WDM* sistēmām tādi ir Ramana un optisko šķiedru parametriskie pastiprinātāji.

Šī nodaļa veltīta kombinēto (hibrīda) optisko pastiprinātāju pētījumiem, kas iegūti, izmantojot pašlaik komerciāli izmantoto optisko pastiprinātāju (*SOA*, *EDFA*, Ramana un parametriskie) kombinācijas.

5.1. Ramana-SOA un Ramana-EDFA kombinēto optisko pastiprinātāju efektivitātes salīdzināšana DWDM pārraides sistēmās

Optisko signālu pastiprināšanai tiek izmantota stimulētā emisija. Optiskajos pusvadītāju pastiprinātajos elektroenerģiju izmanto kā pumpēšanu, lai panāktu populācijas inversiju, bet pastiprināšanos panāk ar stimulētās rekombinācijas luminiscences palīdzību. Spontānais nesēja kalpošanas laiks aktīvā materiāla laukā ir mazāks nekā citos pastiprinātāju veidos, tāpēc *SOA* ir ļoti svarīgi strādāt tuvu piesātinātajam režīmam, lai saglabātu zemu *ASE* līmeni. Pastiprinātāja pastiprināšanas dinamika, ko nosaka ātrās pārraides rekombinācijas kalpošanas laiks, *SOA* ir ātrāks nekā citos pastiprinātāju veidos. Līdz ar to pastiprinātājs salīdzinoši ātri reaģēs uz ieejas optiskā signāla jaudas izmaiņām. Tas var izraisīt smagus signāla traucējumus, jo īpaši daudzkanālu sistēmās [18]. Tā kā impulsi no dažādiem kanāliem tiek pastiprināti vienlaikus, impulss, kas pieder vienam kanālam, var novadīt kopējo augstāko enerģijas līmeņa populāciju. Tas ļauj iegūt mazāku optisko pastiprinājumu impulsam, kas atbilst citam kanālam. Šo procesu sauc par pastiprinājuma šķērsmodulāciju [2]. *SOA* izmantošanas galvenās priekšrocības ir to plašā paplašināšanas joslas platums (t.i., -3 dB līdz 70 nm) un samērā zemā cena [2].

DFA ražošanas procesā izmanto retzemju elementus, lai leģētu dažas silikāta šķiedras. Šim nolūkam var izmantot daudzus dažādus retzemju elementus (erbiju, tūliju, neodīmu, iterbiju uc.). Visbiežāk izmantotais elements ir erbijs, jo tas ļauj optiskajiem pastiprinātājiem darboties C-joslā (no 1530 nm līdz 1565 nm). Lai panāktu efektīvu pumpēšanu erbija leģēto šķiedru pastiprinātajos (*EDFA*), tiek izmantoti 980 nm un 1480 nm pusvadītāju lāzeri, savukārt populācijas inversija ir sasniedzama, izmantojot tieši, pretēji un kopīgi vērstos pumpēšanas avotus. *EDFA* pastiprinājuma spektru nosaka leģētās šķiedras molekulārā struktūra, un tā ir stingri atkarīga no viļņu garuma. Galvenais *EDFA* trūkums, ka viļņa garuma spektrs, kas atkarīgs no joslas platuma, ir tikai aptuveni 40 nm [1]. Pateicoties salīdzinoši ilgam kalpošanas laikam spontānos nesējos silīcija dioksīda šķiedrās, tas ļauj sasniegt lielu pastiprinājumu vājam signālam ar zemu trokšņa rādītāju, kas atspoguļo signāla/trokšņa attiecību atšķirību attiecīgās iekārtas ievadā un izvadā [2]. Šis ir galvenais iemesls, kāpēc *EDFA* visbiežāk tiek izmantots optiskajai pastiprināšanai.

Mūsdienās Ramana pastiprinātāji tiek izmantoti lielākajā daļā jauno tālsakaru un īpaši tālsakaru optisko šķiedru pārraides sistēmās, padarot tos starp pirmajām plaši izplatītām nelineārām optiskajām ierīcēm telekomunikācijās [22]. Ramana pastiprinātajos neliels signāla pastiprinājums rodas no stimulētās Ramana izkliedes - enerģijas pārvešana no spēcīgas optiskās gaismas pumpēšanas uz pastiprināto signālu. Silīcija dioksīda šķiedrās maksimālais pastiprinājums atbilst signāla frekvencei, kas ir ~13,2 THz. Galvenā Ramana pastiprinātāju priekšrocība ir tā, ka jaudas spektrs ir ļoti plašs un tā formu var mainīt, mainot pumpēšanas avotu skaitu un viļņa garumu [119]. Salīdzinoši zemais Ramana pastiprinātāju trokšņa rādītājs arī ir ievērojams ieguvums. Šie divi aspekti padara Ramana pastiprinātājus par kombinēto pastiprinātāju galveno sastāvdaļu, jo tos var izmantot, lai uzlabotu konkrētā pastiprinātāja jaudu, kā arī, lai paplašinātu un izlīdzinātu pastiprināšanas spektru, pievienojot ļoti maz trokšņa pastiprinātajam signālam. Galvenie Ramana pastiprinātāju trūkumi ir sliktā pumpēšanas

efektivitāte pie zemām signāla jaudām [119], kā arī dārgu jaudīgu lāzeru izmantošana, kas spēj nodrošināt lielas jaudas vienmodas šķiedrās.

Sistēmās ar optisko pastiprināšanu pastiprinātā signāla intensitāte var sasniegt pietiekami augstu līmeni, lai izraisītu šķiedras nelinearitāti, kas var izraisīt nopietnu starpkanālu šķērstraucējumus, tādējādi arī strauji samazinot pārraides kvalitāti. Sistēmām, kas ir ļoti jūtīgas pret šķiedras nelinearitāti, ir ļoti svarīgi sekot starpkanālu šķērstraucējiem, ko rada četru viļņu mijiedarbība (*FWM*). *FWM* izraisa spektrālos komponentus ar frekvencēm, kas var sakrist ar pārraidāmā signāla kanālu frekvencēm, tādējādi ierobežojot pastiprinātāja jaudu, kuram tiek uzturēta nepieciešamā pakalpojuma kvalitāte. Šādos gadījumos ASE un citi pastiprinātāja radītie signālu kropļojumi var ievērojami ietekmēt maksimāli iespējamo pārraides attālumu. Tas nozīmē, ka *SOA* nav piemērots optisko pastiprinātāja tips šādai sistēmai.

Ar minētajiem pastiprinājuma ierobežojumiem Ramana pastiprinātāji var izraisīt pārāk daudz starpkanālu šķērsrunu, savukārt *DFAs* var būtiski paaugstināt signāla intensitātes līmeni, lai radītu starpkanālu šķērstraucējumu, un, pateicoties to atkarībai no frekvences pastiprinājuma, tie var nenodrošināt līdzvērtīgu pastiprinājumu visiem sistēmas kanāliem, tādēļ tas ir jālīdzsvaro. Izmantojot Ramana-*SOA* vai Ramana-*EDFA* kombinācijas var palīdzēt pārvarēt šīs problēmas [47].

Ramana pastiprinātāji ir būtiska kombinēto pastiprinātāju sastāvdaļa. Protams kombinēto *SOA-EDFA* var izmantot gadījumos, kad nepieciešams paplašināt *EDFA* pastiprinājuma spektru, ko var izdarīt, piemērojot visrentablāko risinājumu. Tomēr šāda kombinācija rada lielāku ASE daudzumu nekā Ramana-*SOA* vai Ramana-*EDFA* gadījumā. Sakarā ar pārmērīgo *SOA* radīto signālu kropļojumu skaitu un spēcīgo *EDFA* radītā pastiprinājuma atkarību no viļņa garuma, *EDFA-SOA* kombinētā risinājuma ieviešana nav apsvērta.

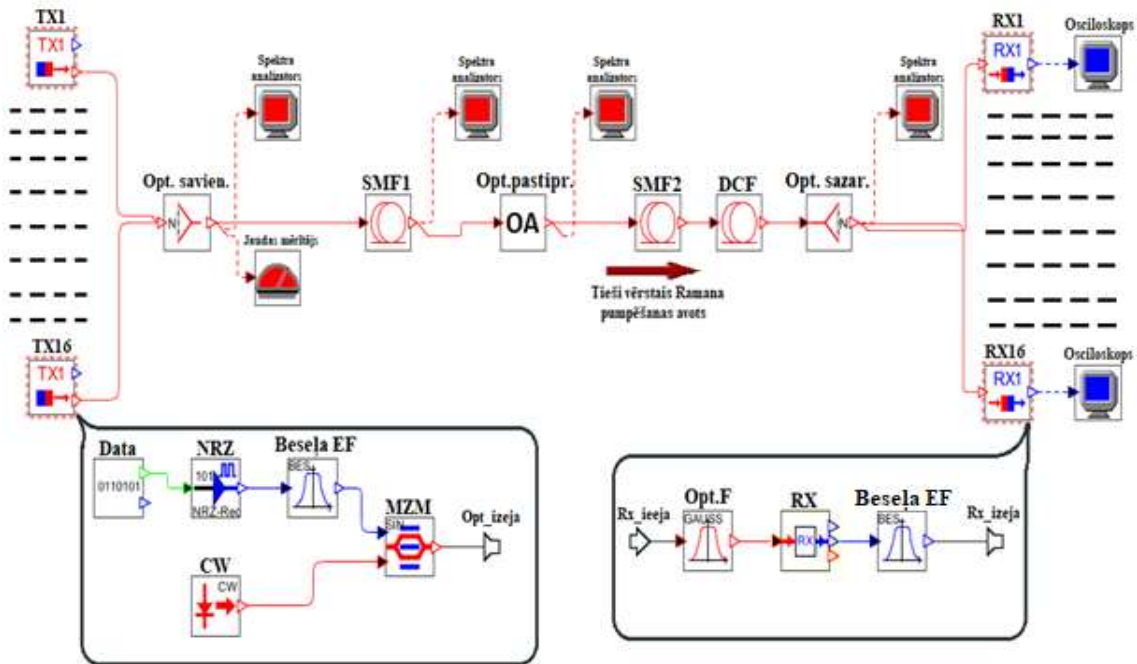
Šīs apakšnodaļas mērķis noskaidrot, kura kombinēto Ramana-*SOA* vai Ramana-*EDFA* pastiprinātāju kombinācijām var nodrošināt pietiekami labu signāla pastiprinājumu ar mazākiem traucējumiem (t.i., ar lielāku pārraides attālumu) un nezaudējot kvalitāti, kas ir jūtīga pret pārraides sistēmas nelinearitāti. Efektīvākais veids, kā novērtēt pārraides kvalitāti, ir analizēt acu diagrammas, kurās tiek parādīti elektriskā signāla modeļi pēc to atklāšanas, kā arī novērtēt pārsūtīto signālu *BER* vērtības kā parametru, kas vislabāk atspoguļo signāla traucējumus pārraides laikā. Lai novērtētu pārraidītā signāla traucējumus, ko izraisa šķiedru nelinearitātes, apskatīsim tā optisko spektru, bet ASE radīto trokšņa līmeni novērtēs trokšņa rādītāji.

Kombinēto pastiprinātāju radītā signāla traucējumu pētīšanai tika izstrādāta 10 Gbit/s 16 kanālu *DWDM* pārraides sistēma ar kodēšanas funkciju bez atgriešanās pie nulles (*NRZ*), ieslēgšanas-izslēgšanas (*OOK*) intensitātes modulācijas formāts un 50 GHz kanālu intervālu. Simulācijas shēma, kas sastāv no trim galvenajiem blokiem: raidītāja bloks, optiskā pārraides līnija un uztvērēja bloks, parādīta 5.1. att.

Raidītāja bloku veido 16 *NRZ-OOK* ārēji modulētie kanālu raidītāji, katrs no tiem darbojas savā frekvencē no 193,05 THz līdz 193,8 THz. Katrs raidītājs satur impulsa modeļa ģeneratoru (*PPG*), *NRZ* vadītāju, elektrisko filtru, nepārtraukta viļņa (*CW*) lāzeru un *Mach-Zender* modulatoru. Nepārtrauktais optiskais signāls tiek ārēji modulēts ar *NRZ* kodētu elektrisko impulsu, izmantojot elektro-optisko *MZM*. Tad visi 16 ģenerētie optiskie signāli tiek apvienoti un pārraidīti caur optisko līniju.

Vispirms signāls pārvar 72 kilometru vienmodas šķiedru (*SMF1*) ar 0,2 dB/km vājinājumu un 16 ps/nm/km hromatisko dispersiju. *SMF* garumu nosaka optiskā signāla nepieciešamā jauda

optiskā pastiprinātāja ieejā, kas ir ļoti svarīga, pateicoties piesātinājuma efektam - it īpaši, ja tiek izmantots *SOA*. *EDFA* šis parametrs ir būtisks, taču tas ir optimizēts pusvadītāju pastiprinātājam (*SOA* augstā trokšņa līmeņa dēļ un tā pieauguma dinamikas dēļ). Vāja signāla jaudas līmenis katram kanālam pie pastiprinātāja ieejas ir aptuveni -22,4 dBm. Tad signālu pastiprina līnijas *SOA* vai *EDFA* pastiprinātājs.



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

Divus kombinētos pastiprinātājus (Ramana-*SOA* un Ramana-*EDFA*) salīdzinās kā līnijas pastiprinātājus, jo šādi pastiprinātāji ne tikai izraisa signālu traucējumus un ievērojami paaugstina intensitātes līmeni, lai izraisītu šķiedru nelinearitāti, bet arī pastiprināt signālu, ko izraisa pārraides laikā uzkrāto traucējumu nelinearitāte. Tādējādi pastiprinātāja kopējā pieļaujamā trokšņa līmeņa prasības ir stingrākas.

SOA sūkņēšanas strāva ir optimizēta, lai samazinātu pastiprinātāja radītos signāla traucējumus. *EDFA* parametri izvēlēti tādā veidā, lai jaudas spektra nevienmērīgumu varētu viegli kompensēt ar vienu Ramana pastiprinātāja pumpēšanas avotu. Tad pastiprinātais signāls nonāk otrā *SMF* šķiedrā, kur to pastiprina mazjaudas *DRA*, kura jauda ļauj sasniegt maksimālo signāla pastiprinājumu, neizraisot pārāk daudz nelineārus kropļojumus. Šī otra *SMF* garums ir mainīgs, lai iegūtu maksimālo pārraides attālumu.

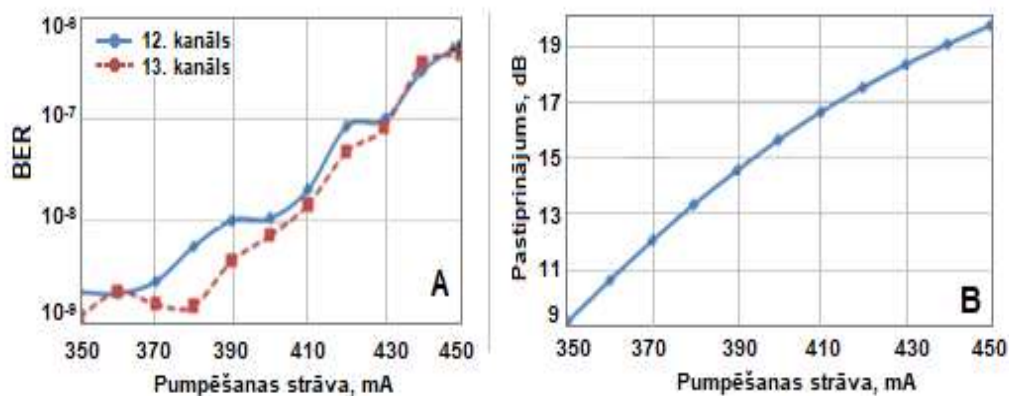
Pirmkārt, atrastas Ramana-*SOA* un Ramana-*EDFA* konfigurācijas, kas ļauj sasniegt maksimālo pārraides attālumu.

SOA aktīvā slāņa parametri un citi tā ģeometriskie un materiālie parametri parādīti 5.1. tab., kur pusvadītāju optiskais pastiprinātājs bija optimizēts analogiskai sistēmai.

Pusvadītāju optiskā pastiprinātāja materiāla parametri [120]

Parametri	Vērtība
Pastiprinātāja garums	750 μm
Aktīvā slāņa platums	2 μm
Aktīvā slāņa biezums	0,2 μm
Gaismas ierobežojošais faktors	0,41
Brīvo nesēju koncentrācija	$1,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Materiāla pastiprinājuma koeficients	$2,1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
Nesēju spontānais dzīves laiks	0,3 Ns
Ieejas un izejas savienojuma ienestie zudumi	3,0 dB

Pumpēšanai izmantotā strāva pusvadītāju pastiprinātājā jāizvēlas no apsvērumiem, kā panākt maksimālo pastiprinājumu ar minimālo troksni. Tika atrasts *BER* līmenis divos kanālos signālam pirms un pēc pastiprināšanas pie dažādām strāvas vērtībām (no 350 līdz 450 mA). Kanāli tika mērķtiecīgi izvēlēti ar visaugstāko un viszemāko optiskās jaudas līmeni *SOA* izejā - attiecīgi 12. un 13. kanāls. Ir svarīgi atzīmēt, ka, lai izvairītos no pastiprinātāja pastiprināšanas ietekmes uz *BER* vērtībām abos kanālos, optiskais signāls tika apzināti vājināts, tādējādi pilnīgi kompensējot vāja signāla pastiprināšanu. Tika iegūta pastiprinātā signāla pastiprinājuma atkarība no pumpēšanas strāvas, un tas palielinās ar katru papildu 10 mA. Rezultāti parādīti 5.2. att.

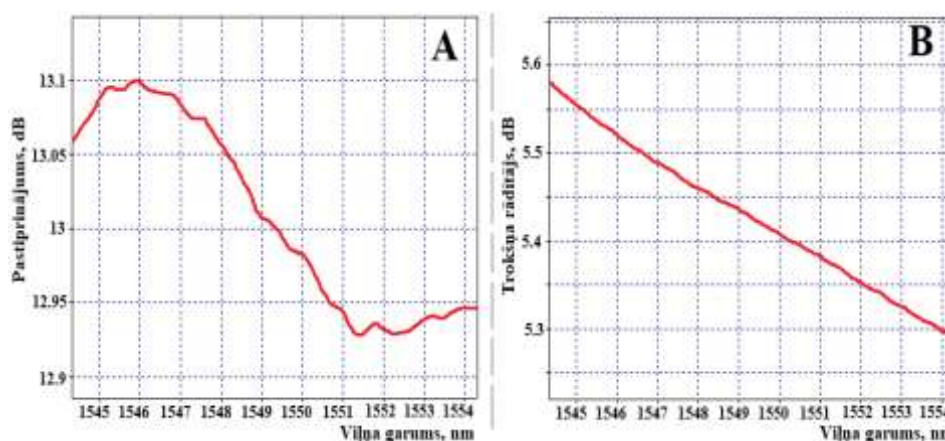


5.2. att. 12. un 13. kanāla *BER* vērtības atkarībā no pumpējošās strāvas *SOA* izejā ar izkompensēto pastiprinājumu (a) un optiskais pastiprinājums atkarībā no pumpējošās strāvas (b).

12. kanāla *BER* vērtība pastiprinātāja ieejā bija $2,04 \times 10^{-9}$ un 13. kanāla - $9,96 \times 10^{-10}$, t.i., zemāka, neskatoties uz to, ka 12. kanāla optiskā jauda ir nedaudz lielāka. Pumpējošā strāva, sākot no 380 mA, ievērojami palielina minēto divu kanālu *BER* vērtības. Tas liecina, ja pumpējošās strāvas vērtība pārsniedz 370 mA, pastiprinātāja radīto signālu kropļojumu apjoms sāk pieaugt. Tāpēc pieņemām 370 mA pumpējošo strāvu kā optimālu šai sistēmai. Palielinot pumpējošo strāvu, pastiprinātāja pastiprināšanas pieaugums kļūst mazāks. Tas liecina, ka pastiprinātājs lēnām sasniedz populācijas inversijas maksimālo līmeni. Tādēļ, pateicoties īsam

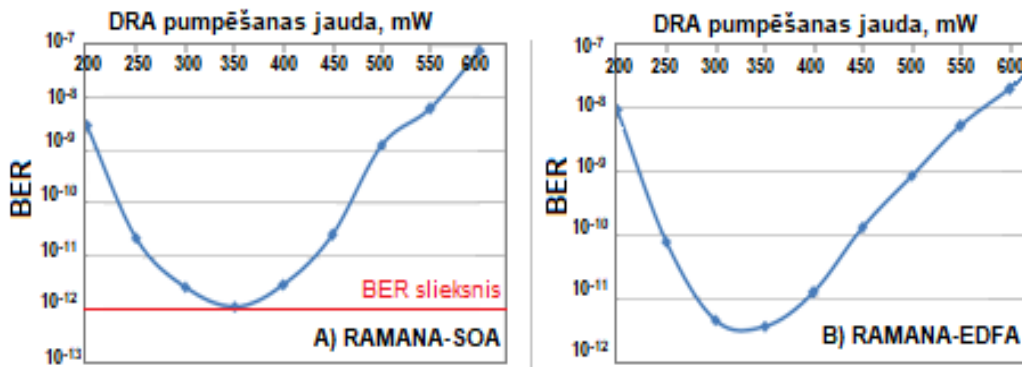
spontānā nesēja dzīves laikam, uzģenerētais ASE arī piedzīvo pieaugumu, palielinot pumpējošo strāvu. Tā kā tā vērtība ir 370 mA, SOA nodrošina maza signāla pastiprinājumu 12,1 dB. Fakts, ka SOA nodrošina ļoti plašu joslas platumu, apstiprina vēl viens fakts, ka visu 16 kanālu optiskā pastiprinājuma vērtību starpība ir tikai 0,02 dB. Pārējo pastiprinātāja jaudu nodrošinās beztrokšņu sadalītais Ramana pastiprinātājs.

Kombinētā Ramana-EDFA pastiprinātājā tika izvēlēta divvirzienu EDFA pumpēšana, ar 980 nm tieši vērsto un 1480 nm pretēji vērsto pumpēšanas avotiem. Pumpēšanas jaudas tika izvēlētas, lai padarītu EDFA pastiprinājuma spektra nevienmērīgumu vieglāk kompensējamu ar vienu pumpēšanas avota Ramana pastiprinātāju. Šajā gadījumā 16 kanāli aizņem ~6 nm joslas platumu, kura robežās zemas jaudas viena pumpēšanas avota DRA pastiprinājuma starpība ir < 0,5 dB. Ņemot vērā šo faktu, nolemts, ka EDFA ir jāizmanto 5 m gara ar erbija joniem leģēta šķiedra ar populācijas inversiju, izmantojot 10 dBm (10 mW) 980 nm tieši vērsto un 16 dBm (40 mW) 1480 nm pretēji vērsto pumpēšanu. Iegūtais pastiprinājuma spektrs un trokšņa rādītājs ir parādīti 5.2. att., kur iegūtais pastiprinājuma spektrs, kas iegūts viļņu garumos no 1547 līdz 1553 nm, svārstās no 12,93 dB līdz 13,1 dB. EDFA pastiprinājuma nevienmērīgumu izlīdzinājām ar viena pumpēšanas avota Ramana pastiprinātāju. Trokšņa rādītājs svārstās no 5,33 līdz 5,49 dB, kas ir diezgan liels pieaugums EDFA pastiprinātājam, kas darbojas ar augstu populācijas inversijas līmeni. Optimālajai pastiprinātāja konfigurācijai ir iespējams sasniegt trokšņa rādītāju, kas ir tuvu 3 dB atzīmei [2]. Tādejādi EDFA konfigurācija nav optimāla, tomēr iegūtais trokšņa rādītājs ir mazāks nekā SOA teorētiskais.



5.3. att. EDFA pastiprinājuma spektrs (A) un trokšņa rādītājs (B) ar 5 m garu leģētu šķiedru un 10 dBm 980 nm tieši vērsto un 16 dBm 1480 nm pretēji vērsto pumpēšanas avotiem.

