

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Aleksejs UDAĻCOVS
Doktora studiju programmas «Telekomunikācijas» doktorants

**SPEKTRĀLĀ EFEKTIVITĀTE UN PĀRRAIDES
ENERGOEFEKTIVITĀTE VIĻŅGARUMDALES
BLĪVĒTOS OPTISKOS TĪKLOS**

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2015

Udaļcovs A. Spektrālā efektivitāte un pārraides energoefektivitāte viļņgarumdaļes blīvētos optiskos tīklos. Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015, 40 lpp.

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

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes «RTU P-08» 2015. gada 26. februāra lēmumu, protokols Nr. 26.



Eiropas sociālais fonds



Eiropas savienība

ISBN 978-9934-10-690-3

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 4. jūnijā plkst. 16 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes iela 16/20, 215. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Profesors *Dr. phys.* Edmunds Tamanis
Daugavpils Universitātē, Dabaszinātņu un matemātikas fakultātē

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

APSTIPRINĀJUMS

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

Aleksejs Udaļcovs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, nobeigums, literatūras saraksts, 6 pielikumi, 81 attēls, 18 tabulas, kopā — 188 lappuses. Literatūras sarakstā ir 160 nosaukumi.

PATEICĪBA

Izsaku pateicību promocijas darba vadītājam profesoram Vjačeslavam Bobrovam un Telekomunikāciju institūta direktoram profesoram Ģirtam Ivanovam par sniegto atbalstu un padomiem promocijas darba izstrādes gaitā.

Šo gadu laikā, strādājot Telekomunikāciju institūtā par pētnieku, man bija iespēja sadarboties ar daudziem talantīgiem un profesionāliem cilvēkiem. Paldies visiem par kopīgu darbu, laiku un pieredzi, ar ko viņi dalījās. Īpaši vēlos pateikties ilggadējiem kolēģiem un telpas biedriem Oskaram Ozoliņam, Andim Supem, Sandim Spolītim un Sergejam Olonkinam. Paldies par draudzīgo atmosfēru un interesantām diskusijām gan studiju procesā, gan promocijas darba tapšanas laikā.

Daļa no promocijas darbā iekļautiem rezultātiem tika izstrādāti Karaliskajā Tehnoloģiju institūtā (*KTH*), Stokholmā, Zviedrijā. Paldies profesorei *Lena Wosinska* par sniegto iespēju būt daļai no Optisko tīklu laboratorijas (*ONLab*) pētnieku grupas. Īpaša pateicība asistējošam profesoram *Paolo Monti* par atbalstu. Bez viņa neatlaidības, pacietības un ilgajām kopīgā darba stundām nebūtu iespējams sasniegt daļu no rezultātiem. Liels viņam paldies un vislabākie novēlējumi arī turpmāk — darbā un karjeras izaugsmē. Paldies visiem *ONLab* grupas biedriem un viesiem par kopīgajam *fika*. Liels paldies *KTH* docentam *Johan Richard Schatz* par sniegtajiem padomiem, izsmēlošajām atbildēm uz jautājumiem un par iespēju veikt pētījumus sadarbībā ar *Finisar Sweden AB* un *Acreo Sweden AB*. Paldies visai *Acreo Sweden AB* kompānijas Tīklošanas un pārraides laboratorijai (*Netlab*) un īpaši pētniekam *Xiaodan Pang* par produktīvu sadarbību, izpalīdzību un draudzīgu darba atmosfēru. Liela pateicība Zviedru institūtam (*Svenska institutet*) par atbalstu, kas ļāva ne tikai ciešāk sadarboties ar *KTH*, bet arī iegūt noderīgus kontaktus.

Visbeidzot — vislielākais paldies manai ģimenei un Gaļinai Harjkovai par sniegto atbalstu promocijas darba izstrādē un pacietību manas ilgās un periodiskās prombūtnes laikā. Paldies, ka vienmēr ticējāt maniem spēkiem. Jūsu atbalsts ir nenovērtējams.

Liels paldies! Большое спасибо! Thank you very much! Tack så mycket! Dziękuję bardzo!
Grazie mille!

ACKNOWLEDGMENTS

First, I am very grateful to my supervisor Professor Vjaceslavs Bobrovs and the Head of the Institute of Telecommunications Professor Girts Ivanovs for their support and advice given during the elaboration of this Doctoral Thesis.

Over the years while I have been working as a Researcher at the Institute of Telecommunications, I have had a great opportunity to meet and work with many talented people and top-notch researchers. Thanks to all of them for a joint work, their time and experience which they have shared with me. Very special thanks go to my colleagues and roommates Oskars Ozolins, Andis Supe, Sandis Spolitis and Sergejs Olonkins. I thank them for the friendly ambience and interesting discussions that arose during my Doctoral studies and at the writing stage of the Doctoral Thesis.

Some research results provided in this Doctoral Thesis have been achieved at the Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm, Sweden. Therefore, I am very thankful to Professor Lena Wosinska for giving me a great opportunity to be a member of the Optical Networks Laboratory (ONLab). Very special thanks go to Assistant Professor Paolo Monti for accepting me as his own Doctoral student and taking charge of me during my stay at the KTH. It would not be possible to achieve some of the presented results without his persistence, patience and long working hours devoted to our joint research. Many thanks to him and the best wishes for subsequent work and carrier. Thanks to all ONLab group members and visitors with whom I had the greatest pleasure of enjoying *fika*. Special thanks to KTH Docent John Richard Schatz for the given advice, answers to many questions and a chance to collaborate with research units of Finisar Sweden AB and Acreo Sweden AB. Thanks to the entire Networking and Transmission Laboratory (Netlab) of Acreo Sweden AB, and especially to a postdoc researcher Xiaodan Pang for his productive work, helpfulness and friendly working atmosphere. Thanks to the Swedish Institute (*Svenska institutet*) for its support that allowed establishing close collaboration with the KTH and an opportunity of establishing a business contact net.

Finally and most importantly, I would like to thank my family and Galina Harjkova for providing all the care, support and patience which was required in order to withstand a periodic and sometimes my long absence. Thank you for all your belief, faith and trust in me. Your support is priceless.

*Liels paldies! Большое спасибо! Thank you very much! Tack så mycket! Dziękuję
bardzo! Grazie mille!*

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

<i>2-POLSK</i>	<i>Binary Orthogonal Polarization-Shift Keying</i>	Binārā ortogonālā polarizācijas manipulācija
<i>3R</i>	<i>Re-timing, Re-shaping, and Re-amplification (type of optical regenerators)</i>	optiskā signāla reģenerators, kas veic signālu pastiprināšanu, signāla formas un secības atjaunošanu
A		
<i>ASE</i>	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	pastiprināta spontānā emisija
<i>AWG</i>	<i>Arbitrary Waveform Generator</i>	patvaļīgas formas signālu ģenerators
<i>AWG</i>	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>	viļņvadu masīva režģis
B		
<i>B2B</i>	<i>Back-to-Back</i>	apvienots
<i>BER</i>	<i>Bit-Error Rate</i>	bitu kļūdu attiecība
C		
<i>CD</i>	<i>Chromatic Dispersion</i>	hromatiskā dispersija
<i>CW</i>	<i>Continuous Wave</i>	nepārtrauktais starojums
<i>CWDM</i>	<i>Coarse (WDM)</i>	rupja (viļņgarumdales blīvēšana)
D		
<i>DCF</i>	<i>Dispersion Compensating Fiber</i>	dispersiju kompensējošā šķiedra
<i>DCM</i>	<i>Dispersion Compensation Module</i>	dispersiju kompensējošais modulis
<i>DFB (laser)</i>	<i>Distributed Feedback (laser)</i>	lāzers ar izkliedēto atgriezenisko saiti
<i>DP-QPSK</i>	<i>Dual Polarization QPSK</i>	polarizācijdales blīvētā kvadrātūras fāzes manipulācija
<i>DPSK</i>	<i>Differential Phase-Shift Keying</i>	diferenciālā fāzes manipulācija
<i>DQPSK</i>	<i>Differential Quadrature PSK</i>	diferenciālā kvadrātūras fāzes manipulācija
<i>DSO</i>	<i>Digital Storage Oscilloscope</i>	ciparu signālu osciloskops
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processing</i>	signālu ciparapstrāde
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor</i>	ciparu signālu procesors
<i>DWDM</i>	<i>Dense (WDM)</i>	blīva (viļņgarumdales blīvēšana)
E		
<i>ECL</i>	<i>External Cavity Laser</i>	lāzers ar ārējo rezonatora dobumu
<i>EDFA</i>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs
F		
<i>FBG</i>	<i>Fiber Bragg Grating</i>	šķiedras Braga režģis
<i>FEC</i>	<i>Forward Error Correction</i>	kļūdu labojošie kodi
<i>FWM</i>	<i>Four-Wave Mixing</i>	četrus viļņus mijiedarbojot

G

GHG *Greenhouse Gases* siltumnīcefekta gāzes

H

HFLW *High Frequency Linewidth* līnijas platums pie augstām frekvencēm

I

IP *Internet Protocol* interneta protokols
ITU *International Telecommunication Union* Starptautiskā Telekomunikāciju apvienība

L

LO (laser) *Local Oscillator (laser)* koherentā uztvērējā iebūvēts lāzers

M

MLR *Mixed Line Rate* kombinēta (datu) pārraides ātruma (*WDM* sistēma)
MZI *Mach-Zehnder Interferometer* Maha-Cendera interferometrs
MZM *Mach-Zehnder Modulator* Maha-Cendera modulators

N

NRZ-OOK *Non-Return-to-Zero On-Off Keying* intensitātes manipulācijas ar kodēšanu bez atgriešanās pie nulles

O

OLA *Optical Line Amplifier* optiskās līnijas pastiprinātājs
OSNR *Optical Signal to Noise Ratio* optiskā signāla un trokšņa attiecība
OXC *Optical Cross-Connect* optiskais šķērssavienotājs

P

P2P *Point-to-Point* punkts-punkts
PIN (photodiode) *Positive-Intrinsic-Negative (photodiode)* *PIN* fotodiode

Q

QoT *Quality of Transmission* pārraides kvalitāte
QPSK *Quadrature Phase-Shift Keying* kvadratūras fāzes manipulācija

R

RZ *Return-to-Zero* (kodēšanas formāts) ar atgriešanos pie nulles

S

SI *Swedish institute* Zviedru institūts
SLR *Single-Line Rate* viena (datu) pārraides ātruma (*WDM* sistēma)
SP *Single Polarization* viena vienīga polarizācija

<i>SSMF</i>	<i>Standard Single Mode Fiber</i>	standarta vienmodas optiskā šķiedra
T		
<i>TSP</i>	<i>Transponder</i>	retranslators
W		
<i>WDM</i>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>	viļņgarumdaļes blīvēšana
X		
<i>XPM</i>	<i>Cross-Phase Modulation</i>	fāzes šķērsmodulācija

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Nemitīgi augot pieprasījumam pēc datu pārraides apjomiem, optisko pamattīklu operatori neviendabīgā un strauji augošā IP (*Internet Protocol*) trafika apstākļos jānodrošina garantēta servisa kvalitāte un pakalpojumu pieejamība [7, 8]. Šā mērķa īstenošanai jāmeklē kompromiss starp tīkla infrastruktūras attīstību, uzturēšanās un ekspluatācijas izmaksām un iespējamo ietekmi uz apkārtējo vidi (ekoloģiju) [26, 31, 32].

Iepriekšējos 10 gados, lai apmierinātu pieprasījumu pēc datu pārraides apjomiem, šķiedru optiskās pārraides sistēmās (ŠOPS) izmantotais frekvenču joslas platums tika nemitīgi palielināts. Vidēji katru divu gadu laikā šī josla tika vismaz dubultota [33]. ŠOPS pārraidāmais informācijas apjoms tika paaugstināts, gan palielinot sistēmā esošo kanālu skaitu, gan datu pārraides ātrumu tajos. Rezultātā ir novērota, piemēram, 10 Gbit/s kanālu nomaiņa uz 40 Gbit/s vai pat 100 Gbit/s [2, 10, 12, 29]. Taču to var uzskatīt par īstermiņa risinājumu [17], jo pārraidei piemērotā frekvenču josla pat silīcija optiskās šķiedras gadījumā nav bezgalīga. Tā ir ierobežota divējādi — ar optiskā līnijas pastiprinātāja darbības diapazonu, un ar līnijā izvietotajiem hromatiskās dispersijas kompensācijas moduļiem (*DCM — Dispersion Compensation Module*) [3, 6]. Maģistrālajos pamattīklos šī josla parasti ir ierobežota ar erbijs leģētā optiskās šķiedras pastiprinātāja (*EDFA — Erbium Doped Fiber Amplifier*) darbības diapazonu no 1530 nm līdz 1565 nm jeb tradicionālo C diapazonu (*C — Conventional*) [2, 15]. Līdz ar to pēdējos piecos gados tiek pētīti jauni risinājumi, kas ļautu palielināt kopējo pārraidāmās informācijas apjomu, attiecinot uz 1 Hz no frekvenču joslas platuma, t. i., **spektrālo efektivitāti (bit/s/Hz)** [4, 10, 18, 27].

Spektrālās efektivitātes palielināšana noved pie augstākām signālu kvalitātes prasībām pārraides līnijas uztverošā mezglā [10, 11]. Savukārt lineāro un nelineāro optisko efektu ietekmes pastiprināšanās rezultātā samazinās attālums, pēc kura tos iespējams detektēt ar noteiktu bitu kļūdu attiecību (*BER — Bit-Error Rate*) jeb **maksimāli pieļaujamais pārraides attālums bez optiskā signāla reģenerācijas** [5, 21, 23, 35]. Optiskā signāla atjaunošana var tikt veikta optiskajā diapazonā, tomēr optisko tīklu gadījumā, kur līniju garums var pārsniegt arī vairākus simtus kilometrus, jāizmanto reģeneratori, kas balstās uz optoelektrisko un elektrooptisko pārveidi, t. i., tā sauktie *3R* (*3R — Re-timing, Re-shaping, and Re-amplification*) reģeneratori. Tas saistīts ne tikai ar lieliem pārraides attālumiem, bet arī ar izmantotiem spektrāli efektīviem modulāciju formātiem, maršrutēšanas algoritmiem, aizsardzības shēmām, tīkla topoloģiju, trafika matricām un paša trafika raksturu [34, 36, 37]. Līdz ar to optisko signālu atjaunošanai komerciālos pamattīklos pārsvarā tiek izmantoti tieši *3R* reģeneratori, kas izmanto optoelektrisko un elektrooptisko pārveides, savukārt pilnībā optiskie reģeneratori ir ievērojami mazāk izplatīti. Iemesls tam ir arī to sarežģītība un pavisam nesena komerciālā pieejamība. Samazinoties attālumam starp diviem *3R* reģeneratoriem, jāizmanto lielāks reģeneratoru skaits, lai nodrošinātu noteikto signālu kvalitāti pie nemainīga ŠOPS līnijas garuma. Savukārt papildu infrastruktūras komponentu (piemēram, *3R* un līnijas pastiprinātāju) izmantošana rada lielāku jaudas patēriņu 1 bit/s plūsmas pārraidei jeb zemākas **energoefektivitātes (J/bit)**. Rezultātā secinām, ka viļņgarumdales blīvētos optiskos pamattīklos pastāv sakarība starp (*i*) spektrālo efektivitāti, (*ii*) optiskās šķiedras līnijas (OŠL) garumu un (*iii*) pārraides energoefektivitāti pie noteiktām signālu kvalitātes prasībām uztverošā mezglā, un ir jāveic pētījums šo parametru savstarpējās ietekmes noskaidrošanai.

Darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot iepriekš minētos faktus, tika izvirzīts **promocijas darba mērķis — veikt analītisku un eksperimentālu spektrālās efektivitātes ietekmes novērtējumu uz 1 bita**

pārraidei nepieciešamo enerģijas patēriņu šķiedru optiskajās sakaru sistēmās ar viļņgarumdales blīvēšanu.

Pamatuzdevumi, kas bija jāveic izvirzītā mērķa sasniegšanai

1. Noskaidrot risinājumus, kas tiek izmantoti arvien pieaugošā informācijas apjoma pārraidei starp diviem optiskā pamattīkla mezgliem, kā arī nodefinēt galvenos faktorus, kas ierobežo pārraides attālumu un spektrālo efektivitāti.
2. Izvērtēt modulācijas formātu ietekmi uz optiskajos pamattīklos izmantojamo retranslatoru un $3R$ reģeneratoru jaudas patēriņu ar 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s datu pārraides ātrumu, izveidojot to jaudas patēriņa modeļus.
3. Novērtēt ŠOPS infrastruktūrā ietilpstošo komponentu jaudas patēriņa vērtības un salīdzināt retranslatoru un $3R$ reģeneratoru jaudas patēriņa vērtības, kas iegūtas, izmantojot izstrādātos jaudas patēriņa modeļus, ar tām, kas sastopamas citu autoru zinātniskās publikācijās un ražotāju specifikācijās.
4. Eksperimentāli noteikt energoefektīvākā retranslatora (100 Gbit/s DP-QPSK) sastāvā ietilpstošo lāzeravotu izstarojuma parametru (līnijas platums un frekvenču trokšņa spektrs) ietekmi uz uztverto signālu kvalitāti koherentajās sakaru sistēmās.
5. Noteikt minimāli pieļaujamo starpkānāla intervālu un aizsargjoslas lielumu viļņgarumdales blīvētājās ŠOPS ar 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s datu pārraides ātrumu, kas nodrošina NRZ-OOK, NRZ-DPSK un DP-QPSK signālu uztveršana ar noteiktu bitu kļūdu attiecību, kā arī izveidot pārraides modeļus maksimālā pārraides attāluma bez optiskā signāla reģenerācijas noteikšanai.
6. Izanalizēt spektrālās efektivitātes ietekmi uz pārraides energoefektivitāti kombinētajās viļņgarumdales blīvētājās sakaru sistēmās atkarībā no (i) attālumiem starp diviem optiskās līnijas pastiprinātajiem, (ii) maksimāli pieļaujamā pārraides attāluma bez $3R$ reģenerācijas (optiskās sasniedzamības) un (iii) kopējā pārraides attāluma starp diviem pamattīkla mezgliem.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentāli mērījumi. Retranslatoru un $3R$ reģeneratoru jaudas patēriņa vērtības un modulācijas formātu optiskās sasniedzamība tika novērtēta, izmantojot izvestos jaudas patēriņa un analītiskos pārraides modeļus. Blakus kanālu rādīto lineāro šķēstraucējumu ietekmes novērtēšanai izmantotas vairākas novērtēšanās metodes, kas ietver gan skaitliskās simulācijas, gan eksperimentālos mērījumus. Skaitliskās simulācijās izmantots nelineārs Šrēdingera vienādojums, kas tiek risināts laika apgabalā, izmantojot sadale-solis Furjē metodi. Lāzeravotu frekvenču trokšņu mērījumi ir veikti ar divām metodēm: (i) interferometriskā metode un (ii) pētāmā un uztvērēja lāzera izstarojuma sajaukšanas metode. Optiskā signāla kvalitātes novērtēšanai izmantoti jaudas spektru, acu diagrammu, IQ diagrammu un bitu kļūdu attiecības mērījumi.

Promocijas darba galvenie rezultāti

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Izstrādāts uzlabots fiksētais *DWDM* režģis pārraides kanālu centrālo frekvenču atdalīšanai, kas ļauj palielināt pārraidei izmantojamās frekvenču joslas spektrālo efektivitāti.
2. Eksperimentāli noteikta raidītāja lāzera frekvenču trokšņa rezonanses maksimumu (pīķu) ietekme uz izstarojuma līnijas platumu, izmantojot koherento uztvērēju un nosakot, ka pret frekvenču troksni noturīgāks ir 224 Gbit/s DP-QPSK risinājums nekā atbilstošais 112 Gbit/s risinājums koherentās ŠOPS, kuram optiskās šķiedras

līnijas garums ir (i) $L_{P2P} = 0$ km (B2B pārraide) un (ii) $L_{P2P} = 500$ km (vidējais līnijas garums COST-239 tīkla topoloģijā).

