



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

Toms Salgals

# SPEKTRĀLI EFEKTĪVU HIBRĪDU OPTISKO SAKARU SISTĒMU IZVEIDE UN NOVĒRTĒJUMS

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība  
Rīga 2022

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte  
Telekomunikāciju institūts

**Toms Salgals**

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

**SPEKTRĀLI EFEKTĪVU HIBRĪDU OPTISKO  
SAKARU SISTĒMU IZVEIDE UN NOVĒRTĒJUMS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Zinātniskie vadītāji:**

profesors *Dr. sc. ing.* SANDIS SPOLĪTIS,  
asociētais profesors *Dr. sc. ing.* OSKARS OZOLIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Salgals T. Spektrāli efektīvu hibrīdu optisko sakaru sistēmu izveide un novērtējums. Promocijas darba kopsavilkums.  
Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes  
“RTU P-08” 2022. gada 3. maija lēmumu,  
protokols Nr. 12.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas «Izaugsme un nodarbinātība» 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa «Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās» projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 «Rīgas Tehniskās universitātes un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās».

Pētījums tapis ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu.

**NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020**



**EIROPAS SAVIENĪBA**  
Eiropas Sociālais  
fonds

---

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

<https://doi.org/10.7250/9789934228049>

ISBN 978-9934-22-804-9 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 9. septembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Rīgā, Ārnes ielā 12, 201. auditorijā.

## OFICIĀLE RECEKSENTI

Profesors *Dr.sc.ing. Jaime Rodrigo Navarro*,  
*Casa Systems, Inc.*, Spānija

Profesors *Dr. sc. ing. Giuseppe Rizzelli*,  
*Politecnico di Torino*, Itālija

Profesors *Dr. sc. ing. Dmitrijs Pikuļins*,  
*Rīgas Tehniskā universitāte*

## APSTIPRINĀUMS

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

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tajā izmantotas 13 no 26 autora zinātniskajām publikācijām. Publikācijas uzrakstītas angļuvalodā un indeksētas *SCOPUS*, *IEEE* un *WoS* datubāzē, to kopējais apjoms ir 246 lpp.

## PATEICĪBA

Liels paldies visiem, kas sniedza ieguldījumu šī darba tapšanā – gan tiem, kas bija tieši iesaistīti kā kolēģi, darba vadītāji vai līdzautori, gan ģimenei un tiem, kas sniedza palīdzību un atbalstu iespējamām un neiespējamām jaunām idejām!

Īpaši pateicos saviem vadītājiem profesoram Sandim Spolītim par zināšanām un prasmēm, zinātnisko atbalstu, kas vienmēr rezultējās ar daudzām laboratorijā pavadītām stundām, asociētajam profesoram Oskaram Ozoliņam par jaunu iespēju parādīšanu un nodrošināšanu, kā arī Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes Telekomunikāciju institūta direktoram profesoram Vjačeslavam Bobrovam par uzticēšanos, ticību un atbalstu visu šo gadu garumā un profesionālo vadību.

Paldies visiem kolēģiem un līdzautoriem! Man bija un ir gods un prieks strādāt ar jums, jo īpaši tiem, kuri ir kļuvuši par draugiem, vienmēr atbalstīs un par spīti visam būs gatavi virzīties uz priekšu, lai sasniegtu jaunas neaptveramas kalnu virsotnes – augstākas par Everestu.

Visbeidzot, vislielākais paldies manai ģimenei un draugiem par ikdienas atbalstu un ticību maniem spēkiem!

Paldies!