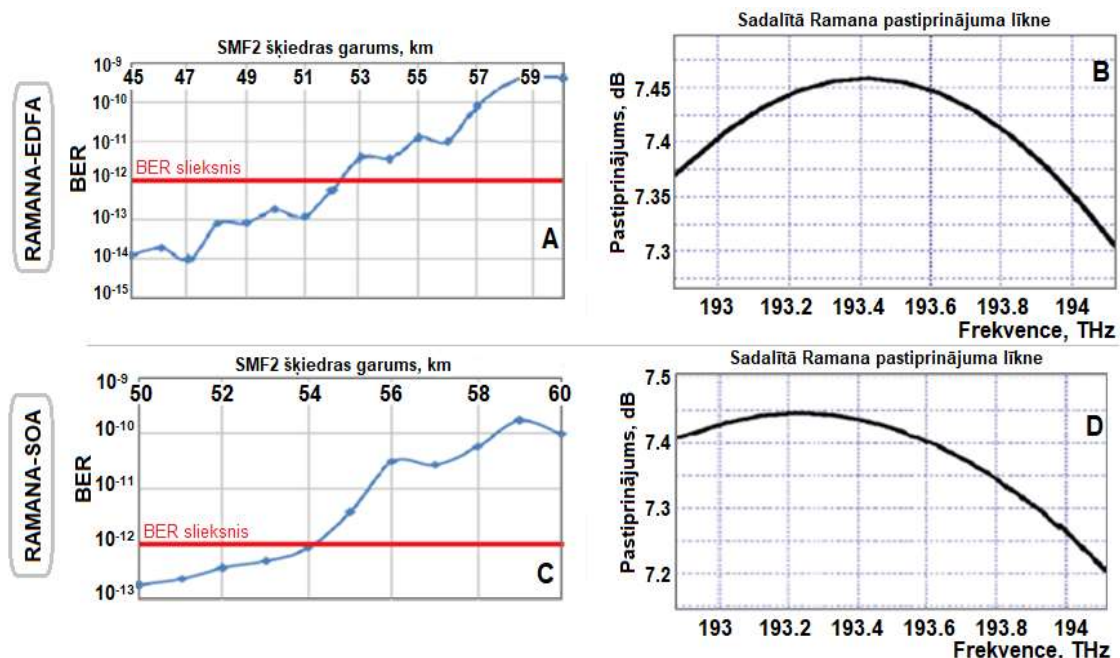
Kombinēto Ramana-EDFA un Ramana-SOA pastiprinātāju izpētei tikai izmantots tieši vērtais 1453,1 nm Ramana pumpēšanas avots. Noskaidrojām optimālo pumpēšanas jaudu (5.3. att.).



5.4. att. Sistēmas BER atkarība no jaudas 1451,8 nm tieši vērsto Ramana-SOA (A) un Ramana-EDFA (B) pumpēšanas avotam.

Abos gadījumos pumpēšanas jaudai virs 350 mW FWM radītais šķērstraucējums pārsniedz pieļaujamo vērtību un nopietni pasliktina kopējo sistēmas darbību. Tādēļ esošajos apstākļos vispiemērotākā vērtība bija 350 mW.

Tā kā SMF šķiedra kalpo kā pastiprinājuma vide sadalītajam Ramana pastiprinātājam, lai iegūtu kopējo DRA pastiprinājumu, vispirms vajag noteikt SMF2 garumu starp pastiprinātāju un uztvērēja bloku, tādējādi iegūstot arī maksimālo pārraides attālumu. Lai to panāktu, ir nepieciešams noteikt optimālo DCF garumu, kuru, no vienas puses, nosaka kopējā uzkrātā hromatiskā dispersija, bet, no otras puses, ierobežo signāla vājināšanās, ko izraisa DCF. Optimālais DCF garums ir 17 km. Lai atrastu maksimālo pārraides attālumu, tika iegūtas sistēmas BER atkarība no SMF2 šķiedra garuma (parādīts 5.4. att. kopā ar DRA pastiprinājuma spektriem).

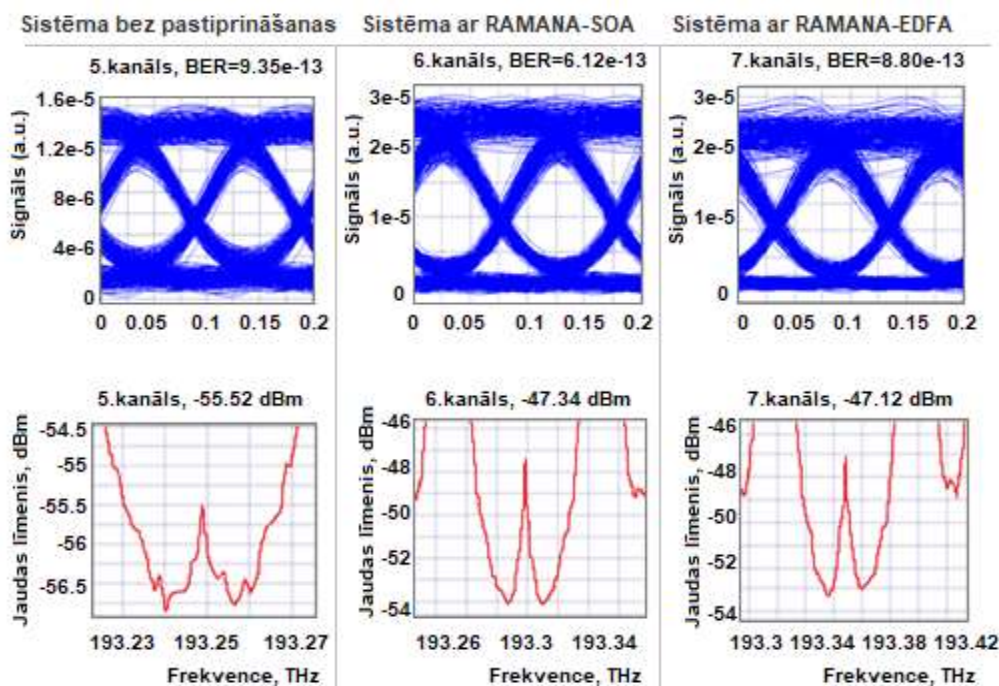


5.5. att. Sistēmas BER atkarība no SMF2 garuma (A, C) un DRA iegūtie pastiprinājuma spektri Ramana-SOA (B) un Ramana-EDFA (D).

5.5. att. redzamās atkarības liecina, ka Ramana-SOA gadījumā maksimālais SMF garums starp pastiprinātāju un uztvērēja bloku, kas nodrošina sistēmas $BER < 10^{-12}$, ir 52 km. No tā

izriet, ka kopējais pārraides attālums būs 124 km. Ramana-*EDFA* sistēmai šis šķiedras garums ir 54 km un pārraides attālums - 126 km. Svarīgi piebilst, ka ir iegūts arī maksimālais pārraides attālums sistēmai, kurā netika pielietota pastiprināšana un attālums ir 69 km. Tas nozīmē, ka Ramana-*SOA* kombinācija spēj pagarināt šo attālumu par 55 km un Ramana-*EDFA* - par 57 km. Optiskā signāla vērtības uztvērēja ieejā sistēmai bez pastiprinājuma mainījās no -23.32 līdz -23.57 dBm, Ramana-*SOA* sistēmai no -21.78 līdz -21.44 dBm un ar Ramana-*EDFA* - no -21.31 līdz -21,05 dBm.

Lai identificētu faktoros, kas ierobežo pārraidi katrā no trijiem gadījumiem, tika izanalizēti kanālu acu diagrammas ar vissliktāko *BER*. Kanālu acu diagrammas kopā ar attiecīgo starpkanālu šķērstraucējumu, ir parādīti 5.6. att.



5.6. att. Kanālu acu diagrammas ar sliktāko *BER* vērtību (augšā) un starpkanālu šķērstraucējumi attiecīgos kanālos (apakšā).

Kā tika sagaidīts, sistēmā bez pastiprināšanas, galvenais ierobežojošais faktors ir optiskā signāla vājināšanās. Ramana-*EDFA* pastiprinātāja sistēmas 7. kanāla acu diagrammā var redzēt, ka *FWM* rada starpkanālu šķērstraucējumu, kas ir galvenais pārraides ierobežojošais faktors, jo *FWM* harmonikas ir skaidri redzamas loģiskā "1" līmenī un kritiskā *BER* vērtība tika sasniegta ar augstāku uztvertā signāla jaudas līmeni.

Ramana-*SOA* sistēmai starpkanālu šķērstraucējums ir diezgan augsts, lai arī zemāks nekā kombinētā Ramana-*EDFA* pastiprinātāja gadījumā, jo pastiprināšanas starpība ir ~0,8 dB abos gadījumos. Ja salīdzina optiskā signāla jaudas līmeņus pie uztvērēja bloka ieejas, var redzēt, ka vidējā starpība ir ~0,4 dB, bet pastiprināšanas atšķirība ir ~0,8 dB. Tādēļ ir skaidrs, ka *SOA* rada vairāk *ASE* trokšņa nekā *EDFA*, kas papildus starpkanālu šķērstraucējumiem palielina detektētā signāla jaudu uztvērējā.

Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, izdarīti secinājumi:

1. Konstatēts, ka šķiedru nelinearitāte īstenotajā 16 kanālu *DWDM* pārraides sistēmā spēcīgi ietekmē pārraides kvalitāti, kas ļauj salīdzināt Ramana-*SOA* un Ramana-*EDFA* kombinētos pastiprinātājus.

2. Pastiprinātāju testēšana sniedz skaidru priekšstatu par pastiprinātā signāla kropļojumiem. *SOA* parametri tika pielāgoti tā, lai tas radītu lielāku pastiprinājumu ar mazākiem signāla kropļojumiem. Tika novērots, ka, palielinot *SOA* pumpēšanas strāvu (virs 370 mA), tas noved pie signāla *BER* palielināšanas pēc pastiprināšanas, kas norāda uz lielākiem signāla traucējumiem, ko rada *SOA*.

3. Kombinētā pastiprinājuma ieviešana var nodrošināt vienmērīgāku pastiprinājumu visiem sistēmas kanāliem. Ramana-*EDFA* risinājuma gadījumā *EDFA* parametrus koriģēja, lai iegūtu pastiprinājuma spektru, ko viegli varētu izlīdzināt ar vienu Ramana pumpēšanas avotu. Ievadītā *EDFA* konfigurācija nodrošināja 0,17 dB pastiprinājumu starpību, bet pēc *EDFA* papildināšanas ar *DRA* iegūstam pastiprinājuma spektru, kurā maksimālā pastiprinājuma starpība ir tikai 0,05 dB.

4. Pat neoptimāli konfigurēts *EDFA* rada mazākus signālu kropļojumus nekā *SOA*. Ieejas signāla jauda tika īpaši pielāgota *SOA*, tādēļ *EDFA* nebija optimāli konfigurēts; tomēr Ramana-*EDFA* kombinētais pastiprinātājs uzrādīja labākus rezultātus un nodrošināja pārraidi garākā optiskā līnijā nekā Ramana-*SOA* pastiprinātājs (attiecīgi 126 un 124 km). Ramana-*SOA* nodrošināja vidējo pastiprinājuma koeficientu 19,6 dB un Ramana-*EDFA* - 20,4 dB.

5. Tā kā *EDFA* radīja mazākus signāla kropļojumus, Ramana-*EDFA* risinājums nodrošināja labāku pastiprinājuma kvalitāti nekā Ramana-*SOA*. Abos gadījumos galvenais faktors, kas ierobežo pārraidi ir *FWM* saražotais starpkanālu šķērstraucējums.

5.2. Ramana-FOPA kombinētā pastiprinātāja veikspēja 16 kanālu WDM pārraides sistēmā

Šķiedru joslas platums, ko uzskata par izmantojamu tālsakaru pārraidei, aizņem viļņu garuma diapazonu no ~1300 līdz ~1700 nm, kur tipisks standarta vienmodas šķiedras (*SSMF*) zudums ir mērens vai mazs ($\leq 0,35$ dB/km). Praktiskās realizācijās izmantoto joslas platumu ierobežo pielietotās pastiprināšanas tehnoloģijas joslas platums. Plaši izmantotais ar erbija joniem leģētais šķiedru pastiprinātājs (*EDFA*), pastiprinājuma joslas platums aptver daļu no C un L joslām (kopā 5–10 THz). Lai pārvarētu šo ierobežojumu, var izmantot paralēli vairākas pastiprināšanas tehnoloģijas, lai izveidotu daudzjoslu pastiprinātājus un pārraides sistēmas [121].

Ramana-*EDFA* kombinācija ļauj izlīdzināt *EDFA* pastiprinājuma spektru, kas ir diezgan nevienmērīgs un kuru ir grūti izlīdzināt, izmantojot tikai *EDFA* pumpēšanas lāzerus [75]. Ramana pastiprinātājs var arī nodrošināt negatīvu trokšņa faktoru, kas samazina daļu no *EDFA* saražotā pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) trokšņa. Šīs kombinācijas galvenais trūkums ir ierobežots *EDFA* pastiprinājuma joslas platums, kas aptver tikai C (1530-1565 nm) un L (1565-1625 nm) joslas. Tādēļ šī kombinācija tikai uzlabo *EDFA* raksturlielumus, bet nedod papildus elastību attiecībā uz viļņa garumu.

Tāpēc ir pastiprinātāji, kuru joslas platumu var mainīt, izmantojot piemērotus pumpēšanas lāzerus. *WDM* sistēmām tādi ir Ramana un optisko šķiedru parametriskie pastiprinātāji.

Ramana pastiprinātāju priekšrocība ir iespēja pielāgot pastiprināšanas līknes frekvenču joslu, izvēloties pumpēšanas lāzera viļņa garumu. Ramana pastiprinājums ir salīdzinoši platjoslas ar joslas platumu > 5 THz [22]. Lai paplašinātu pastiprināšanas spektru, tiek izmantoti arī vairāki pumpēšanas lāzeri. Galvenais Ramana pastiprinātāju trūkums ir zema pumpēšanas

efektivitāte vāju ievades signālu gadījumā. Tas nozīmē, ka, lai sasniegtu nepieciešamo signāla pastiprinājumu, ir nepieciešams jaudīgs pumpēšanas lāzers, jo tiek patērēti vairāk nekā 30% no pumpēšanas jaudas [122]. Ramana pastiprinātājiem nepieciešama pumpēšanas jauda diapazonā no 1 līdz 5 W. Vēl viens trūkums ir ātrās reagēšanas laiks, kas izraisa trokšņa radīšanu.

Vēl viena ļoti aktuāla pastiprinātāju klase ir uz nelineārajiem optiskajiem efektiem balstīts – tas ir optisko šķiedru parametriskais pastiprinātājs (*FOPA*), kas balstās uz četru viļņu mijiedarbību (*FWM*). Attiecībā uz *FOPA* pastiprinājuma joslas platumu un pozīciju frekvenču diapazonā tas ir ļoti līdzīgs Ramana pastiprinātājam. Pastiprinājuma raksturlielumus var mainīt, izvēloties atbilstošu pumpēšanas lāzeru, un sasniegtais pastiprinājums ir efektīvāks nekā izmantojot Ramana efektu [123]. *FWM* laikā radušos brīvģaitas komponentus var izmantot arī viļņa garuma pārveidošanai. Lai realizētu *FOPA*, ir nepieciešams panākt fāžu saskaņošanu starp pumpēšanas lāzeru un pastiprināmiem signāliem, lai panāktu efektīvu signāla pastiprināšanu. Fāžu saskaņošana ir atkarīga no daudziem aspektiem, ieskaitot pumpēšanas lāzera un signāla viļņa garumu un jaudu, kā arī šķiedru dispersiju un nelineāros raksturlielumus utt. [124-126]. Neskatoties uz šo diezgan sarežģīto uzstādīšanu, laboratorijas apstākļos ir ieviesti *FOPA* ar pastiprinājumu 70 dB un joslas platumu ≥ 200 nm [127-128]. Viens no galvenajiem *FOPA* trūkumiem *WDM* sistēmās ir nevēlama *FWM* mijiedarbība starp signāliem, kas tiek pastiprināti nelineārā vidē, izraisot starpkanālu šķērsrunu [160]. *FOPA* veikspēju var uzlabot, izmantojot sarežģītus iestatījumus, kas ietver divvirzienu cilpveida arhitektūras izmantošanu, daudzsekciju pastiprināšanas datu nesēju vai signāla sadalīšanu divās ortogonālās polarizācijās, lai nodrošinātu signāla pastiprinājumu, kas nav jūtīgs pret polarizāciju [129-130].

Šajā apakšnodaļā pētīšu pastiprinātāja kombināciju, kas tiek saukta par Ramana atbalstīts *FOPA* (Ramana-*FOPA*) pastiprinātājs. Galvenā ideja ir tāda, ka *FOPA* pastiprinātājs tiek papildināts ar Ramana pumpēšanas avotu, kas savienots pretējā virzienā [131]. Tādējādi tajā pašā šķiedrā signāla pastiprināšanā tiek iesaistīti divi nelineāri efekti: stimulēta Ramana izkliede un četru viļņu mijiedarbība. Ramana-*FOPA* pastiprinājuma uzvedība ir diezgan sarežģīta. Kopējais pastiprinājums var būt lielāks nekā Ramana un parametriskā pastiprinātāja pastiprinājumu summa [131-133].

Ramana pumpēšanas avota viļņa garums parasti tiek iestatīts tā, lai pastiprinātu parametrisko pumpēšanas lāzeri, jo Ramana efekts ir efektīvāks jaudīgākai optisko komponentu pastiprināšanai. Tātad Ramana pumpēšanas enerģijas pārraide uz signālu pārsvarā notiek netieši caur parametrisko pumpēšanas avotu. Tomēr daļa signāla pastiprināšanas notiek arī tieši caur Ramana pastiprināšanas procesu [133].

Ramana-*FOPA* pastiprinātājam izmantota pretēji vērsta Ramana pastiprinātāja pumpēšanas shēma, lai nomāktu signāla jaudas svārstības, ko izraisa pumpēšanas relatīvās intensitātes troksnis [167], kā arī, lai mazinātu nevēlamo Ramana pumpēšanu ar parametrisko pumpēšanas mijiedarbību caur *FWM* procesu nelineārajā vidē, parasti tā ir augstas nelinearitātes šķiedra (*HNLF*).

Ramana-*FOPA* pastiprinātāji ir pētīti dažādiem mērķiem. Pirmkārt, pamatideja ir pārbaudīta un aprakstīta vairākās publikācijās, kur analizēti šīs kombinācijas principi un ieguvumi [128, 131-135]. Šajos dokumentos galvenā uzmanība tiek pievērsta pastiprinātāja kombinētajiem pastiprinājuma spektriem, kā arī dažādu pumpēšanas shēmu efektivitātei un trokšņa rādītājiem. Tomēr jaunākajos dokumentos Ramana-*FOPA* izmantošana *WDM* sistēmās ir pētīta analītiski [136] un eksperimentāli [137]. Pēdējā minētajā publikācijā Ramana-*FOPA*

veiktspēja tika pētīta 10 kanālu *WDM* sistēmā, kas darbojas C joslā un katra kanālu signāla jauda pastiprinātāja ieejā ir līdz -20 dBm.

Ramana-*FOPA* pastiprinātājs izmantots 16 kanālu *WDM* sistēmā ar 100 GHz starpkanālu intervālu, kas darbojas S-joslā (1460–1530 nm). Signāla jauda vienam kanālam pie pastiprinātāja ieejas ir iestatīta uz -40 dBm, kas atbilst tālsakaru pārraides sistēmām vai pasīvajiem optiskajiem tīkliem ar lielu sazarojuma pakāpi, piemēram, metro vai piekļuves tīkliem. Galvenais mērķis ir atrast Ramana-*FOPA* konfigurāciju, kas padara iespējami ļoti vāju optiskā signāla pastiprinājumu S optiskajā joslā, vienlaikus saglabājot pēc iespējas zemāku jaudas starpību starp visiem *WDM* sistēmas kanāliem. Piedāvātā Ramana-*FOPA* iestatīšana salīdzināta ar viena pumpēšanas avota *FOPA* pastiprinātāju ar tādu pašu izejas signāla jaudas līmeni, lai novērtētu veiktspējas uzlabojumus pēc Ramana pastiprinātāja pievienošanas sistēmai.

Ramana-*FOPA* pētījums balstās uz *OptSim* datorsimulācijas programmatūru [175]. Optiskā pastiprinātāja veiktspēja novērtēta, analizējot pastiprinājuma līknes un jaudas sodu pēc saņemtā signāla jaudas, kā arī saņemtā *WDM* optiskā signāla un trokšņa attiecības (*OSNR*) un bitu kļūdu attiecības (*BER*).

Simulācijas iestatīšana (5.6. att.) sastāv no četrām galvenajām sekcijām: raidītāji, pārraides līnija, Ramana-*FOPA* pastiprinātājs un uztvērēji. Raidītāja daļa sastāv no 16 avotiem, katrs no tiem sastāv no 40 Gbit/s pseido-nejauša bitu modeļu ģenerators, kas ir savienots ar *NRZ* kodētāju un pēc tam ar *Mach-Zehnder* modulatora (*MZM*) elektriskā signāla ievadei. *MZM* optiskā ieeja ir savienota ar gaismas avotu. Līdz ar to visi avoti ģenerē 40 Gbit/s *NRZ-OOK* signālus. Vienīgā atšķirība starp visiem raidītājiem ir gaismas avota starojuma frekvence. Visi 16 kanāli atrodas frekvenču joslā starp 196,1 un 197,6 THz (viļņa garums starp 1517,168-1528,773 nm) ar starpkanālu intervālu 100 GHz. Šī frekvenču josla atbilst S optiskajai joslai (1460-1530 nm), kas atrodas ārpus *EDFA* pastiprinājuma diapazona. Visi 16 kanāli tiek multipleksēti, izmantojot optisko savienotāju un pēc tam 150 km garumā tiek pārraidīti vai pa standarta *SMF* (*ITU-T G.652*), vai *NZ-DSF* (*ITU-T G.655*) šķiedru, galvenie parametri, kas pie 1550 nm standarta viļņa garuma ir parādīti 5.2. tabulā.