3. Ar piedāvāto 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s pārraides kanālu izvietojšanas shēmu noteikta sakarība starp frekvenču joslas izmantošanas efektivitāti (spektrālo efektivitāti, bit/s/HZ), vidējo jaudas patēriņu uz katru pārraidīto 1 bit/s (pārraides energoefektivitāti, J/bit) un kopējo pārraides attālumu 10–40–100 Gbit/s viļņgarumdaļes blīvētajās šķiedru optiskās pārraides sistēmās.
4. Izveidoti analītiskie modeļi retranslatoru un 3R reģeneratoru jaudas patēriņa aprēķinam un tika pierādīts, ka, nosakot energoefektīvāko pārraides sistēmas risinājumu, retranslatoru un 3R reģeneratoru energoefektivitāte jāapskata kopā. Pretējā gadījumā modulācijas formāta izvēle, kas balstās tikai uz retranslatoru jaudas patēriņu, nespēj nodrošināt vismazāko enerģija patēriņu, kas nepieciešams 1 bita pārraidei starp diviem optiskā tīkla mezgliem ar maksimāli pieļaujamo spektrālo efektivitāti (piem., virs 2 bit/s/HZ 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā).

Izmantojot promocijas darba izstrādes gaitā iegūtus rezultātus, sadarbībā ar Karalisko Tehnoloģijas institūtu (KTH) Optisko tīklu laboratoriju (ONLab) tika iegūts Zviedru institūta Visbija programmas grants par izstrādāto zinātniskās pētniecības projektu «*Green 3R Placement Strategies for WDM Networks with Mixed-Line-Rate*». Projekta realizācijas laikā daļu no šajā promocijas darbā iekļautajiem eksperimentāliem mērījumiem veikti *Finisar Sweden AB* un *Acreo Sweden AB* laboratorijās.

Promocijas darba izstrādes laikā tika iegūtie **galvenie secinājumi**

1. Frekvenču joslas spektrālā efektivitāte var tikt palielināta līdz pat divām reizēm, ja kanālu atdalīšanai kombinēta pārraides ātruma viļņgarumdaļes blīvētos ŠOPS fiksētā ITU-T režģa vietā tiek izmantoti nevienmērīgi frekvenču intervāli, kas aprakstīti uzlabotajā DWDM režģī. Spektrālās efektivitātes palielinājums ir atkarīgs no sistēmas sākotnējās konfigurācijas, kas ietver datu pārraides ātrumu un modulācijas formātu atšķirīgos kanālos (viļņa garumos).
2. Pārraides kvalitāte koherento modulācijas formātu gadījumā ir atkarīga ne tikai no raidītāja pusē izmantotā lāzera izstarojuma līnijas platuma lieluma, bet arī no tā rādītāja frekvenču trokšņa spektra formas, ko nosaka tādi parametri kā nesējas rezonanses frekvence, K-faktors un līnijas platums pie augstām frekvencēm (HFLW). Ātrdarbīgākās ŠOPS, kurās optisko signālu modulācijai tiek izmantots DP-QPSK formāts, ir noturīgākas pret raidītāja lāzeravota frekvenču trokšņiem nekā atbilstošais risinājums ar mazāko simbolu pārraides ātrumu.
3. Nekoherentu modulācijas formātu (piem., NRZ-OOK un NRZ-DPSK) izmantošana 40 Gbit/s bitu pārraides ātruma gadījumos ļauj ietaupīt līdz pat 33% no enerģijas, kas būtu nepieciešama 1 bita pārraidei 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā, ja OŠL garums ir vienāds ar 1000 km, bet 3R reģenerācijas iecirkņa garums spektrālās efektivitātes dēļ ir ierobežots ar vienu 40 km garu standarta vienmodas optisko šķiedras posmu. Savukārt, ja 3R reģenerācijas iecirkņa garums ir būtiski lielāks nekā izmantotais standarta vienmodas optiskās šķiedras (SSMF) posms ($L_{SSMF} = 40$ km), tad 100 Gbit/s DP-QPSK nodrošina vislabāko spektrālo efektivitāti ($\gg 1$ bit/s/HZ) kombinācijā ar viszemāko enerģijas patēriņu, kas nepieciešams 1 bita pārraidei OŠL.
4. Neatkarīgi no izmantotā kombinēta 10–40–100 Gbit/s pārraides ātruma viļņgarumdaļes blīvēšanas ŠOPS konfigurācijas eksistē «vienādas energoefektivitātes punkts», kuru nosaka pārraidei izmantojamo 10 Gbit/s NRZ-OOK kanālu skaits, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s retranslatoru un 3R reģeneratoru

energoefektivitāte un optisko šķiedru līnijas garums, kurā pēc pārraides jānodrošina noteiktā kvalitāte signālu uztveršanai (piem., $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$).

Darba **praktiskā vērtība**

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti tika izmantoti 2 starptautisko (FP7 programmu GRIFFON (Nr. 324391) un ICT-DISCUS (Nr. 318137)) un 4 Latvijas (ESF Nr. 2013/0012/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/051, ESF Nr. 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2./09/IPIA/VIAA/005, ERAF Nr. 2DP/2.1.1.2.0/10/APIA/VIAA/003, ERAF Nr. 2010/0270/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/002) zinātniskās pētniecības projektu realizācijā.
2. Sadarbībā ar Karalisko Tehnoloģijas institūtu (*KTH*) Optisko Tīklu Laboratoriju (*ONLab*) tika iegūts Zviedru institūta (*SI — Swedish institute*) Visbija programmas grants (No. 00228/2013) par izstrādāto zinātniskās pētniecības projektu «*Green 3R Placement Strategies for WDM Networks with Mixed-Line-Rate*».
3. Sadarbības līguma ietvaros aktualitāte par energoefektivitātes paaugstināšana šķiedru optikas pārraides sistēmās tika ietverta VAS «Latvijas Valsts Radio un Televīzijas Centram» sagatavotajā «Maģistrālo tīklu tehnoloģiju un to projektēšanas pamattendenču novērtējumā» (ERAF fonda projekts Nr. 3DP/3.2.2.3.0/12/IPIA/SM/001 «Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos»).
4. Iesniegts Latvijas patenta pieteikums par energoefektīvās kombinētā datu pārraides ātruma viļņgarumdales blīvētās šķiedru optikas pārraides sistēmas izveidi ar 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s pārraides ātrumu, pieteikuma Nr. P-12-15.

Darbā tika izvirzītās **aizstāvamās tēzes**

1. Kombinēta pārraides ātruma ŠOPS frekvenču joslas spektrālā efektivitāte var tikt palielināta vairāk nekā divas reizes, izmantojot uzlaboto *DWDM* režģi ar nevienmērīgiem frekvenču intervāliem, kas datu pārraides ātrumu un modulācijas formātu blakus izvietotos kanālos izmanto kā kritēriju starpkanālu intervālu piešķiršanai.
2. Koherenta ŠOPS ar lielāku simbolu pārraides ātrumu ir noturīgāka pret raidītāja lāzera frekvenču troksni nekā atbilstošais risinājums ar mazāku simbolu pārraides ātrumu. (Piemēram, 224 Gbit/s DP-QPSK ir vairāk nekā par 3 dB noturīgāks pret raidītāja lāzera frekvenču troksni nekā atbilstošais 112 Gbit/s risinājums, kas ļauj izmantot lāzeravotu ar līnijas platumu līdz pat 20 MHz pie nosacījuma, ka K-faktors ir mazāks par 0.5 ns un rezonanses frekvence ir zem 3 GHz).
3. Retranslatoru jaudas patēriņš nevar tikt izmantots kā vienīgais kritērijs datu pārraides ātruma un modulācijas formāta izvēlei ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu 1 bita pārraidei *WDM* sistēmās, kurās maksimālais pārraides attālums bez optiskā signāla reģenerācijas ir ierobežots ar vienu 40 km garu vienmodas optiskās šķiedras posmu. (Piemēram, 40 Gbit/s NRZ-DPSK modulācijas formāta izmantošana nodrošina līdz pat 33 % mazāku enerģijas patēriņu 1 bita pārraidei nekā 100 Gbit/s DP-QPSK risinājums pie 1000 km garas OŠ līnijas, ja optiskā signāla atjaunošana jāveic katrā starpmezglā).
4. Spektrāli efektīvo 10–40–100 Gbit/s ŠOPS gadījumos eksistē «vienādas energoefektivitātes punkts», kurā enerģijas patēriņš 1 bita pārraidei ir vienāds visām kombinētā datu pārraides ātruma sakaru sistēmām, neatkarīgi no frekvenču joslas sadalījuma attiecības starp 40 Gbit/s un 100 Gbit/s kanāliem.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti **23** starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti **5** publikācijās zinātniskajos žurnālos, **15** rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, **9** rakstos konferenču tēžu krājumos un **3** Latvijas patentos.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. **Udalcovs A.**, Monti P., Bobrovs V., Schatz R., Wosinska L. Power efficiency of WDM networks using various modulation formats with spectral efficiency limited by linear crosstalk// Optics Communications. — Elsevier Inc., 2014. — No. 318. — pp. 31–36.
2. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Trifonovs I., Celmins T. Investigation of maximum distance reach for spectrally efficient WDM system with mixed data rates and signal formats// Electronics and Electrical Engineering. — Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2013. — Vol. 19, No. 1. — pp. 87–92.
3. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of differently modulated optical signals transmission in HDWDM systems// Journal of Computer Technology and Applications. — New York: David Publishing Company, — 2011. — Vol. 2, No. 10 — pp. 801–812.
4. Bobrovs V., Ivanovs G., **Udalcovs A.** Investigation of allowed channel spacing for differently modulated optical signals in combined HDWDM systems// Electronics and Electrical Engineering. — Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011, Vol. 112, No. 6. — pp. 19–24.
5. Bobrovs V., Spolitis S., **Udalcovs A.**, Ivanovs G. Schemes for compensation of chromatic dispersion in combined HDWDM systems// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. — Riga, Latvia: Institute of Physical Energetics, 2011. — Vol. 48, Issue 5. — pp. 13–27.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. Olmedo M., Pang X., **Udalcovs A.**, Schatz R., Zibar D., Jacobsen G., Popov S., Monroy I. Impact of carrier induced frequency noise from the transmitter laser on 28 and 56 Gbaud DP-QPSK metro links// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP). — Shanghai, China: OSA, 2014. — Paper ATh1E. — pp. 1–3. **(Best Student Paper Award)**
2. Bobrovs V., Gavars P., Trifonovs I., Ivanovs G., **Udalcovs A.** Transponder impact on power and spectral efficiencies in WDM links based on 10–40–100 Gbps mixed-line rates // Proceeding of Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). — Gaungdzhou, China: The Electromagnetics Academy, 2014. — pp. 1664–1668.
3. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Power efficiency vs. spectral efficiency and transmission distance in 2.5-10-40 Gbps backbone optical networks // International Symposium on Communications, Control & Signal Processing (ISCCSP). — Athens, Greece: IEEE, 2014. — pp. 202–205.
4. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Comparison between power efficiencies of mixed-line rate over single-line rate in spectral efficient WDM networks with signal quality guarantee// Proceedings of IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM). — Santiago, Chile: IEEE, 2013. — pp. 1–6.
5. **Udalcovs A.**, Monti P., Bobrovs V., Schatz R., Wosinska L., Ivanovs G. Spectral and energy efficiency consideration in mixed-line rate WDM networks with signal quality guarantee// Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks. — Cartagena, Spain: IEEE, 2013. — Paper Tu.D1.3. — pp. 1–7. **(Invited Paper)**
6. Bobrovs V., **Udalcovs A.**, Trifonovs I. Evaluation of nonlinear effect impact on optical signal transmission over combined WDM system// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). — Taipei, Taiwan: The Electromagnetics Academy, 2013. — pp. 303–307.
7. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Porins J. Evaluation of SPM-induced optical signal distortions in ultra-dense mixed-WDM system// Proceeding of International Conference on Future

- Generation Communication Technology (FGCT). — London, United Kingdom: IEEE, 2012. — pp. 180–184.
8. Bobrovs V., **Udalcovs A.**, Parts R., Trifonovs I. Evaluation of the maximum permissible transmission distance for the mixed-HDWDM systems// Proceedings of the 9th International Symposium on Telecommunications (BIHTEL). — Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: IEEE, 2012. — pp. 1–6.
 9. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Ivanovs Ģ. Investigation of the maximum distance reach for the mixed-WDM systems with unequal frequency grid// Proceedings of International Symposium on Signals, Systems and Electronics. — Potsdam, Germany: IEEE, 2012. — pp. 1–5.
 10. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Investigation of spectrally efficient transmission for unequally channel spaced WDM systems with mixed data rates and signal formats// Proceedings of the 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). — Poznan, Poland: IEEE, 2012. — pp. 1–4.
 11. Bobrovs V., **Udalcovs A.**, Trifonovs I. Investigation of spectrally efficient transmission in mixed WDM systems// Proceeding of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). — Kuala Lumpur, Malaysia: The Electromagnetics Academy, 2012. — pp. 977–981.
 12. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Proposed model of mixed-WDM systems resulting from development trends in optical transport and access networks// Proceedings of the 4th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT). — Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2012. — pp. 563–569.
 13. Bobrovs V., **Udalcovs A.**, Trifonovs I. Investigation of maximum distance reach for spectrally efficient combined WDM systems// Proceedings of the 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC). — Vilnius, Lithuania: IEEE, 2012. — pp. 52–55. **(Best Paper Award)**
 14. Bobrovs V., Ivanovs G., **Udalcovs A.**, Spolitis S., Ozolins O. Mixed chromatic dispersion compensation methods for combined HDWDM systems// Proceedings of the 6th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA). — Barcelona, Spain: IEEE, 2011. — pp. 313–319.
 15. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Investigation of spectrally efficient transmission for differently modulated optical signals in mixed data rates WDM systems//Proceedings of IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW). — Stockholm, Sweden: IEEE, 2011. — pp. 7–12.

Raksti konferencešu tēžu krājums

1. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Transponder impact on power efficiency in WDM-links based on 10-40-100 Gbps mixed-line rates// Book of Abstract of the 8th International Conference on Advanced Optical Material and Devices (AOMD-8). — Riga, Latvia: Institute of Atomic Physics and Spectroscopy, 25–27 August, 2014.
2. **Udalcovs A.**, Garkavcenko A. Impact of single-mode fiber dispersion coefficient on signal distortions for different data-rates and modulation formats// Book of Abstracts of the 9th International Young Scientists Conference on Developments in Optics and Communications (DOC 2013). — Riga, Latvia: Institute of Atomic Physics and Spectroscopy, 10–12 April, 2013. — pp. 40–41.
3. Karjakina O., **Udalcovs A.** Research of chromatic dispersion management strategies applied for fiber-optic transmission systems with wavelength division multiplexing// Book of Abstracts of the 9th International Young Scientists Conference on Developments in Optics and Communications (DOC 2013). — Riga, Latvia: Institute of Atomic Physics and Spectroscopy, 10–12 April, 2013. — pp. 94–95.

4. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Evaluation of the maximum permissible transmission distance for mixed HDWDM systems// Book of Abstracts of the 8th International Young Scientists Conference on Developments in Optics and Communications (DOC 2012). — Riga, Latvia: Institute of Solid State Physics, University of Latvia, 12–14 April, 2012. — pp. 84–85.
5. **Udalcovs A.**, Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of spectral efficiency for mixed data rates combined HDWDM systems// Book of Abstracts of the 7th International Young Scientists Conference on Developments on Optics and Communications (DOC 2012). — Riga, Latvia: Institute of Solid State Physics, University of Latvia, 28–30 April, 2011. — pp. 40–41.
6. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Investigation of error-free transmission for high density combined WDM systems // Book of Abstracts of the 12th International Young Scientists Conference on Optics & High Technology Material Science (SPO 2011). — Kiev, Ukraine, 27–30 October, 2011. — pp. 211–212.
7. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Research of combined transmission for high-speed WDM systems// Books of Abstracts of the Riga Technical University 52nd International Conference. — Riga, Latvia: Riga Technical University, 13–14 October, 2011. — pp. 12–12.
8. **Udalcovs A.**, Bobrovs V. Minimāli pieļaujamā starpkanālu intervāla izpēte kombinētajās WDM sistēmās// 52. RTU Studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli. — Rīga, Latvija: RTU Izdevniecība, 28. aprīlis, 2011. — 282.–282. lpp.
9. Bobrovs V., **Udalcovs A.** Estimation of combined NRZ-DUOBINARY-NRZ HDWDM system performance // Book of Abstracts of the 6th International Young Scientists Conference on Developments on Developments in Optics and Communications (DOC 2010). — Riga, Latvia: Institute of Solid State Physics, University of Latvia, 23–25 April, 2010. — pp. 42–42.

Jāatzīmē, ka raksti, kas iekļauti pilna teksta vai konferenču tēžu krājumos, tika klātienē aizstāvēti attiecīgajās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

Latvijas **patenti**

1. Bobrovs, V., Ozoliņš, O., Spolītis, S., **Udalcovs, A.**, Ivanovs, Ģ. Viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas mērījumu shēma // Latvijas patents LV-14557.
2. Bobrovs, V., Spolītis, S., **Udalcovs, A.**, Parts, R., Ivanovs, Ģ. Šķiedru optiskā piekļuves sistēma WDM-PON ar dispersijas kompensāciju // Latvijas patents LV-14628.
3. **Udalcovs A.**, Ozoliņš O., Spolītis S., Parts R., Bobrovs V. Kombinēta pārraides ātruma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēma// Latvijas patenta pieteikums P-12-15.

Promocijas darba rezultāti izmantoti 3 starptautisko un 4 Latvijas zinātniskās pētniecības **projektu** realizācijai

1. FP7/2007-2013 programma: ICT-DISCUS No. 318137.
2. FP7/ 2013-2017 programma: GRIFFON No. 324391.
3. Swedish institute (SI): Visby program under grant agreement No. 00228/2013.
4. ESF projekts: «Starpdisciplinārās IKT zinātniskās grupas izveide liela apjoma datu pārraidei, apstrādei un pārvaldīšanai», Nr. 2013/0012/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/051.
5. ESF projekts: «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai», No. 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2./09/IPIA/VIAA/005
6. ERAF projekts: «Rīgas Tehniskās universitātes starptautiskās sadarbības, projektu un kapacitātes attīstība zinātnē un tehnoloģijā», Nr. 2DP/2.1.1.2.0/10/APIA/VIAA/003

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 188 lpp. Darbā ir ievads, četras tematiskās nodaļas, nobeigums, literatūras saraksts un pielikumi. Darba **ievadnodaļā** pamatota veikto pētījumu aktualitāte un noteikti promocijas darba pētījumu virzieni, kā arī formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvamās tēzes un apkopoti galvenie rezultāti.

Darba **otrajā nodaļā** ir (i) izpētīta un novērtēta viļņgarumdales blīvēšana tehnoloģija, (ii) definēts pastiprinātas emisijas trokšņu (*ASE* — *Amplified Spontaneous Emission*), Kerra nelinearitāšu, polarizācijas modu dispersijas un šķērstraucējumu no viļņa garumu filtriem izraisīto signālu kvalitātes zudumu novērtēšanas kritērijs, (iii) novērtēti lāzeravotu izraisītie fāzes un frekvenču trokšņi un (iv) raksturoti modulācijas formāti, kas pārsvarā tiek izmantoti optisko signālu modulācijai komerciālos optiskos tīklos un kas varētu tikt izmantoti frekvenču joslas spektrālās efektivitātes palielināšanai.