Toms Salgals

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

\* Skaitliskie sākuma saīsinājumi

**3G** – trešās paaudzes mobilie sakari  
**4G** – ceturtais paaudzes mobilie sakari  
**5G** – piektās paaudzes mobilie sakari  
**AEQ** – adaptīvā ekvalizācija  
**AON** – aktīvs optiskais tīkls  
**ARoF** – analogais radio caur šķiedru  
**ASI** – Atomfizikas un spektroskopijas institūts  
**AWG** – sakārtots viļņvadu režģis (viļņvadu masīva režģis)  
**BBU** – mobilo sakaru raidītāju bloks  
**BER** – bitu kļūdu attiecība  
**BPF** – joslas filtrs  
**C-Band** – tradicionālais diapazons (josla)  
**CD** – hromatiskā dispersija  
**CEPT** – Eiropas Telekomunikāciju pārvalžu konferences komiteja  
**CO** – centrālais ofiss  
**CW** – nepārtrauktā viļņa starojuma (lāzera avots)  
**DB** – duobinārais  
**DCF** – dispersiju kompensējoša šķiedra  
**DCM** – dispersijas kompensācijas modulis  
**DCI** – Datu centra savstarpēja savienošana  
**DMD** – diferenciālā modu aizture  
**DSO** – ciparu signālu osciloskops  
**DSP** – ciparu signālu apstrāde  
**DTU** – Dānijas Tehniskā universitāte  
**DWDM** – augsta blīvuma optiskās sistēmas  
**EDB** – elektriskais duobinārais  
**EPON** – Ethernet pasīvais optiskais tīkls  
**FBG** – šķiedras Brega režģis  
**FB** – lēmumu atgriezeniskās saite  
**FBT** – lēmumu atgriezeniskās saites elements  
**FEC** – turpvērstā kļūdu labošana  
**FF** – signāla uz priekšu vērstā atsaukšanas saite  
**FFT** – signāla uz priekšu vērstais atsaukšanas elements  
**FOTS** – šķiedru optiskās pārraides sistēmas  
**FSPL** – pārraides pamatzudumi brīvā telpā  
**FSR** – brīvais spektra diapazons  
**FWM** – četru viļņu mijiedarbe  
**HD-FEC** – spēcīga lēmuma turpvērstās kļūdas labošanas kods  
**HS-PON** – ātrgaitas pasīvais optiskais tīkls  
**IEEE** – Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts  
**IF** – starpfrekvence  
**IM-DD** – intensitātes modulācija ar tiešo uztveršanu  
**IoT** – lietu internets  
**IP** – interneta protokols  
**IPF-RAN** – Krievijas Zinātnu akadēmijas Federālā pētniecības centra Lietišķās fizikas institūts  
**ISI** – starpsimbolu interference  
**ITU** – Starptautiskā Telekomunikāciju apvienība  
**ITU-T** – Starptautiskās Telekomunikāciju savienības Telekomunikācijas standartu sektors  
**KTH** – Zviedrijas Karaliskā Tehniskā universitāte

**KPI** – galvenie veiktspējas rādītāji  
**LNA** – zema trokšņa līmeņa platjoslas pastiprinātājs  
**LO** – šaurjoslas nepārtraukta optiskā starojuma lokālā oscilatora lāzera avots  
**LTE** – starptautisko mobilo telekomunikāciju sistēma  
**LU** – Latvijas Universitāte  
**MCF** – daudzkodolu optiskā šķiedra  
**MIMO** – vairāk ieejas un vairāk izejas  
**MZM** – Maha-Zendera modulators  
**NF** – ienesto trokšņu rādītājs  
**NG** – nākamā paaudze  
**NG-PON** – nākamās paaudzes pasīvais optiskais tīkls  
**NG-PON2** –40 Gigabitu pasīvais optiskais tīkls  
**NOE** – nelineārie optiskie efekti  
**NRZ** – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods  
**NRZ-OOK** – intensitātes manipulācija ar kodēšanu bez atgriešanās pie nulles  
**ODN** – optiskās sadales tīkls  
**OFC** – optiskās frekvences ķemme  
**OLT** – optiskās līnijas terminālis (gala iekārta)  
**ONT** – optiskā tīkla terminālis/galiekārta  
**ONU** – optiskā tīkla iekārta  
**OOK** – “ieslēgt-izslēgt” manipulācija  
**OPB** – optiskais jaudas budžets  
**OSNR** – optiskā signāls-troksnis attiecība  
**P2P** – punkts-punkts topoloģija  
**PAM** – impulsa amplitūdas modulācija  
**PAM-M** – daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācija  
**PIN** – PIN fotodiode  
**PON** – pasīvais optiskais tīkls  
**RAN** – radio piekļuves tīkls  
**RoF** – radio caur šķiedru  
**ROP** – uztvertās optiskās jaudas līmenis  
**RU** – bāzes stacijas uztverēja bloks  
**SAD** – simetriski adaptīvā bitu aiztures tehnika  
**SDM** – telpdales (telpiskā) blīvēšana  
**SMCF** – vienmodas daudzkodolu optiskā šķiedra  
**SNR** – signāls-troksnis attiecība  
**SMF** – vienmodas optiskā šķiedra  
**TI** – Telekomunikāciju institūts  
**VDC** – līdzstrāvas spriegums  
**WDM** – viļņgarumdales blīvēšana  
**WDM-PON** – viļņgarumdales blīvēts pasīvais optiskais tīkls  
**WGM** – čukstošās galerijas režģis  
**WGMR** – čukstošās galerijas modu rezonators  
**WSS** – pēc viļņa garuma selektīvs optiskais slēdzis  
**WS-WDM-PON** – viļņa garuma selektīvais WDM-PON  
**WR-WDM-PON** – viļņa garuma maršrutēts WDM-PON  
**VR** – virtuālā un paplašinātā realitāte  
**XG-PON (10G-PON)** –10 Gigabitu pasīvais optiskais tīkls