5.2. tabula

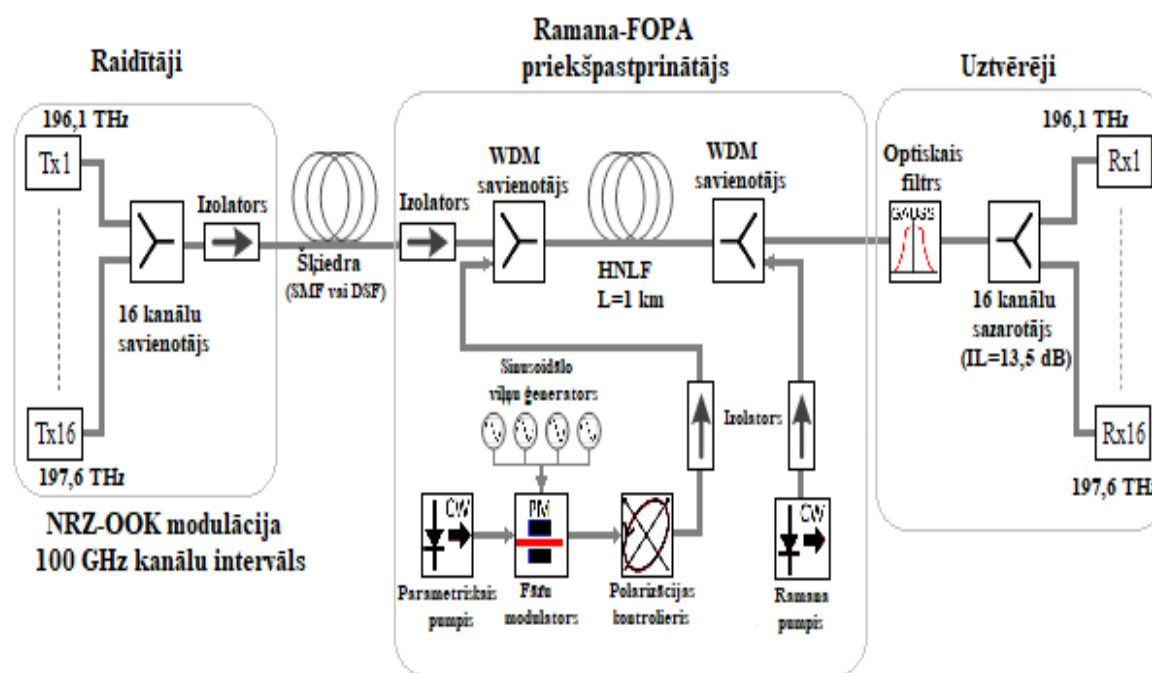
Pārraides līnijas izmantotie šķiedru parametri

Parametrs \ Šķiedras tips	Standarta <i>SMF</i>	<i>NZ-DSF</i>	<i>HNLF</i> (tiek izmantota pastiprinātāja sadaļā)
Vājinājuma koeficients (dB/km)	0,20	0,19	0,96
Dispersijas koeficients (ps/nm/km)	18	4	0
Dispersijas slīpums (ps/(nm ² km))	0,086	0,108	0,016
Efektīvā zona (μm ²)	85	72	10
Nelinearitātes indekss (m ² /W)	2,21×10 ⁻²⁰	2,31×10 ⁻²⁰	3,7×10 ⁻²⁰

Tā kā kanāla jauda -40 dBm ir pārāk maza, lai to uztvertu izmantojot *PIN* fotodiodes pieļaujamā *BER* līmenī, tāpēc tam ir nepieciešama priekšpastiprināšana. Pateicoties tehnoloģiju attīstībai, tipisks risinājums *WDM* sistēmām ir uz *EDFA* balstīts priekšpastiprinātājs, kas ļauj uzlabot uztvērēja jutību līdz -38,8 dBm pie 40 Gbps [138-139]. Tomēr *FOPA* var nodrošināt

vēl lielāku jūtīgumu, kā aprakstīts dažādos dokumentos [139-140]. Tāpēc pētīta Ramana-*FOPA* kombinētā pastiprinātāja veiktspēja vāja signāla pastiprināšanas gadījumā. Kā redzams 5.7. att., aiz savienotāja ir izolators, kas bloķē atstarotos signālus no iekļūšanas raidītājos.

Ramana-*FOPA* iestatīšana sastāv no parametriskā pumpēšanas avota (*angl. parametric pump - PP*), kas ir *CW* lāzers, kas izstaro 192,918 THz un izejas jaudu 500 mW, ko izmanto kā bāzes vērtību, kas ir optimizēta. Lai nomāktu stimulēto Briljuēna izkliedi *HNLF* šķiedrā, *PP* ir savienots ar *MZM* balstītu fāzes modulatoru, lai paplašinātu pumpēšanas gaismas spektru, kas tiek plaši izmantots *FOPA* [123]. Četrus dažādu frekvenču sinusoidālu svārstību kombinācija tika ievadīta fāzes modulatora elektriskā signāla ieejā. Sinusoidālo viļņu biežums tika ņemts no iepriekšējiem *FOPA* pētījumiem, un tie ir: 180, 420, 1087 un 2133 MHz [141]. Pēc fāzes modulatora seko polarizators, lai pielāgotu *PP* polarizācijas stāvokli (*angl. state of polarization - SOP*), lai tas atbilstu *WDM* signālam *SOP*. Pēc polarizatora ir izolators, kas novērš atstaroto signālu iekļūšanu lāzera izejā. Divi *WDM* savienotāji ir savienoti ar *HNLF*. Viens *HNLF* ieejā, lai *HNLF* savienotu *PP* radīto pumpēšanas starojumu ar *WDM* signāliem. Otrs ir savienots ar *HNLF* izeju, lai pievienotu pretēji vērsto (attiecībā uz *PP*) Ramana pumpēšanas (*angl. Raman pump - RP*) starojumu. *RP* ir *CW* lāzers ar izejas jaudu 500 mW. *RP* frekvence ir iestatīta tā, lai sasniegtu maksimālo Ramana pastiprinājumu *PP* frekvencē. Izolators *RP* izejā ir tā paša iemesla dēļ, kas minēts iepriekš - apturēt atstaroto signālu iekļūšanu lāzera avotā.



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

WDM savienotāji vienlaikus darbojas arī kā filtri, lai filtrētu *PP* un *RP* starojumu pēc izplatīšanās *HNLF*. *HNLF* garumu, ko izmanto parametriskajā pastiprinātājā, galvenokārt nosaka divi aspekti. No vienas puses, *HNLF* garumam jābūt pēc iespējas mazākam, lai samazinātu dispersijas izraisīto fāzes neatbilstību starp pumpēšanu un signāliem. No otras puses, garāks *HNLF* ļauj samazināt pumpēšanas lāzera jaudu. Izmantojam 1 km garu *HNLF* šķiedru ar nulles hromatisko dispersiju pie 1553 nm, dispersijas slīpumu 0,016 ps/nm/km,

nelinearitātes koeficientu $15,0 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, Ramana konstanti 0,18 un vājinājumu 0,96 dB/km pie 1550 nm. Šie parametri izvēlēti no komerciāli pieejamās *HNLF* specifikācijas.

Pēc Ramana-*FOPA* pastiprinātāja ir optiskais filtrs ar Gausa tipa pārraidīšanas funkciju ar 3 dB joslas platumu 15 nm. Šo filtru izmanto, lai filtrētu L joslā (1565-1625 nm) izvietotos brīvģaitas komponentus, kas radīti *FWM* procesā. Uztvērēja daļa sastāv no 16 kanālu optiskā strāvas sadalītāja. Šī sadalītāja ienestie zudumi ir 13,5 dB. Pēc tam katrs kanāls tiek filtrēts, izmantojot optisko Gausa tipa filtru ar 3 dB joslas platumu 0,25 nm. Pēc filtrēšanas seko uztvērējs, kura pamatā ir PIN fotodiode, kas veic optiskā un elektriskā signāla pārveidošanu. Uztvērēja jūtība ir -21,5 dBm, lai nodrošinātu bitu kļūdu attiecību (*BER*) pie 10^{-9} . Tad elektriskais signāls tiek filtrēts, izmantojot zemfrekvences Beseļa tipa filtru, lai samazinātu uztvērēja radītos trokšņus. Pēc tam visi saņemtie signāli tiek ievadīti acu diagrammās un spektra analizatoros. Acu diagrammas izmantotas, lai noteiktu saņemto signālu *BER*. Visās simulācijās *WDM* sistēmas veiktspēju noteica sliktākā kanāla *BER* vērtība. Digitālo optisko uztvērēju vispārpieņemtais kritērijs prasa, lai *BER* vērtība būtu zemāka par 10^{-9} [2].

Pārraides līnijai priekšpastiprinātāja ieejas signāla ģenerēšanai tika izmantotas divu veidu šķiedras, proti, 150 km standarta *SMF* un *NZ-DSF*. Tika konstatēts, ka, pielietojot kādu no šķiedrām, nebija novērotas pamanāmas atšķirības priekšpastiprinātāja darbībā, tāpēc tika izmantota *NZ-DSF* šķiedra.

Ir arī zināms, ka četru viļņu mijiedarbības efektivitāti lielā mērā ietekmē signāla un pumpēšanas avota viļņu relatīvā polarizācija. Tam nepieciešama kāda veida polarizācijas izsekošana vai nejūtīga polarizācijas shēma. Tā kā tas pārsniedz šī raksta darbības jomu, tika pieņemts, ka signāls un pumpēšanas avots ir kop-polarizēti.

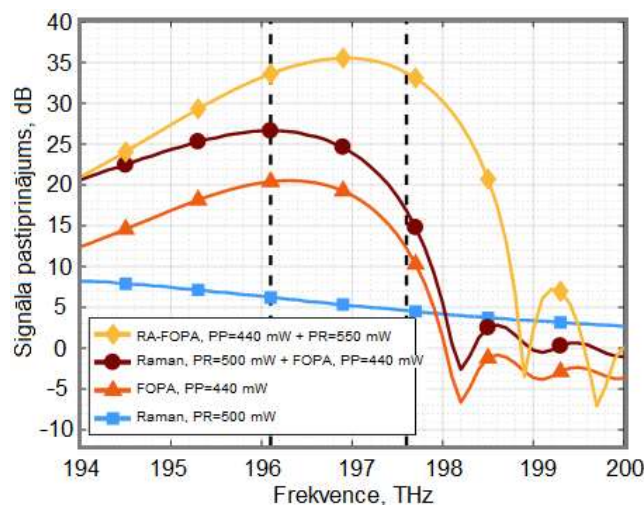
Sakarā ar to, ka pastiprinājuma līkne ir atkarīga no pumpēšanas jaudas gan attiecībā uz tā maksimālo pastiprinājumu, gan formu, kanālu izvietojums spektrālajā tīklā tika koriģēts, lai panāktu līdzīgu pastiprinājumu visattālākajiem kanāliem. Pumpēšanas jaudas pieaugums novirza pīķa pastiprinājuma punktu tālāk no pumpēšanas avota. Lai sasniegtu maksimāli vienādu izejas jaudu, kanāli netika centrēti ap maksimālo pastiprinājumu, bet atradās nedaudz tuvāk pumpēšanas frekvencei. Tas ir saistīts ar straujāku pastiprinājuma līkni tajā vietā, kas atrodas tālāk no pumpēšanas avota.

Tā kā Ramana-*FOPA* veiktspēja ir atkarīga no diezgan sarežģītas mijiedarbības starp dažādiem nelineāriem efektiem, ir jāatrod, kādi *PP* un *RP* parametri jāizvēlas, lai sasniegtu nepieciešamās pastiprinājuma īpašības. Optiskais signāls, kas sastāv no 16 *WDM* kanāliem un kanāla jauda ir ~ -40 dBm. Mērķis ir vienmērīgi pastiprināt visus 16 kanālus (kopējais joslas platums 11,6 nm), tāpēc sistēmas sliktākā kanāla *BER* ir zemāks par 10^{-9} .

Tāpēc vispirms ir nepieciešams noskaidrot *PP* un *RP* frekvences un pumpēšanas jaudas. Tas izdarīts, secīgi izslēdzot *RP* un *PP*, mainot shēmā atstātā pumpēšanas lāzera frekvenci un jaudu, lai atrastu kombināciju, kas dod zemāko jaudas atšķirību no kanāla uz kanālu un visu kanālu *BER* ir mazāks par 10^{-9} . Konstatēts, ka Ramana-*FOPA* *WDM* kanālu pastiprinājums ir vienāds, ja tiek apvienoti 192,918 THz un 440 mW izejas jauda *PP* un 206,13 THz un 500 mW izejas jauda *RP*.

Ramana-*FOPA* pastiprinājums 194–200 THz frekvenču diapazonā ir parādīts 5.8. att. Izmantojot tos pašus parametrus kā Ramana-*FOPA*, tiek parādītas atsevišķas *FOPA* un Ramana pastiprinātāju pastiprinājuma līknes un to attiecīgā pastiprinājuma summa. Ramana pastiprinātāja pastiprinājums ir salīdzinoši mazs, jo *RP* frekvence tika izvēlēta tā, lai maksimālais pastiprinājums sakristu ar *PP* frekvenci. Salīdzinot ar Ramana un *FOPA*

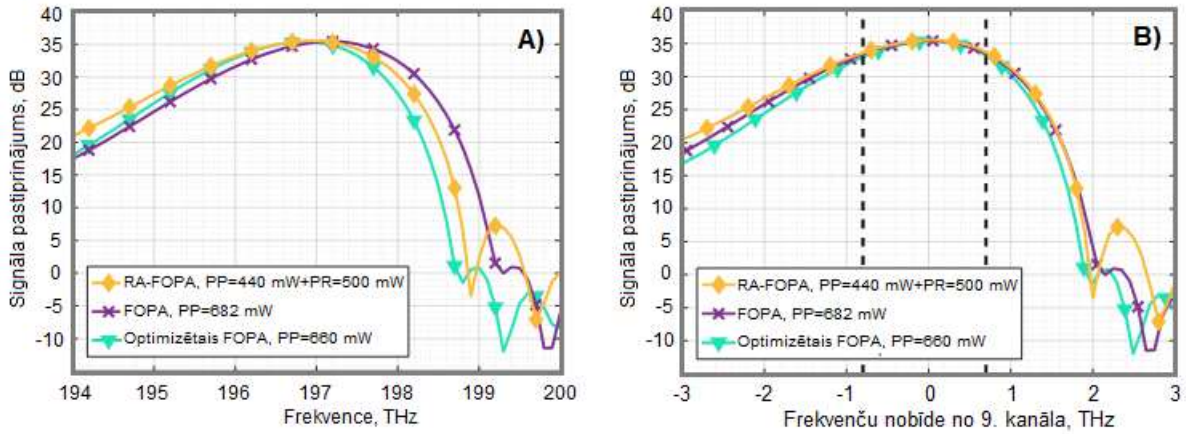
pastiprinājuma summu, Ramana-*FOPA* pastiprinājums ir ievērojami lielāks. Tas apstiprina, ka Ramana-*FOPA* pastiprināšanas process nav tikai abu pastiprinātāju pastiprinājumu summa. Ramana-*FOPA* pastiprinājums visā frekvenču diapazonā ir vidēji par 8,2 dB lielāks nekā abu pastiprinātāju summas pastiprinājums. Galvenais iemesls tam ir netiešā Ramana signāla pastiprināšana, izmantojot parametrisko procesu. Arī pastiprināšanas līknes centrālā daļa (divas vertikālas punktētas līnijas), kur atrodas *WDM* kanāli, ir vienmērīgāka. *FOPA* un Ramana-*FOPA* pastiprinājumu līkņu formu nosaka *FWM* efekts. Palielinoties frekvences starpībai starp pumpēšanu un signāliem, fāzes saskaņošanas nosacījums vairs nav pilnībā izpildīts, tāpēc parametriskais pastiprinājums strauji samazinās un sāk svārstīties nelielā diapazonā [179,180]. Ramana-*FOPA* gadījumā vidējais pastiprinājums 16 kanālu *WDM* sistēmai bija 34,7 dB un starpība starp mazāko un augstāko pastiprinājumu bija 1,9 dB. Salīdzinot ar citu pētnieku rakstiem, kur Ramana-*FOPA* vāja signāla pastiprinājums svārstās no 6,4 dB [142] līdz 10 dB [143], pie līdzīgām kopējām pumpēšanas jaudām (~ 1W).



5.8. att. Signāla pastiprinājuma līknes 194–200 THz frekvenču joslā dažādām pastiprinātāju kombinācijām. Divas vertikālas melnas punktētas līnijas attēlo frekvenču joslu, kurā atrodas visi 16 *WDM* kanāli.

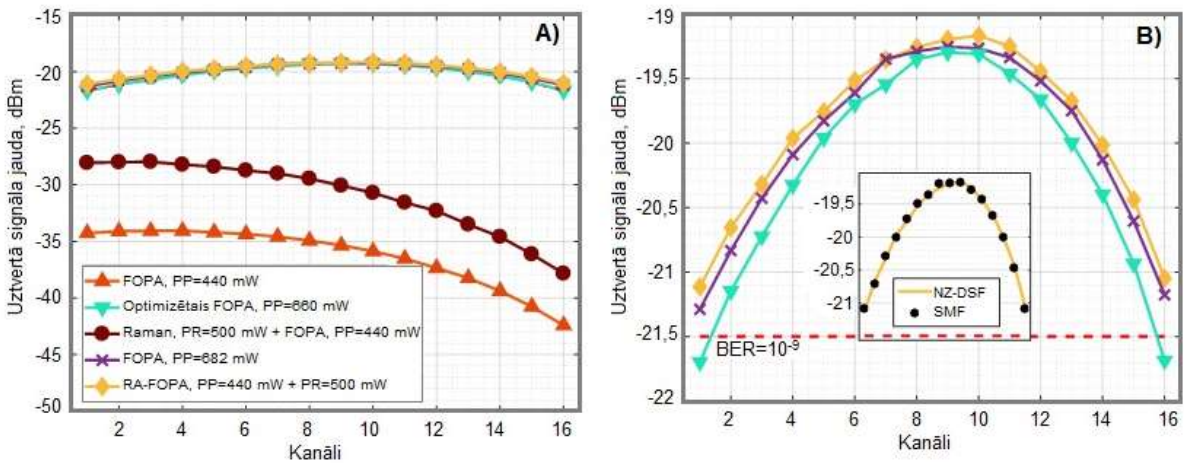
Apskatītais Ramana-*FOPA* pastiprinātājs salīdzināts arī ar viena pumpēšanas avota *FOPA*, kas darbojas kā priekšpastiprinātājs tajā pašā pārraides sistēmas modelī. Simulācijas shēma ar *FOPA* kā priekšpastiprinātāju ir tāda pati kā iepriekš aprakstītā Ramana-*FOPA* gadījumā (sk. 5.7. att.) bez otrā *WDM* savienotāja pie *HNLF* izejas vai *RP* lāzera. Tika pētītas divas iespējas, lai iegūtu to pašu maksimālo pastiprinājumu kā Ramana-*FOPA* gadījumā. Pirmais variants - *PP* lāzera frekvence ir tāda pati kā Ramana-*FOPA* un jauda tiek palielināta. Otrais variants - *PP* lāzera frekvence ir optimizēta, lai iegūtu maksimālo pastiprinājumu ar minimālo *PP* jaudu. Attiecīgi *PP* lāzera viļņa garums un jauda katram gadījumam ir 1553,99 nm, 682 mW un 1554,10 nm, 660 mW. Attiecīgās pastiprināšanas līknes ir parādītas 5.9. att. Kaut arī Ramana-*FOPA* gadījumā kopējā pumpēšanas jauda ir lielāka, viena pumpēšanas lāzera korpusam ir nepieciešams jaudīgāks gaismas avots nekā katram atsevišķam pumpēšanas lāzeram (*PP* pie 440 mW un *RP* pie 500 mW), ko izmanto ierosinātajā Ramana-*FOPA* konfigurācijā.

No 5.9. att. redzams, ka Ramana-*FOPA* -3 dB pastiprinājuma joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā *FOPA* gadījumā ar 682 mW un 0,20 THz platāks par optimizēto *FOPA* pie 660 mW, ko daļēji var izskaidrot ar tiešu signālu pastiprināšanu caur Ramana pumpēšanu.



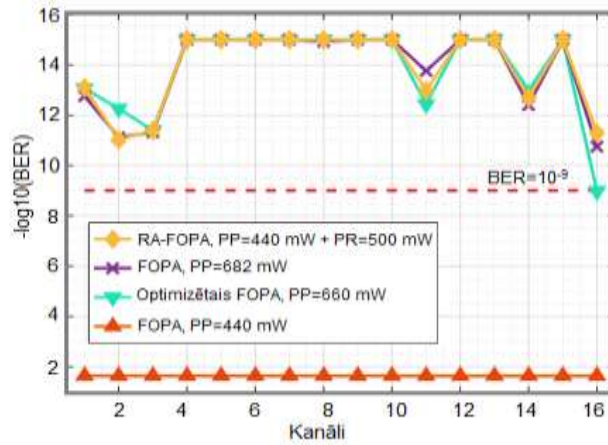
5.9. att. *FOPA* un Ramana-*FOPA* signāla pastiprinājuma līknes, kas iestafītas (A) frekvenču joslā no 194 līdz 200 THz un (B) frekvenču nobīdes no 9. kanāla.

5.10. A att. ir parādīts visu pastiprinātāju konfigurāciju uztvertās optiskās jaudas salīdzinājums visiem 16 *WDM* sistēmas kanāliem (pie sistēmas *BER* 10^{-9}). Pēc grafika redzams, ka Ramana-*FOPA* kombinētais pastiprinātājs nodrošina vienmērīgu izejas jaudu. *FOPA*, kombinētā un optimizētā *FOPA* pastiprinātāju uztvertās izejas jaudas tuvāks salīdzinājums attēlots 5.9. B att. Kā arī redzam, kas signāla jaudai ir tikai nelielas atšķirības, salīdzinot *NZ-DSF* un *SMF28* šķiedras.



5.10. att. *WDM* kanālu jaudas sadalījums (A), pietuvināts jaudas sadalījums *FOPA*, Ramana-*FOPA* un optimizētajam *FOPA* (B).

5.11. att. redzams, ka *FOPA* pastiprinātāja *BER* vērtības ir pielīdzinātas kombinētajam Ramana-*FOPA* pastiprinātājam. 16. kanāls parāda sliktāku veiktspēju, tas ir saistīts ar *FOPA* stāvo pastiprinājuma līkni, kas noved pie mazākas kanāla jaudas.

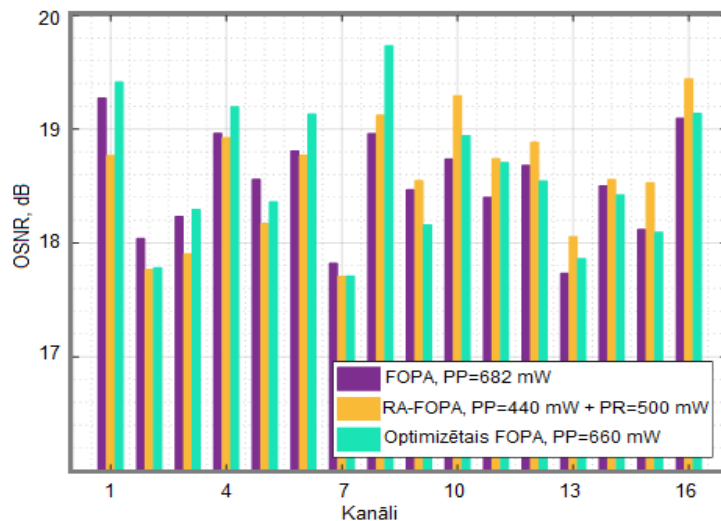


5.11. att. Visu 16 WDM kanālu BER sadalījums. Rezultāti ierobežoti līdz $BER 10^{-15}$ labākai redzamībai. BER novērtēšanas kļūda ir +/- viena pakāpe.

Uztverto signālu OSNR aprēķināts, izmantojot uztvertā signāla kvalitātes koeficientu (Q), kur $BER=1/2 \operatorname{erfc}(Q/\sqrt{2})$. Uztvertā signāla kvalitātes koeficienta atkarība pret OSNR tiek aprēķināta ar šo vienādojumu:

$$Q_{\text{lineārais}} = 10 \cdot \log_{10} \left(2 \cdot 10^{\frac{OSNR_{dB}}{10}} \cdot \frac{B_N}{R_B} \right), \quad (5.1)$$

kur B_N ir trokšņa joslas platums un R_B – simbolu ātrums [144].



5.12. att. OSNR sadalījums visiem sistēmas kanāliem FOPA, Ramana-FOPA un optimizētajam FOPA pastiprinātājiem.

Pirms OSNR aprēķina visi uztvertie signāli tika izlīdzināti attiecībā uz jaudu (21,7 dBm), jo simulācijas modelis Q koeficientu aprēķina tieši proporcionāli jaudai. Tas nepieciešams, lai reālistiskāk salīdzinātu trīs pastiprinātājus (Ramana-FOPA, FOPA un optimizēto FOPA) attiecībā pret uztvertā signāla troksni, nevis absolūto jaudas līmeni. 5.12. att. attēlots uztvertā signāla OSNR (aprēķināts ar 0,01 THz izšķirtspēju). Attiecīgi vidējā un standarta OSNR novirze: Ramana-FOPA $18,57 \pm 0,53$ dB, FOPA $18,52 \pm 0,45$ dB un optimizētā FOPA $18,59 \pm 0,61$ dB. Tas parāda, ka pēc uztvertā signāla jaudas izlīdzināšanas visi trīs pastiprinātāji rada aptuveni vienādu trokšņa līmeni. Jāatzīmē, ka abiem viena pumpēšanas avota FOPA ir ievērojami jaudīgāki parametriskā pumpēšanas lāzeri, lai sasniegtu vienādu izejas jaudu un OSNR līmeni.