Trešajā nodaļā ir (i) aprakstīts optiskā pamattīkla modelis, kas tiks izmantots pārraides energoefektivitātes novērtēšanai, (ii) novērtētas viļņgarumdales blīvēto ŠOPS sastāvā ietilpstošo komponentu jaudas patēriņa vērtības un veikts to salīdzinājums ar literatūrā atrodamām. Savukārt darba **ceturtajā nodaļā** ir (i) aprakstīts uzlabotais *DWDM* režģa modelis un novērtēta tā izmantošana pārraides spektrālās efektivitātes palielināšanai; (ii) noteikta *Q*-faktora izmaiņa sliktākajā pārraide sistēmas kanālā atkarībā no izmantotā starpkanāla intervāla pie trim dažādiem vienmodas optiskās šķiedras posmu garumiem (40, 80 un 120 km), kā arī gadījumos, ja tiek un netiek izmantots *FEC*; (iii) izanalizēta līnijas pastiprinātāju radīto *ASE* trokšņu ietekme uz signāla kvalitātes zudumiem un izveidoti pārraides modeļi, kas *NRZ-OOK*, *NRZ-DPSK* un *DP-QPSK* modulācijas formātu gadījumos ļauj noteikt maksimāli pieļaujamo pārraides attālumu bez optiskā signāla *3R* reģenerācijas (t. i., reģenerācijas iecirkņa garumu); visbeidzot (iv) eksperimentāli novērtēta koherentajās ŠOPS izmantojamās lāzeravotu fāzes un frekvenču trokšņu ietekmi uz pārraides kvalitāti *SP-QPSK* un *DP-QPSK* modulācijas formātu gadījumos.

Darba **piektajā nodaļā** ir noskaidrots, kā spektrālā efektivitāte ietekmē jaudas patēriņu, kas nepieciešams, lai starp diviem optiskā tīkla mezgliem pārsūtītu 1 bit/s datu plūsmu, nodrošinot noteiktu signāla kvalitāti uztverošajā mezglā. Darba **nobeigumā** apkopoti un pamatoti promocijas darba galvenie secinājumi. Pielikumos ir pievienoti konferenču, publikāciju un projektu saraksti, Latvijas patentu apliecības, doktorantūras prakses rekomendācija un Zviedru institūta stipendijas piedāvājums.

DARBA ATSEVIŠKO NODAĻU IZKLĀSTS

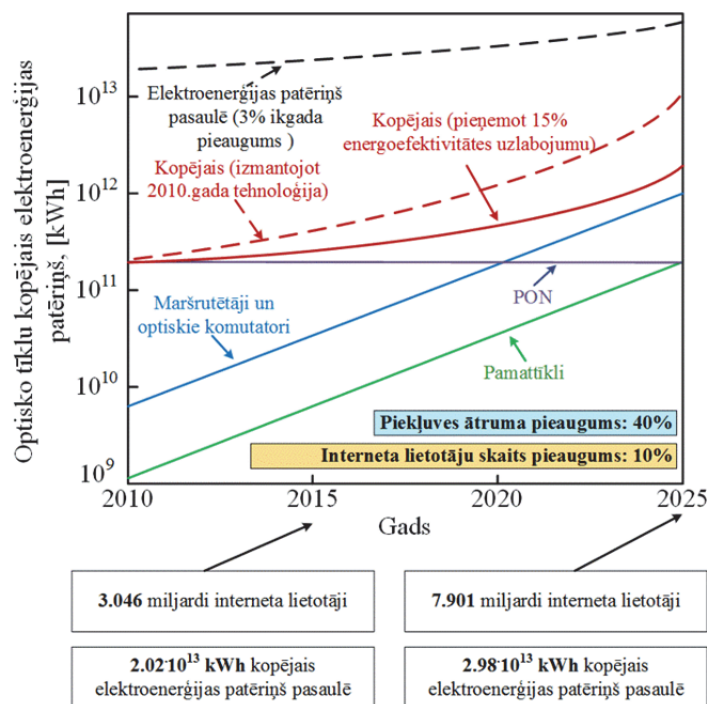
Pirmā nodaļa (ievads)

Izvērtējot viļņgarumdales blīvēto optisko tīklu attīstības noteicošos faktorus, tādus kā (i) interneta trafika un to lietotāju skaita pieaugumu, (ii) spektrālās efektivitātes paaugstināšanās iespējas, (iii) pasaules enerģijas patēriņš un (iv) IKT sektora devumu pasaules elektroenerģijas patēriņā, ir secināts, ka optisko tīklu operatoriem arvien aktuālāki kļūst risinājumi, kas ļautu palielināt spektrālo efektivitāti, tajā pat laikā nepalielinot 1 bita pārraidei nepieciešamo enerģijas patēriņu. Pretējā gadījumā tas radītu ne tikai ekspluatācijas izdevumu pieaugumu, bet arī ekoloģiskas sekas, kas saistītas ar kaitīgo izmešu pieaugumu.

Saskaņā ar Starptautiskās Telekomunikāciju apvienības (*ITU* — *International Telecommunication Union*) veiktajiem aprēķiniem IKT sektors ir atbildīgs vismaz par

2–2,5 % no kopēja *GHG* izmešu daudzuma jeb mazliet mazāk par 10^{12} kg CO₂ ekvivalentā [40, 41]. Palielinoties enerģijas patēriņam IKT sektorā no pašreizējiem 4 % līdz pat prognozējamiem 8 % 2020. gadā [13, 26, 31, 32, 40, 41], tas atstās neizdzēšanas sekas uz globālo ekoloģiju.

Mūsdienu telekomunikācijas infrastruktūra izmanto tikai ap 1 % no pasaules elektroenerģijas patēriņa, bet, ņemot vērā *IP* trafika pieauguma tempus, šis skaitlis tuvākajos gados tikai pieaugs, un 2025. gadā var sasniegt 10 % [16, 28], skat. 1. att. Šāda prognoze iegūta, pieņemot: (i) pārraides tīkla modeli, kura infrastruktūra balstās uz «šķiedra līdz ēkai» principu; (ii) vidējais interneta piekļuves ātrums gada laikā pieaug par 40 %; (iii) vidējais interneta lietotāju skaita ikgada pieaugums ir 10 %; (iv) pārraides tīkla infrastruktūras komponentu energoefektivitātes pieaugums gada laikā ir vismaz 15 %; (v) globālās elektroenerģijas ražošanas tempi vidēji pieaugs par 3 %.



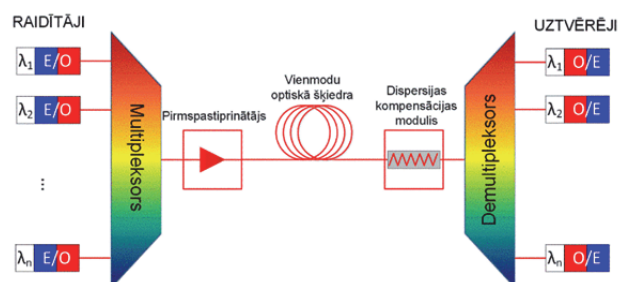
1. att. Prognozējamais globāla interneta jaudas patēriņš laikā no 2010. līdz 2025. gadam [28]

No iegūtās prognozes var secināt, ka enerģijas patēriņš transporta pamattīklos ir tikpat straujš kā maršrutētājos, savukārt enerģijas patēriņš pasīvajos piekļuves tīklos paliek nemainīgs. Līdz ar to energoefektivitātes palielināšana transporta tīklos ir viens no galvenajiem uzdevumiem, ko risina pasaules vadošās zinātniskās laboratorijas un konsorcijs, piemēram, skat. [1, 3, 28, 33, 34].

Otrā nodaļa

Optisko signālu pārraidei viļņgarumdaļes blīvētajās ŠOPS var definēt piecus atsevišķus etapus: (i) nesējsignāla ģenerēšana; (ii) optisko signālu apvienošana; (iii) optisko signālu pārraides šķiedru optikas līnijā (OŠL); (iv) optisko signālu atdalīšana atbilstoši to viļņu garumiem (frekvencēm); (v) signālu uztveršana, demodulācija un detektēšana (skat. 2. att.). Pirmais un piektais etaps ir saistīts ar izvēlēto optiskā signāla modulācijas formātu. Otrais un ceturtais etaps ir saistīts ar metodi, kas izmantota kanālu centrālo frekvenču piešķiršanai. Trešais etaps ir saistīts ar lineāriem un nelineāriem kropļojumu mehānismiem, kas ietekme modulētu signālu pārraidi optiskajā šķiedrā.

Kanālu centrālo viļņa garumu (jeb frekvenču) piešķiršana balstās uz divām ITU-T rekomendācijām: ITU-T G.694.1 un ITU-T G.694.2. Pirmā no tām apraksta fiksēto un elastīgo *DWDM* režģi. Ja fiksētā *DWDM* režģa gadījumā rekomendācija nosaka tikai un vienīgi kanālu centrālās frekvences pie dažādiem starpkanālu intervāliem, piem., 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz un 12.5 GHz, tad elastīgā *DWDM* režģa gadījumā rekomendācija nosaka ne tikai kanālu centrālās frekvences, bet arī frekvenču spraugas platumu. Šajā gadījumā kanālu centrālās frekvences noteikšanai izmanto 6.25 GHz izmaiņu soli (skat. (1) izteiksmi), savukārt frekvenču spraugas platuma noteikšanai tiek izmantots divās reizēs lielāks izmaiņu solis, t. i., 12.5 GHz (skat. (2) izteiksmi).



2. att. Viļņgarumdales blīvētās šķiedru optikas pārraides sistēmas vienkāršotā blokshēma [20]

Elastīgais *DWDM* režģis bija jāievieš, jo fiksētais *DWDM* režģis strādā labi, kamēr *WDM* sistēmā visi pārraides kanāli darbojas ar vienu datu pārraides ātrumu un/vai optisko signālu modulācijai tiek izmantots vienāds modulāciju formāts. Pretējā gadījumā vai nu notiek optisko kanālu pārklāšanās, vai nu neefektīvi tiek izmantoti optiskās šķiedras frekvenču resursi.

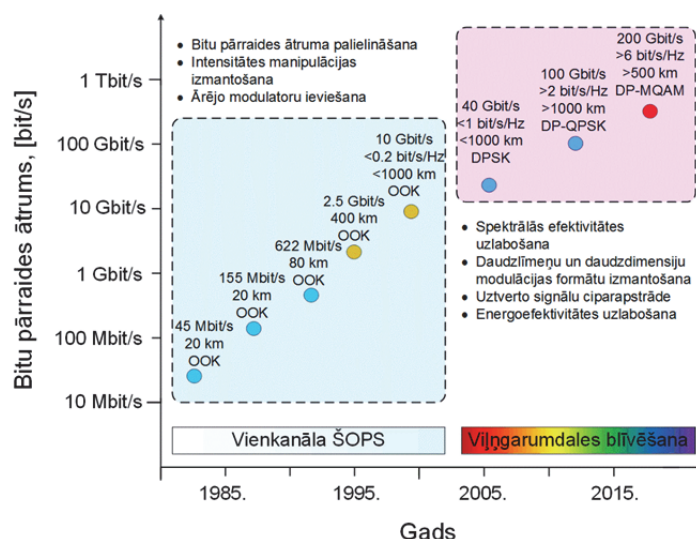
$$f_c = 193.100 + n0.00625 \text{ [THz]}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1)$$

$$\Delta f_{width} = 12.5m \text{ [GHz]}, m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Otrā no iepriekš minētajām rekomendācijām (ITU-T G.694.2) apraksta kanālu centrālo viļņa garumu piešķiršanu rupjās viļņgarumdales blīvēšanas gadījumā (*CWDM*). Šī rekomendācija ietver sevī 18 *CWDM* kanālus, kuru centrālie viļņa garumi izvietoti ar 20 nm soli diapazonā no 1271 nm līdz 1611 nm. Nekādi tālāki pētījumi par *CWDM* netiek veikti, jo šī blīvēšanas tehnoloģija netiek uzskatīta par aktuālo risinājumu mūsdienu optiskiem pamattīkliem.

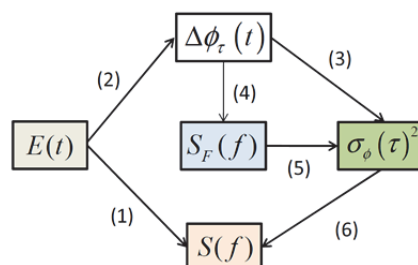
Izvērtējot signālu izplatīšanos optiskajā šķiedrā, jāsecina, ka viens no galvenajiem lineāriem efektiem, kas būtiski ietekme signālu pārraides optiskajos pamattīklos, ir pastiprinātās spontānas emisijas (*ASE*) trokšņi no līnijas pastiprinātājiem, savukārt par galveno nelineāro optisko efektu varētu nosaukt optiskās fāzes šķērsmodulāciju (*XPM*). *ASE* trokšņu lielums uztvērēja galā ir tieši atkarīgs no izmantoto *EDFA* pastiprinātāju trokšņu faktora, paša pastiprinājuma, ko nosaka attālums starp diviem līnijas pastiprinātājiem, OŠ vājinājuma koeficienta un izmantotā elektriskā filtra, kā arī optiskā filtra joslu platuma. Jo *ASE* trokšnis pēc to uztveršanās un optoelektriskās pārveides uztvērējā parādās kā elektriskie trokšņi. *XPM* izraisa tieši amplitūdas trokšņu pieaugumu, kas rodas optiskās šķiedrās novērotas dispersijas dēļ. Dispersija pārveido fāzes modulāciju par intensitātes modulāciju. Līdz ar to *XPM* izraisītie amplitūdas trokšņi var būtiski ietekmēt intensitātes manipulētu signālu (piem., NRZ-OOK) pārraidi un bitu kļūdu attiecību uztvērēja galā. Darbā ir noteikts, ka 10 Gbit/s NRZ-OOK pārraides gadījumā *XPM* izraisīto nelineāro trokšņu lielums vairāk nekā 20 reizēs pārsniedz četru viļņu mijiedarbes (*FWM*) radīto trokšņu lielumu pie uztvertas signālu kvalitātes $Q = 7.3$ [30].

Izvērtējot optiskā signāla brīvības pakāpes — amplitūda (jeb intensitāte), fāze un polarizācijas stāvoklis, tika novērtēti modulāciju formāti, kas manipulē ar šīm brīvības pakāpēm (skat. 3. att.). Intensitātes manipulācija ar kodēšanu bez atgriešanas pie nulles (NRZ-OOK) ir vēsturiskais risinājums 10 Gbit/s tīklos. Optiskā signāla fāze jau tiek izmantota nākamajā optisko tīklu attīstības posmā — 40 Gbit/s kanāliem. Šajā gadījumā viens no visbiežāk izmantotiem modulāciju formātiem ir diferenciālās fāzes manipulācijas ar kodēšanu bez atgriešanas pie nulles (NRZ-DPSK). Kā alternatīvais risinājums 40 Gbit/s sasniegšanai uz viena viļņa garuma ir diferenciālās kvadrātūras manipulācijas (DQPSK) un duobinārais formāts (ODB).



3. att. Optiskajos pamattīklos izmantojamo pārraides ātrumu un modulācijas formātu attīstība laikā no 1980. līdz 2015. gadam [11]

Optiskā signāla polarizācijas stāvoklis var tikt izmantots arī optiskā signāla manipulācijai (piem., izmantojot ortogonālo polarizācijas stāvokļu manipulāciju (2-POLSK)), bet mūsdienīgu optisko pamattīklos to galvenokārt izmanto optiskā signāla papildu blīvvešanai. Piemēram, 100 Gbit/s DP-QPSK risinājumu gadījumā divi 50 Gbit/s QPSK signāli tiek sablīvēti pēc to polarizācijas stāvokļiem. Vienam no tiem ir lineārā X-polarizācija, otram — lineārā Y-polarizācija. Optiskā signāla blīvvešana pēc polarizācijas (*PolMux*) ļauj samazināt pārraidei nepieciešamas joslas platumu un simbolu pārraides ātrumu. Šādu daudzlīmeņa un daudzdimensiju modulācijas formātu demodulācijai jāizmanto koherentās uztveršanas metodes un signālu ciparapstrāde.



4. att. Saikne starp lāzeravota izstarojuma komplekso amplitūdu $E(t)$, fāzes starpību $\Delta\phi_\tau(t)$, spektru $S(f)$, frekvenču trokšņa spektru $S_F(f)$ un fāze trokšņa dispersiju $\sigma_\phi^2(\tau)$ [42]

Darbojoties ar koherentiem optiskā signāla modulācijas formātiem, jāņem vērā vēl viens kropļojumu avots — fāzes un frekvenču trokšņi no raidītājā un arī uztvērēja pusē izmantotajiem lāzeravotiem. Īpaši tas ir svarīgi, ja izmaksu samazināšanas nolūkos

izstarojuma ģenerēšanai tiek izmantoti pārskaņojami pusvadītāju lāzeri. Fāzes trokšņu raksturošanai tiek izmantotas vairākas funkcijas (skat. 4. att.). Saikne starp lāzera izstarojuma komplekso amplitūdu $E(t)$, fāzes starpību $\Delta\phi_\tau(t)$, spektru $S(f)$, frekvenču trokšņa spektru $S_F(f)$, $S_{\Delta\phi_\tau}(f)$ fāzes starpības spektru un fāze trokšņa dispersiju $\sigma_\phi^2(\tau)$ ir parādīta 4. attēlā. Matemātiskās izteiksmes, kas saista katru no šiem raksturlielumiem, ir apkopotas (3)–(8) izteiksmēs [42].

$$S(f) = \langle |F[E(t)]|^2 \rangle \quad (3)$$

$$\Delta\phi_\tau(t) = \phi_n(t) - \phi_n(t - \tau) \quad (4)$$

$$\sigma_\phi^2(\tau) = \langle \Delta\phi_\tau(t)^2 \rangle \quad (5)$$

$$S_{\Delta\phi_\tau}(f) = 4 \left(\frac{\sin(\pi \cdot f \cdot \tau)}{f} \right)^2 S_F(f) \quad (6)$$

$$\sigma_\phi^2(\tau) = 4 \int_0^\infty \left(\frac{\sin(\pi \cdot f \cdot \tau)}{f} \right)^2 S_F(f) df \quad (7)$$

$$S(f) = F \left[\exp \left(-\frac{\sigma_\phi^2(\tau)}{2} \right) \right] \quad (8)$$

Piezīme: Furjē transformācijas tiek apzīmēta kā $F[*]$, un $\langle * \rangle$ ir vidējas pēc realizācijas ansamblā. Šīs matemātiskās izteiksmes tiks izmantots, lai MATLAB aprēķinātu un attēlotu fāzes un frekvenču trokšņu spektru diagrammas (skat. 13., 14. un 17. att.).