## SATURS

1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	7
1.1. Tēmas aktualitāte.....	7
1.2. Promocijas darba mērķis un izvirzītās tēzes .....	8
1.3. Promocijas darba uzdevumi .....	9
1.4. Pētījumu metodika.....	10
1.5. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti .....	10
1.6. Darba struktūra un apjoms .....	12
1.7. Darba aprobācija un publikācijas .....	12
2. PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI.....	16
3. PROMOCIJAS DARBA NODAĻU KOPSAVILKUMS.....	17
3.1. Spektrāli efektīvu modulācijas formātu lietojuma novērtējums <i>WDM-PON</i> sistēmu veikspējas palielināšanai (3. nodaļas apskats) .....	17
3.2. Uztvertā signāla kvalitātes ietekmes novērtējums atkarībā no lietotās optiskās pārraides vides spektrāli efektīvas <i>WDM-PON</i> platjoslas pārraides sistēmas realizācijai (4. nodaļas apskats).....	21
3.3. Spektrāli efektīvas nākamās paaudzes mobilo sakaru optiskās sistēmas milimetru viļņu radio signālu pārraidei caur šķiedru izstrāde un novērtējums (5. nodaļas apskats).....	23
3.4. Spektrāli efektīvas <i>WDM</i> pārraides sistēmas realizācija ar silīcija mikrosfēras ( $\text{SiO}_2$ ) <i>WGMR</i> bāzes veidotu <i>Kerr OFC</i> gaismas avotu (6. nodaļas apskats).....	30
SECINĀJUMI.....	34
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	37

# 1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## 1.1. Tēmas aktualitāte

Straujais interneta datu plūsmas pieaugums ik gadu liek uzlabot telekomunikāciju tīklu infrastruktūru, paaugstinot datu pārraides ātrumu [1]. Pasīvie optiskie piekļuves tīkli (*PON*) ir vieni no populārākajiem optiskajiem tīkliem ar zemas izmaksas arhitektūru. Standartizētiem *PON* tīklu risinājumiem ir veikta virkne uzlabojumu, kas saistīti ar datu pārraides ātrumu galalietotājiem. Lai iegūtu spektrāli efektīvu datu pārraidi, *PON* tīklu infrastruktūra tiek nodrošināta, izmantojot viļņgarumdales blīvēšanas (*WDM*) tehnoloģijas risinājumu [2].

Pieprasījums pēc lielas datu pārraides eksponenciāli pieaug sakarā ar straujo interneta pieprasījumu, attīstoties jaunām tehnoloģijām (piemēram, lietu internetam (*IoT*), 4K/8K televīzijai, virtuālai un paplašinātai realitātei (*VR*) u.c.). Ātri pieaugošajam galalietotāju skaitam ir nepieciešams lielāks joslas platums, risinājums tam ir telpdales (telpiskā) blīvēšana (turpmāk – *SDM*) [3]–[4]. Daudzkodolu optiskā šķiedra tiek pētīta kā jauns risinājums, lai apmierinātu pieaugošā datu plūsmu optiskajos tīklos [5]. Vienmodas optiskā šķiedra ar vienu serdeni ir ierobežota iespējamajā datu pārraides ātrumā, to ierobežo pastiprinātāja joslas platums un nelineārie optiskie efekti (*NOE*) [6].

Risinājums telekomunikāciju sistēmu uzlabošanai ir uzlabot optiskās sakaru līnijas, kas izmanto bez atgriešanas pie nulles (*NRZ*) modulācijas formātus. To vietā izmantojot daudzpakāpju impulsa amplitūdas modulāciju, saīsināti *PAM-M* vai *M-PAM*, kur vairāki biti tiek iekodēti vienā signāla līmenī. Daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācijas (*M-PAM*) modulācijas formāts ir salīdzinoši viegli realizējams, šis formāts piedāvā nosacīti vieglu kompromisu starp veiktspēju un tā realizācijas sarežģītības pakāpi, kā arī spēj nodrošināt telekomunikāciju pakalpojumu sniedzējiem rentablu risinājumu [7].