Kombinētā Ramana-*FOPA* pastiprinātāja pastiprinājums ir vienmērīgāks un pastiprinājuma joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā *FOPA* pastiprinātāja gadījumā ar 682 mW pumpēšanas avotu un par 0,20 THz platāks nekā optimizētā *FOPA* ar 660 mW pumpēšanas avotu. Tas saistīts ar tiešu signāla pastiprināšanu caur Ramana pumpēšanas avotu. Bet izejas optiskās jaudas starpība ir ļoti līdzīga visiem *WDM* sistēmas kanāliem. Tikai optimizētā *FOPA* gadījumā 16. kanāls nav sasniedzis sistēmas BER sliekšni. Pastiprinātā signāla *OSNR* kombinētā Ramana-*FOPA* gadījumā līdzīgs abām *FOPA* konfigurācijām (~ 18,6 dB). Tāpēc viena pumpēšanas avota *FOPA* var optimizēt attiecībā uz izejas signāla kvalitāti, taču tam nepieciešama ievērojami augstāka parametriskā pumpēšanas avota jauda (440 mW pret 682 mW).

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

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

6. KOPIĢI LEĢĒTAS ŠĶIEDRAS UN APVALKA PUMPĒŠANAS OPTISKĀ PASTIPRINĀTĀJA PROTOTIPA IZSTRĀDE UN IZPĒTE

Optisko pastiprinātāju aktualitāte ir saistīta ar faktu, ka strauji attīstās optiskās pārraides sistēmas, jo palielinās pārraidīto datu apjoms. Nepieciešami lielāki datu pārraides ātrumi, lai nodrošinātu informācijas pārraidi reālā laikā. Tas rada jaunus izaicinājumus optiskām pārraides sistēmām, kur viena no tām ir optisko signālu pastiprināšana. Optiskie pastiprinātāji ir ļoti aktuāli arī signālu apstrādes metodēs, kuru pamatā ir nelineāru optisko efektu izmantošana. Piemēram, vairākiem viļņu garuma gaismas avotiem, viļņu garuma pārveidotājiem, pilnīgi optiskiem reģeneratoriem, parasti nepieciešama liela optiskā jauda, lai ierosinātu nepieciešamo nelinearitāti.

Šīs nodaļas mērķis ir izstrādāt platjoslas optisko signāla pastiprinātāju, izmantojot kopīgi leģētas šķiedras un efektīva apvalka pumpēšanas tehnoloģiju. Šāda tipa pastiprinātāji ļautu sasniegt augstu un vienmērīgu pastiprinājumu un uzlabotu optisko šķiedru sakaru sistēmu veiktspēju. Kā arī apvalka pumpēšanas tehnoloģijai ir liels potenciāls attiecībā uz daudzmodu optiskajiem pastiprinātājiem.

6.1. Izvēlētā leģētā šķiedru pastiprinātāja apraksts

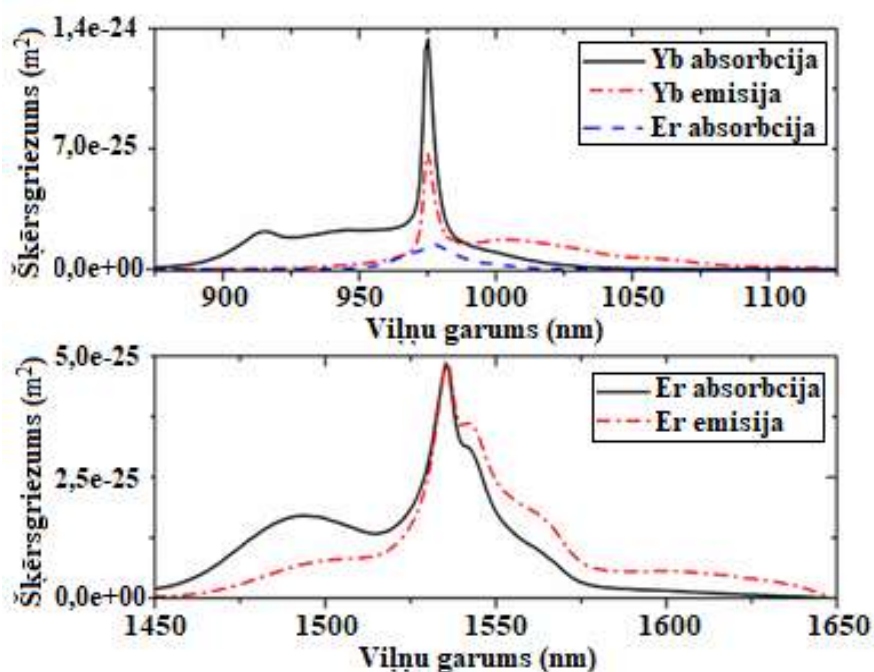
Galvenā ideja ir attīstīt energoefektīvu un rentablu leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju prototipu, kas piemērots telekomunikāciju lietojumiem. Paredzētā pielietojuma joma ir *WDM* optiskās pārraides sistēmas, metro piekļuves tīkli un hibrīdi pasīvie optiskie tīkli paplašinātai sasniedzamībai. Visos gadījumos galvenā interese ir jaudas pastiprinātāja konfigurācijai.

Pamatojoties uz iepriekš minēto, izvēlētā pastiprinātāja konfigurācija balstīsies uz apvalka pumpēšanas principu. Šī metode dod vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālo kodola pumpēšanu. Viena no nozīmīgākajām iespējām ir izmantot mazāk sarežģītas multimodālas gaismas diodes (*LED*), aizstājot lāzera diodes (*LD*). Tas ir iespējams, jo lieljaudas pumpējošais starojums netiek palaists tieši leģētas šķiedras kodolā, bet 1. ārējā apvalkā. Apvalka izmēri ir daudz lielāki (parasti vairāk nekā 10 reizes), salīdzinot ar leģētu kodola izmēru un tāpēc tie atvieglo lieljaudas pumpēšanas gaismas savienošānu ar aktīvo leģēto šķiedru. Tā kā pumpēšanas gaisma izplatās ļoti daudzveidīgā šķiedru apvalkā, to pakāpeniski absorbē leģēto šķiedru kodols. Pēc pastiprināšanas process ir tāds pats kā kodola pumpēšanas gadījumā [145]. Gaismas diodēm arī nav nepieciešama tik stingra strāvas un temperatūras kontrole un to elektriskās un optiskās jaudas pārveidošanas efektivitāte ir augstāka (parasti *LD* enerģijas pārveidošanas efektivitāte ir ~ 30%, bet *LED* ~ 70%) [146]. Diemžēl šī nozīmīgā priekšrocība daļēji zaudēta, pateicoties daudz mazākām pumpēšanas gaismas signāla pastiprinājuma efektivitātes vērtībām, salīdzinot ar standarta kodola pumpēšanas *EDFA* pastiprinātājiem. Apvalka pumpēšanas gadījumā diezgan mazā kodola dēļ (salīdzinot ar apvalka izmēriem), pumpēšanas pārklāšanās ar leģēto kodolu ir maza un noved pie optiskās

pumpēšanas samazināšanās, lai iegūtu pārraides efektivitāti. Bet mazāk sarežģīta pumpēšana padara šo pieeju par daudzsološu, īpaši attiecībā uz lieljaudas pastiprinātāja dizainu.

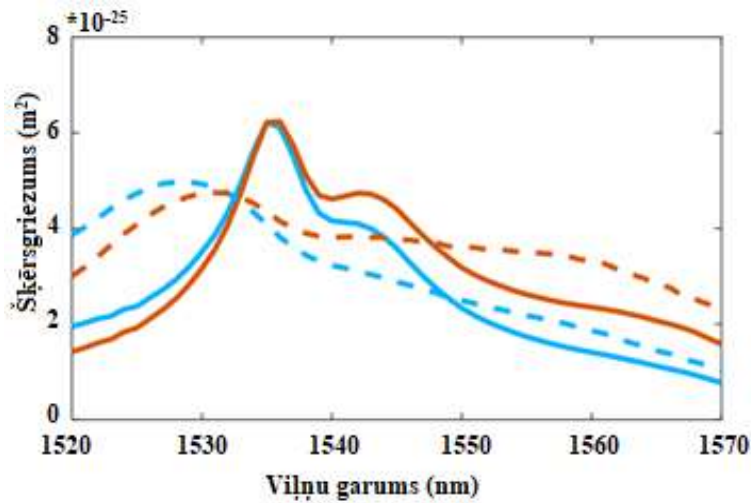
Apvalka pumpēšanas ģeometrijas zemā pumpēšanas efektivitāte rodas no ievērojamas pumpēšanas jaudas un ar erbija joniem leģētā kodola pārklāšanās samazināšanās. Šāds pārklāšanās samazinājums rada nepieciešamību vai nu izmantot ļoti garas šķiedras, kas ievērojami samazina izmaksu efektivitāti, vai arī palielināt erbija leģēto jonu koncentrāciju, izraisot lielāku kopu veidošanos. Vēl viens iespējamais risinājums ir izmantot *Er/Yb* kopīgo leģējumu, nevis tikai *Er*-leģējumu, lai palielinātu absorbcijas un pumpēšanas ātrumu [147].

Divu retzemju leģēto elementu kombinācija uzlabo pumpēšanas efektivitāti, kas ir būtiska apvalka pumpēšanas risinājumam. Iterbijam (3+) ir daudz lielāks absorbcijas šķērsgriezums nekā erbijam (3+) un tas nodrošina emisiju erbija absorbcijas joslā (skatīt 6.1. att.). Tas ir ļoti noderīgi, ja ir *LED* gaismas diodes, kurām parasti ir ļoti plaši izejas spektri (vairāki nm) un nav stabilizēts viļņa garums. Gandrīz vienmērīga *Yb³⁺* absorbcija arī nodrošina stabilāku darbību ar mazāku atkarību no temperatūras. Tāpēc zemāku izmaksu pumpēšanas avotus var izmantot bez temperatūras kontroles un attiecīgi lielāka viļņa garuma novirzes.



6.1. att. Pastiprināšanas šķiedras erbija un iterbija jonu absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi [148].

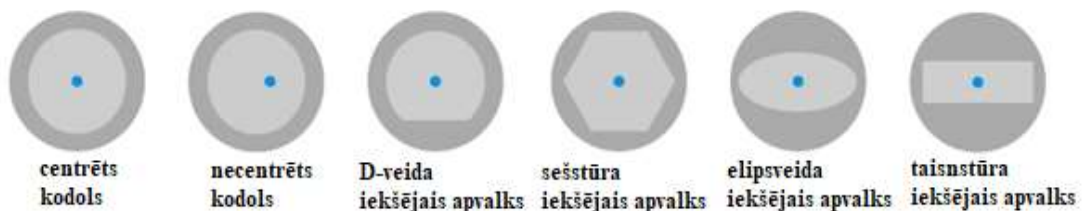
Tomēr būtisks *Er/Yb* kopīgā leģējuma trūkums ir tāds, ka fosfora klātbūtne leģētā reģionā ir nepieciešama, lai nomāktu enerģijas atpakaļ pārnesi no erbija uz iterbiju, samazinot neizstarojošo sabrukšanas laiku no $^4I_{11/2}$ līdz enerģijas līmenis $^4I_{13/2}$, tāpēc fosfora un iterbija klātbūtne stikla matricā sašaurina erbija absorbcijas un emisijas šķērsgriezumus C joslā (skatīt 6.2. att.) [147].



6.2. att. Absorbcijas (zils) un emisijas (oranžs) šķērsgriezumi kā funkcija viļņu garumiem no 1520 līdz 1570 nm *Er/Yb* kopīgi leģētai šķiedrai (nepārtraukta līnija) un erbija leģētai šķiedrai (pārtrauktā līnija) [147].

Viena pieeja, kā paplašināt šķērsgriezumus, ir izmantot fluorīda saturošo stiklu. Tomēr ir vairākas būtiskas nepilnības. Fluorīda stikla saturošās šķiedras ir daudz dārgākas, sarežģītā ražošanas procesa dēļ (neliels skaits ražotāju), un šīs šķiedras ir ļoti trauslas un grūti apstrādājamas, tādējādi apgrūtinot to izmantošanu. Līdz ar to, neskatoties uz to, ka *Er/Yb* kopīgi leģēto šķiedru šķērsgriezumi parasti ir šaurāki, platjoslu pastiprināšanu var panākt, darbinot pastiprinātāju ļoti piesātinātos apstākļos, kas rada lielu pastiprinājumu garākos viļņu garumos (1560 nm), savukārt pastiprinājums paliek nepietiekams zem 1535 nm [147].

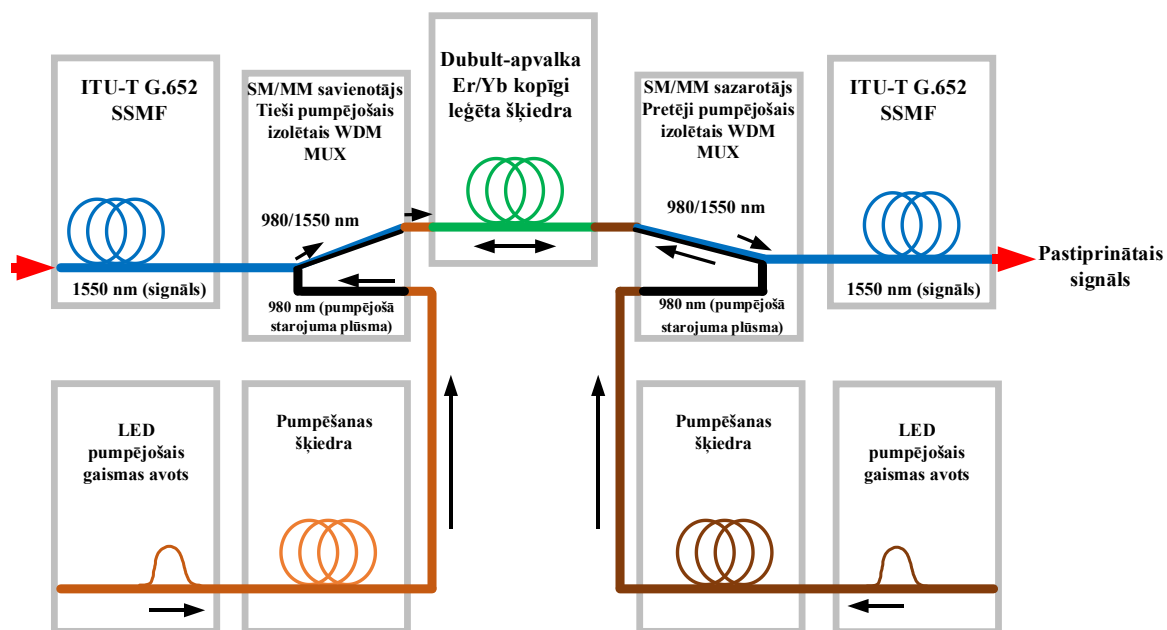
Dubultapvalka šķiedras profilam vai konstrukcijai ir liela nozīme arī pastiprinātāju darbībā. Klasiski centrēts kodola dizains ir viens no vienkāršākajiem no ražošanas viedokļa, bet nedod nekādas priekšrocības apvalka pumpēšanas gadījumā. Galvenais mērķis ir panākt maksimālu pumpēšanas jaudas koncentrāciju leģētas šķiedras vidējā (kodola) daļā. Diemžēl aplūveida ārējais apvalka profils atbalsta daudz augstākas pakāpes spirālveida modas, kas nepārsniedz kodola laukumu. Pumpējošā starojuma absorbciju var uzlabot, izmantojot dažādus šķiedru apvalka profilus, kas palielina apvalka modu daļu, kas pārklājas ar leģētu kodolu (skatīt 6.3. att.). Daži no tiem darbojas formā, pārkāpjot aplūveida simetriju. Vēl viena pieeja ir izveidot šķiedru profilu ar plakni (-ēm) (D-veida, sešstūra, taisnstūra utt.), lai pumpēšanas gaismu virzītu uz centru caur atstarošanās procesu.



6.3. att. Dažādu dubultapvalku šķiedru profili [149].

Pumpēšanas absorbcijas efektivitāti var palielināt arī ar periodisku vai kvaziperiodisku leģētu šķiedru liekšanu, kas izraisa nepārtrauktu sajaukšanos modā [150]. Tā rezultātā notiek apvalka modu mijiedarbība un virzība uz aktīvo kodolu.

Izveidotā apvalka pumpēšanas leģētās šķiedras pastiprinātāja blokshēma ir parādīta 6.4. att. Tajā parādīti pastiprinātāja iestatīšanas galvenie strukturālie komponenti. Galvenā sastāvdaļa ir dubultapvalka *Er/Yb* leģētā šķiedra. Šķiedras garums noteikts, ņemot vērā pieejamo pumpēšanas jaudu un paredzamo izejas jaudas/signāla pastiprinājumu. Caur īpašu optisko savienotāju, signāla un pumpēšanas gaisma tiks savienota dubultapvalkā. Savienotājam vienlaicīgi jāvada gaismas signāls aktīvās šķiedras kodolā un pumpēšanas gaismu pirmā apvalkā. Kā optiskais pumpēšanas avots, izmantota lieljaudas *LED* diode. Dotā blokshēma ir paredzēta divvirzienu pumpēšanas konfigurācijai. Tiks pētīts, kura pumpēšanas shēma ir vispiemērotākā pastiprinātājā ar apvalka pumpēšanu.



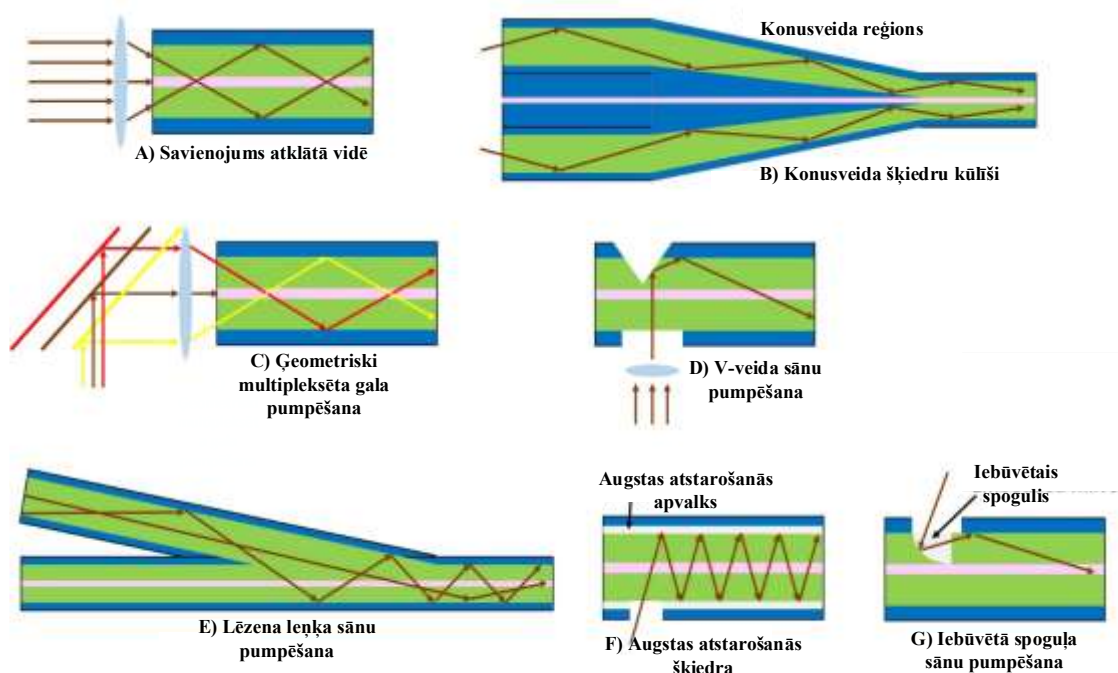
6.4. att. Izveidotā dubultapvalka leģētā šķiedru pastiprinātāja blokshēma ar divvirzienu pumpēšanu.

Pumpēšanas gaismas avots izvēlēts, ņemot vērā, ka aktīvā šķiedra būs *Er/Yb* kopīgi leģēta šķiedra. Tāpēc ir jāizmanto pumpēšanas avots ar emisijas viļņa garumu ap 980 nm. Kā jau tika minēts iepriekš, Yb^{3+} un Er^{3+} jonu kombinācijai ir daudz plašāks absorbcijas viļņa garuma diapazons, salīdzinot ar erbijas leģētām šķiedrām. Tā kā apvalka pumpēšanas tehnikai ir raksturīga mazāk efektīva pumpēšanas absorbcija, ir saprātīgi izmantot gaismas avotus ar lielāku izejas jaudu. Apvalka pumpēšanas pastiprinātājiem ir arī tendence darboties labāk (lielāks pastiprinājuma un trokšņa koeficients), ja tos darbina tuvāk piesātinājuma režīmam [147].

LED diode, kas izmantota pumpēšanai, ir daudzmodu gaismas avots ar centrālās emisijas viļņa garumu ap 975 nm un spektra līnijas platumu ap 5 nm. Viļņa garuma un temperatūras koeficients $d\lambda/dT$ ir 0,35 nm/°C un maksimālā izejas jauda 10 W. Diode ir savienota ar daudzmodu šķiedru ar kodola/apvalka izmēru 105/125 μm . Diezgan lielās pumpēšanas jaudas dēļ tiek uzskatīts, ka jāizmanto metināmais savienojums starp *LED* izeju un optisko savienotāju. Zemākas pumpēšanas jaudas gadījumā var izmantot optiskos savienotājus, kas papildīti ar indeksa atbilstības želeju, lai samazinātu atpakaļ atstarošanas stikls/gaiss dēļ.

6.2. Optiskā savienotāja tehnika dubultapvalka legēto šķiedru pastiprinātājiem

Dubultapvalka (*angl. double-clad DC*) šķiedras pumpēšanas tehnoloģijai pielieto vairākas dažādas konfigurācijas, kas nodrošinātu pastiprinātā optiskā signāla un platjoslas pumpēšanas gaismas savienošanu dubultapvalka legētā optiskā šķiedrā. Apvalka pumpēšanas metodes būtiska komponente ir speciāls savienotājs, kas apvieno signālu un pumpējošo gaismu tā, lai signāls izplatās legētas šķiedras kodolā, bet pumpējošais starojums apvalkā. Apvalka pumpēšanai var izmantot dažādus savienotājus atkarībā no to fiziskās realizācijas. Vispārīgi tos var iedalīt divas galvenajās kategorijās: pumpēšana no gala virsmas un pumpēšana no sāna virsmas.



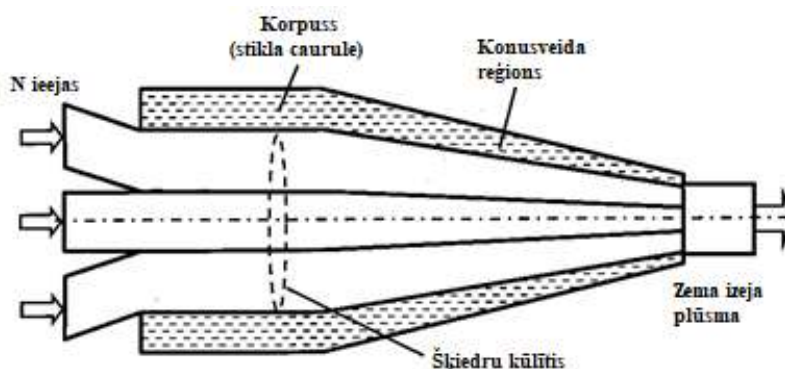
6.5. att. Optiskās pumpēšanas un datu signāla apvienošanas tehnikas dubultapvalka šķiedru pastiprinātājiem (rozā slānis – kodols, zaļais slānis – 1. apvalks, zilais slānis – 2. apvalks, krāsainās bultiņas – gaismas stari) [151].

Katrai savienošanas tehnikai ir savi trūkumi un priekšrocības. 6.1. tab. parādīts dažādu šķiedru savienošanas tehniku salīdzinājums saskaņā ar informāciju zinātniskajā literatūrā.