Trešā nodaļa

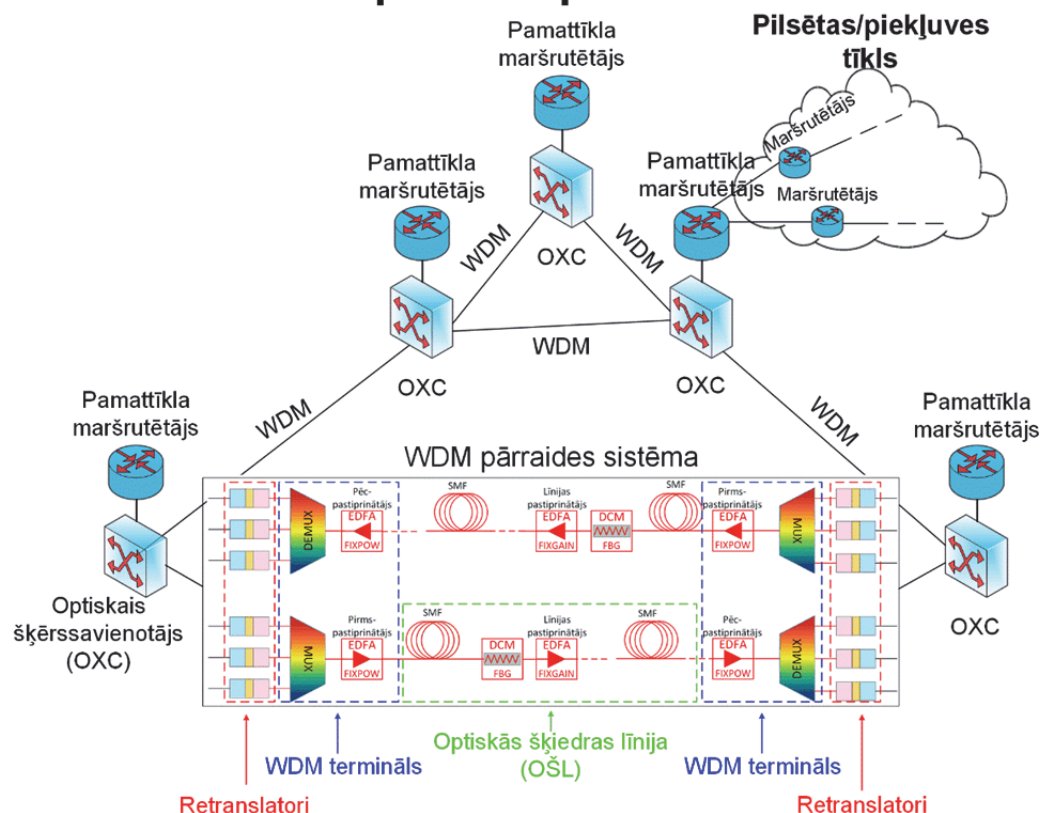
Pārraidē energoefektivitātes novērtēšanai tika izmantots optiskā pamattīkla modelis, kuram ir četri dažādi slāņi (skat. 5. att.): (i) *IP/MPLS*; (ii) *Ethernet*; (iii) *OTN* un (iv) *WDM* slānis. Energoefektivitāte *IP/MPLS* un *Ethernet* slāņos ir atkarīga no atbilstošu pamattīkla maršrutētāju jaudas patēriņa un, protams, trafika starp konkrētiem pamattīkla mezgliem. Noskaidrot, ka *IP/MPLS* slānī tiek izmantoti tikai divu ražotāju maršrutētāji: (i) *CISCO*, piemēram, *CISCO CRS-3*; (ii) *Juniper Networks*. Rēķinot energoefektivitāti šajā slānī, pieņem, ka šāda veida maršrutētāji patērē apmēram 10 W uz katru pārraidīto 1 Gbit/s, jeb 10 nJ/bit.

Jaudas patēriņu optiskā pamattīkla *Ethernet* slānī veido divas sistēmas, kas tiek izmantotas dotā veida maršrutēšanas realizācijai komerciālos pamattīklos. Viena ir *Cisco Nexus 7018*, bet otrā *Juniper EX8216*. Atzīmēsim, ka šajā gadījumā tiek operēts ar tādu parametru kā konkrēta porta jaudas patēriņš. Piemēram, ir aprēķināts, ka 10G porta jaudas patēriņš ir ap 38 W. Jaudas patēriņa novērtējums *OTN* slānī pārsvarā balstās uz konfidenciālo vai ierobežotas piekļuves informāciju, ko iespējams iegūt, tikai cieši sadarbojoties ar iekārtu ražotājiem. Jāatzīmē, ka atšķirīga starp jaudas patēriņu *OTN* un *Ethernet* slāņos ir pietiekami maza. Piemēram, 10 Gbit/s *OTN* ports patērē ap 34 W.

Jaudas patēriņš *WDM* optiskajā slānī lielākā mērā nosaka divi faktori: (i) izmantotais maršrutēšanas algoritms; (ii) pārraidē sistēmas parametri, tādi kā izmantotais pārraidē ātrums, optiskā signāla modulācijas formāts, pārraidē spektrālā efektivitāte un, protams, attālums starp pamattīkla mezgliem, starp kuriem ir jānodrošina dotās informācijas plūsmas pārraide ar iepriekš noteiktu signālu kvalitāti. Jaudas patēriņa novērtēšanai pārraidē sistēmas sastāvā ietilpstošās komponentes tika sadalītas divās grupās — jaudas patēriņš (i) nav un (ii) ir atkarīgs no pārraidei izmantojamā optiskā signāla modulāciju formāta. Līnijas

pastiprinātāju un *WDM* termināļu jaudas patēriņš nav atkarīgs ne tikai no optiskā signālu modulācijas formātu, bet arī no datu pārraides ātruma, izmantotā līnijā (skat. 1. tabulu). Savukārt retransloru un reģeneratoru jaudas patēriņš atkarīgs no abiem šiem parametriem (skat. 2. tabulu).

Optiskais pamattīkls



5. att. Optiskā pamattīkla vispārējā struktūra [25]

1. tabula

Jaudas patēriņš tām *WDM* komponentēm, kuru vērtība nav atkarīga no izmantotā modulāciju formāta [13, 14]

Komponente	Piezīmes	Jaudas patēriņš (<i>P</i>), W
<i>OLA</i>	2 km gara <i>SMF</i> sekcija, 2 × OŠ	65
<i>OLA</i>	40 km gara <i>SMF</i> sekcija, 2 × OŠ	65
<i>OLA</i>	80 km gara <i>SMF</i> sekcija, 2 × OŠ	110
<i>OLA</i>	120 km gara <i>SMF</i> sekcija, 2 × OŠ	120
<i>WDM</i> termināls	Līdz 40 kanāliem, 2 × OŠ	230
<i>WDM</i> termināls	Līdz 80 kanāliem, 2 × OŠ	240

Aprēķinot un izanalizējot dažādu retransloru un reģeneratoru jaudas patēriņa vērtības, jāsecina, ka pie pietiekami maza pārraidāmās informācijas apjoma (zem 30 Gbit/s) vislielāko energoefektivitāti iespējams sasniegt ar 10 Gbit/s NRZ-OOK. Savukārt pie pārraidāmā informācijas apjoma, kas pārsniedz 80 Gbit/s, viszemāko enerģiju 1 bita pārraidei nodrošina tieši 100 Gbit/s DP-QPSK. 3R reģeneratoru gadījumā vislielāko energoefektivitāti pie liela informācijas pārraides apjoma uzrāda tieši nekoherentie modulāciju formāti (NRZ-OOK un NRZ-DPSK). 40 Gbit/s NRZ-DPSK retransloratora energoefektivitāte ir gandrīz divas reizes lielākā nekā tā būtu, ja koherenta DP-QPSK formāts tiktu izmantots optisko signālu modulācijai, t. i., 1.9 nJ/bit un 3.2 nJ/bit atbilstoši.

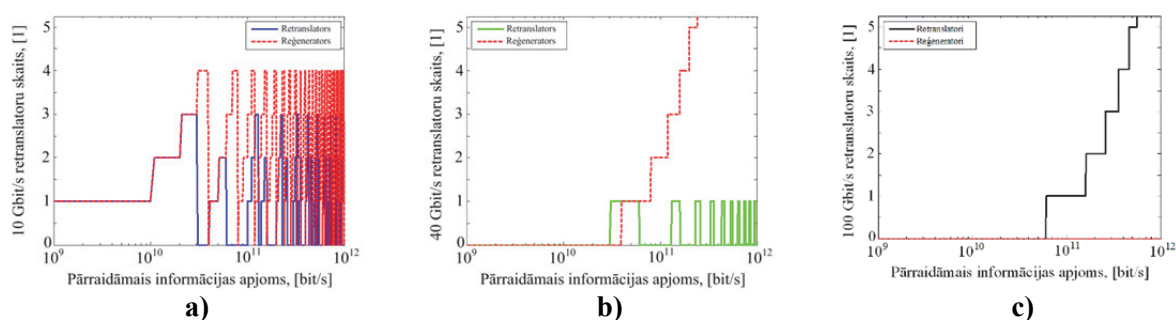
2. tabula

Iegūtais retranslatoru un 3R reģeneratoru jaudas patēriņš [W] (ar *FEC* un bez *FEC*) un *TSP* vērtību salīdzinājums ar literatūrā visbiežāk sastopamajiem.

<i>B</i> , Gbit/s	Modulācijas formāts	<i>TSP</i> jaudas patēriņš (ar <i>FEC</i> /bez <i>FEC</i>), W	3R jaudas patēriņš (ar <i>FEC</i> /bez <i>FEC</i>), W	Literatūrā sastopamās <i>TSP</i> jaudas patēriņa vērtības, [atsauce]
10	NRZ-OOK	23.4/22.0	24.0/21.2	34.0 [31], 35.0 [39], 50.0 [13, 14]
40	NRZ-OOK	75.0/69.4	54.0/42.8	66.0 [24], 100.0 [13, 14]
10	NRZ-DPSK	23.8/22.4	24.8/22.0	20.5* [44]
40	NRZ-DPSK	75.4/69.8	54.8/43.6	85.0 [43]
10	DP-QPSK	42.0/40.6	61.2/58.4	—
40	DP-QPSK	126.0/120.4	156.0/144.8	113 [131]
100	DP-QPSK	292.8/278.8	345.6/317.6	351.0 [19], 139.0 [38], 188.0 [31]
		139.0/132.4	164.1/150.8	70.8* [9]

Piezīmes: *Šīs vērtības iegūšanai tika pieņemts, ka nominālais jaudas patēriņš ir 75 % no maksimālās. Iekārtu specifikācijās dažreiz norāda nevis nominālo jaudas patēriņu, kāds ir normālos ekspluatācijas apstākļos, bet gan maksimālo [13].

Izmantojot iegūtās retranslatoru un reģeneratoru jaudas patēriņa vērtības, 10–40–100 Gbit/s kombinētajām pārraides sistēmām tika izveidots, aprakstīts un izpētīts algoritms, kas ļauj noteikt nepieciešamu 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s kanālu skaitu noteikta informācijas apjoma pārraidei, lai nodrošinātu vismazāko kopējo retranslatoru jaudas patēriņu (skat. 6. att.). Ja modulācijas formāta izvēlei tiek izmantots paša retranslatora energoefektivitātes kā vienīgais kritērijs, tad neatkarīgi no pārraidāma informācijas apjoma 10 Gbit/s NRZ-OOK kanālu skaits nedrīkst pārsniegt trīs, turklāt ne vairāk kā viens 40 Gbit/s NRZ-DPSK kanāls var tikt izmantots datu pārraidei. Pretējā gadījumā būt iespējams samazināt kopējo retranslatoru jaudas patēriņu.

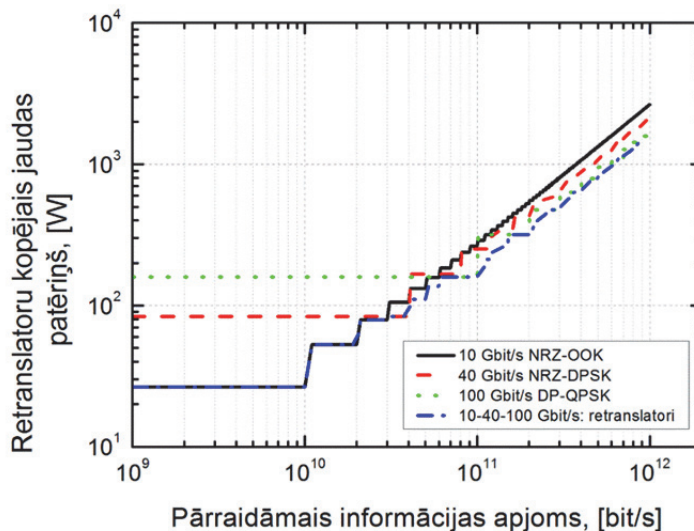


6. att. 10 Gbit/s NRZ-OOK (a), 40 Gbit/s NRZ-DPSK (b) un 100 Gbit/s DP-QPSK (c) retranslatoru skaits, kas nepieciešams, lai *MLR* (*Mixed Line Rate*) sistēmā pārraidītu noteiktu informācijas apjomu starp diviem optiskā tīkla mezgliem

Šajā gadījumā kopējais jaudas patēriņš, kas nepieciešams, lai pārraidītu noteiktu informācijas apjomu caur vienu OŠL sekciju (skat. 7. att.), ir (i) tikpat liels, kā tas būtu 10 Gbit/s *SLR* (*Single-Line Rate*) pārraides gadījumā, ja pārraidāmais informāciju apjoms ir mazāks par 30 Gbit/s; (ii) mazāks nekā jebkuru citu kanālu izvēlē gadījumos, $30 \text{ Gbit/s} < C < 60 \text{ Gbit/s}$; (iii) ne lielāks, kā tas būtu 100 Gbit/s *SLR* risinājumā gadījumā.

Situācija izmainās, ja 3R reģeneratoru jaudas patēriņš tiek izvēlēts kā kritērijs. Šajā gadījumā vismazākais kopējais retranslatoru jaudas patēriņš tiek nodrošināts tajās 10–40–

100 Gbit/s *MLR* sistēmās, kurās neatkarīgi no pārraidāma informācijas apjoma tiek izmantoti ne vairāk kā četri 10 Gbit/s NRZ-OOK kanāli, 40 Gbit/s NRZ-DPSK kanālu skaits pieaug līdz ar pārraidāmā trafika apjomu, bet 100 Gbit/s DP-QPSK kanāli vispār netiek izmantoti. Tas ir izskaidrojams ar 40 Gbit/s NRZ-DPSK *3R* reģeneratoru augsto energoefektivitāti (ap 1 nJ/bit).



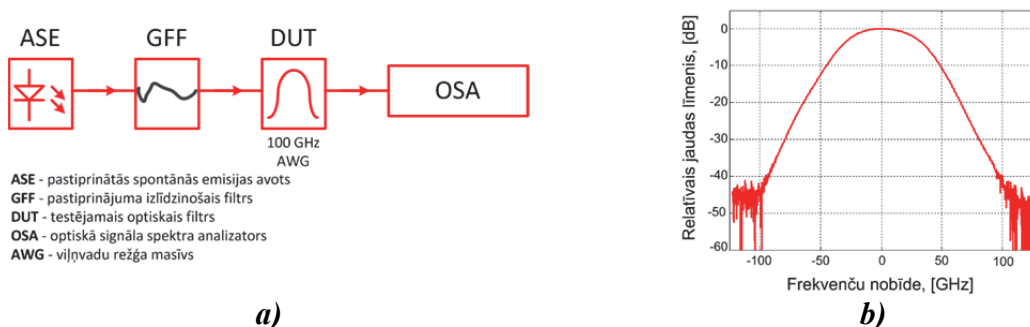
7. att. Kopējais retranslatoru jaudas patēriņš atkarībā no pārraidāmā informācijas apjoma

Atzīmēsim, ka pietiekami lielu pārraides attālumu vai spektrālās efektivitātes vērtību gadījumu pārraidei nepieciešamo jaudas patēriņu noteiks nevis retranslatori, bet gan līnijas pastiprinātāji un optisko signālu *3R* reģeneratori (skat. 5. nodaļu).

Ceturrtā nodaļa

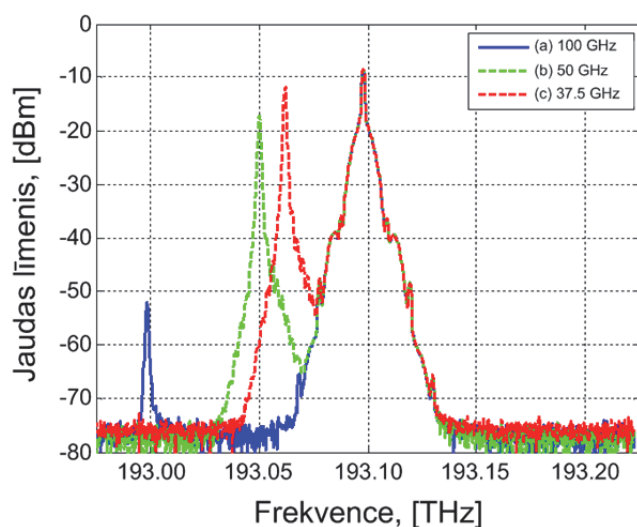
Eksperimentāli tika izanalizēti optisko signāli kropļojumi, kas rodas, optiskiem signāliem izplatoties spektrāli efektīvajās viļņgarumdaļas blīvējās šķiedru optiskās pārraides sistēmās. Vispirms tika aprakstīts uzlabotais *DWDM* režģis, kas paredzēts spektrālās efektivitātes palielināšanai. Tad, izmantojot piedāvāto uzlabojumu, tika noteikts, kā mainās signālu kvalitāte atkarībā no izmantotā starpkanālu intervāla ŠOPS ar *FEC* un bez tā gadījumā, ja izmantotā *SSMF* garums ir vienāds ar 40 km, 80 km un 120 km. Tālāk, balstoties uz *Q*-faktora vērtībām pēc pārraides vienā optiskās šķiedras līnijas sekcijā, tika noteikts maksimālais pārraides attālums bez *3R* reģenerācijas. Tas tika izdarīts, izmantojot iegūtos pārraides modeļus, kas ļauj novērtēt *ASE* trokšņu rādītos signālu kvalitātes zudumus. Visbeidzot tika novērtēta signālu kvalitātes zudumi atkarībā no izmantotā lāzeravotu fāzes un frekvenču trokšņiem.

Piedāvātais ITU-T G.694.1 rekomendācijā aprakstītā *DWDM* fiksētā režģa uzlabojums balstās uz mazākā starpkanālu intervālu izmaiņu soļa izmantošanu. ITU-T rekomendācijā aprakstītā *DWDM* režģa gadījumā katra nākamā starpkanālu intervāla vērtība tiek iegūta, iepriekšējo izdalot ar 2, tad spektrālās efektivitātes uzlabošanai tiek piedāvāts izmantot starpvērtības. Par starpvērtībām šajā gadījumā sauc vidējo aritmētisko vērtību, kas iegūta, paņemot divas blakus izvietotas starpkanālu intervālu vērtības no ITU-T rekomendācijas. Šāda pieeja ļauj iegūt pēc patikas mazu starpkanālu intervālu izmaiņas soli. Saprotams, ka ciešākā kanālu izvietojuma pārraides spektrā novedīs pie lielākiem lineāriem šķērstraucējumiem no blakuskanāliem.



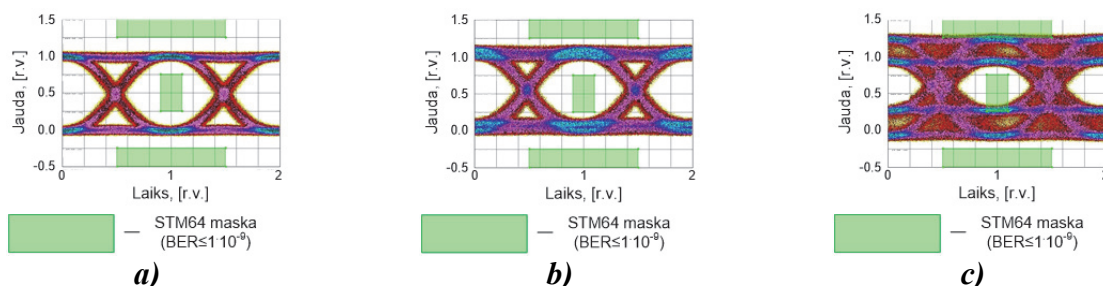
8. att. Mērījuma shēma (a), kas tika izmantota viļņa garuma filtra caurlaides joslas un amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas formas noteikšanai (b)

Lineāro šķērštraucējumu līmenis un to ietekme uz pārraides kvalitāti lielā mērā ir atkarīga no izmantotu viļņa garumu filtru parametriem (piem., caurlaides joslas platums un amplitūdas kvadrāta pārvades funkcijas (AKPF) formas). Lai varētu noteikt, cik tuvu pārraides kanāli var tiek sabīdīti frekvenču spektrā, neaizstājot jau esošos viļņa garumu filtrus, tika izmantota divu kanālu 10 Gbit/s NRZ-OOK *WDM* sistēmā ar *AWG* (*Arrayed Waveguide Grating*), kas pēc ražotāja specifikācijā norādītas informācijas ir paredzēts izmantošanai 100 GHz starpkanālu intervālu gadījumā. Vispirms tika noteikta izmantotā 100 GHz *AWG* filtra caurlaides joslas platums un AKPF forma, izmantojot patentēto mērījumu shēmu, kas balstās uz *ASE* trokšņu avota izmantošanu (skat. 8. att.).



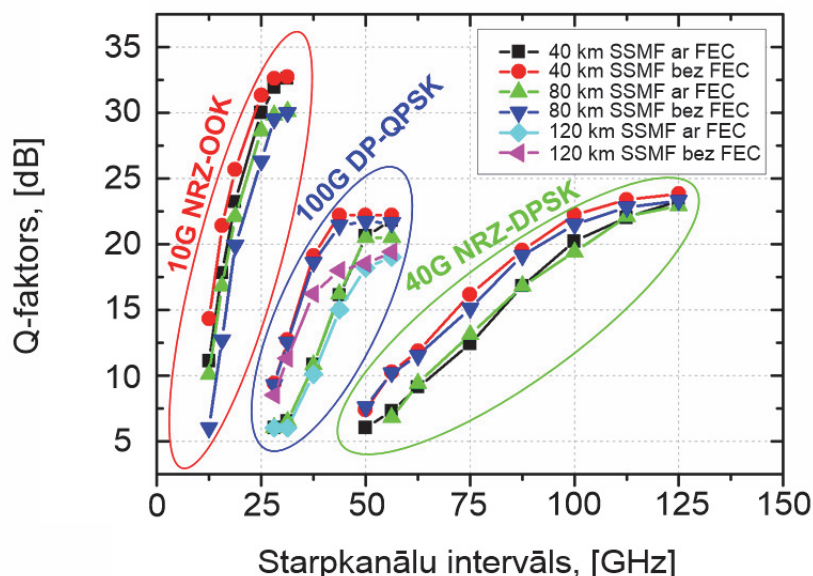
9. att. 10-10 Gbit/s NRZ-OOK sistēmas spektrs *B2B* pārraides gadījumā pie 100 GHz, 50 GHz un 37.5 GHz starpkanālu intervāliem

Rezultātā tika noteikts, ka 100 GHz *AWG* filtra divpusējs caurlaides joslas platums — 3 dB līmenī ir vienāds ar 58 GHz un ar 130 GHz — 20 dB līmenī. Ievietojot šādu filtru *WDM* sistēmā, lineāro šķērštraucējumu izraisītie kvalitātes zudumi parādās tikai pie 50 GHz starpkanālu intervāla. Ievērojami kropļojumi, kas neļauj uztvert signālu ar $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$, parādās tikai pie 37.5 GHz (skat. 9.–10. att.). Līdz ar to jāsecina, ka viļņa garumu filtrs, kas pēc ražotāja datiem paredzēts 100 GHz starpkanālu intervālam, var tikt izmantots arī divreiz mazākā starpkanālu intervāla, īpaši nezaudējot signālu kvalitāti.



10. att. 10-10 Gbit/s NRZ-OOK sistēmā uztvertā optiskā signāla acu diagramma pēc *B2B* pārraides pie (a) 100 GHz, (b) 50 GHz un (c) 37.5 GHz starpkanālu intervāliem

Lai varētu novērtēt spektrālās efektivitātes palielinājumu, ko sniedz piedāvātā ITU-T G.694.1 rekomendācijas uzlabojums, tika izvēlēta kombinētā *WDM* sistēma, kuras konfigurāciju var aprakstīt kā [1., 4., un 7. kanāls 10 Gbit/s NRZ-OOK] — [2., 5., un 8. kanāls 10 Gbit/s 2-POLSK] — [3., 6., un 9. kanāls 40 Gbit/s NRZ-DPSK]. Ja kanālu atdalīšanai tiktu izmantots ITU-T režģis, tad maksimālā spektrālā efektivitāte, ko būtu iespējams sasniegt, būtu 0.20 bit/s/HZ. Savukārt, ja tiktu izmantots uzlabotais *DWDM* režģis, tad tā sasniegtu 0.27 bit/s/HZ vai pat 0.42 bit/s/HZ, ja nevienmērīgais starpkanālu intervāls tiktu izmantots viļņa garumu atdalīšanai. Tas ļauj palielināt spektrālo efektivitāti vairāk nekā divkārt, salīdzinot ar ITU-T definēto risinājumu.



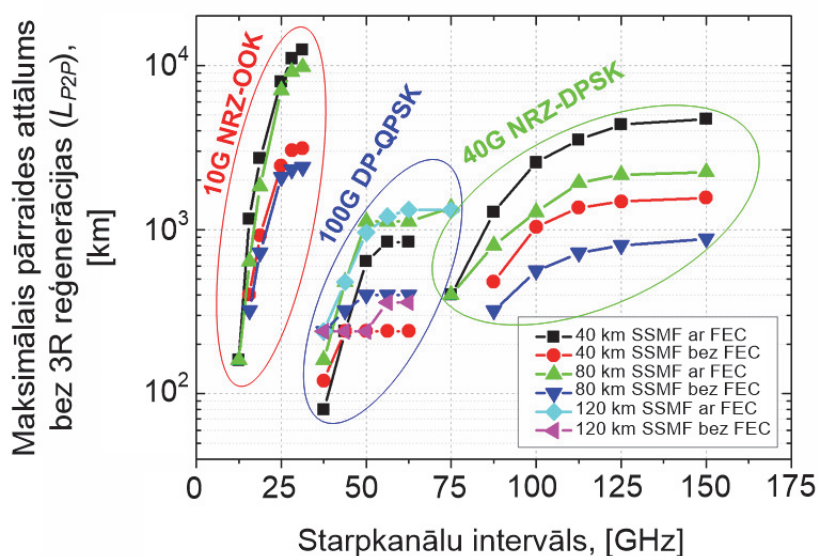
11. att. Vismazākās Q-faktora vērtības kā funkcija no starpkanālu intervāla *SLR* sistēmā ar un bez *FEC* 40 un 80 km garu *SMF* posmu gadījumā

Tālāk, izmantojot manis uzlabotu *DWDM* režģi, kas balstās uz ITU-T G.694.1 rekomendāciju, tika noteikti starpkanālu intervāli, kas sistēmās bez *FEC* ļauj uztvert signālu ar $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$ un ar $BER \leq 2 \cdot 10^{-3}$ sistēmās ar *FEC*. Šos starpkanālu intervālus saucim par minimāli pieļaujamiem starpkanālu intervāliem. *FEC* izmantošanas gadījumā BER sliekšni ir krietni lielāks, jo šajā gadījumā tiek izmantoti papildu biti, un tā rezultātā nominālais bitu pārraides ātrums līnijā palielinās līdz 10.709 Gbit/s, 43.018 Gbit/s un 127.16 Gbit/s. Rezultātā minimālie starpkanālu intervāli *SLR* sistēmu gadījumā tika noteikti trim dažādiem modulāciju formātiem: (i) 10 Gbit/s NRZ-OOK, (ii) 40 Gbit/s NRZ-DPSK un (iii) 100 Gbit/s DP-QPSK, un trim dažādiem SSMF posmu garumiem: (i) 40 km; (ii) 80 km un (iii) 120 km. Pavisam tika iegūtas 14 līknes, kas parāda, kā Q-faktors sliktākajā sistēmas

kanālā mainās atkarībā no izmantotā starpkanālu intervāla (skat. 11. att.). Vēlāk tieši šīs līknes tiks izmantotas kā ieejas dati, kas ar izveidoto pārraides modeli palīdzību ļaus noteikt maksimāli pieļaujamo pārraides attālumu bez $3R$ reģenerācijas (skat. 12. att.).

Izanalizējot visas iegūtas līknes, jāsecina, ka vislielākās Q -faktora vērtības tika iegūtas WDM sistēmās, kurās FEC netiek izmantots un $SSMF$ garums ir vienāds ar 40 km. Pārsniedzot noteiktu starpkanālu intervālu, Q -faktora vērtības vairs nepieaug. Neatkarīgi no $SSMF$ garuma un FEC izmantošanas šīs starpkanālu intervāls ir vienāds ar: (i) 31.25 GHz 10 Gbit/s NRZ-OOK sistēmās; (ii) 150 GHz 40 Gbit/s NRZ-DPSK gadījumos. 100 Gbit/s DP-QPSK modulācijas formāta gadījumā šāda vērtība jau ir atkarīga gan no FEC izmantošanas, gan no $SSMF$ garuma. Sistēmās ar FEC un 40/80 km $SSMF$ garumiem tas vienāds ar 43.75 GHz, savukārt pārējo 100 Gbit/s gadījumā tas vienāds ar 56.25 GHz. Ja kanālu atdalīšanai tiek izmantotas mazākās starpkanālu intervālu vērtības nekā iepriekš minētas, tad signālu kvalitāti galvenokārt nosaka lineārie šķērštraucējumi.

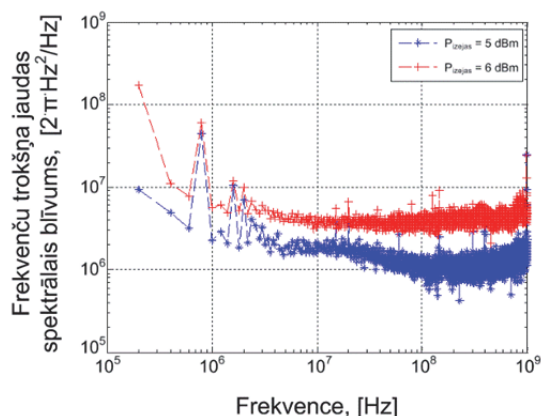
WDM sistēmās ar FEC minimāli pieļaujamie starpkanālu intervāli 10 Gbit/s NRZ-OOK, 40 Gbit/s NRZ-DPSK un 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā ir vienādi ar 12.5 GHz, 75 GHz un 37.5 GHz. Savukārt sistēmās bez FEC tie ir 15.625 GHz, 87.5 GHz un 37.5 GHz. Minimāli pieļaujamie starpkanālu intervāli tika noteikti arī starp dažādiem modulāciju formātiem: (i) 10 Gbit/s NRZ-OOK un 40 Gbit/s NRZ-DPSK; (ii) 10 Gbit/s NRZ-OOK un 100 Gbit/s DP-QPSK; (iii) 40 Gbit/s NRZ-DPSK un 100 Gbit/s DP-QPSK. Tālāk tie tiks izmantoti viļņa garumu izvietojšanai 10–40–100 Gbit/s MLR sistēmas spektrā. Rezultātā jāsecina, ka minimālais frekvenču intervāls, kas jāizmanto iepriekš minēto viļņa garumu atdalīšanai, ir (i) 62.5 GHz, (ii) 31.25 GHz un (iii) 75 GHz. Ja šo viļņa garumu atdalīšanai tiktu izmantots kāds mazāks frekvenču intervāls, tas novestu pie lielākiem lineāriem šķērštraucējumiem. To rezultātā signālu kvalitāte neatbilstu izvirzītajai prasībai — $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$.



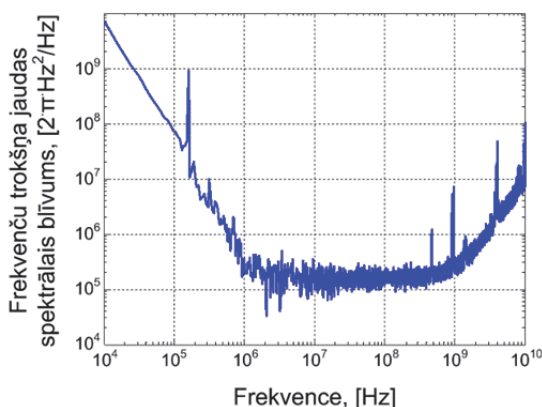
12. att. Maksimāli pieļaujamo pārraides attālumu bez optisko signālu $3R$ reģenerācijas kā funkcija no starpkanālu intervāla un punkts-punkts OŠL konfigurācijas gadījumā

Izmantojot iegūtas Q -faktora līknes, tika noteikts maksimālais pārraides attālums bez $3R$ reģenerācijas jeb reģenerācijas iecirkņa garums (skat. 12. att.). Tas tika noteikts, izmantojot iegūtus pārraides modeļus, kas ļauj analītiski noteikt Q -faktoru samazinājumu atkarībā no līnijas pastiprinātāju skaita, to pastiprinājumu un trokšņu faktoru. Kā ieejas parametri tika izmantoti: (i) modulācijas formāts; (ii) $SSMF$ posmu garums; (iii) starpkanālu

intervāls; (iv) iepriekš noteikta Q-faktora vērtība pēc pārraides vienā optiskās šķiedras līnijas (OŠL) sekcijā. Izanalizējot maksimālā pārraides attāluma līknes, jāsecina, ka *WDM* sistēmas konfigurācija, kurā tiek izmantots *FEC* un OŠL sastāv no 40 km garas *SSMF*, nodrošina vislielāko pārraides attālumu tieši nekoherento modulācijas formātu gadījumā. 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā jāizmanto 80 km vai pat 120 km gari *SSMF* posmi. Pretējā gadījumā reģenerācijas iecirkņa garums samazinās vairāk nekā par 30 %. Maksimālā reģenerācijas iecirkņu atšķirība ir tikai 40 km, ja 100 Gbit/s DP-QPSK modulācijas formāta gadījumā tiek izmantoti 80 km vai 120 km gari *SSMF* posmi. Saprotams, ka vismazākais reģenerācijas iecirknis 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā tiek iegūts sistēmām, kurās netiek izmantots *FEC* un *SSMF* posmu garums ir tikai 40 km. Vislielākais reģenerācijas iecirkņu garums *WDM* sistēmās, kurās tiek izmantots *FEC* un 80 km gari *SSMF* posmi, pārsniedz (i) 9700 km 10 Gbit/s NRZ-OOK, (ii) 2200 km 40 Gbit/s NRZ-DPSK un (iii) 1300 km 100 Gbit/s DP-QPSK modulācijas formātu gadījumā.



13. att. *Agilent* 81689A pārskaņojuma *DFB* lāzera frekvenču trokšņa jaudas spektrālais blīvums



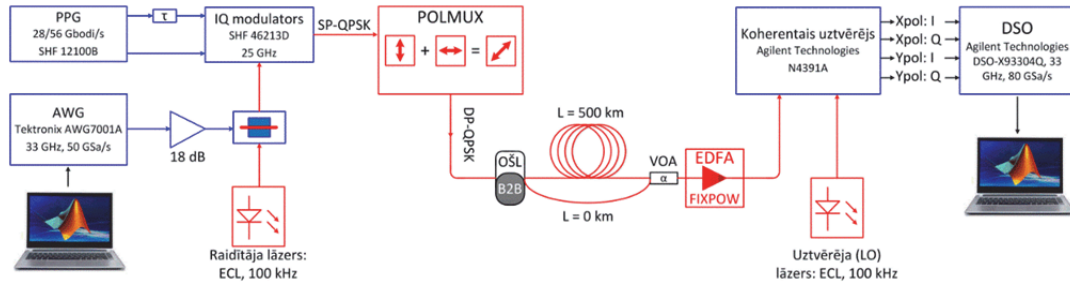
14. att. *ECL* un *LO* lāzeru frekvenču trokšņu jaudas spektrālais blīvums, kas noteikts, izmantojot koherento uztvērēju

Ja iepriekš kā galveno pārraides kropļojumu avotu varēja nosaukt lineāros šķērstraucējumus vai lineāro šķērstraucējumus un *ASE* trokšņus, vai tikai *ASE* trokšņus no līnijas pastiprinātājiem, tad tālāk, šīs nodaļas ceturtajā daļā, tika izpētīts pavisam cits signālu kvalitātes zudumu iemesls — fāzes un frekvenču trokšnis no pārraidei izmantojamiem lāzeravotiem. Šis kropļojumu veids ir aktuāls tieši koherento modulācijas formātu gadījumā, bet tieši tagad tie arī tiek izmantoti gan spektrālās efektivitātes un pārraides energoefektivitātes palielināšanai. Vispirms tika izmērīts pārskaņojama *DFB* lāzera fāzes trokšņu jaudas spektrālais blīvums, izmantojot interferometrisko mērījumu metodi. Šāds mērījums tika veikts pie diviem izejas jaudas līmeņiem: +5 dBm un +6 dBm. Iegūtie spektri mazliet atšķiras pēc formas zemo frekvenču diapazonā (skat. 13. att.). Tālāk tika novērtēts, kādu iespaidu tas atstāj uz *OSNR* līmeni, kas nepieciešams 28 Gbaud SP-QPSK un DP-QPSK signālu uztveršanai ar $BER \leq 2 \cdot 10^{-3}$ pie diviem līnijas garumiem: (i) $L_{P2P}=0$ km un (ii) $L_{P2P}=880$ km. Nepieciešamais līmenis nebija lielāks par 1 dB. Tikpat maza starpība starp nepieciešamajiem *OSNR* līmeņiem tika iegūta, ja pārskaņojama *DFB* vietā tika izmantots *ECL* pie +6 dBm izejas jaudas. Uzsvērsim, ka pēc ražotāja norādītiem datiem, izmantojamā pārskaņojama *DFB* lāzera izstarojuma līnijas platums — 3 dB līmenī nav mazāks par 20 MHz, savukārt *ECL* līnijas platums nav lielāks par 100 kHz. Tātad bija skaidrs, ka tikai līnijas platums nevar tikt izmantots, lai raksturotu fāzes trokšņu ietekmi uz pārraides kvalitāti. Līdz ar to, pirmkārt, bija jāatrod veids, kā varētu pilnīgi kontrolētos laboratorijas apstākļos eksperimentāli ģenerēt lāzeravotu frekvenču trokšņus ar atšķirīgiem raksturlielumiem, un, otrkārt, bija jāatrod ērtāks veids uzģenerēto lāzeravotu frekvenču trokšņu raksturošanai.

DP-QPSK modulācijas gadījumā arī uztvērējā pusē tiek izmantots lāzeravots (t. i., LO lāzers), kam ir ļoti šaurs spektrs un stabils laikā, tāpēc tik nolemts raksturot uzreiz divu lāzeru frekvenču trokšņus. Tas var tikt izdarīts, izmantojot pašu koherento uztvērēju un ciparu signālu osciloskopu (DSO). Koherentā uztvērēja izejā tiek iegūti elektriskie signāli Z_I un Z_Q , kas tālāk tiek padoti uz ciparu signālu osciloskopu. Šajā gadījumā tika izmantots *Agilent Technologies Digital Storage Oscilloscope DSO-X 93304Q* ar 33 GHz joslas platumu un nolasīšanas frekvenci $80 \cdot 10^9$ nolases/sekundē (80 GSa/s). Z_I un Z_Q elektriskie signāli tiek apstrādāti DSO un uzglabāti tālākai apstrādei uz datora. Kompleksais signāls, kas sastāv no divām nomērītām Z_I un Z_Q , var tikt aprakstīts kā:

$$Z_k = Z_I(kT_0) + jZ_Q(kT_0) = \sqrt{P_S P_{LO}} \exp\{j\Delta\theta kT_0 + j\varphi_k\} + n_k \quad (9)$$

Šajā gadījumā Z_k ir kompleksa signāla nolases, kas nomērīta ar nolasīšanas frekvenci $R = 1/T_0$. P_S un P_{LO} ir pētāma lāzera un LO lāzera optiskā signāla jaudas. $\Delta\theta$ frekvenču nobīde starp LO un pētāmā lāzera izstarojuma frekvencēm. φ_k ir optiskā signāla fāzes nolase, kas iegūta attiecība pret LO signāla fāzi. n_k ir aditīvā trokšņa nolases. Jāuzsver, ka šī mērījumu metode ļauj eksperimentāli novērtēt vienlaikus divu lāzeru (pētāmā jeb signāla lāzera un LO lāzera) apvienotus raksturlielumus.