Dažādu savienošanas tehniku salīdzinājums [145, 152-162]

	Savienojums atklātā vidē	Konusveida šķiedra kūlīši	Pumpēšana no gala virsmas	V-veida sānu pumpēšanas	Lēzena lenķa sānu pumpēšana	Augstas atstarošanās šķiedra	Iebūvēta spoguļa sānu pumpēšana
Pumpēšanas un signāla efektivitāte	Zema	Laba	Zema	Laba	Laba	Laba	Laba
Galalietotāju ērtība	Sarežģīta	Vidēja	Sarežģīta	Sarežģīta	Sarežģīta	Vidēja	Vidēja
Saglabā signāla modālās īpašības	Nē	Jā	Nē	Jā	Jā	Jā	Jā
Gaiss/tikls sakarība	Jā	Nē	Jā	Jā	Nē	Jā	Jā
Mērogamība/pumpēšanas pārmerība	Sarežģīta	Vidēja	Sarežģīta	Sarežģīta	Vidēja	Sarežģīta	Sarežģīta
Nevienmērīgums	Zems	Labs	Zems	Vidējs	Labs	Labs	Vidējs
Visu šķiedru pieejas	Nē	Jā	Nē	Nē	Jā	Nē	Nē

Uzmanību piesaistījusi viena no konusveida šķiedru kūlīšu (parādīts 6.6. att.) tehnikām. Šajā metodē vairākas daudzmodu (*MM*) šķiedras apvienotas, sametinātas un izvilktas konusā, sametinātas *DC* šķiedrā, un pēc tam atkārtoti pārklātas ar zemāka indeksa polimēru. Pumpēšanas gaisma ir palaista *DC* šķiedrā no atsevišķiem diožu lāzeriem, kas ir savienoti šķiedrās. Pēc izvēles šķiedru kūlītī var ietilpt vienmodas (*SM*) šķiedra, ko izmanto signāla gaismas savienošanai *DC* šķiedras kodolā vai ārpus tā. Šī metode ir stabila un izturīga, un tai var būt augsta savienojuma efektivitāte (galu galā to ierobežo pumpēšanas avota diožu šķiedru savienojuma efektivitāte). Pieeja ļauj veikt vienvirziena pumpēšanu un ir mērogojama. Šķiedru kūlīša un *SM* “bizītes” forma un izmērs ir jāsaskaņo ar *DC* šķiedru, kas tiek pumpēta.



6.6. att. Savienotāja shēma, kas izgatavota metināšanas un konusveidīgo šķiedru kūlīšu ceļā [152].

Šāda veida šķiedru savienotāju ražošana nav tik sarežģīta. Šādu savienotāju iegūst, veidojot vairākas konusveida pumpēšanas šķiedras un novietojot tās ap daudz-apvalku šķiedru, veidojot šķiedru kūlītī. Pēc tam šķiedru kūlītis ir savīts un sametināts tā, lai ieejas pumpēšanas šķiedras saplūst. Pumpēšanas šķiedru diverģences daļa tiek noņemta un savienota ar daudz-apvalku šķiedru ar līdzīga diametra šķiedru.

6.3. Apvalka pumpēšanas erbija-iterbija šķiedru pastiprinātāja novērtējums C-frekvenču joslas optiskos tīklos

Tīkla trafiks katru gadu palielinās un optisko šķiedru izplatība lauku apvidos un pieaugošais galalietotāju skaits ir izraisījis milzīgu interneta trafika pieaugumu, kas tagad jāatbalsta ar telekomunikāciju infrastruktūru. Tīklu operatori un nodrošinātājiem ir daudz izaicinājumu, tāpēc tiek meklēti ekonomiski izdevīgi risinājumi, kas varētu atbalstīt nākotnes un pat globālas ārkārtas situācijas. Ņemot vērā pēdējo gadu interneta trafika pieauguma tempu aspektus, platjoslas un multimediju pakalpojumu daudzpusību, kā arī izmaksu un energoefektivitāti, telpisko dalījumu multipleksēšanu (*angl. Space-Division Multiplexing - SDM*) uzskata par vienu no lielākajiem sasniegumiem optisko šķiedru sakaru jomā, kas spēj atbalstīt telekomunikāciju tīklu un pakalpojumu ilgtspējīgu attīstību [163-166]. Apvalka pumpētiem legēto šķiedru pastiprinātājiem ir arvien lielāka uzmanība, lai nodrošinātu izmaksu efektīvu optiskā signāla pastiprināšanu *SDM* balstītās šķiedru pārraides sistēmās. Šādas pastiprināšanas shēmas ļauj izmantot lielas jaudas neatdzesētas daudzmodu lāzera diodes kā pumpēšanas avotus, kas ievērojami samazina šāda pastiprinātāja kopējo enerģijas patēriņu. Turklāt tikai viena pumpēšanas avota izmantošana uzlabo rentabilitāti, palīdz samazināt daudzkodolu pastiprinātāja izmēru un tādējādi ietaupīt vietu, pārejot uz šādu pastiprinātāja ieviešanu [167].

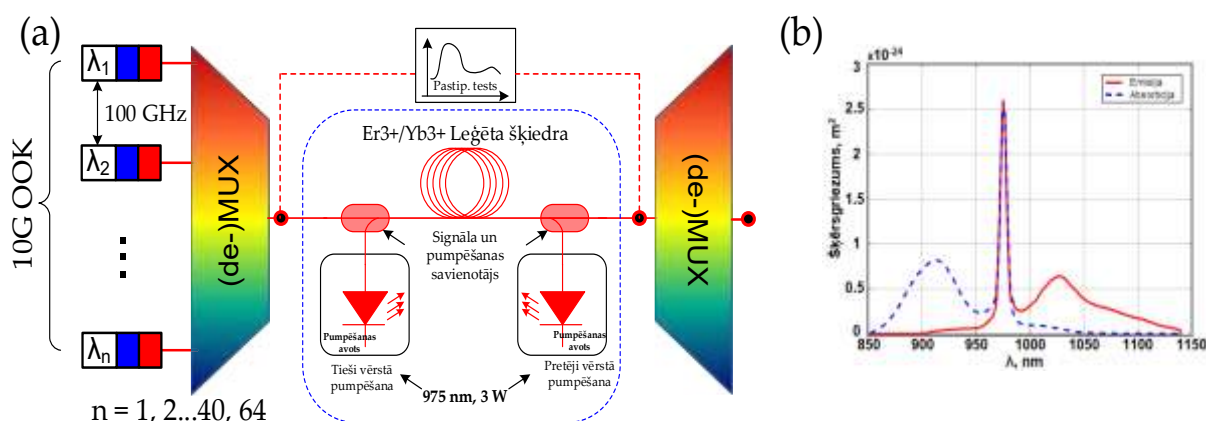
Lai gan *SDM* tīklos parasti tiek izmantoti daudzkodolu erbija legēti apvalka pumpēšanas (*angl. multicore EDFA - MC-EDFA*) šķiedru pastiprinātāji [165-169], taču tiem ir ārkārtīgi zema pumpēšanas pārveidošanas efektivitāte. Tas ir galvenais šādu pastiprinātāju trūkums, kas rodas nepietiekamas pumpēšanas starojuma absorbcijas pastiprinājuma vidē [170]. Tāpēc optiskās izejas jaudas palielināšana ir problemātiska. *MC-EDFA* tipiskās izejas jauda ir no 14 līdz 17 dBm [170-171]. Lai novērst šos ierobežojumus, erbija (Er^{3+}) un iterbija (Yb^{3+}) jonu kopīgais legējums tiek izmantots kā pastiprinājuma vide lielākajai daļai mūsdienu lieljaudas optisko šķiedru pastiprinātāju. Šajā gadījumā pastiprināšana notiek divos posmos. Pirmajā posmā pumpēšanas starojuma galveno daļu absorbē Yb^{3+} joni, kas pārvietojas ierosinātā stāvoklī. Otrajā posmā ierosinātie Yb^{3+} joni daļu no savas enerģijas rezonansē uz Er^{3+} joniem. Tādējādi pumpēšanas starojuma absorbcija ievērojami palielinās [173]. Turklāt kopīga legēšana ar Er/Yb , samazina klasterizācijas iespēju starp Er^{3+} joniem, kas ļauj palielināt Er^{3+} jonu koncentrāciju pastiprināšanas vidē salīdzinājumā ar parasto erbija legētu šķiedru [170]. Tā rezultātā, lai sasniegtu noteiktu pastiprināšanas līmeni, ir nepieciešamas īsākas Er/Yb kopīgi legētas šķiedras.

Pēdējos gados apvalka pumpēšanas *DFA* risinājumi ir plaši pētīti, lai noteiktu priekšrocības un trūkumus, ko tie var radīt pēc izvietojanas *SDM* tīklos. Enerģijas patēriņu var samazināt par 40%, aizstājot parasto *EDFA* ar 32 kodolu apvalka pumpēšanas *EYDFA* [173]. Turklāt, jo lielāks ietaupījums, jo vairāk kodolu atbalsta daudzkodolu pastiprinātāji. 19-kodolu *EDFA* tika izmantots, lai sasniegtu 207 Tbit/s datu pārraides ātrumu 1500 km garā 12 kodolu šķiedrā (*angl. multicore fiber – MCF*). Runājot par pārraidi garos attālumos, pastiprinātāja raksturlielumi, piemēram, trokšņa rādītājs (*NF*), pastiprinājuma profils utt. var ievērojami samazināt pastiprināšanas iecirkņu skaitu, pirms kropļojumi degradēs signālu zem kvalitātes sliekšņa. Šis tika pētīts [165], kur autori pēta, kā *IC-XT* (*inter-core crosstalk*) *MC-EYDFA* ietekmē 400 G div-polarizācijas 16 simbolu kvadrātiskās amplitūdas modulācijas (*DP-16QAM*) maksimālo

pārraides attālumu, salīdzinot ar standarta *EDFA* konfigurāciju. Rezultāti uzrādīja, ka apskatītajam scenārijam maksimālais pārraides attālums samazinās no 11 līdz 8 pastiprināšanas iecirkņiem, aizstājot parasto līnijas *EDFA* ($NF = 4,5$ dB) ar *MC-EYDFA* ($NF = 4,5$ dB). Ja $NF=6,5$ dB, tad ir 11 un 6 pastiprināšanas iecirkņi. Tāpēc rūpīgi jāapsver *MC-EYDFA* dizains, lai samazinātu ietekmi uz maksimālo pārraides attālumu, vienlaikus nodrošinot izmaksu un enerģijas ietaupījumu. Tomēr apvalka pumpēšanas *EYDFA* konstrukcijas raksturlielumu (piemēram, kopīgi leģētas *Er/Yb* šķiedras garuma, pumpēšanas jaudas un virziena, kā arī *Er/Yb* emisijas šķērsgriezuma) ietekme uz pastiprinātāja darbību joprojām ir neskaidra, it īpaši, ja runa ir par atkarību no viļņgaruma. Šis pēdējais aspekts ir svarīgs šādu pastiprinātāju izmantošanai, lai kompensētu optiskos zudumus tīklos/kanālos, izmantojot viļņgaruma dalīšanas multipleksēšanu (*WDM*).

Tāpēc tiek pētīta *EYDFA* darbība dažādos darbības apstākļos, lai novērtētu piemērotību pilsētas optisko pārraides tīklu piekļuves segmentam, kur parasti tiek izmantoti blīvu viļņgaruma dalīšanas multipleksēšanas (*DWDM*) risinājumi. Lai veiktu analīzi, izstrādāta simulācijas sistēma, kas sastāv no *DWDM* pārraides sistēmas ar līdz 64×10 Gbps *DWDM* kanāliem un viena kodola apvalka pumpēšanas *EYDFA*, izmantojot *VPI Photonics Design Suite* [174]. Pastiprinātāja modelis veidots, izmantojot komerciāli pieejamās *Er/Yb* kopīgi leģētās šķiedras, proti, *Fibercore CP1500Y* iegūtos raksturlielumus. Lai izveidotu reālistisku *EYDFA* modeli, eksperimentāli iegūti *CP1500Y* šķiedras pārklāšanās koeficienti un absorbcijas šķērsgriezumi. Nomērītie raksturlielumi tiek ievadīti *EYDFA* modelī un tās veiktspēju novērtē dažādos darbības apstākļos, ko nosaka ar pastiprināmo *DWDM* kanālu skaitu un ieejas optisko jaudu uz kanālu. Pastiprinātāja veiktspēja novērtēta, ņemot vērā tā pastiprinājumu, trokšņa rādītāju (NF) un izejas jaudas. Analizēta šo īpašību atkarību no viļņa garuma, mainot *DWDM* kanālu skaitu un to optiskās jaudas līmeņus, kā arī mērogojot šķiedras emisijas un absorbcijas šķērsgriezumus. Tālāk mainot iegūtos šķērsgriezumus Yb^{3+} emisijai un absorbcijai, analizēju Yb^{3+} jonu raksturlielumu ietekmi uz *EYDFA* īpašībām.

6.7. a) att. attēlota *VPI* simulācijas shēma, ko izmanto, lai raksturotu izstrādātās apvalka pumpēšanas *EYDFA* īpašības. Eksperimentāli izmērītie Yb^{3+} absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi attēloti 6.7. b) att. un šie dati tika ievadīti simulācijas programmas shēmā.



6.7. att. a) vienkāršots simulācijas modelis apvalka pumpēšanas *EYDFA*; b) *Er/Yb* absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi.

Pārklāšanās koeficientu noteica, izmantojot sarkanzaļo-zilo (*angl. Red-Green-Blue - RGB*) pieeju, kas ir piemērota *EYDF* šķērsgriezuma attēliem, kas iegūti ar šķiedru mikroskopu (6.8.

att.). Šādus pastiprinātājus var izmantot optisko pārraides tīklu pilsētu segmentos, tāpēc tiek apsvērta daudzviļņu darbība. Simulācijas modelis sadalīts trīs daļās: (1) $n \times 10$ Gbps *WDM* raidītāji ar *OOK*; (2) reālistisks *EYDFA* modelis, kas sastāv no *EYDF* šķiedras, optiskā pumpēšanas avota (centrālais viļņa garums $\lambda_c=975$ nm pie 25° C un izejas jauda 0,3–5 W), lieljaudas optiskajiem sadalītājiem un pastiprinātāja testu iekārtām, kas ļauj novērtēt pastiprinātāja raksturlielumus (piemēram, pastiprināšanas spektru, trokšņa rādītāju un pumpēšanas pārveidošanas efektivitāti); un (3) demultiplekseri un *WDM* uztvērēji signāla kvalitātes novērtēšanai.

Šķiedru modelis ir galvenā shēmas sastāvdaļa, *VPI* programmā izmantoju stacionāru šķiedru modeli, ko var izmantot kopīgi leģēto *Er/Yb* apvalka pumpēšanas šķiedru pastiprinātājos. Šī modeļa pamatā ir divvirzienu signālu izplatīšanās vienādojumi un daudzlīmeņu ātruma vienādojumi jonu populācijām. Lai noregulētu šo modeli izvēlētai *EYDF*, izmantoju izmērītos šķērsriezumus, lai norādītu emisijas un absorbcijas spektrus un pārklāšanās koeficientus, lai norādītu saistību starp *WDM* signāla (~ 1550 nm) un pumpēšanas signāla (~ 975 nm) izplatīšanos. Simulācijas shēmas iestatījumi ir parādīti 6.2. tabulā.

6.2. tabula

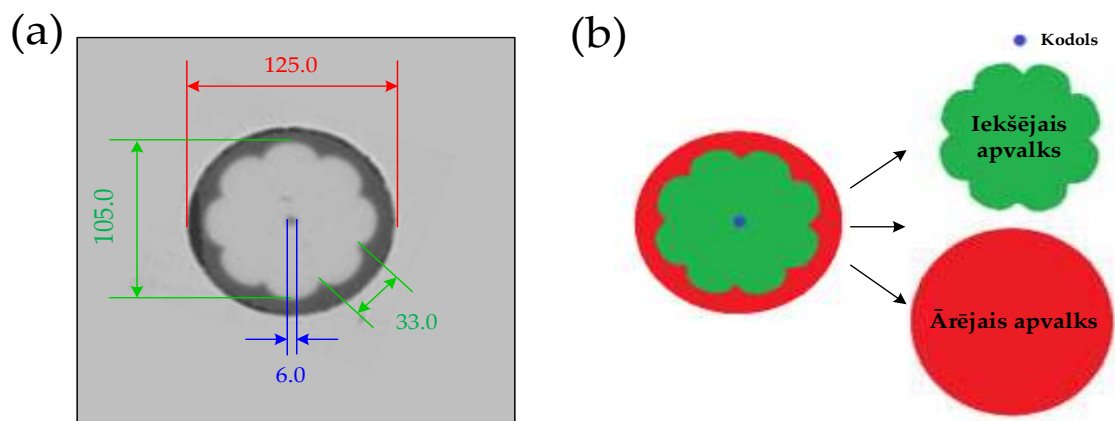
Pastiprinātāja shematisko parametru kopsavilkums

Sistēmas parametri	
Pārraides ātrums un modulācija	10 Gbps <i>NRZ-OOK</i>
Kanālu skaits (n)	1 līdz 64
Sākuma frekvence pirmajam/pēdējam kanālam	191.6/195.5 THz
Kanālu intervāls	100 GHz
Viena kanāla jauda	-25 dBm/kan līdz -10 dBm/kan
<i>EYDFA</i> pumpēšanas parametri	
Pumpēšanas viļņgarums	975 nm pie 25° C temperatūras
Pumpēšanas jauda	3W, darbības diapazons 0.3 – 5 W
Virziens	Tiesā/pretejā izplatīšanās
Leģētās šķiedras parametri	
Garums	1 līdz 10 m
Er^{3+} koncentrācija	$1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Yb^{3+} koncentrācija	$2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$
<i>Er/Yb</i> šķērsrelaksācijas koeficients	$1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$
Kodola laukums/iekšējā apvalka laukumu ($A_{\text{kodols}}/A_{\text{iekšējais apvalks}}$)	0.0058
Iekšējā apvalka laukums/ārējo apvalka laukumu ($A_{\text{iekšējais apvalks}}/A_{\text{ārējais apvalks}}$)	0.9203

Sistēmas parametri ietver arī *WDM* signālu specifiskācijas. Darbosimies ar 10 Gbps *NRZ-OOK* signāliem, kuru centrālās frekvences atrodas C-joslā (1530-1565 nm), izmantojot 100 GHz kanālu intervālu. Tiek apsvērta *WDM* konfigurācija ar 64 kanāliem, bet *WDM* 41-64 kanāli atrodas ārpus C-joslas ($f_c > 195,6$ THz) un tie galvenokārt tiek izmantoti, lai izolētu pastiprinātāja pastiprinājuma un *NF* īpašību atkarību no viļņgaruma, īpaši lielai (-10 dBm/kan)

un mazai (-25 dBm/kan) ieejas jaudai. *EYDFA* pumpēšanas parametri sniedz detalizētu informāciju par pumpēšanas avotu un tā virzienu attiecībā pret signāla izplatīšanās virzienu.

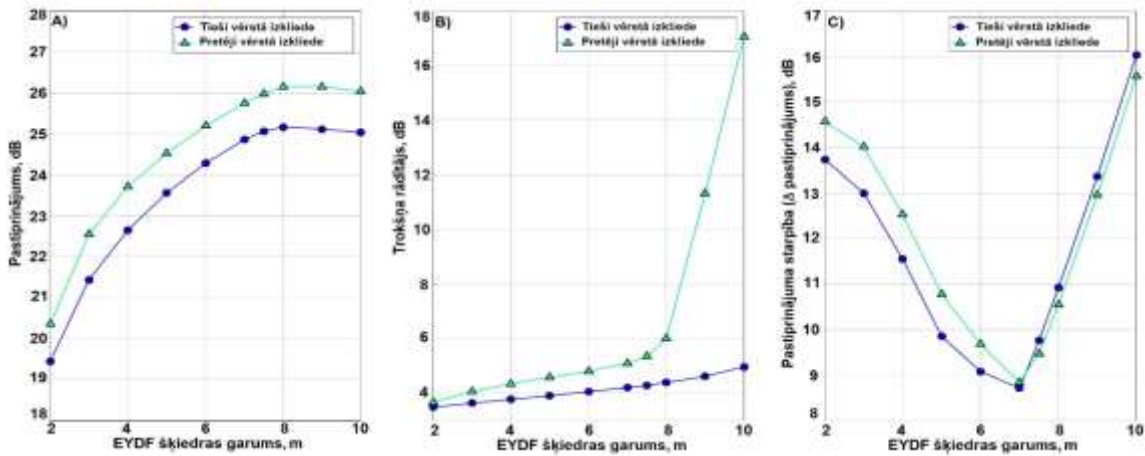
EYDF šķiedras pārklāšanās koeficients novērtēts, izmantojot *RGB* pieeju, kuras pamatā ir šķiedras šķērsriezuma attēlu grafiska pēcapstrāde. Parasti dubultapvalka optiskās šķiedras pārklāšanās koeficientu nosaka kā attiecību starp tā kodola laukumu un iekšējā apvalka laukumu [193]. Pelēkās krāsas attēls mikroskopā izmantots, lai noteiktu robežas starp kodolu, iekšējo un ārējo apvalku. Kad visas krāsas noteiktas, katram segmentam piešķir *RGB* krāsu un tā pārkrāsojas (skat. 6.8. b. att.).



6.8. att. a) Er^{3+}/Yb^{3+} kopīgi leģētas šķiedras šķērsriezuma mikroskopiskais attēls kopā ar tā ģeometriskie izmēriem un b) *RGB* attēlojums, izmantojot pārklāšanās faktora novērtējumu.

Pastiprinātāja radītie signāla traucējumi var ievērojami samazināt sasniedzamo pārraides attālumu sistēmās ar vairākiem pastiprināšanas iecirkņiem. Vēl viena svarīga pastiprinātāju īpašība, kas tieši ietekmē pārraidi, ir iegūt vienmērīgu pastiprinājumu. Pastiprināšanas starpība starp kanāliem palielinās ar katru nākamo pastiprināšanas iecirkni, kas savukārt izraisa nopietnu pārraidītā signāla kvalitātes pasliktināšanos. Tāpēc, meklējot vispiemērotāko *EYDFA* konfigurāciju, mērķis bija panākt pēc iespējas mazāku pastiprinātāja radīto signāla traucējumu daudzumu un pēc iespējas vienmērīgāku pastiprinājuma spektru, un analizēt pastiprinātāja reakcijas atkarību no ieejas signāla pie dažādām jaudas īpašībām. Šāda pastiprinātāja konfigurācija sasniegšana, neizmantojot pastiprināšanas izlīdzināšanas filtrus, ir sarežģīta problēma, jo pastiprinātāja radītais pastiprināšanas profils un *NF* ir tieši atkarīgi no pastiprināšanas vides, pumpēšanas starojuma viļņgaruma un jaudas, kā arī no pastiprināmā signāla parametriem.

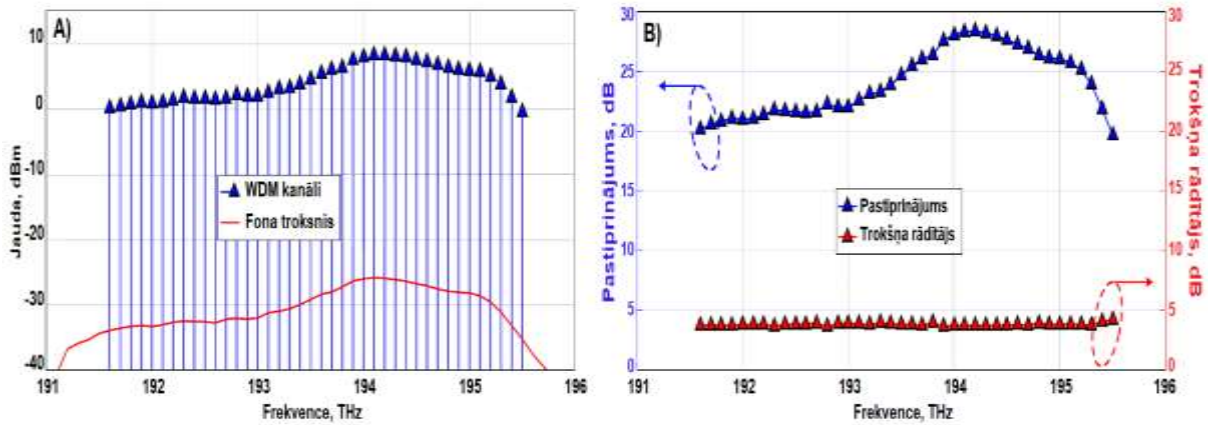
EYDFA konfigurācija izvēlēta, iegūstot pastiprinājumu un *NF* pie dažādiem pastiprināšanas vides garumiem gan tieši, gan netieši vērstai izkliedei. Lai iegūtu šos rezultātus, pastiprinātājs tika ievietots 40 kanālu *WDM* pārraides sistēmas modelī, kanālu nesējiem vienmērīgi sadaloties frekvenču apgabalā no 191,6 THz līdz 195,5 THz (100 GHz kanālu intervāls) un ar -20 dBm/kanāla jaudu pastiprinātāja ieejā. Izmantots pumpēšanas starojums ar 3 W jaudu un 975 nm viļņgarumu. Šādas pumpēšanas avota vērtības izvēlētas, pamatojoties uz mūsu laboratorijā pieejamajām lieljaudas gaismas avota specifikācijām.