15. att. Eksperimentālā shēma, kas tika izmantota, lai noteiktu frekvenču trokšņu ar atšķirīgiem raksturlielumiem ietekmi uz pārraides kvalitāti koherentajā ŠOPS

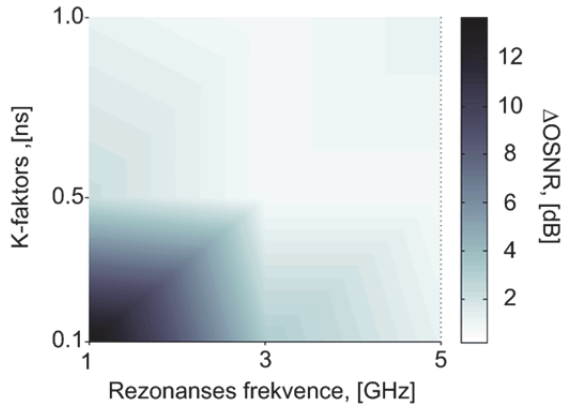
Nosakot izmantotā ECL un LO lāzeru frekvenču trokšņu jaudas spektrālo blīvumu, tika noteikts arī to summārais līnijas platums (skat. 15. att.). Šajā gadījumā tas nav lielāks par 200 kHz, kas ļauj secināt, ka šī metode pietiekami ātri un ļoti precīzi ļauj noteikt izstarojumu līnijas platumu. Ja raidītāja tiku izmantots kāds «sliktāks» lāzers, tad ar šo metodi iegūtais frekvenču trokšņa jaudas spektrālais blīvums un līnijas platums raksturotu tieši raidītāja lāzeru nevis LO lāzeru. LO lāzers šajā gadījumā arī ir ECL ar mazāk nekā 100 kHz līnijas platumu. Visbeidzot, lai noteiktu tieši frekvenču trokšņu ietekmi uz signālu kvalitāti, tika nolemts «uzlikt» uzģenerēto frekvenču troksni uz ECL izstarojumu (skat. (10) izteiksmi), izmantojot patvaļīgas formas signālu ģeneratoru (skat. 15. att.).

$$S_{\theta}(f) = \frac{10^9 \Delta_{\theta(1/f)}}{\pi f} + \frac{\Delta_{\theta int}}{\pi(1+\alpha^2)} \left(1 + \alpha^2 \frac{f_R^4}{(f_R^2 - f^2)^2 + \left(\frac{K f_R^2}{2\pi}\right)^2} \right) \quad (10)$$

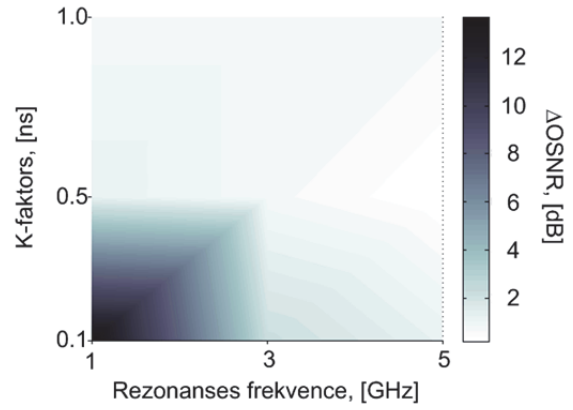
Frekvenču trokšņa vienas pusējas jaudas spektrālā blīvumā izteiksmē (skat. (10) izteiksmi):

- 1) $\Delta_{\theta(1/f)}$ apraksta flikera trokšņa ($1/f$) līmeni pie 1 GHz;
- 2) $\Delta_{\theta int}$ apraksta raksturīgā (iekšējā) frekvenču trokšņa līmeni pie zemām frekvencēm. Šo parametru literatūra bieži vien sauc par izstarojuma līnijas platumu pie augstām frekvencēm ($HFLW$ — *High Frequency LineWidth*);

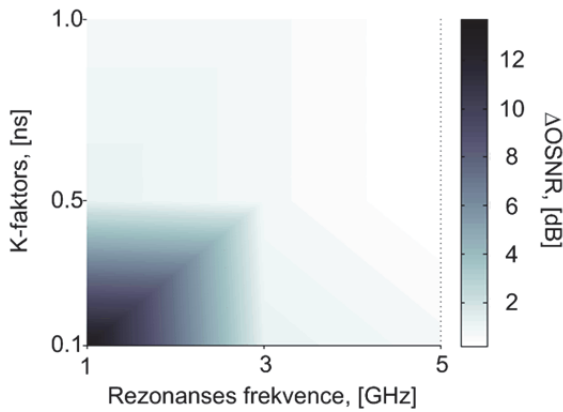
- 3) f_R ir rezonanses frekvence un K-faktors raksturo, cik ātri pieaug absorbcijas koeficienta izmaiņa līdz ar relaksācijas frekvences palielināšanos. Pusvadītāju lāzeru gadījumā K-faktora lielums nav atkarīgs no sliekšņa strāvas lieluma un atrodas robežās no $0.1 - 1 \cdot 10^{-9}$ [s];
- 4) α parametrs nosaka nesējas ierosināto frekvenču trokšņus, kas palielina trokšņa pīķi ap rezonanses frekvenci.



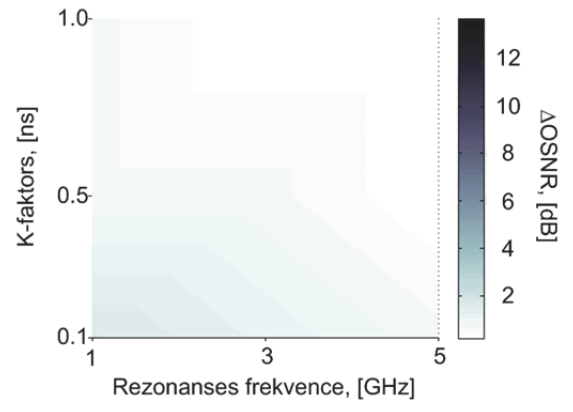
a) 112 Gbit/s DP-QPSK, $\Delta\theta_{int} = 20$ MHz



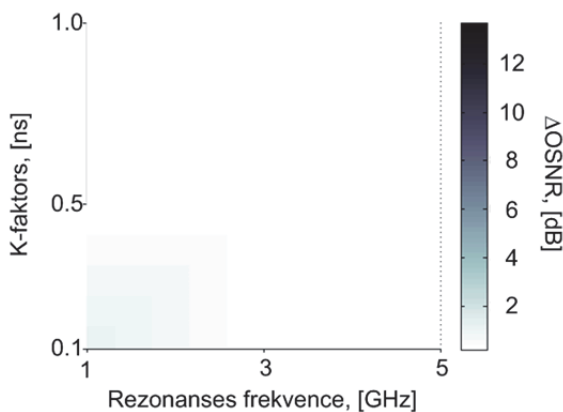
b) 224 Gbit/s DP-QPSK, $\Delta\theta_{int} = 20$ MHz



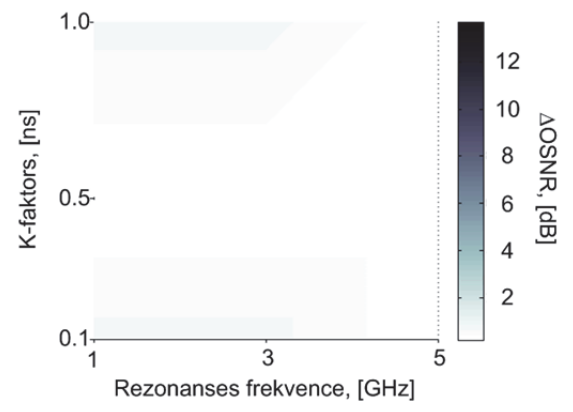
c) 112 Gbit/s DP-QPSK, $\Delta\theta_{int} = 10$ MHz



d) 224 Gbit/s DP-QPSK, $\Delta\theta_{int} = 10$ MHz



e) 112 Gbit/s DP-QPSK, $\Delta\theta_{int} = 1$ MHz

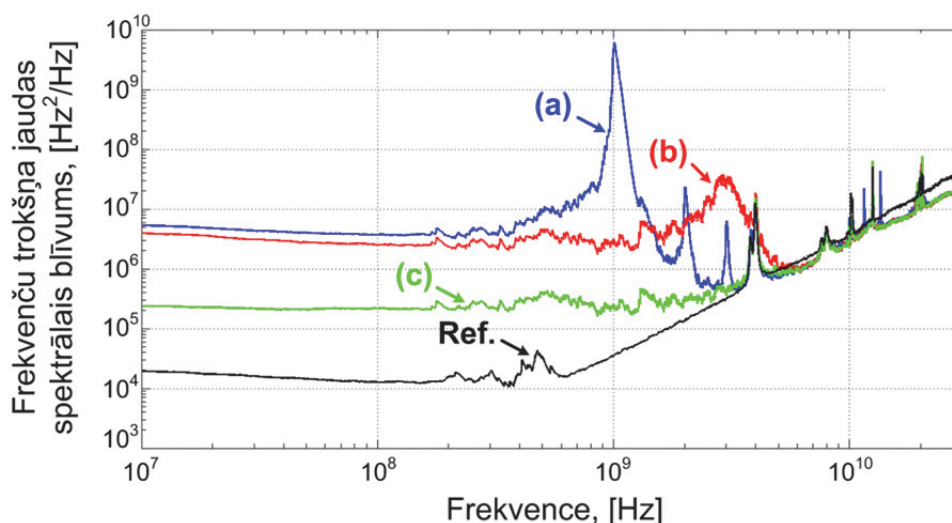


f) 224 Gbit/s DP-QPSK, $\Delta\theta_{int} = 1$ MHz

16. att. Papildu nepieciešamais OSNR līmenis [dB] $2 \cdot 10^{-3}$ BER sliekšņa sasniegšanai 112 Gbit/s un 224 Gbit/s DP-QPSK koherētās pārraides gadījumā pie dažādiem frekvenču trokšņa parametriem

Frekvenču trokšņa ģenerācijai tika izmantots tā vienaspusējs spektrs, kas tika mainīts, variējot ar $HFLW$, K-faktora un rezonanses frekvences vērtībām. Šīs vērtības tika izvēlētas tā,

lai raksturotu visiespējamākos frekvenču trokšņus pārskatāmos pusvadītāju telekomunikāciju lāzeros. Rezultātā izvēlētas vērtības ir: (i) f_R — rezonanses frekvence: 1, 3 un 5 GHz; (ii) K-faktors: 0.1 ns, 0.5 ns un 1 ns; (iii) $HFLW$: 1 MHz, 10 MHz un 20 MHz. Kopumā tika veikta 27 mērījumu sērija pie katra pārraides ātruma (28 Gbaud un 56 Gbaud, kas DP-QPSK modulācijas gadījumā atbilst 112 Gbit/s un 224 Gbit/s). Gadījumā, ja fāzes troksnis nav uzlikts *ECL* izstarojumam, tad nepieciešams 8.8 dB un 11.3 dB *OSNR* līmenis, lai 112 Gbit/s un 224 Gbit/s DP-QPSK gadījumā sasniegtu *BER* sliekšni $2 \cdot 10^{-3}$. Sasniedzot šo sliekšni, tiks pieņemts, ka pārraidīta informācija var tikt atjaunota, izmantojot kļūdu labojošos kodu, skat. [22]. Mērījumu rezultāti ir apkopoti 16. attēlā. Atzīmēsim, ka *OSNR* līmenis abos gadījumos (gan 28 Gbaud, gan 56 Gbaud) tika noteikts 0.2 nm attālumā no signāla pīķa.



17. att. Frekvenču trokšņa jaudas spektrālā blīvuma diagrammas pie a = [1 GHz, 0.1 ns, 20 MHz], b = [3 GHz, 0.5 ns, 10 MHz] un c = [5 GHz, 1 ns, 1 MHz]

Izanalizējot iegūtos mērījumu rezultātus, jāsecina, ka sliktākais gadījums ir a = [1 GHz, 0.1 ns, 20 MHz]. Pie šādiem frekvenču trokšņa parametriem $\Delta OSNR > 13$ dB (skat. 16. (a) un (b) attēlus). Kā labāko parametru kombināciju, varētu izcelt c = [5 GHz, 1 ns, 1 MHz]. Šajā gadījumā $\Delta OSNR$ nav lielāks par 0.2 dB (skat. 16. (e) un (f) attēlus). Vairumā no aplūkotajiem gadījumiem *OSNR* starpība nav lielāka par 0.7 dB. Kā vidējo gadījumu varētu izcelt b = [3 GHz, 0.5 ns, 10 MHz]. Atbilstošās frekvenču trokšņa jaudas spektrālā blīvuma diagrammas ir parādītas 17. attēlā. Tās tika nomērītas, lietojot pētāmā un uztvērēja lāzeru izstarojumu sajaukšanas metodi.

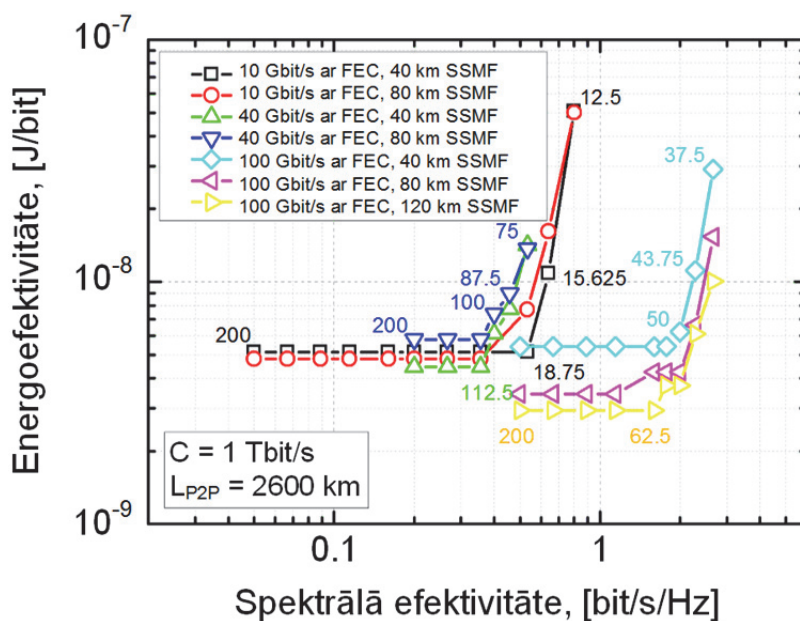
Rezultātā tika noteikts, ka 100 G un pat 200 G DP-QPSK pārraidei var tikt izmantoti pusvadītāju lāzeri, kuriem līnijas platums pie augstām frekvencēm ir vienāds pat ar 20 MHz, ja vien K-faktors un rezonanses frekvence ir lielāki par 0.5 ns un 3 GHz.

Piektā nodaļa

Šī nodaļa veltīta sakarības izpētei starp spektrālo efektivitāti un pārraides energoefektivitāti. Nodaļā ir divas pamatdaļas. Pirmajā tika izpētīta dotā sakarība *WDM* sistēmās, kurās datu pārraidei tiek izmantots viens vienīgs datu pārraides ātrums un modulāciju formāts (t. i., *SLR* arhitektūra). Šīs nodaļas galvenais uzdevums bija noskaidrot, pie kādām spektrālās efektivitātes vērtībām un kādiem *SSMF* posmu garumiem (40 km, 80 km vai 120 km) sistēmas bez kļūdu labojošiem kodiem (*FEC*) nodrošina zemāku enerģiju uz bitu nekā atbilstoši risinājumi ar *FEC*. Otrajā daļā tika izvērtēta pārraides

energoefektivitāte gan SLR, gan MLR sistēmās, kurās datu pārraide notiek ar maksimāli pieļaujamo spektrālo efektivitāti. Vispirms tika noteikts modulācijas formāts, kas ļauj sasniegt vislielāko energoefektivitāti SLR sistēmās. Tad tika izpētīta 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s kanālu izvietojuma shēmu ietekme uz pārraides energoefektivitāti un vidēju spektrālo efektivitāti MLR sistēmās. Visbeidzot savā starpā tika salīdzinātas pārraides energoefektivitātes, ko iegūst spektrāli efektīvo SLR un MLR risinājumu gadījumos.

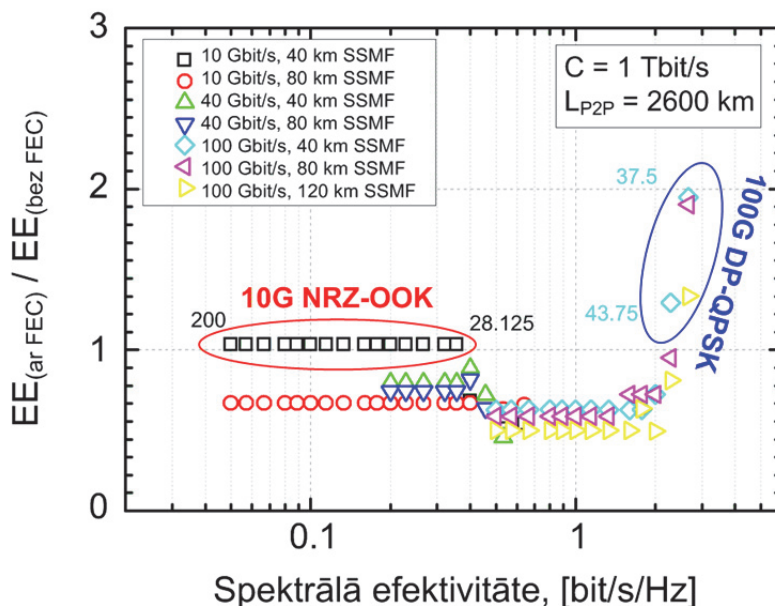
Energoefektivitātes analīzei SLR sistēmās tika iegūtas energoefektivitātes līknes, kas parāda, kā mainās enerģija, kas nepieciešama 1 bita pārraidei, atkarībā no spektrālās efektivitātes. Šīs sakarības analīzei tika izmantoti (i) 10 Gbit/s NRZ-OOK, (ii) 40 Gbit/s NRZ-DPSK un (iii) 100 Gbit/s DP-QPSK modulāciju formāti un trīs standarta vienmodas optiskās šķiedras posmu garumi: 40 km, 80 km un 120 km. Atzīmēsim, ka 120 km garī posmī tika izmantoti tikai 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā, kas ir izskaidrojams ar elektronisko hromatisko dispersijas kompensāciju un signālu pēcapstrādi DSP. Izvērtējot iegūtas energoefektivitātes līknes pie dažādiem pārraidītās informācijas apjomiem un optiskās šķiedras līnijas garumiem, jāsecina, ka 100 Gbit/s DP-QPSK modulācijas formāta izmantošana nodrošina vislabāko spektrālo efektivitāti kombinācijā ar viszemāko jaudas patēriņu, kas nepieciešama šādas pārraides veikšanai (skat. 18. att.). Papildus tam garāku SSMF posmu izmantošana tikai sekmē nepieciešamā jaudas patēriņa samazināšanai. Tikmēr tā tas nav 10 Gbit/s NRZ-OOK un 40 Gbit/s NRZ-DPSK gadījumā, kur SSMF posmu garums jāizvēlas atkarībā no izmantotās spektrālās efektivitātes, pārraidāmā informācijas apjoma un OŠL garuma.



18. att. Pārraides energoefektivitātes atkarība no spektrālās efektivitātes, ja 1 Tbit/s datu plūsma tiek pārraidīta caur 2600 km garu OŠL

Gadījumā, ja pārraidāmais informācijas apjoms ir vairāki simti Gbit/s, bet OŠL garums ir daži simti kilometri, tad no pārraides energoefektivitātes viedokļa nav būtiskas atšķirības, cik garus SSMF posmus izmantot. Pretējā gadījumā jāņem vērā arī spektrālā efektivitāte (jeb starpkanālu intervāls). Ja 10 Gbit/s WDM sistēmās ar FEC viļņa garumu atdalīšanai tiek izmantoti starpkanālu intervāli, kas ir lielāki par 28.125 GHz, tad 80 km garu SSMF posmu izmantošana ļauj ietaupīt 7 % jaudas, kas nepieciešama šāda informācijas apjoma pārraidei. Savukārt, ja izmantotie viļņa garumi tiek sablīvēti krietni ciešāk, piemēram, izmantojot 18.75 GHz vai pat 15.625 GHz frekvenču intervālu, tad nepieciešamais jaudas

patēriņš var tik samazināts vairāk nekā par 30 %, ja 80 km garu *SSMF* posmu vietā tiktu izmantoti 40 km. 40 Gbit/s NRZ-DPSK sistēmās ar *FEC* tieši 40 km gari *SSMF* posmi nodrošina lielāku energoefektivitāti nekā atbilstošais risinājums ar 80 km *SSMF* posmiem. Ja tiek izmantots starpkanālu intervāls, kas ir lielāks par 112.5 GHz, tad enerģijas ietaupījums ir 20 % uz katru pārraidītu bitu. Savukārt mazākā intervāla gadījumā atšķirības starp 40 km un 80 km *SSMF* gadījumiem samazinās un pilnībā pazūd pie minimāli pieļaujamā starpkanālu intervālā (75 GHz).

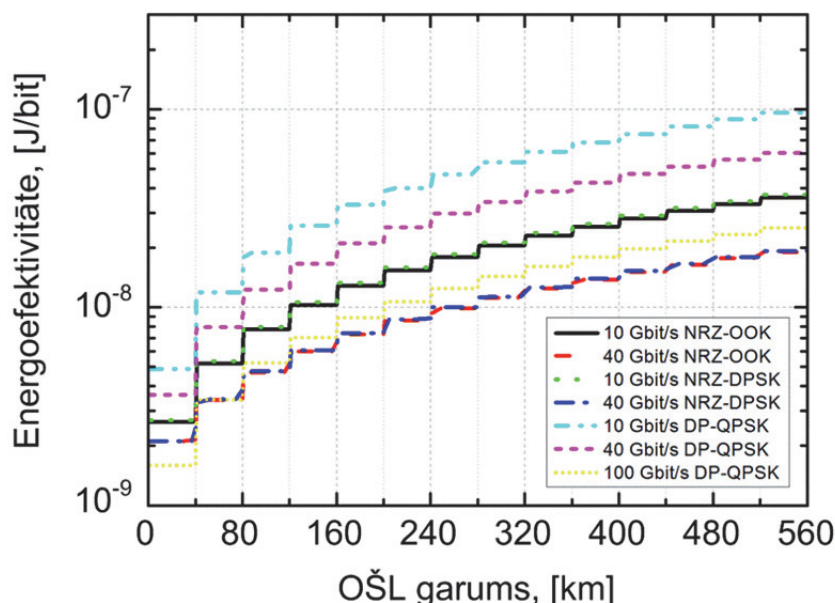


19. att. Attiecība starp pārraides energoefektivitātēm *WDM* sistēmās, kurās tiek un netiek izmantots *FEC*, ja $C = 1$ Tbit/s un $L_{P2P} = 2600$ km

Izvērtējot gadījumus, kad energoefektīvāk ir izmantot pārraides sistēmas bez *FEC*, jāsecina, ka *FEC* neizmantošana ļauj būtiski samazināt enerģiju, kas nepieciešama 1 bita pārraidei, tikai tajās *WDM* sistēmās, kurās tiek izmantots 100 Gbit/s DP-QPSK modulācijas formāts un spektrālā efektivitāte tuvojās vai vienāda ar maksimāli pieļaujamo. Jo biežāk ir jāveic optiskā signālā *3R* reģenerācija, jo lielāks ir enerģijas ietaupījums. Piemēram, tas sasniedz pat 50 %, ja $C = 1$ Tbit/s un $L_{P2P} = 2600$ km (skat. 19. att.). Dažos *SE*, C un L_{P2P} parametru kombinācijas gadījumos arī 10 Gbit/s NRZ-OOK un 40 Gbit/s NRZ-DPSK sistēmas bez *FEC* ir energoefektīvākas nekā sistēmas ar *FEC*, bet iegūtā atšķirība energoefektivitātē nav lielāka par 3–7 %, ko var uzskatīt par maznozīmīgu.

Novērtējot pārraides energoefektivitāti spektrāli efektīvās *SLR* sistēmās, jāsecina, ka vismazāko enerģiju uz bitu nodrošina tieši 40 Gbit/s nekoherentie risinājumi. Darbā tika izpētīti divi šādi risinājumi: 40 Gbit/s NRZ-OOK un 40 Gbit/s NRZ-DPSK. Starpība starp tiem ir nenožīmīga, un var uzskatīt, ka energoefektivitātes ziņā nav starpības, kuru no šiem diviem variantiem izmantot optisko signālu modulācijai. Spektrāli efektīvajās *WDM* sistēmās signāla *3R* atjaunošana jāveic pietiekami bieži, un tā rezultātā kopējo jaudas patēriņu, kas nepieciešams 1 bit/s pārraidei, noteiks galvenokārt *3R* reģeneratori. Vismazāko enerģiju, kas nepieciešama 1 bita reģenerācijai, nodrošina tieši 40 Gbit/s NRZ-OOK un NRZ-DPSK *3R* reģeneratori, savukārt visenergoefektīvākais no apskatītajiem retranslatoriem ir 100 Gbit/s DP-QPSK retranslator. Rezultātā 40 Gbit/s NRZ-DPSK modulācijas formāta izmantošana 100 Gbit/s DP-QPSK vietā ļauj ietaupīt ap 25 % no enerģijas, kas nepieciešama 1 bita pārraidei spektrāli efektīvajā *SLR* sistēmā, kuras OŠL garums ir vienāds ar 527 km (skat.

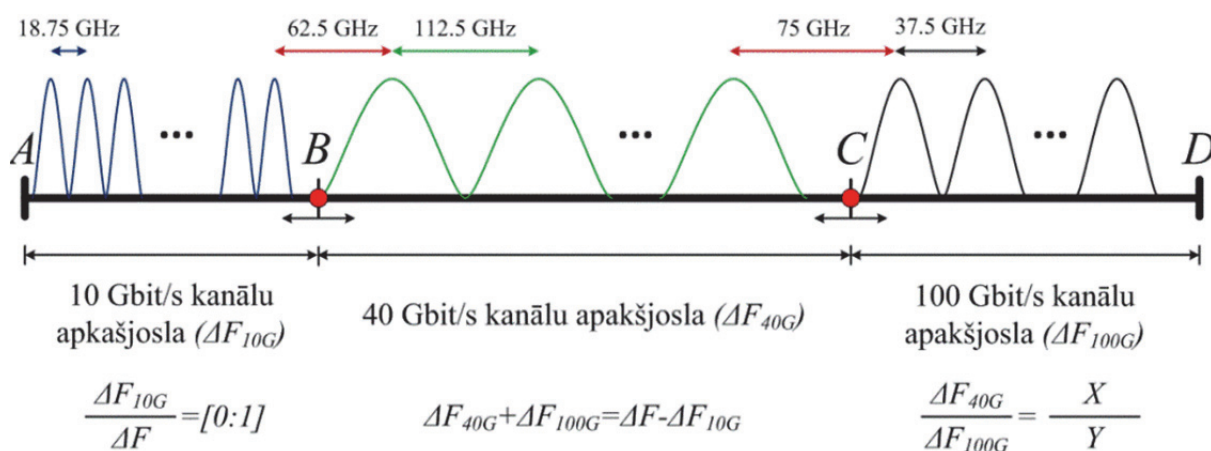
20. att.). Palielinoties pārraides attālumam (OŠL garumam), enerģijas ietaupījumi arī pieaug. Piemēram, tie sasniedz jau 33 % pie $L_{P2P} = 1000$ km.



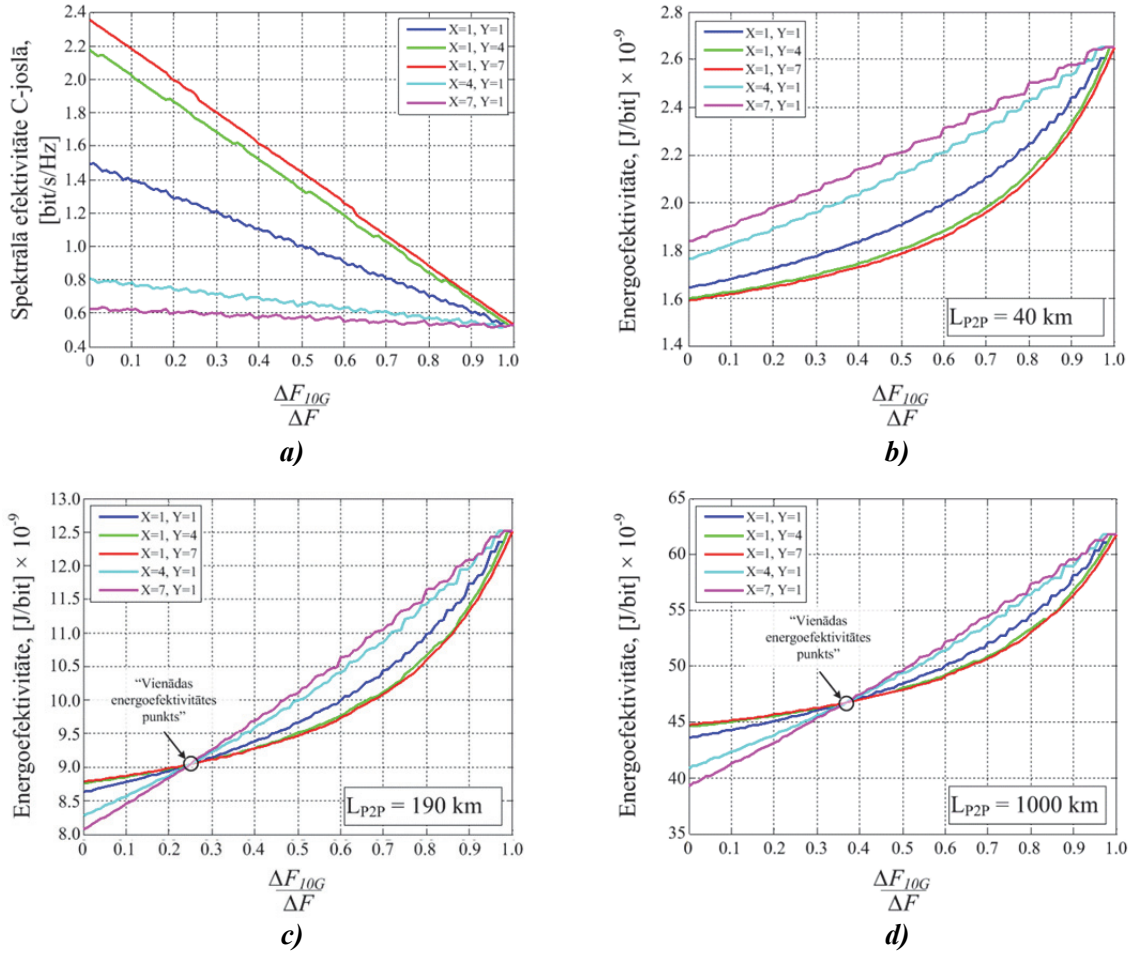
20. att. Pārraides energoefektivitātes izmaiņa atkarībā no OŠL garuma spektrāli efektīvajās SLR sistēmās ($L_{max} = L_{SSMF}$)

Pārraides energoefektivitāte kombinēta datu pārraides (MLR) WDM sistēmās būs atkarīga arī no izmantotas kanālu izvietojanas shēmas. Šajā darbā 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, 100 Gbit/s viļņa garumi tika izvietoti speciāli izdalītajās apakšjoslās (skat. 21. att.). Katras apakšjoslas platums var tikt mainīts patvaļīgi vai atkarībā no izmantotā sadalījuma starp 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s kanāliem. Apakšjoslu atdalīšanai tiek izmantotas iepriekš noteiktas aizsargjoslas, savukārt kanālu atdalīšanai vienā apakšjoslā var tikt izmantoti arī iepriekš noteiktie minimāli pieļaujamie starpkanālu intervāli. Apakšjoslu platumi, aizsargjoslas platums un izmantotie starpkanālu intervāli arī noteiks kanālu skaitu, kas savukārt lielā mērā noteiks arī visas pārraides energoefektivitāti.

Kopējais frekvenču joslas platums (ΔF)



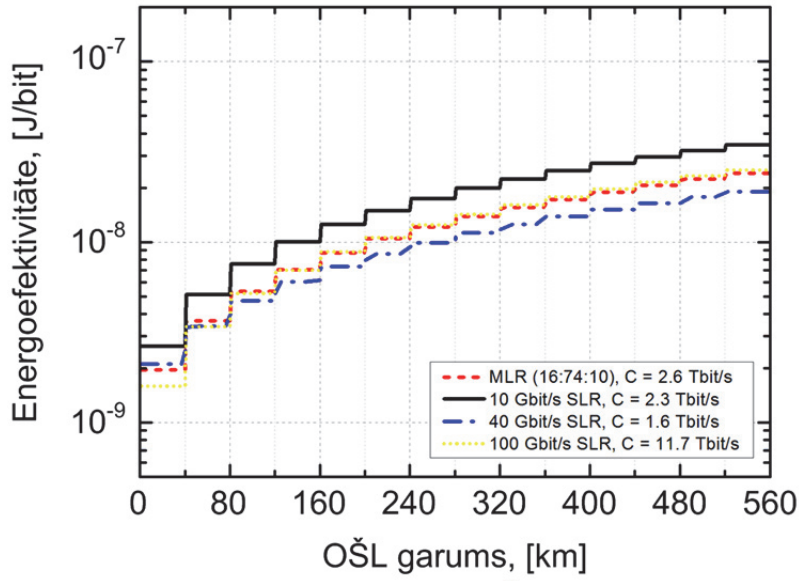
21. att. Kanālu izvietojums pārraides pieejamā frekvenču joslā 10–40–100 Gbit/s MLR sistēmas gadījumā



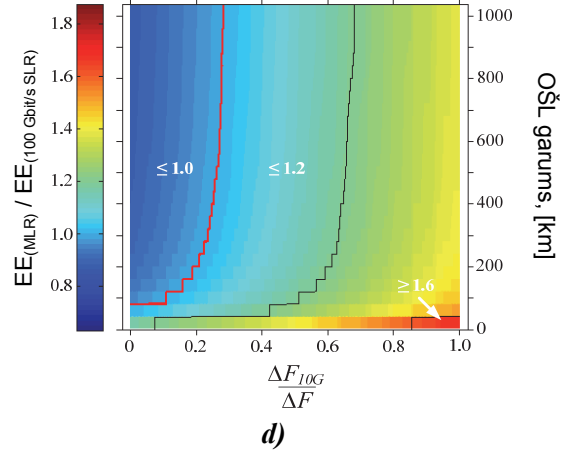
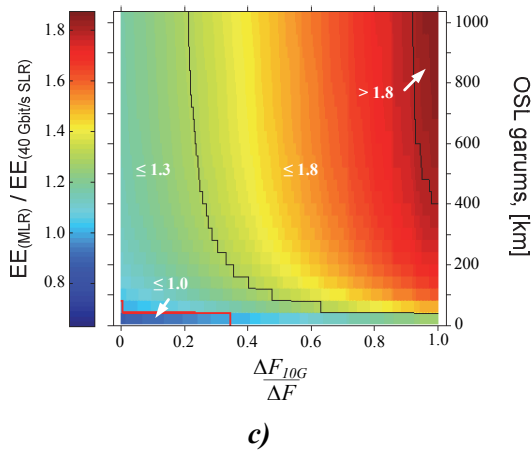
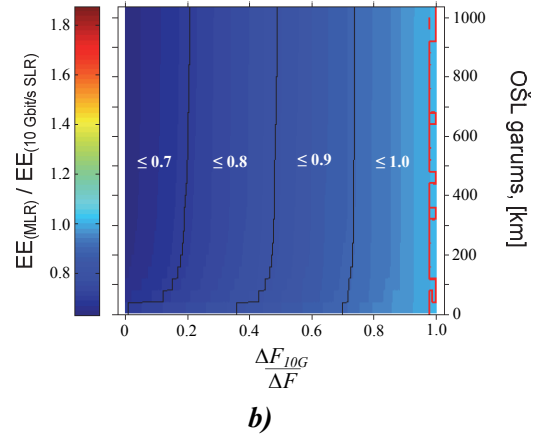
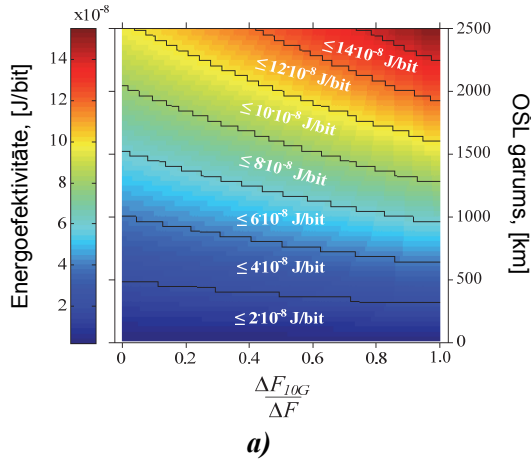
22. att. Spektrālā efektivitāte C joslā (a) un pārraides energoefektivitāte atkarībā no apakšjoslu platuma un OŠL garuma: (b) $L_{P2P} = 40$ km, (c) $L_{P2P} = 190$ km un (d) $L_{P2P} = 1000$ km

Izanalizējot 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, 100 Gbit/s kanālu izvietojšanās shēmas, jāsecina, ka eksistē tā sauktais «vienādas energoefektivitātes punkts» (skat. 22. att.). Šajā punktā pārraides energoefektivitāte ir vienāda visiem apskatītajiem *MLR* risinājumiem, t. i., nav atkarīga no frekvenču josla sadalījuma starp 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s viļņu garuma. Tā atrašanās vieta ir atkarīga tikai un vienīgi no OŠL garuma un attiecības starp retranslatoru un $3R$ reģeneratoru jaudas patēriņu vērtībām. Apskatītajās frekvenču joslas sadalījuma shēmās šis punkts tiek iegūts, ja 10 Gbit/s NRZ-OOK kanāli neaizņem vairāk kā 40 % no kopējas frekvenču joslas. Jāatzīmē, ka pietiekami īsā pārraides attālumā ($L_{P2P} \leq 200$ km) lielākā platuma piešķiršana 100 Gbit/s DP-QPSK apakšjoslai var tikt izmantota gan energoefektivitātes, gan vidējās spektrālās efektivitātes palielināšanai *MLR* sistēmā. Savukārt krietni lielākā pārraides attālumā jāpalielina 40 Gbit/s NRZ-DPSK kanāliem atvēlētā apakšjosla, lai samazinātu enerģiju, kas nepieciešama 1 bita pārraidei.

Ja apakšjoslu platumu noteikšanai tiek izmantots sadalījums starp 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s pieprasījumiem, ko apraksta 50:35:15 attiecība, tad pārraides energoefektivitāte šādā spektrāli efektīvajā *MLR* sistēmā ir: (i) augstākā nekā 10 Gbit/s un 100 Gbit/s *SLR* risinājumiem, ja pārraides attālums ir lielāks par 200 km ($L_{P2P} > 200$ km); (ii) identiskā 100 Gbit/s *SLR* risinājumiem, ja $120 \leq L_{P2P} \leq 200$ km; (iii) zemākā nekā 100 Gbit/s *SLR* risinājumam, ja $L_{P2P} < 120$ km. Savukārt 40 Gbit/s NRZ-DPSK *SLR* risinājums spēj nodrošināt energoefektīvāku pārraidi nekā šāda *MLR*, ja pārraides attālums nav ierobežots ar vienu *SSMF* posmu (skat. 23. att.).