6.9. att. (A) vidējais pastiprinājums, (B) vidējais troksņa rādītājs un (C) maksimālā pastiprinājuma starpība starp kanāliem atkarībā no *EYDF* šķiedras garuma sistēmā ar 40 *WDM* kanāliem, ieejas signāla jauda -20 dBm uz kanālu un ar 3 W 975 nm tieši (zils) un pretējo (zaļš) vērsto pumpēšanas avotu.

6.9. att. (A) parādīts, ka pastiprināšanas vides garuma palielināšana, izraisa vidējo pastiprināšanas pieaugumu tikai līdz brīdim, kad *EYDF* kļūst 8 metrus garš. Turklāt turpmākais *EYDF* garuma palielinājums faktiski rada nelielu samazinājumu pastiprinājumam. Tas parāda, ka šajā brīdī pumpēšanas starojums samazinās un vairs nepastiprina, kā arī pastiprinātā signāla jauda samazinās, pašas *EYDF* šķiedras signāla vājinājuma dēļ. Ja *EYDF* garums ir mazāks par 8 m, iegūtās *NF* vērtības ir 6 dB robežās gan tieši, gan pretēji vērsta pumpēšanas avota konfigurācijai, bet pēc tam *NF* pieaugums ar katru nākamo *EYDF* metru kļūst skaidrāks, it īpaši gadījumā, ja signāls un pumpējošais starojums tiek palaisti pretējā virzienā (6.9. att. (B)). *NF* vērtība nav lielāka par 4,5 dB pie tieši vērsta pumpēšanas un 6 dB – pie pretēji vērsta pumpēšanas. Vienmērīgs pastiprinājums ir svarīga īpašība, īpaši sistēmām ar vairākiem pastiprināšanas iecirkņiem. Ja visi *DWDM* kanāli netiek pastiprināti vienādi, tad jaudas starpība palielinās ar katru pastiprināšanas iecirkni un tādējādi ierobežojot maksimālo pārraides attālumu. Vismazākā pastiprinājuma starpība < 9 dB iegūta pie 7 m garas *EYDF* šķiedras gan tieši, gan pretēji vērsta pumpēšanas avotu risinājumiem. Pastiprinājuma starpība ir daudz lielāka, ja *EYDF* ir īsāks vai garāks par 7 m. Tāpēc izvēlētai 3W pumpēšanas jaudai, vēlams vidējais populācijas inversijas līmenis sasniegts tieši šajā *EYDF* garumā (7 m).

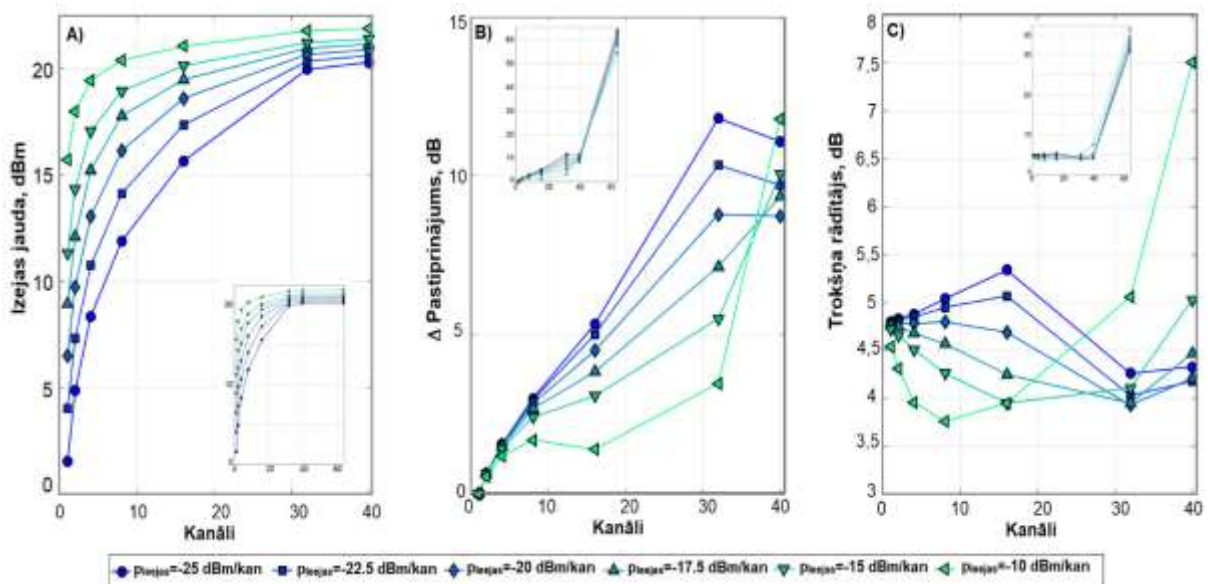
Šajā *EYDF* garumā vidējais pastiprinājums, ko nodrošināja pretēji vērsta pumpēšanas avots, ir par 0,9 - 1 dB lielāks nekā vidējais pastiprinājums, kas iegūts, izmantojot tieši vērsto pumpēšanas avotu. Līdzīga tendence novērota arī iegūtajam vidējam *NF* un pastiprinājuma starpības vērtībām: gadījumā, ja tika izmantota pretēji vērsta pumpēšanas shēma, troksņa rādītājs bija par 0,9 dB lielāks un maksimālā pastiprinājuma starpība ir par 0,4 dB lielāka nekā tieši vērsta pumpēšanas avota gadījumā. Izvēlēts izmantot zemāku troksņa rādītāja vērtību, nevis lielāku pastiprinājumu. Pamatojoties uz šiem rezultātiem, viena kodola apvalka pumpēšanas *EYDFA* izvēlēts 3 W 975 nm tieši vērsta pumpēšanas avots un 7 m gara pastiprināšanas vide. 6.10. att. parādīti signāla un troksņu spektri pastiprinātāja izejā, kā arī pastiprinājuma un troksņa rādītāja spektri.



6.10. att. (A) Optiskais spektrs, kas iegūts pie *EYDFA* izejas ar 7 m garu šķiedru un (B) vidējais pastiprinājums un trokšņa rādītājs sistēmā ar 40 *WDM* kanāliem.

Signāla jauda svārstās no 0,1 dBm līdz 8,3 dBm (6.10. att. (A)). Tas tika sasniegts, izmantojot *EYDFA* pastiprinājuma koeficientu, kura spektrs ir parādīts 6.10. att. (B) un svārstās no 19,7 dB līdz 28,3 dB. 40 pastiprināto kanālu trokšņa rādītāju vērtības mainās no 3,7 līdz 4,2 dB. Ieejas optiskā jauda bija iestatīta uz -20 dBm/kanālu visiem 40 kanāliem.

Pēc tam, kad tika izvēlēta pastiprinātāja konfigurācija, tika analizēta pastiprinātāja reakcija dažādos darbības apstākļos. Tāpēc tika mainīts kanālu skaits un jauda pastiprinātāja ieejā, un piefiksēta kopējā jauda pastiprinātāja izejā, maksimālā pastiprinājuma starpība starp kanāliem un vidējais trokšņa rādītājs. Šie rezultāti tika iegūti 1, 2, 4, 8, 16, 32, 40 un 64 kanāliem ar -25 dBm, -22,5 dBm, -20 dBm, -17,5 dBm, -15 dBm un -10 dBm jaudu vienam kanālam pastiprinātāja ieejā (6.11. att.).



6.11. att. (A) Izejas jauda, (b) maksimālā pastiprinājuma starpība un (c) maksimālie trokšņa rādītāji salīdzinājumā ar *WDM* kanālu skaitu un ieejas jaudu *EYDFA* konfigurācijai ar 7 m garu *EYDF* un 3 W 975 nm tieši vērsto pumpēšanas avotu.

Jo lielāks ir kanālu skaits, jo mazāka ir atšķirīga izejas jaudai dažādām signāla jaudām pastiprinātāja ieejā. Turklāt jaudas pieaugums pastiprinātāja izejā kļūst nenozīmīgs, palielinot skaitu no 40 līdz 64 kanāliem, neatkarīgi no signāla jaudas *EYDFA* ieejā. Ja 40 kanālu *WDM*

sistēmā pie ieejas signāla jaudas ir -25 dBm/kan, pastiprinātājs darbojas ļoti piesātinātā režīmā un vienkārši nespēj nodrošināt augstāku pastiprināšanas līmeni.

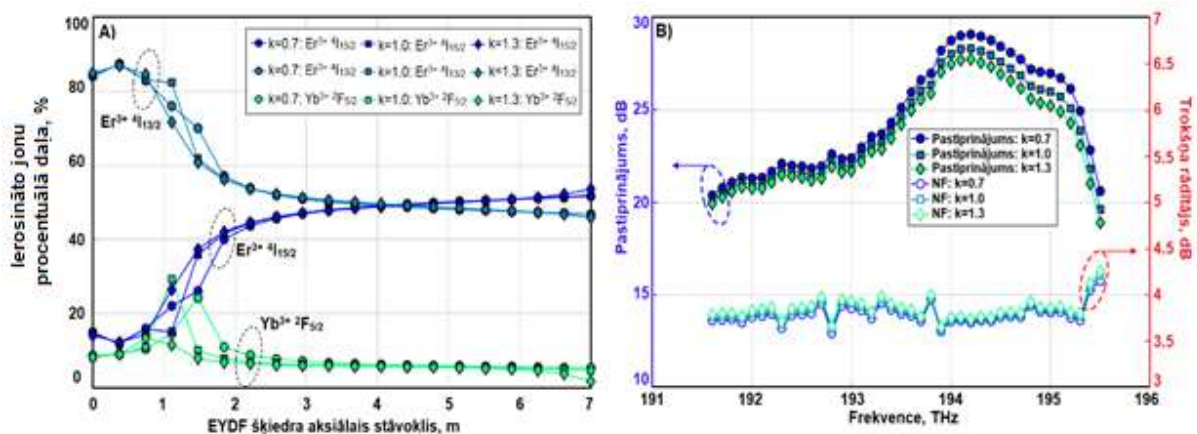
Interesants novērojums atrasts pie ieejas signāla jaudas -25 dBm/kan: kad kanālu skaits dubultojas no 2 līdz 4, faktiskais kopējās jaudas pieaugums pastiprinātāja izejā ir 3,5 dB, bet, palielinoties kanālu skaitam no 16 līdz 32, šī izejas jaudas starpība sasniedz 4,3 dB. Tas parāda, ka ar vāju ieejas signāla jaudu un nelielu kanālu skaitu, ieejas signāls nespēj efektīvi patērēt pastiprināšanas vidē nodrošināto populācijas inversiju. Tā rezultātā neizmantotā populācijas inversija galu galā rada papildu ASE trokšņa veidošanos, kā tas skaidri redzams 6.11. att. (C). Palielinot kanālu skaitu no 32 līdz 40, pastiprinātāja izejas jauda pieaug tikai par 0,3 dB un paliek nemainīga, ja ieejas kanālu skaits tiek palielināts līdz 64 kanāliem. Tas parāda, ka šajā brīdī pastiprinātājs jau darbojas piesātinājuma režīmā. Lielāka pumpēšanas signāla jauda arī nerada lielāku pastiprinājumu vai lielāku izejas jaudu. Pat ja tiek izmantots 4 W pumpēšanas avota signāls, izejas jauda palielinās ne vairāk kā par 0,2 – 0,3 dB 40 kanālu konfigurācijā ar $p_{ieejas} = -20$ dBm/kan. Tāpēc ierosinātās EYDFA maksimālā izejas jauda ir ierobežota līdz aptuveni 22 dBm.

No 6.11. att. (B) redzams, ka, ja kanālu skaits ir līdz 32, tad, jo lielāka ir ieejas signāla jauda, jo mazāka ir maksimālā pastiprinājuma starpība starp kanāliem. Galvenais cēlonis ir, ka nepieciešama ievērojami lielāka populācijas inversijas daļa, lai nodrošinātu vienādu pastiprināšanas līmeni jaudīgākam ieejas signālam, tāpēc pie noteikta populācijas inversijas līmeņa jaudīgāks signāls vienkārši saņem mazāku pastiprinājumu, tādējādi arī pastiprinājuma starpība starp kanāliem ir mazāka. Bet, palielinot kanālu skaitu līdz 40, situācija kļūva pilnīgi pretēja, piemēram, pastiprinājuma starpība pie ieejas signāla jaudas -25 dBm/kan kļūst mazāka nekā pie ieejas signāla -10 dBm/kan. Tas ir saistīts ar sasniegtā populācijas inversijas līmeņa novadīšanas procesu. Spēcīgāks signāls efektīvāk iztukšo sasniegto populācijas inversiju un -25 dBm ieejas signāla gadījumā, palielinot kanālu skaitu līdz 40, iespējams, ir mainījies vidējo populācijas inversijas līmeni visā pastiprināšanas vidē līdz vērtībai, kas varētu nodrošināt vienmērīgāku pastiprinājumu frekvences apgabalā, ko izmanto pārraidei. Gluži pretēji, gadījumā, ja ieejas signāla jauda tika iestatīta uz -10 dBm/kan, palielinot kanālu skaitu līdz 40, sasniegtā populācijas inversija tika novadīta tik ātri, ka tā vairs nevarēja nodrošināt tik vienmērīgu pastiprinājuma spektru.

Līdzīga tendence ir vērojama 6.11. att. (C), kur kanālu skaita pieaugums, pastiprinātāja ieejā vispirms izraisa iegūto NF vērtību samazināšanos, bet pēc tam, kad kanālu skaits sasniedz noteiktu vērtību, vidējās NF vērtības sāk augt. Zemākas jaudas kanāliem NF palielinās par 0,5–1 dB un tad samazinās, sasniedzot 4–4,5 dB (32–40 DWDM kanāli). Pastiprinājuma starpības un vidējā trokšņa rādītāja vērtības dramatiski palielinās, palielinot kanālu skaitu no 40 līdz 64. Tas norāda, ka pastiprinātājs ar izvēlēto konfigurāciju vienkārši nevar nodrošināt pastiprinājumu visā frekvenču apgabalā, ko aizņem 64 kanāli un signālu augstākas frekvences kanāli tiek absorbēti pastiprināšanas vidē.

Izejas jaudas ierobežojums lielākoties ir saistīts ar pastiprināšanas vides fizikālajiem parametriem, kas raksturo ātrumu visā šķiedrā, ar kuru pumpēšanas starojums tiek patērēts un pārņemts uz pastiprināto signālu. Tā kā EYDF šķiedras Yb^{3+} joni ir atbildīgi par pumpējošā starojuma ātru absorbciju un par tās enerģijas daļu pārraidi uz Er^{3+} joniem, nolemts manipulēt ar Yb emisijas un absorbcijas šķērsgriezumu raksturlielumiem, lai iegūtu skaidru priekšstatu par to, kā Yb^{3+} jonu raksturlielumi ietekmē iegūto EYDFA darbību. Šim nolūkam eksperimentāli izmērītie Yb emisijas un absorbcijas šķērsgriezumi reizināti ar 0,7 un 1,3 koeficientu un iegūta

pastiprinājuma spektra, trokšņa rādītāja atkarība no viļņgaruma un ierosinātā jonu procentuālā atkarība no šķiedras aksiālā stāvokļa. Vēlāk rezultāti tika salīdzināti ar attiecīgajām atkarībām, kas iegūtas faktiski izmēritajām Yb šķērsgriezuma vērtībām (6.12. att.).

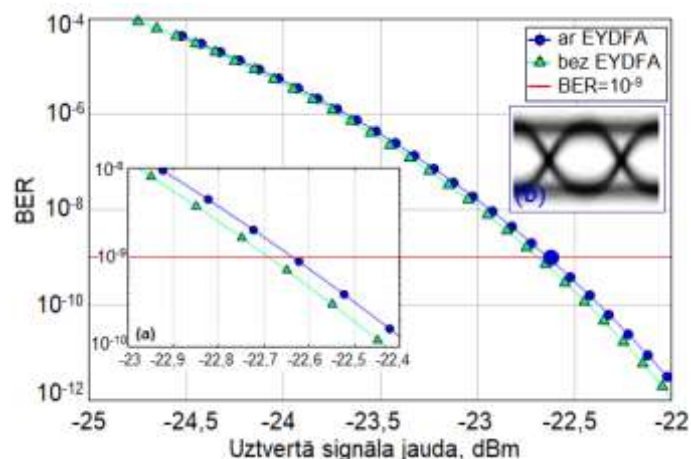


6.12. att. Jūtības analīze, kas parāda Yb^{3+} absorbcijas un emisijas šķērsgriezumu ietekmi uz jonu ierosmi koeficientiem $k = 0.7, 1.0, 1.3$: (A) ierosināto jonu procentuālā attiecība pret aksiālo stāvokli šķiedrā; (B) *EYDFA* vidējais pastiprinājums un maksimālais *NF WDM* sistēmā ar 40 kanāliem.

Ja šķērsgriezuma vērtības samazinās par 30% (reizinot ar 0,7), ierosināto Yb jonu procentuālā pīķa vērtība kļūst mazāka (aptuveni par 5%) un tiek pārvietota tālāk pastiprināšanas vidē: no 1,1 līdz 1,5 m *EYDF* (6.12. att. (A)). Līdz ar to populācijas inversijas samazināšanās tiek izlīdzināta visos enerģijas līmeņos, ļaujot pastiprinātajam signālam uzkrāt noteiktu pumpēšanas enerģijas daļu un tādējādi uzlabojot tā iespējas patērēt lielākas populācijas inversijas daļas. Tas pagarina *EYDF* garumu, kur notiek signāla pastiprināšanās, kā rezultātā tiek iegūts lielāks pastiprinājums (par $\sim 0,7$ dB) un zemāka *NF* (par $\sim 0,1$ dB). Pretēja situācija novērota, ja Yb emisijas un absorbcijas šķērsgriezumi palielināti par 30% (reizināti ar 1,3): Yb populācijas inversijas maksimums tiek novērots 0,74 m attālumā no *EYDF* šķiedras ieejas (no 0,36 metriem tuvāk). Rezultātā iegūtais vidējais pastiprinājums ir samazinājies par 0,5 dB un vidējais *NF* pieaudzis par 0,05 dB.

BER veiktspēja novērtēta 40 kanālu *DWDM* sistēmas konfigurācijai ar *EYDFA* un bez tās (skat. 6.13. att.). *BER* vērtības iegūtas četriem kanāliem: pirmajam ar $f_c = 191,6$ THz (C joslas sākums), 16. kanālam ar $f_c = 193,1$ THz (*DWDM* režģa centrālā frekvence), 26. kanālam ar $f_c = 194,1$ THz (maksimālais pastiprinājums) un 40. kanālam ar $f_c = 195,5$ THz (C joslas beigas).

Rezultāti 6.13 att. parāda jaudas sodu zem 0,1 dB pie $BER = 10^{-9}$ salīdzinājumā ar konfigurāciju bez pastiprināšanas. Šādus traucējumu līmeņus var uzskatīt par nenozīmīgiem. Tomēr pastiprinājuma spektri būtu jāizlīdzina, piemēram, izmantojot pastiprināšanas izlīdzināšanas filtrus vai vairākus pastiprināšanas iecirkņus, pirms šādus pastiprinātājus efektīvi izmantot optisko zudumu kompensēšanai *WDM* pārraides sistēmās.



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

Apvalka pumpēšanas $EYDFA$ pastiprinātājs nodrošināja vienmērīgu pastiprinājumu starp 19,7 – 28,3 dB, zemu trokšņa līmeni starp 3,7 – 4,2 dB un jaudas sodu zem 0,1 dB pie BER līmeņa 10^{-9} , pastiprinot 40 $DWDM$ kanālus (7 m $EYDF$ šķiedra, 3 W 975 nm tieši vērtais pumpēšanas avots un $p_{ieejas} = -20$ dBm uz kanālu). Pastiprinātāja darbība tika pētīta piesātinājuma režīmā, lai atklātu tā darbības joslas platumu un maksimālo izejas jaudu, ko pastiprinātājs var nodrošināt. Ņemot vērā samērā zemo ieejas signāla jaudu (~ -20 dBm uz kanālu), $EYDFA$ var izmantot, lai pastiprinātu līdz 40 $DWDM$ kanāliem visā C joslā un nodrošinātu izejas jaudu ap +22 dBm.

Pētījuma laikā atrastie un atklātie pastiprinātāja raksturlielumi ir svarīgi, lai izstrādāt un testēt apvalka pumpēšanas $EYDFA$.

NOBEIGUMS

Mūsdienās pasaulē tiek novērots straujš pārraidāmās informācijas apjoma palielinājums. Šāds datu apjoma pieaugums prasa ātrāku un kvalitatīvāku informācijas tehnoloģiju ieviešanu telekomunikāciju nozarē. Iemesli šādam apjoma palielinājumam ir pieaugošais galalietotāju skaits, kā arī jauni un uzlaboti esošie pakalpojumi. Pasaulē vairāk un vairāk būvē un ekspluatē šķiedru optiskās pārraides sistēmas ar viļņgarumdales blīvēšanu (*WDM*). *WDM* sistēmu lielākas caurlaides spējas sasniegšanai ir nepieciešams lielāks kanālu skaits, kā arī nepieciešams paplašināt izmantoto viļņa garuma diapazonu. Frekvenču josla, ko izmanto signālu pārraidē, ir ierobežota vājinājuma dēļ. Palielinoties sistēmas kanālu skaitam, ienestais vājinājums palielinās. Ienestais vājinājums ir aktuāla problēma optisko signālu pārraidei liela attāluma sistēmās. Optiskā vājinājuma kompensēšanai izmanto optiskos pastiprinātājus. Optiskie pastiprinātāji ir iedalīti dažādos tipos un katrs no tiem nodrošina optiskā signāla pastiprināšanu, izmantojot savu pastiprināšanas principu. Tādēļ katram pastiprinātāju tipam ir savas priekšrocības un trūkumi.

Minēto iemeslu dēļ promocijas darbā izvirzīts mērķis: **izpētīt un novērtēt optisko pastiprinātāju darbību *WDM* sakaru sistēmās un datorsimulācijas programmā izstrādāt jauna tipa *EYDFA* optiskās ierīces modeli ar apvalka pumpēšanas tehnoloģiju.**

Augstāk minēto iemeslu dēļ promocijas darba pirmajā nodaļā ir apskatīti un salīdzināti optiskie pastiprinātāji: pusvadītāju pastiprinātājs, ar retzemju elementiem leģētie šķiedru optiskie pastiprinātāji, optiskie pastiprinātāji, kas izmanto Ramana un Brilljuēna izkliedes efektus, kopīgi leģēto šķiedru un apvalka pumpēšanas tehnikas šķiedru optiskie pastiprinātāji, kombinētie un parametriskie pastiprinātāji. Pirmajā nodaļā arī analizēti pasīvie optiskie tīkli, kas ir nākotnes tehnoloģija un ļauj atrisināt pārraidāmā datu apjoma pieaugumu.