23. att. Pārraidē energoefektivitāte atkarībā no OŠL garuma spektrāli efektīvajās *SLR* un *MLR* ($\Delta F_{10G} = 16\%$, $\Delta F_{40G} = 74\%$ un $\Delta F_{100G} = 10\%$) sistēmās ar viļņgarumdaļes blīvēšanu



24. att. Pārraidē energoefektivitāte spektrāli efektīvajā 10–40–100 Gbit/s *MLR* ($X = 7$, $Y = 1$) sistēmā (a) un attiecība starp energoefektivitātēm *MLR* un (b) 10 Gbit/s, (c) 40 Gbit/s, (d) 100 Gbit/s *SLR* sistēmās atkarībā no OŠL garuma un 10 Gbit/s NRZ-OOK kanāliem atvēlētās joslas platuma

Papildus tam energoefektivitāte *MLR* sistēmā tika salīdzināta ar energoefektivitāti, ko iegūst *SLR* gadījumā. Šis salīdzinājums tika veikts pie dažāda apakšjoslu platuma, ko atvel 10 Gbit/s kanāliem 10–40–100 Gbit/s *MLR* sistēmā, kurā $\Delta F_{40G} = 7 \cdot \Delta F_{100G}$ (skat. 24. att.). Izanalizējot iegūtos rezultātus, tika secināts, ka: (i) zemāku enerģiju 1 bita pārraidei nespēj nodrošināt 10 Gbit/s *SLR* risinājums, ja *MLR* sistēmā 10 Gbit/s NRZ-OOK kanāliem atvēlētais joslas platums nav lielāks par 80 % no kopējā frekvenču joslas platuma; (ii) 40 Gbit/s *SLR* risinājums nodrošina mazāku enerģiju uz bitu nekā šāds *MLR* risinājums, ja vien OŠL garums nav ierobežots ar vienu *SSMF* posma garumu un 10 Gbit/s NRZ-OOK kanāliem *MLR* sistēmā nav atvēlēts vairāk kā 35 % no kopējas frekvenču joslas; (iii) mazāku enerģiju uz bitu nodrošina šāds *MLR* risinājums nekā 100 Gbit/s *SLR*, ja vien OŠL garums nav ierobežots ar dažiem *SSMF* posmiem un 10 Gbit/s NRZ-OOK kanāli neaizņem vairāk kā 25 % no frekvenču joslas. Pretējā gadījumā 100 Gbit/s *SLR* izmantošana ļauj samazināt enerģiju, kas nepieciešama 1 bita pārraidei, līdz pat 70 %, salīdzinot ar apskatīto *MLR* sistēmu.

Tādējādi pārraides energoefektivitāte kombinēta datu pārraides ātruma viļņgarumdales blīvētajās šķiedru optikas pārraides sistēmā ir atkarīga ne tikai no informācijas apjoma, kas jāpārveda noteiktā attālumā, bet arī no šim nolūkam izmantotu 10 Gbit/s, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s kanālu skaita. Tieši šis kanālu skaits, OŠL garums un *3R* reģenerācijas mezglu skaits noteiks to, vai dotā kombinēta *WDM* sistēma energoefektivitātes ziņā pārspēs kādu no iespējamajiem *SLR* risinājumiem vai nē.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Izpildot pirmās nodaļas beigās definētos uzdevumus, tika iegūti promocijas darba galvenie rezultāti un secinājumi.

1. Darbā izstrādātais uzlabotais *DWDM* režģis var tikt izmantots spektrālās efektivitātes palielināšanai ŠOPS, saglabājot iepriekšējos optiskos viļņa garumu filtrus. Eksperimentāli tika noteikts, ka 10 Gbit/s NRZ-OOK modulētu viļņu garumu atdalīšanai pie 50 GHz starpkanālu intervāla ar tikt izmantoti *AWG* optiskie filtri ar 58 GHz caurlaides joslas platums — 3 dB līmenī un 130 GHz — 20 līmenī, kas pēc ražotāju datiem paredzēti izmantošanai pie 100 GHz starpkanālu intervāla. Šajā gadījumā uztverto signālu kvalitāte neatbilst $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$ tikai, ja pārraides kanāli tiek sablīvēti, izmantojot starpkanālu intervālus mazāku par 37.5 GHz. Jāatzīmē, ka signālu kvalitāti uztverošā mezglā galvenokārt noteiks lineārie šķērstraucējumi no blakus izvietotiem pārraides kanāliem (viļņu garumiem).
2. Viļņgarumdales blīvētās ŠOPS, kurās kanālu atdalīšanai tiek izmantots darbā izstrādātais uzlabotais *DWDM* režģis, tiek iegūtas maksimāli pieļaujamā spektrālā efektivitātes pie noteiktās signālu kvalitātes $BER \leq 2 \cdot 10^{-3}$, ja 10 Gbit/s NRZ-OOK, 40 Gbit/s NRZ-DPSK un 100 Gbit/s DP-QPSK modulācijas formātu gadījumos sistēmās ar *FEC* tiek izmantoti 12.5 GHz, 75 GHz un 37.5 GHz starpkanālu intervāli. Sistēmās bez *FEC* un $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$ signālu kvalitātes prasības šie starpkanālu intervāli ir 15.625 GHz, 87.5 GHz un 37.5 GHz.
3. Frekvenču joslas spektrālā efektivitāte var tikt palielināta līdz pat divām reizēm, ja kanālu atdalīšanai kombinēta pārraides ātruma viļņgarumdales blīvētos ŠOPS fiksētā *DWDM* režģa vietā tiek izmantoti nevienmērīgi frekvenču intervāli, kas balstās uz modificētu ITU-T rekomendāciju fiksētajam *DWDM* režģim. Spektrālās efektivitātes palielinājums ir atkarīgs no sistēmas sākotnējās konfigurācijas, kas ietver datu pārraides ātrumu un modulācijas formātu atšķirīgos kanālos (viļņa garumos).
4. Ar izstrādātiem 10 Gbit/s NRZ-OOK, 40 Gbit/s NRZ-DPSK un 100 Gbit/s pārraides modeļiem, kas balstās uz Q-faktora vērtībām pēc pārraides vienā OŠL posma un kas ņem

vērā ASE trokšņus no optiskiem līnijas pastiprinātājiem, tika noteikts, ka WDM sistēmas konfigurācija, kurā tiek izmantots FEC un OŠL sastāv no 40 km garas SSMF, nodrošina vislielāko pārraides attālumu tieši nekoherento modulācijas formātu gadījumā. Savukārt 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā jāizmanto 80 km vai pat 120 km gari SSMF posmi, kas palielina optiski sasniedzamību par vairāk nekā 30 %.

5. Pārraides kvalitāte koherento modulācijas formātu gadījumā ir atkarīga ne tikai no raidītāja pusē izmantotā lāzera izstarojuma līnijas platuma lieluma, bet arī no tā rādītā frekvenču trokšņa spektra formas, ko nosaka tādi parametri kā rezonanses frekvence, K-faktors un līnijas platums pie augstām frekvencēm (HFLW). Ātrdarbīgākās ŠOPS, kurās optisko signālu modulācijai tiek izmantots DP-QPSK formāts, ir noturīgākas pret raidītāja lāzeravota frekvenču trokšņiem nekā atbilstošais risinājums ar mazāko simbolu pārraides ātrumu.
6. Nekoherentu modulācijas formātu (piem., NRZ-OOK un NRZ-DPSK) izmantošana pie 40 Gbit/s bitu pārraides ātruma ļauj ietaupīt līdz pat 33 % enerģijas, kas būtu nepieciešama 1 bita pārraidei 100 Gbit/s DP-QPSK gadījumā, ja OŠL garums ir vienāds ar 1000 km, bet 3R reģenerācijas iecirkņa garums spektrālās efektivitātes dēļ ir ierobežots ar vienu 40 km garu standarta vienmodas optisko šķiedras posmu. Savukārt, ja 3R reģenerācijas iecirkņa garums ir krietni lielāks nekā izmantotais standarta vienmodas optiskās šķiedras posms, tad 100 Gbit/s DP-QPSK nodrošina vislabāko spektrālo efektivitāti ($\gg 1$ bit/s/HZ) kombinācijā ar viszemāko jaudas patēriņu, kas nepieciešams 1 bita pārraidei OŠL.
7. Neatkarīgi no izmantotā kombinēta 10-40-100 Gbit/s pārraides ātruma viļņgarumdales blīvēšanas ŠOPS konfigurācijas eksistē «vienādas energoefektivitātes punkts», kuru nosaka pārraidei izmantojamo 10 Gbit/s NRZ-OOK kanālu skaits, 40 Gbit/s un 100 Gbit/s retranslatoru un 3R reģeneratoru energoefektivitāte un optisko šķiedru līnijas garums, kurā pēc pārraides jānodrošina noteiktā kvalitāte signālu uztveršanai (piem., $BER \leq 1 \cdot 10^{-9}$).

Nobeigumā jāuzsver, ka šajā promocijas darbā iegūtie rezultāti var tikt izmantoti spektrālās efektivitātes un pārraides energoefektivitātes palielināšanai gan komerciāli izmantojamās, gan patlaban projektējamās viļņgarumdales blīvētos šķiedru optiskos tīklos.

Pētījumu gaitā tika iegūti un sagatavoti vairāki patenti. Izstrādāta Latvijā patentēta mērījumu shēma viļņa garuma filtru efektīvās caurlaides joslas noteikšanai (Latvijas patenta numurs 14557) un patentēts spektrāli efektīvās viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas prototips (Latvijas patenta numurs 14546), kurā polarizācijas modulators, tiek izmantots viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas otrajā kanālā, kas nodrošina datu pārraides ātruma palielināšanu otrajā un trešajā kanāla līdz 40 Gbit/s ar frekvenču intervālu starp blakus esošajiem kanāliem ne mazāku kā 0.6 nm jeb 75 GHz un palielina viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas spektrālo efektivitāti līdz 0.40 bit/s/HZ. Iesniegts arī Latvija patenta pieteikums (P-12-15) par kombinēta pārraides ātruma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmu, kas ļauj palielināt frekvenču joslas spektrālo efektivitāti, saglabājot vai pat uzlabojot pārraides energoefektivitāti.

Jāuzsver, ka sadarbībā ar Karalisko Tehnoloģijas institūtu (KTH) Optisko tīklu laboratoriju (ONLab) tika iegūts Zviedru institūta (SI) Visbija programmas grants, saistībā ar kuru tiek realizēts zinātniskās pētniecības projekts «Green 3R Placement Strategies for WDM Networks with Mixed-Line-Rate».

LITERATŪRA

- [1] Bertran-Pardo O., Renaudier J., Charlet G., Tran P., Mardoyan H., Salsi M., Bertolini M., Bigo S. Insertion of 100Gb/s coherent PDM-QPSK channels over legacy optical networks relying on low chromatic dispersion fibres// IEEE Global

- Telecommunications Conference (GLOBECOM). — Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2009. — pp. 1–6.
- [2] Birks M., Mikkelsen B. 40 Gbit/s upgrades on existing 10 Gbit/s transport infrastructure// Proceedings of SPIE, Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking IV. — 2005. — Vol. 6012, No. 60120D.
 - [3] Bissessur H., Hugbart A., Ruggeri S., Bastide C. 40G over 10G infrastructure — dispersion management issues// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC'05). — Anaheim, California, USA: IEEE, 2005. — Vol. 5, OFF5.
 - [4] Bosco G., Curri V., Carena A., Poggiolini P., Forghieri F. On the performance of Nyquist-WDM terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers// Journal of Lightwave Technology. — 2011. — Vol. 29, No. 1. — pp. 53–61.
 - [5] Cartaxo A. V. T. Cross-phase modulation in intensity-modulation direct detection WDM systems with multiple optical amplifiers and dispersion compensators// Journal of Lightwave Technology. — 1999. — Vol. 17, No. 2. — pp. 178–190.
 - [6] Chandrasekhar S., Liu X. Impact of channel plan and dispersion map on hybrid DWDM transmission of 42.7-Gb/s DQPSK and 10.7-Gb/s OOK on 50-GHz grid// IEEE Photonic Technology Letters, — 2007. — Vol. 19, No. 22. — pp. 1801–1803.
 - [7] Cisco Systems Inc. Cisco visual networking index: forecast and methodology 2013–2018 // White paper. — 2014. — pp. 1–14.
 - [8] Cisco Systems Inc. Cisco visual networking index: forecast and methodology 2012–2017// White paper. — 2013. — pp. 1–10.
 - [9] Civcom Devices&Systems Ltd. 100G DP-(D)QPSK coherent tunable transponder// Datasheet. — DOC-11-901-00, 2014.
 - [10] Elluis A. D., Gunning F. C. G. Coherent WDM, towards >1 bit/s/Hz information spectral density// Proceedings of SPIE. — 2005. — Vol. 5828 — pp. 482–490.
 - [11] Fujitsu Network Communications Inc. Beyond 100G // White paper. — Richardson, Texas, USA, 2012. — pp. 1–5.
 - [12] Gosselin S., Joindot M. Key drivers and technologies for future optical networks// European Conference on Optical Communications (ECOC'06). — 2006. — Tutorial We2.2.1.
 - [13] Heddeghem W. V., Izdikowski F., Vereecken W., Colle D., Pickavet M., Demester P. Power consumption modeling in optical multilayer networks// Journal of Photonic Network Communications. — 2012. — Vol. 24. — pp. 86–102.
 - [14] Heddeghem W. V., Izdikowski F., Vereecken W., Colle D., Pickavet M., Demester P. Equipment power consumption in optical multilayer networks — source data// Journal of Photonic Network Communications. — 2012. — Vol. 24. — pp. 1–28.
 - [15] ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid// Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. — 2012.
 - [16] Klein T. E. Next-generation energy efficient networks// Overview of the GreenTouch Consortium. — 34 p.
 - [17] Lebel E. Get excited about 100G// Lighthwaveonline, LiveWebcast. — August 25, 2011.
 - [18] Miyamoto Y. Ultra High Capacity Transmission for Optical Transport Networks// Proceeding of the Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC'11). — Las Angeles, California, USA, 2011. — Paper OThX4.
 - [19] Morea A., Spadaro S., Rival O., Perello J., Agraz F., Verchere D. Power management of optoelectronic interfaces for dynamic optical networks// Proceedings of European

- Conference on Communication (ECOC'11). — Geneva, Switzerland, 2011. — Paper We.8.K.3.pdf. — pp. 1–3.
- [20] Mukherjee B. Optical WDM networks. — Berlin, Germany: Springer, 2006. — 953 p.
 - [21] Nag A., Tornatore M., Mukherjee B. Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats// *Journal of Lightwave Technology*. — 2010. — Vol. 28, No. 4. — pp. 466–475.
 - [22] Olmedo M., Pang X., Udalcovs A., Schtaz R., Zibar D., Jacobsen G., Popov S., Monroy I. Impact of carrier induced frequency noise from the transmitter laser on 28 and 56 Gbaud DP-QPSK metro links// *Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. — Shanghai, China: OSA, 2014. — Paper ATTh1E. — pp. 1–3.
 - [23] Pachnicke S., Paschenda T., Krummrich P. Assessment of a constraint-based routing algorithm for translucent 10 Gbit/s DWDM networks considering fiber nonlinearities// *Journal of Optical Networking*. — 2008. — Vol. 7, No. 4. — pp. 365–377.
 - [24] Palkopoulou E., Schupke D. A., Bauschert T. Energy efficiency and CAPEX minimization for backbone network planning: is there a tradeoff?// *3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*. — New Delhi, India: IEEE, 2009. — pp. 1–3.
 - [25] Pattavina A. Architectures and performance of optical packet switching nodes for IP networks// *Journal of Lightwave Technology*. — March 2003. — Vol. 23, No. 3. — pp. 1023–1032.
 - [26] Rizzelli G., Morea A., Tornatore M., Rival O. Energy efficient traffic-aware design of on-off multi-layer translucent optical network// *Journal of Computer Networks*. — 2012. — Vol. 56, No. 10. — pp. 2443–2455.
 - [27] Sano A., Masuda H., Kobayashi T., Fujiwara M., Horikoshi K., Yoshida E., Miyamoto Y., Matsui M., Mizoguchi M., Yamazaki H., Sakamaki Y., Ishii H. Ultra-High Capacity WDM Transmission Using Spectrally-Efficient PDM 16-QAM Modulation and C- and Extended L-Band Wideband Optical Amplification// *Journal of Lightwave Technology*. — 2011. — Vol. 29, No. 4. — pp. 578–586.
 - [28] Tucker R. S. Green optical communications — Part I: energy limitations in transport// *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2011. — Vol. 17, No. 2. — pp. 245–260.
 - [29] Udalcovs A., Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of differently modulated optical signals transmission in HDWDM systems// *Journal of Computer Technology and Applications*. — New York: David Publishing Company, — 2011. — Vol. 2, No. 10 — pp. 801–812.
 - [30] Velasco L., Jirattigalachote A., Ruiz M., Monti P., Wosinska L., Junyent G. Statistical approach for fast impairment-aware provisioning in dynamic all-optical networks// *Journal on Optical Communications and Networking*. — 2012. — Vol. 4, No. 2. — pp. 130–141.
 - [31] Vizcaino J. L., Ye Y., Monroy I. T. Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks// *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*. — 2012. — Vol. 56, No. 10 — pp. 2400–2419.
 - [32] Vizcaino J. L., Ye Y., Monroy I. T. Energy efficiency in elastic-bandwidth optical networks// *Proceedings of International Conference on the Network of the Future (NoF)*. — France, Paris: IEEE, 2011. — pp. 107–111.
 - [33] Wietfeld A. C. Modeling, simulation and analysis of optical time division multiplexing transmission systems// *Doctoral thesis*. — 2004. — 187 p.
 - [34] Xie W., Zhu Y., Jue J. P. Energy-efficient impairment-constrained 3R regenerator placement in optical networks// *Proceeding of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC)*. — Ottawa, Canada: IEEE, 2012. — pp. 3020–3024.

- [35] Zhang F. XPM Statistics in 100% Precompensated WDM Transmission for OOK and DPSK Formats// IEEE Photonics Technology Letters. — 2009. — Vol. 21, No. 22. — pp. 365–377.
- [36] Zhu Z, Chen X., Ji F., Zhang L., Farahmand F., Jue J. P. Energy-efficient translucent optical transport networks with mixed regenerator placement// Journal of Lightwave Technology. — 2012. — Vol. 30, No. 19. — pp. 3147–3156.
- [37] Zhu Z. Mixed placement of 1R/2R/3R regenerators in translucent optical networks to achieve green and cost-effective design// IEEE Communications Letters, — 2011. — Vol. 15, No. 7. — pp. 752–754.
- [38] ADVA: FSP 3000 coherent transponders, fact sheet (2012) / Internets. — <http://www.advaoptical.com/~media/Innovation/Efficient%20100G%20Transport/100G%20Coherent%20Transponder.ashx>
- [39] Ciena: F10-T 10G transponder, datasheet (2011) / Internets. — <http://www.ciena.com/products/f10-t/tab/features/>
- [40] GreenTouch: ICT industry combats climate change / Internets. — <http://www.greentouch.org/index.php?page=how-the-ict-industries-can-help-the-world-combat-climate-change>
- [41] ITU: ICTs and climate change / Internets. — <http://www.itu.int/en/action/climate/Pages/default.aspx>
- [42] Kikuchi K. Characterization of semiconductor-laser phase noise and estimation of bit-error rate performance with low-speed offline digital coherent receivers / Internets. — <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22418335>
- [43] MRV: LambdaDriver — DWDM 40Gbps transponder (TM-40GT8, 2011) / Internets. — Available: http://www.mrv.com/datasheets/LD/PDF300/MRV-LD-TM-40GT8_HI.pdf
- [44] SHF 46211A: 10 Gbps multifunction optical transceiver, datasheet (2013) / Internets. — http://www.shf.de/fileadmin/download/46210/datasheet_shf_46211a_v001.pdf