Promocijas darba otrā nodaļa ir veltīta erbija leģēto šķiedru pastiprinātāja (*EDFA*) veiktspējas izpētei 16 kanālu *WDM* pārraides sistēmā pie dažādiem ekspluatācijas apstākļiem. Pētīts, kā mainās pastiprinātā signāla kvalitāte, kad tiek mainīts starpkanālu intervāls (37,5 GHz, 50 GHz, 100 GHz), pastiprinājuma apgabala garums (75 km, 100 km un 150 km) un *EDFA* izvietojums (jaudas, līnijas un priekšpastiprinātājs) *WDM* pārraides sistēmā ar *EDFA* pastiprinātājiem. *EDFA* konfigurācijas izvēlētas tā, lai visos sistēmas kanālos nodrošinātu *BER* vērtības zemākas par 10^{-9} .

Izpētot *EDFA* pozicionēšanas ietekmi uz vēlamo *EDFA* konfigurāciju un tās darbību, ir izdarīti šādi secinājumi:

- *WDM* sistēmā ar jaudas *EDFA* pastiprinātāju bija nepieciešama 550 mW pumpēšanas jauda salīdzinot ar līnijas un priekšpastiprinātāju, tas izskaidrojams ar lielu signāla jaudu *EDFA* ieejā (9,06 dBm). Šāds signāls ir 8 reizes jaudīgāks un ir nepieciešama vairākas reizes lielāka populācijas inversija, lai sasniegtu līdz 13 dB kanālu pastiprinājumu.
- Augstākais jaudas sods tika novērots sistēmā ar jaudas *EDFA* pastiprinātāja - 0,92 dB attiecībā uz nepastiprināto signālu. Tas izskaidrojams ar šķiedras nelinearitātes ietekmi, jo pastiprinātā signāla kopējā jauda pastiprinātāja izejā ir 156,5 mW. Tik augsta signāla jauda ir radījusi šķiedru nelinearitāti, kā rezultātā *FWM* rada starpkanālu šķērstraucējumus un *SPM* izraisīja signāla spektra paplašināšanos.

- No pumpēšanas enerģijas patēriņā viedokļa (pumpēšanas jauda - 4 mW) sistēma ar *EDFA* priekšpastiprinātāju ir optimāla, bet zemās signāla jaudas *EDFA* ieejā (-13,94 dBm), populācijas inversija netiek efektīvi izmantota un rodas papildus *ASE* trokšņu un jaudas sods (0,31 dB) ir augstāks nekā līnijas *EDFA* gadījumā (0,26 dB).

Kanālu intervālu izmaiņas ietekmē *WDM* sakaru sistēmas darbību. Pētījumu rezultātā noskaidrots, ka, ja pastiprinājuma spektrs ir salīdzinoši vienmērīgs attiecīgajā viļņa garuma joslā, sistēmām ar mazāku kanālu intervālu, ir nepieciešams lielāks pastiprinājums (tāpēc arī lielāka pumpējošā starojuma jauda), lai nodrošinātu *BER* vērtības zem noteiktā sliekšņa.

Kanālu intervālu izmaiņas ietekmē *EDFA* pastiprinātāju konfigurāciju un veiktspēju un izdarīti šādi secinājumi:

- Lai nodrošinātu noteiktu signāla kvalitāti kanālu intervālam līdz 37,5 GHz, var būt nepieciešama papildus pumpēšana, lai kompensētu attiecīgā kanāla signāla enerģijas daļu filtrēšanu, jo blakus esošajiem kanāliem ir starpkanālu šķērsruna.

- Izvēloties kanālu intervālu pārraides sistēmās ar *EDFA*, jāņem vērā *EDFA* pastiprinājuma spektra slīpuma atkarība no sasniegtā populācijas inversijas līmeņa un šķiedras nelinearitātes ietekmes uz signāla kvalitāti. Pastiprinājuma spektra slīpuma dēļ, pie zemām pumpēšanas jaudām sistēmā ar 100 GHz kanālu intervālu, ir novērotas augstākas *BER* vērtības nekā sistēmās ar mazāku kanālu intervālu. Tomēr, palielinoties pumpēšanas jaudai, situācija kļūst pilnīgi pretēja, jo pastiprinājuma spektrs kļūst vienmērīgāks un šķiedru nelinearitāte rodas skaidrāk pie mazākām kanālu intervāla vērtībām.

- Signāla jauda pēc pastiprināšanas ir pietiekoši liela, kā rezultātā rodas šķiedras nelinearitāti. *WDM* sistēmā izmantojot mazāku kanālu intervālu, tiek novērota lielāka *FWM* radītā starpkanālu šķērsruna, tāpēc lielāks jaudas sods novērots attiecībā pret sistēmu bez pastiprināšanas. 100 GHz kanālu intervālam, jaudas sods ir vienāds ar 0,1 dB, 50 GHz kanālu intervālam - 0,18 dB un 37,5 GHz kanālu intervālam - 0,22 dB.

Trešais faktors, kas pētīts un ietekmē signāla kvalitāti, ir pastiprinājuma apgabala garums. *EDFA* konfigurācijas izvēlētas tā, lai visos sistēmas kanālos nodrošinātu *BER* vērtības zemākas par 10^{-9} , izmantojot pēc iespējas mazāku pumpēšanas jaudu un pēc iespējas īsāku *EDF* šķiedras garumu. Visos pētījumu gadījumos novērotas vienādas tendences. Ja *EDF* šķiedras garums ir īsāks nekā izvēlētajā konfigurācijā, tad nepieciešama lielāka pumpēšanas jauda, jo novērota nepietiekama ierosināto erbija jonu populācija, kas nodrošinātu attiecīgo pastiprinājumu. Ja *EDF* garums ir garāks nekā izvēlētajā konfigurācijā, tad arī nepieciešama lielāka pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu nepieciešamo pastiprinājumu, jo pastiprinājuma spektra slīpums palielinās pie ieejas signāla nemainīgās jaudas.

Raugoties no enerģijas patēriņa viedokļa, energoefektīvākā ir sistēma ar trim *EDFA* pastiprinātājiem un 100 km garu pastiprināšanas apgabalu (105 mW pumpēšanas jauda un 24 metri *EDF*), kas nodrošina vajadzīgo signāla kvalitāti un rada vismazākos pastiprinātā signāla traucējumus. Jaudas sods sistēmā ar trīs *EDFA* pastiprinātājiem ir mazāks nekā sistēmā ar 4 *EDFA*, bet saražotais *ASE* trokšņa daudzums ir lielāks sistēmā ar 3 *EDFA* pastiprinātājiem. Tas izskaidrojams, ka katrs nākamais pastiprinātājs rada ne tikai savu *ASE*, bet arī pastiprina iepriekšējo *EDFA ASE* troksni.

Promocijas darba trešā nodaļa veltīta *WDM-PON* sakaru sistēmas darbības novērtējumam. 3.1. apakšnodaļā ir pētīta 16 kanālu spektrāli sagrieztas *WDM-PON* pārraides sistēmas veiktspēja ar vienu platjoslas pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) gaismas avotu un dispersijas kompensējošo moduli ar *FGB*. 3.2. apakšnodaļā veikts pētījums par spektrālās

efektivitātes palielināšanu kombinēto risinājumu *WDM-PON* pārraides sistēmā, kas ļauj palielināt sistēmas kopējo kapacitāti. Kombinētās pārraides sistēmas metodes izmantošana ir efektīvs risinājums attiecībā uz *SE* un izdevumiem pārraides sistēmas attīstībā. Kombinētās pārraides sistēmas gadījumā jauni datu pārraides ātrumi vai modulācijas formāti varbūt piemēroti tikai daļai kanālu, kas nodrošinātu mazākus izdevumus.

Darba ceturrtā nodaļā veikta sadalītā un diskrētā Ramana pastiprinātāja veikspējas pētījums *WDM* sakaru sistēmā. Pētījumā ar diskrēto Ramana pastiprinātāju (*LRA*) secināts, ja *LRA* novietots tālāk no raidītāja bloka, jo mazāka pumpēšanas jauda ir nepieciešama, lai nodrošinātu vajadzīgo signāla kvalitāti un jaudas soda vērtības ir mazākas.

Promocijas darba piektā nodaļa veltīta kombinēto optisko pastiprinātāju: Ramana-*EDFA*, Ramana-*SOA* un Ramana-*FOPA* risinājumu veikspējas izpētei *WDM* sistēmā.

Promocija darba sestajā nodaļā ir izstrādāts erbijā un iterbijā kopīgi legētas šķiedras un apvalka pumpēšanas tehnikas optiskais pastiprinātājs. Šāds pastiprinātājs ļaus sasniegt augstu un vienmērīgu pastiprinājumu un uzlabot optisko šķiedru sakaru sistēmas veikspēju.

Promocijas darba izstrādes laikā iegūti šādi **galvenie secinājumi**:

1. Pārraides sistēmās ar *EDFA* pastiprinātāju, kur kanālu intervāls ir zem 100 GHz, ir nepieciešama pumpēšanas jauda virs 60 mW, lai nodrošinātu atbilstošu pastiprināmā signāla kvalitāti un BER vērtības zem noteiktā līmeņa 10^{-9} . Ja intervāls ir zem 50 GHz, tad blakus kanālu spektru pārklāšanās ir neizbēgama un jaudas soda vērtība ir lielāka kā 0,20 dB.
2. Sistēmās ar vairākiem *EDFA* pastiprināšanas posmiem, optimālākais no enerģijas patēriņa viedokļa, ir sistēma ar 3 *EDFA* un 100 km pastiprināšanas diapazonu, jo kopējā sistēmas pumpēšanas jauda ir mazāka (105 mW) un pietiek ar 24 m *EDF* šķiedras, lai nodrošinātu vajadzīgo signāla kvalitāti un sistēmas BER būtu zem 10^{-9} . Jaudas sods *WDM* sistēmai ar 3 *EDFA* pastiprinātājiem attiecīgā pret sistēmu bez pastiprināšanas ir tikai 0,32 dB.
3. Pielietojot tikai vienu platjoslas *ASE* gaismas avotu visiem lietotājiem un *DCM* moduli dispersijas kompensācijai, pētāmā 16 kanālu *WDM* optiskās piekļuves sistēma nodrošināja datu pārraidi vairāk kā 20 km garā līnijā ar augstu sistēmas veikspēju ar *BER* 10^{-10} . Šāds risinājums ir labs nākamās paaudzes pasīvajiem optiskajiem tīkliem.
4. Kombinētās konfigurācijas ietekmes novērtējums uz *WDM-PON* sistēmas spektrālo efektivitāti atklāja, ka *SE* efektivitāti var palielināt, optimizējot kanālu intervālu. Sistēmai ar nevienādiem kanālu intervāliem un *MMF*, *SE* (0,62 (bit/s)/Hz) ir par 6,2 reizes lielāka nekā tipiskai 100 GHz 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmai. *WDM-PON* sistēmai ar *MMF* un *MLR* spektrālā efektivitāte ir 0,27 (bit/s)/Hz un ir par 2,7 reizes lielāka nekā tipiskai sistēmai.
5. Diskrētā un sadalītā Ramana pastiprinātāju novietojot tālāk no raidītāja bloka (125 km), ir nepieciešama par 3% mazāka pumpēšanas jauda, lai nodrošinātu pastiprināmā signāla kvalitāti zem *BER* 10^{-9} un arī kanālu pastiprinājums ir virs 21,5 dB. Diskrētā Ramana pastiprinātāja gadījumā pumpēšanas jauda (līdz 500 mW) ir vidēji par 50% mazāka nekā sadalītā Ramana pastiprinātāja gadījumā (minimālās pumpēšanas jauda ir 905 – 1020 mW atkarībā no izvietojuma pārraides līnijā).
6. Kombinētā Ramana-*FOPA* datormodeļa pastiprinājums ir vienmērīgāks un sasniedza 34,7 dB 16 kanālu 40 Gbit/s *WDM* sistēmā. Kombinētā pastiprinātāja pastiprinājums ir par 30 % (8,2 dB) lielāks nekā Ramana un *FOPA* pastiprinājumu summa. Ramana-

FOPA -3 dB pastiprināšanas joslas platums ir par 0,02 THz platāks nekā 682 mW *FOPA* gadījumā un 0,20 THz platāks nekā salīdzinot ar optimizēto 660 mW *FOPA*, kas izskaidrojams ar tiešu signāla pastiprināšanu caur Ramana pumpēšanas avotu.

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

Promocijas darba pētījuma rezultāti izmantoti vairāku zinātniski pētniecisko projektu realizācijā:

- ERAF projekts “Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde” Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/002;
- ERAF projekts “Pasīvi šķiedru optiskie sensori energoefektīvai transporta infrastruktūras tehniskā stāvokļa uzraudzībai” Nr. 1.1.1.1/16/A/072;
- ERAF projekts “Efektīvu apvalkā pumpētu šķiedru optisko pastiprinātāju izstrāde telekomunikāciju sistēmām” Nr. 1.1.1.1/18/A/068).

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Cisco Annual Internet Report, 2018–2023, Cisco Systems, White Paper, March 9, 2020
- [2] Agrawal G.P. “Fiber-Optic Communication Systems 4th ed.,” Wiley&Sons, Inc., Rochester, NY, 2010. -603 p.
- [3] Morioka, T. New Generation Optical Infrastructure Technologies: EXAT Initiative Towards 2020 and Beyond// IEEE. – 2009. – pp. 1–2.
- [4] Варава, Н., Никоноров, М., Пронин, С. Оптические усилители EDFA: практическое применение // Первая миля. – №3, 2011, с. 48.-53.
- [5] Zhu, Z. Design green and cost-effective translucent optical networks. From: Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC 2011) and the National Fiber Optic Engineers Conference, 6.-10. march, 2011, pp. 1. – 3.
- [6] Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. - Москва: Техносфера, 2004. – 495.
- [7] Убайдуллаев, Р. Волоконно-оптические сети. – Москва: Эко-Трендз, 2001. – 267 с. ISBN: 5-88405-011-9.
- [8] Убайдуллаев, Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave russian edition. – №1, 2003, с. 22.-28.
- [9] Urquhart P. (ed) Advances in Optical Amplifiers // In Tech. – 2011. – p. 436.
- [10] John M. Optical Fiber Communications Principles and Practive Third Edition // 2009 – p. 1127
- [11] Tanabe, S. Rare-earth-doped glasses for fiber amplifiers in broadband telecommunication // Comptes Rendus Chimie. – Vol.5, No.12, 2002, pp. 815.-824.
- [12] Agrawal, G.P. Nonlinear Fiber Optics. Third Edition. San Diego: Academic Press, 2001. 481 p. ISBN 0-12-045143-3.
- [13] Mohhamed N.I. Raman Amplifiers for Telecommunications. New York: Springer, 2004. 331 p. ISBN 0-387-00751-2.
- [14] S. K. Routray, A. Javali, R. Nyamangoudar, L. Sharma, “Latching on to Keck's law: Maintaining the high speed trends in optical communication”, 4th Int. Conf. Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS 2017), Coimbatore, 2017, pp. 1– 5.
- [15] R. B. Patel, D. K. Kothari, “Performance enhancement of 12 × 160 Gbps (1.92 Tbps) WDM optical system for transmission distance upto 8000 km with differential coding”, 5th Nirma University Int. Conf. Engineering (NUiCONE 2015), Ahmedabad, 2015, pp. 1–6.
- [16] Shaymal, B and Ajoy, G. Guided Wave Optics and Photonic Devices, – USA: – CRC Press, 2017. – 564 p.
- [17] Premaratne M. and Agrawal G.P. «Light Propagation in Gain Media. Optical Amplifiers», Cambridge University Press, USA, 2011, 286 p.
- [18] Connelly M.J. «Semiconductor optical amplifiers», University of Limerick, Ireland, 2004, 177 p.
- [19] Introduction to Optical Amplifiers // Finisar Corporation White paper – June 2010
- [20] P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, Erbium-Doped Fiber Amplifiers. USA: Academic Press, 1999, p. 481.
- [21] Zyskind, J., Srivastava, A. Optically Amplified WDM Networks. First edition. – USA: Academic Press, 2011. – 502 p. ISBN: 978-0-12-084590-3.

- [22] Islam M.N. «Raman amplifiers for telecommunications», USA: Springer, 2004, p. 298.
- [23] Finisar Corporation. Introduction to EDFA Technology. White paper. – June 2009. – 6 p.
- [24] Dutta A. K., Dutta N. K. and Fujiwara M. «WDM technologies active optical components», Academic Press, 2002, 710 p.
- [25] Kong, E. Erbium-Doped Fiber Amplifier. Education Kit Manual, Ver. 2.0. – Hong Kong: Amonics Ltd., 2004. – 29 p.
- [26] 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.
- [27] A. Udalcovs, V. Bobrovs, I. Trifonovs, T. Celmins, "Investigation of Maximum Distance Reach for Spectrally Efficient WDM System with Mixed Data Rates and Signal Formats", Elektronika ir Electrotehnika, vol.19, no.1, pp. 87-92, vol. 19, no. 1, 2013. DOI: 10.1109/BCFIC.2012.6217979
- [28] Next-Generation PON Evolution, Huawei Technologies Co., Ltd, pp. 24, 2010
- [29] Lallukka S., Raatikainen P. Passive Optical Network. Transport concepts// VTT Technical Research Centre of Finland. - 2006. - pp. 128.
- [30] Fiber To The Home Council Europe. 7th FTTH Handbook. - Brussels: FTTX Council Europe, 2016. - pp. 187.
- [31] Fibre to the Home Council Europe (FTTHCouncil). Record breaking roll-out speeds in Latvia, Incumbent Lattelecom transformed the country's broadband Internet market// FTTH Case study. - 2011. - pp. 1-2.
- [32] Muciaccia T., Gargano F. and Vittorio M. N. Passaro. "Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution", Photonics – 2014. – pp. 323-346.
- [33] Eiropas Komisija. Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un Sociālo Lietu Komitejai un Reģionu Komitejai: Konkurētspējīga digitālā vienotā tirgus savienojamība. Virzība uz Eiropas Gigabitu sabiedrību. - Brisele, 2016 - 19 lpp.
- [34] Mahloo, M., J. Chen, L. Wosinska, A. Dixit, B. Lannoo, D. Colle, and C. M. Machuca, "Towards reliable hybrid WDM/TDM passive optical networks," IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 2, 14-23, 2014.
- [35] Machuca, M., J. Chen, L. Wosinska, M. Mahloo, and K. Grobe, "Fiber access networks: Reliability and power consumption analysis," (Invited paper), Proc. of IEEE International Conference on Optical Network Design and Modeling, 1-6, 2011.
- [36] Yuang, M. C., D. Z. Hsu, P. L. Tien, H. Y. Chen, C. C. Wei, S. H. Chen, and J. Chen, "An energy and cost efficient WDM/OFDMA PON system: Design and demonstration," Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, No. 16, 2809-2816, 2013.
- [37] Bobrovs V., Spolitis S., Ivanovs G. and Gavars P. Performance Improvement of High Speed Spectrum-Sliced Dense WDM-PON System// Proceedings of IX International Symposium on Telecommunications (BIHTEL). - Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, October 25.-27. - 2012. - pp. 1-6.
- [38] Bobrovs V., Spolitis S., Trifonovs I., Ivanovs G. Spectrum Sliced WDM-PON System as Energy Efficient Solution for Optical Access Systems// Proceedings of 5th IEEE Latin America Conference on Communications (LATINCOM 2013). - Santiago, Chile, November 24-26. - 2013. - pp. 1-6.

- [39] Ivanovs G., Spolītis S., Parts R., Bobrovs V. Performance Improvement of Spectrum-sliced Passive Optical Network// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). - Taipei, Taiwan, March 25-28. - 2013. - pp. 308-311.
- [40] Spolītis S., Bobrovs V., Berezins S., Ivanovs G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System// Proceedings of 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2012). - Rome, Italy, October 15-18. - 2012. - pp. 195-199.
- [41] Lam C. Passive Optical Networks, 1st Edition, Principles and Practice. - Academic Press, 2007. - pp. 368.
- [42] Logothetis M.D., Vardakas J.S., Moscholios I.D. Performance evaluation of PON technologies// Proceedings of 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). - Graz, Austria, July 6-10. - 2014. - pp. 1-4.
- [43] Yadav R. Passive-optical-network-(PON-)based converged access network [Invited] // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking - 2012. - vol. 4, no. 11. - pp. B124-B130.
- [44] ITU-T PON standards-progress and recent activities Q2/SG15. / Internets: https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/15/Documents/OFC2018-2-Q2_v5.pdf
- [45] Katla S., Balagoni A. Technological and Cost based Analysis of Future-Proof Fiber Access Passive Networks: GPON and WDM PON // ResearchGate, August 2013 // <https://www.researchgate.net/publication/256097373>
- [46] Agrawal G.P., Headley C. «Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems», United Kingdom: Elsevier Academic Press, 2005, p. 389.
- [47] Islam M. N. «Raman amplifiers for telecommunications 2», Springer, USA, 2004, 463 p.
- [48] 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.
- [49] Kaur I., Gupta N. «Hybrid Fiber Amplifier», PEC University of Technology, March 2012, DOI: 10.5772/33240 · Source: InTech
- [50] Hamaide, J. P., “Optical networks: Recent breakthroughs and future challenges,” White paper, Alcatel-Lucent Bell Labs CominLabs Days, France, 2015.
- [51] Marconi, J. D., J. M. Chavez Boggio, and H. L. Fragnito, “Nearly 100 nm bandwidth of flat gain with a double-pumped fiber optic parametric amplifier,” Proc. OFC2007 Paper OWB, Vol. 1, 2007.
- [52] Malik, R., A. Kumpera, M. Karlsson, and P. Andrekson, “Demonstration of ultra wideband phase-sensitive fiber optical parametric amplifier,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 28, No. 2, 175–177, 2016.
- [53] J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund, J. Li, and P. O. Hedekvist, “Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 8, no. 3, pp. 506–520, May/Jun. 2002.
- [54] Torouinidis T., Andrekson P.A., Olsson B.E. «Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain», IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 10, 2006, pp. 1194. – 1196.
- [55] Olonkins, S. Parametrisko un kombinēto pastiprinātāju pielietojuma izpēte WDM sakaru sistēmās. Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2015. – 149 lpp.

- [56] Lali-Dastjerdi Z., «Optical Amplification for Terabit-per-Second Ultra-High Speed Communication Systems», Ph.D. thesis, DTU Fotonik, Technical University of Denmark, 2013, p. 126.
- [57] Yaman F. «Fiber-Optic Parametric Amplifiers for Lightwave Systems», Ph.D. thesis, University of Rochester, 2005, p. 139.
- [58] Core pumping and cladding pumping, FiberLabs Inc./ Internets - <https://www.fiberlabs.com/glossary/core-pumping-and-cladding-pumping/>
- [59] Abedin K. S., Taunay T. F., Fishteyn M., DiGiovanni D. J., Supradeepa V.R., Fini J. M., Yan M. F., Zhu B., Monberg E. M., and Dimarcello F.V. Cladding-pumped erbium-doped multicore fiber amplifier, Optics Express, Vol. 20, No. 18, published 20 Aug 2012.
- [60] Chen H. et al., "Demonstration of Cladding-Pumped Six-Core Erbium-Doped Fiber Amplifier," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 8, pp. 1654-1660, 15 April 2016.
- [61] FiberLABs Inc. Optical Fiber Amplifier Glossary <https://www.fiberlabs.com/glossary/about-optical-amplifier/>
- [62] RP Photonics Encyclopedia, Rare-earth-doped Fibers https://www.rp-photonics.com/rare_earth_doped_fibers.html
- [63] Palvinder K., Singh K., Devra S., et al. "Evaluation of Gain Spectrum of Silica-Based Single/Dual-Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifier (TDFA) by Optimizing Its Physical and Pumping Parameters in the Scenario of Dense Wavelength Division Multiplexed Systems (DWDM)" Journal of Optical Communications, 0.0 (2017)
- [64] Kozak M., Caspary R., Kowalsky W. "Thulium-doped Fiber Amplifier for the S-Band", 6th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2004), Wroclaw (PL), Volume: We.B
- [65] Wang B. S., Andrejco M. J. "Advanced Topics on Erbium Doped Fibers for High Performance Amplifiers", Proc. SPIE 6019, Passive Components and Fiber-based Devices II, 601917 (5 December 2005)
- [66] Shufu D., Shanghong Z., Lei S., Shengbao Z., Guangwei Z., Yujiang L. "Broadband Er:TM co-doped silica fiber amplifier for DWDM application", Asia-Pacific Optical Communications, 2004, Beijing, China
- [67] J. Putrina, S. Olonkins, V. Bobrovs, "Investigation of in-line EDFA performance dependence on channel spacing in WDM transmission systems", Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2016), Riga, Latvia, 2016, pp. 17–21.
- [68] Dutta AK, Dutta NK, Fujiwara M (2003). WDM technologies: Passive optical components. USA: Academic Press, 551(4).
- [69] Putrina, J. and V. Bobrovs, "Evaluation of erbium doped fiber amplifier application in fiber optics transmission systems," 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 3796–3802, Shanghai, 2016.
- [70] S. Olonkins, V. Bobrovs, G. Ivanovs, "FOPA pump phase modulation and polarization impact on generation of idler components", Elektronika ir Elektrotehnika, vol. 77, no. 4, pp. 77–81, 2016.
- [71] Dutton, H.J.R. Understanding Optical Communications. – NJ: Prentice Hall, 1998. – 760 p. ISBN: 978-0-1302-0-1416.
- [72] Усиление оптических сигналов: <http://www.prointech.ru/kb/usiliteli-i-mediakonvertery/usilenie-opticheskikh-signalov.html>

- [73] S. Berezins, V. Bobrovs, "EDFA application research in WDM communication systems", *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 19, no. 2, pp. 92–96, 2013.
- [74] P. Sharma, A. Kumar, and V. K. Sharma, "Performance analysis of high speed optical network based on dense wavelength division multiplexing," 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), pp. 446-449, Feb. 7-8, 2014.
- [75] S. Olonkins, S. Spolitis, I. Lyashuk, and V. Bobrovs, "Cost Effective WDM-AON with Multicarrier Source Based on Dual-Pump FOPA," 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 23-28, Oct. 6-8, 2014.
- [76] V. Bobrovs, S. Olonkins, O. Ozolins, J. Porins, and G. Lauks, "Hybrid optical amplifiers for flexible development in long reach optical access system," 2012 4th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 577-582, Oct. 3-5, 2012.
- [77] M. J. F. Digonnet, *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. 2nd ed., Revised and Expanded. USA: CRC Press, 2001. 798 p.
- [78] J. Tiso, D. Teare, *Designing Cisco Network Service Architectures (ARCH): Foundation Learning Guide*. 3rd ed. USA: Cisco Press, 2012. 736 p.
- [79] J. Putrina, "EDFA characteristics and working principle evaluation in FOTS," M.S. thesis, Telecom. Inst., Riga Technical University, Riga, Latvia, 2016.
- [80] G. P. Agrawal, *Lightwave Technology: Telecommunication Systems*. USA: John Wiley & Sons, 2005. 480 p.
- [81] G. P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*. 2nd ed. USA: Academic Press, 2001. 471 p. agr
- [82] Bobrovs, V., S. Berezins, and S. Olonkins, "EDFA operating parameter research and its application in WDM transmission systems," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 6, No. 1, 1–13, 2012.
- [83] Anindya Sundar Das and Ardhendu Sekhar Patra 2015 RSOA-Based Full-Duplex WDM-PON for 20 Gbps Transmission in Two Channels Over a Long-Haul SMF Using External Modulation Scheme *J. Opt. Commun*
- [84] Shubham Kheraliya , Chakresh Kumar 2018 Comparative Study of Various Optical Amplifiers for 32-Channel WDM System *J. Opt. Commun*.
- [85] Xu, L., Li, Q., Ophir, N Colorless optical network unit based on silicon photonic components for WDM PON *IEEE Photonics Technol. Lett*, vol.24, pp. 1373–1374
- [86] Jung, H., Tran, N., Okonkwo, C 2010 10 Gb/s Bi-directional symmetric WDM-PON system based on POLMUX technique with polarization insensitive ONU", *Proc. of OFC/NFOEC*
- [87] Olsson A 1988 Polarization-independent configuration of optical amplifier *Electron Lett* , vol.24 , pp.1075–1086.
- [88] Bobrovs, V., S. Spolitis, and G. Ivanovs, "Latency causes and reduction in optical metro networks," (Invited paper), *Proc. of SPIE Photonics West, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems VI*, 1-11, 2014.
- [89] Darren, P. and E. Mitchell, "Long-reach optical access technologies," *IEEE Network*, Vol. 21, No. 5, 5-11, 2007.

- [90] Vukovic, A., M. Savoie, and H. Hua, "Performance characterization of PON technologies," Proc. of International Conference on Application of Photonics Technology, 1-10, Ottawa, 2007.
- [91] Choi, B. H. and S. S. Lee, "The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals," Optics Communications, Vol. 284, No. 24, 5692-5696, 2011.
- [92] Spolitis, S., V. Bobrovs, and G. Ivanovs, "Reach improvement of spectrum-sliced dense WDM- PON system," Proc. of 7th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, 296-301, 2012
- [93] Keiser, G., Optical Communications Essentials, McGraw-Hill, 2007
- [94] Bobrovs, V., S. Spolitis, A. Udalcovs, and G. Ivanovs, "Schemes for compensation of chromatic dispersion in combined HDWDM systems," Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Vol. 48, No. 5, 30-44, 2011
- [95] Bobrovs, V., S. Spolitis, and G. Ivanovs, "Comparison of chromatic dispersion compensation techniques for WDM-PON solution," Proc. of 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications, 64-67, 2012.
- [96] Nag, A., M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats," Journal of Lightwave Technology, Vol. 28, No. 4, 466–475, Feb. 15, 2010.
- [97] Bobrovs, V., A. Udalcovs, and I. Trifonovs, "Investigation of maximum distance reach for spectrally efficient combined WDM systems," 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications, Vilnius, 52–55, 2012.
- [98] A. Udalcovs, V. Bobrovs, "Investigation of spectrally efficient transmission for differently modulated optical signals in mixed data rates WDM systems", in 2011 Proc. IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW), pp. 7-12. DOI: 10.1109/Swe-CTW.2011.6082493
- [99] A. Udalcovs, P. Monti, V. Bobrovs, R. Schatz, L. Wosinska, G. Ivanovs, "Spectral and energy efficiency considerations in mixed-line rate WDM networks with signal quality guarantee", in 2013 Proc. 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-7. DOI: 10.1109/ICTON.2013.6602845
- [100] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, E. Varvarigos, "Planning mixed-line-rate WDM transport networks", in 2011 Proc. 13th International Conference on Transparent Optical Networks, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2011.5970835
- [101] R. Agalliu, M. Lucki, "System Performance and Limits of Optical Modulation Formats in Dense Wavelength", Elektronika ir Electrotechnika, vol.22, no. 2, pp. 123-129, 2016. DOI: 10.5755/j01.eie.22.2.9599
- [102] N. Sharma, R. Vij, N. Badhan, "Enhanced spectral efficiency for intensity modulated DWDM systems", 2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC), Mumbai, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/NCC.2015.7084818
- [103] R. Bajpai, S. Sengar, S. P. Singh, "Comparison of performance of a mixed line rate optical WDM network using different modulations at 40Gbps", 2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Spring), pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICACCA.2016.7578869
- [104] Wei, J. L., K. Grobe, C. Sanchez, E. Giacomidis, and H. Griesser, "Comparison of costand energy-efficient signal modulations for next generation passive optical networks," Optics Express, Vol. 23, No. 22, 28271–28281, 2015.

- [105] Datasheet Co Brite DX1 laser, ID Photonics.
- [106] Datasheet 10G receiver module, Amonics LTD.
- [107] Bickovs, V., S. Olonkins, and V. Bobrovs, "Raman pre-amplifier performance comparison in two 320 Gbps transmission systems," 2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 13–16, Riga, 2016.
- [108] Olonkins, S., I. Stankunovs, A. Aļsevska, L. Gegere, and V. Bobrovs, "Investigation of in-line distributed Raman amplifiers with co and counter-propagating pumping schemes," PIERS Proceedings, 3773–3777, Shanghai, China, Aug. 8–11, 2016.
- [109] Zhang, T., X. Zhang, and G. Zhang, "Distributed fiber Raman amplifiers with incoherent pumping," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 6, 1175–1177, 2005.
- [110] Olonkins, S., I. Lyashuk, V. Bobrovs, and G. Ivanovs, "Equalization of EDFA gain spectrum and increase of OSNR through introducing a hybrid raman-EDFA solution," PIERS Proceedings, 600–603, Prague, July 6–9, 2015.
- [111] Olonkins, S., V. Bobrovs, and G. Ivanovs, "Comparison of semiconductor optical amplifier and discrete raman amplifier performance in DWDM systems," Journal of Electronics and Electrical Engineering, Vol. 7, No. 123, 133–136, July 2012.
- [112] Zhang, T., X. Zhang, and G. Zhang, "Distributed fiber Raman amplifiers with incoherent pumping," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 6, 1175–1177, 2005.
- [113] Miyamoto, T., et al., "Highly nonlinear fiber-based lumped fiber Raman amplifier for CWDM transmission systems," Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 11, 3475–3483, Nov. 2005.
- [114] Al-Khateeb, M. A. Z., M. Tan, M. A. Iqbal, M. McCarthy, P. Harper, and A. D. Ellis, "Four wave mixing in distributed Raman amplified optical transmission systems," 2016 IEEE Photonics Conference (IPC), 795–796, Waikoloa, HI, 2016.
- [115] Thyagarajan K. and Ghatak A. «Fiber Optic Essentials», John Wiley & Sons Inc., Canada, 2007, 259 p.
- [116] Kikuchi K. «Ultra-long-haul optical transmission characteristics of wavelength-division multiplexed dual-polarisation 16-quadrature-amplitude-modulation signals», Electronics Letters, Vol. 46, No. 6, pp. 433. – 434., March 18, 2010.
- [117] Downie J.D. «High-capacity long-haul transmission using ultra-low loss optical fiber», 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), pp.172. – 173., July 2. – 6. 2012.
- [118] Šalik P., Čertik F. and Roka R. «Duobinary Modulation Format in Optical Communication Systems», Advances in Signal Processing, Vol.3., Iss.1., pp. 1.– 7., 2015.
- [119] Tragarajan, K., & Ghatak, A. (2007). Fiber Optics Essentials. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- [120] Singh, S., Kaler, R.S. (2007). Simulation and Optimization of Optical Amplifiers in Optical Communication Networks. Thapar University, India. Doctoral Thesis. 68-71.
- [121] Fukuchi, K. "Wideband and ultra-dense WDM transmission technologies toward over 10-Tb/s capacity," in Proc. Opt. Fiber Communication Conf. (OFC), 2002, pp. 558–559.
- [122] Nicholson J. W. Dispersion Compensating Raman Amplifiers With Pump Reflectors for Increased Efficiency, J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 8, 2003, pp. 1758-1762.
- [123] Marhic M. E. "Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices," Cambridge, 2008.
- [124] Boyd R. W. "Nonlinear Optics," Academic Press, San Diego, 1992.

- [125] Inoue K. and Mukai T. "Signal wavelength dependence of gain saturation in a fiber optical parametric amplifier," *Opt. Lett.* 26, 10-12 (2001).
- [126] Torounidis T., Sunnerud H., Hedekvist P. O., and Andrekson P. A. "Amplification of WDM signals in Fiber-Based optical parametric amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 15, 1061-1063 (2003).
- [127] Torounidis T., Andrekson P. A., and Olsson B. E. "Fibre-optical parametric amplifier with 70-dB gain," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 18(10), 1194–1196 (2006).
- [128] Ho M.C., Uesaka K., Marhic M., Akasaka Y. and Kazovsky L.G. "200-nm-Bandwidth Fiber Optical Amplifier Combining Parametric and Raman Gain," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 19, No. 7, July 2001, pp. 977-981.
- [129] Gordienko, V.; Ferreira, F.M.; Ribeiro, V.; Doran, N. Suppression of Nonlinear Crosstalk in a Polarization Insensitive FOPA by Mid-Stage Idler Removal. In *Proceedings of the 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*; 2019; pp. 1–3.
- [130] Gordienko, V.; Ferreira, F.; Laperle, C.; O’Sullivan, M.; Gaur, C.B.; Roberts, K.; Doran, N. Noise Figure Evaluation of Polarization-insensitive Single-pump Fiber Optical Parametric Amplifiers. In *Proceedings of the 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*; 2020; pp. 1–3.
- [131] Matos C.J.S., Chestnut D.A., Reeves-Hall P.C., and Taylor J.R. "Continuous-wave-pumped Raman-assisted fiber optical parametric amplifier and wavelength converter in conventional dispersion-shifted fiber," *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 1583–1585, 2001.
- [132] Chestnut D.A., Matos C.J.S., and Taylor J.R. "Raman-assisted fiber optical parametric amplifier and wavelength converter in highly nonlinear fiber," *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 19, pp. 1901–1904, 2002.
- [133] Wang S.H., Xu L., Wai P.K.A. and Tam H.Y., "Optimization of Raman-Assisted Fiber optical Parametric Amplifier Gain," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 29, No. 8, April 15, 2011, pp. 1172-1181.
- [134] Wang. S.H., Xu L., Wai P.K.A. and Tam H.Y., "6.4-dB Small Signal Gain Enhancement in Raman-assisted Fiber Optical Parametric Amplifiers," 2008 OSA, CLEO/QELS 2008.
- [135] Wang S.H. and Wai P.K.A. "Gain Enhancement in Hybrid Fiber Raman/Parametric Amplifiers," OSA CLEO/QELS 2010.
- [136] Salman M.H., Hassan A.H. and Yasser H.A. "Theoretical Calibration of Raman-Assisted Fiber Optical Parametric Amplifiers in Wavelength-Division Multiplexing," *IPASJ Int. J. Electronics and Communication*, Vol. 2, No. 8, August 2014., pp. 1-9.
- [137] Stephens M.F.C., Phillips I.D., Rosa P., Harper P. and Doran N.J. "Improved WDM performance of a fibre optical parametric amplifier using Raman-assisted pumping," *Optics Express*, Vol. 23, No. 2, 26 Jan. 2015.
- [138] Laming R.I., Gnauck A.H., Giles C.R., Zervas M.N., and Payne D.N. "High-sensitivity two-stage erbium-doped fiber preamplifier at 10 Gb/s," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 12, pp. 1348–1350, Dec. 1992.
- [139] Liang Y., Li J., Chui P.C. and Wong K.K.Y. "High-Sensitivity Optical Preamplifier for WDM Systems Using an Optical Parametric Amplifier," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, No. 20, October 15, 2009., pp. 1562-1564.
- [140] Hansryd J. and Andrekson P.A. "Broad-band continuous-wave pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength—Conversion efficiency," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 3, pp. 194–196, Mar. 2001.

- [141] Olonkins S., Bobrovs V., Ivanovs G. “Investigation of fiber optical parametric amplifier performance in DWDM transmission systems,” *Elektronika ir Elektrotechnika*, 20 (1), 2014, pp. 88-91.
- [142] Wang, S.H.; Xu, L.; Wai, P.K.A.; Tam, H.Y. Optimization of Raman-Assisted Fiber Optical Parametric Amplifier Gain. *J. Lightwave Technol.* 2011, 29, 1172–1181, doi:10.1109/JLT.2011.2112636.
- [143] Wang, S.H.; Wai, P.K.A. Gain Enhancement in Hybrid Fiber Raman/Parametric Amplifiers. In Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics 2010; OSA: San Jose, California, 2010; p. JTuD56.
- [144] Liu, X.; Luan, H.; Dai, B.; Lan, B. Influence of Fiber Link Impairments to Eb/No Estimation in CO-OFDM Systems with QPSK Mapping. *Optik* **2013**, 124, 1977–1981.
- [145] M. N. Zervas and Christophe A. Codemard “High Power Fiber Lasers: A Review,” (invited paper) *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 219–241, Sep. 2014
- [146] M. Dirjish, “Replacing Laser Diodes With LEDs, And Vice Versa”, Aug 27, 2015 <https://www.sensorsmag.com/components/replacing-laser-diodes-leds-and-vice-versa>
- [147] C. Matte-Breton et al., "Modeling and Characterization of Cladding-Pumped Erbium-Ytterbium Co-doped Fibers for Amplification in Communication Systems," in *Journal of Lightwave Technology*, December 2019.
- [148] Q. Han, W. Yan, Y. Yao, Y. Chen, T. Liu, "Optimal design of Er/Yb co-doped fiber amplifiers with an Yb-band fiber Bragg grating," *Photon. Res.* 4, 53-56 (2016); <https://www.osapublishing.org/prj/abstract.cfm?uri=prj-4-2-53>
- [149] RP Photonics Buyer`s guide “Where to buy Double-clad Fibers” https://www.rp-photonics.com/bg/buy_double_clad_fibers.html
- [150] Koška P., Peterka P., Doya V., Aubrecht J., Kasik I., Podrazký O., "Enhancement of pump absorption efficiency by bending and twisting of double clad rare earth doped fibers (Conference Presentation)", *Proc. SPIE 10232, Micro-structured and Specialty Optical Fibres V*, 102320E (9 June 2017);
- [151] Zervas M.N., “High power ytterbium-doped fiber lasers — fundamentals and applications”, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 28, No. 12 (2014) 2009 (35 pages), World Scientific Publishing Company.
- [152] C. Headley III et al., “Tapered fiber bundles for combining laser pumps (Invited Paper),” in *Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications*, 2005, vol. 5709, p. 263.
- [153] J. P. Koplow, S. W. Moore, and D. A. V. Kliner, “A new method for side pumping of double-clad fiber sources,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 4, pp. 529–540, Apr. 2003.
- [154] P. Even and D. Pureur, “High-power double-clad fiber lasers: a review,” 2002, vol. 4638, no. 33, pp. 1–12.
- [155] A. Kosterin, V. Temyanko, M. Fallahi, and M. Mansuripur, “Tapered fiber bundles for combining high-power diode lasers,” *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 19, p. 3893, Jul. 2004.
- [156] J. Sanghera and I. Aggarwal, “Active and passive chalcogenide glass optical fibers for IR applications: a review,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 256–257, pp. 6–16, Oct. 1999.
- [157] P. Ou, P. Yan, M. Gong, W. Wei, and Y. Yuan, “Studies of pump light leakage out of couplers for multi-coupler side-pumped yb-doped double-clad fiber lasers,” *Opt. Commun.*, vol. 239, no. 4–6, pp. 421–428, 2004.

- [158] A. Hideur, T. Chartier, C. Özkul, and F. Sanchez, "Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser," *Opt. Commun.*, vol. 186, no. 4–6, pp. 311–317, Dec. 2000.
- [159] D. J. Ripin and L. Goldberg, "High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded v-grooves," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 25, pp. 2204–2205, Dec. 1995.
- [160] Q. Xiao, P. Yan, S. Yin, J. Hao, and M. Gong, "100 W ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumping configuration," *Laser Phys. Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 125–129, Feb. 2011.
- [161] F. Hakimi and H. Hakimi, "New side coupling method for double-clad fiber amplifiers," in *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest (IEEE Cat. No.01CH37170)*, 2001, vol. 44, no. 3, p. 116.
- [162] T. Theeg, H. Sayinc, J. Neumann, L. Overmeyer, and D. Kracht, "Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers," *Opt. Express*, vol. 20, no. 27, p. 28125, 2012.
- [163] B. J. Puttnam et al., "High Data-Rate and Long Distance MCF Transmission With 19-Core C+L band Cladding-Pumped EDFA," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 123-130, 1 Jan.1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2946879.
- [164] S. Jain, N. K. Thipparapu, P. Barua and J. K. Sahu, "Cladding-Pumped Er/Yb-Doped Multi-Element Fiber Amplifier for Wideband Applications," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 4, pp. 356-358, 15 Feb.15, 2015, doi: 10.1109/LPT.2014.2374234.
- [165] J. Thouras, E. Pincemin, D. Amar, P. Gravey, M. Morvan and M. Moulinard, "Introduction of 12 Cores Optical Amplifiers in Optical Transport Network: Performance Study and Economic Impact," 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473674.
- [166] N. Yoshikane and T. Tsuritani, "Recent Progress in Space-Division Multiplexing Optical Network Technology," 2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Castelldefels, Barcelona, Spain, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/ONDM48393.2020.9133031.
- [167] K. Takeshima et al., "WDM/SDM transmission of 76×128 -Gbit/s Nyquist-pulse-shaped DP-QPSK Signals over 4,200 km using cladding pumped 7-Core EDFA," 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC.2015.7340111.
- [168] K. Matsumoto, K. Seno, T. Mizuno, S. Yanagimachi, E. Le Taillandier De Gaborv and Y. Mivamoto, "Experimental Demonstration of a SDM Node with Low Power Consumption MC-EDFA and SPOC-Based WSS Arrays," 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka, Japan, 2019, pp. 1-3, doi: 10.23919/PS.2019.8817883.
- [169] S. Wei, B. Yao, Y. Chen and Q. Mao, "Cladding-Pumped Erbium-Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier with Dual-Wavelength Auxiliary Signal Injection of 1030 and 1040 nm," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1-9, April 2020, Art no. 1501509, doi: 10.1109/JPHOT.2020.2975843.
- [170] H. Ono, "Gain Control in Multi-Core EDFA with Hybrid-Pumping," 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference

on *Photonics in Switching and Computing (PSC)*, Fukuoka, Japan, 2019, pp. 1-3, doi: 10.23919/PS.2019.8817896.

[171] R. Sugizaki, "Recent Technologies on Multicore EDFA," *2018 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM)*, Waikoloa Village, HI, 2018, pp. 261-262, doi: 10.1109/PHOSST.2018.8456804.

[172] C. C. Baker, A. Burdett, E. J. Friebele, D. L. Rhonehouse, W. Kim, and J. Sanghera, "Rare earth co-doping for increased the efficiency of resonantly pumped Er-fiber lasers," *Opt. Mat. Exp.*, vol. 9, no. 3, pp. 1041–1048, Feb. 2019.

[173] S. Jain, C. Castro, Y. Jung, J. Hayes, R. Sandoghchi, T. Mizuno, Y. Sasaki, Y. Amma, Y. Miyamoto, M. Bohn, 424 K. Pulverer, Md. Nooruzzaman, T. Morioka, S. Alam, and D. J. Richardson, "32-core erbium/ytterbium-425 doped multicore fiber amplifier for next generation space-division multiplexed transmission system," *Opt. Express*, vol. 25, no. 26, Dec. 2017, Art. no. 32887

[174] VPIphotonics GmbH, "VPItransmissionMaker 11.0," <https://www.vpiphotonics.com/>, accessed May 2020.

[175] OptSim User Guide, USA, RSoft Design Group, Inc., 404, 2008.

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums

Ziņojumu starptautiskās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos, Latvijas patentu, starptautisko zinātniski pētniecisko projektu saraksts.

1. pielikums

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

Ziņojumi starptautiskās konferencēs:

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

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

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

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

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

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

Publikācijas zinātniskajos žurnālos:

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

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

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

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos:

1. Kurbatska I., Bobrovs V., Gavars P., **Gegere L.**, “Evaluation of the impact of parameters of transmission system on the performance of WDM-PON” // Progress in

Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL). - Singapore, Singapore – 2017, 1370.-1376. lpp.

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

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

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

Latvijas patents:

Sagatavots Latvijas patenta pieteikums «Dispersijas kompensēta spektrāli sagriezta viļņgarumdaļes blīvēta optiskā sakaru sistēma».

Promocijas darba rezultāti izmantoti starptautisko (ERAF) zinātniskās pētniecības projektu realizācijai:

Starptautiskie zinātniski pētnieciskie projekti:

1. ERAF projekts “Ātrdarbīgo optisko piekļuves tīklu un elementu izstrāde” (aktivitāte “Atbalsts zinātnei un pētniecībai”), Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/002.

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

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