Tradicionālais mobilo sakaru radio piekļuves tīkls (*RAN*), kas apvieno pamatjoslas signālu apstrādi un radio funkcijas katrā bāzes stacijā, tiek izmantots ilgtermiņa evolūcijas starptautisko mobilo telekomunikāciju sistēmas (*LTE*) risinājumā ceturtais paaudzes mobilo sakaru (4G) tehnoloģijā, kā arī trešās paaudzes mobilo sakaru (3G) tehnoloģijā. Nākamajai, piektās paaudzes mobilo sakaru (5G) tehnoloģijai, ir jānodrošina vismaz 10 reizes lielāks datu pārraides ātrums, augstāka spektrālā efektivitāte un energoefektivitāte, salīdzinot ar šī brīža 3G, 4G/*LTE* mobilo sakaru tehnoloģijām. Piektās paaudzes 5G tehnoloģijas tehnisko prasību izpildi var nodrošināt viļņa garuma blīvētie pasīvie optiskie piekļuves tīkli (*WDM-PON*), kas ir balstīti uz centralizētu optiskā datu pārraides tīkla arhitektūru, kā arī augstāku radiofrekvenču diapazonu izmantošanu, piemēram, milimetru viļņu *mm-viļņu* (24–86 GHz) frekvenču diapazona izmantošanu [8].

Līdz ar to, lai nodrošinātu ātrāku datu pārraidi, ir nepieciešams veidot jauna risinājuma optisko piekļuves sakaru sistēmu arhitektūru, nodrošinot veiktspējas, funkcionalitātes un kapacitātes uzlabošanu. Plaši pielietoto šķiedru optisko *WDM-PON* sistēmu ir iespējams tehnoloģiski pārveidot par hibrīdu analogu radio caur šķiedru (*AROF*)-*WDM-PON* sistēmu, neveicot esošo tīkla elementu nomaiņu, pietiek tikai ar mobilo sakaru raidītāju bloku (*BBU*) un mobilo bāzes staciju uztvērēju bloku (*RU*) integrēšanu esošā *WDM-PON* sakaru sistēmā, nemainot pārējo platjoslas



interneta tīkla arhitektūru un optiskās līnijas termināļus (OLT), kā arī optiskā tīkla galiekārtas (ONT). Promocijas darbā veiktā pētījuma gaitā izstrādātā hibrīda *ARoF-WDM-PON* pārraides sistēmas arhitektūra spējīga nodrošināt optisko signālu pārraidi un 28 GHz (*ka-joslā*) milimetru viļņu signālu pārraidi, nodrošinot atvilces maršrutēšanas darbības principu caur šķiedru, atbilstoši 40 Gigabitu pasīvā optiskā tīkla (*NG-PON2*) definētajām prasībām.

Zemu izmaksu koncepcija, kas spēj nodrošināt pievilcīgu risinājumu hibrīdu optisko sakaru sistēmu izveidei, apvienojot platjoslas interneta un mobilo sakaru pārraidi caur optisko šķiedru, tiek izskatīta par nākamās paaudzes (*NG*) *PON* tīklu arhitektūras risinājumu. Kerra optiskās frekvences ķemmes (*OFCs*), izmantojot dažāda veida čukstošās galerijas modas rezonatorus (*WGMR*), jau ir parādījušas atšķirīgus lietojumus, jo īpaši to lietojumus optisko šķiedru sakaru sistēmās, vienlaikus aizstājot lāzera gaismas avotus konkrētos viļņa garumos [9]. Precīzs laiks, zems fāzes troksnis, ģenerēto harmoniku šaurais līnijas platums nodrošina *WGMR-OFC* veikspēju visdažādākajos sistēmu lietojumos. Turklāt *OFC* ģeneratorus izmanto tādās tehnoloģijās kā optiskie pulksteņi [10], īpaši stabila mikroviļņu ģenerēšana [11], lietojumprogrammās, kurām nepieciešama precīza optiskā frekvences reference, spektroskopija, kvantu lietojumi [12], optiskie sakari [13] utt. *WGMR-OFC* gaismas avotu lietojums *WDM* šķiedru optiskajās sakaru sistēmās aptver lietojuma scenārijus, sākot no īsas sasniedzamības, piemēram, datu centru savstarpējai savienošanai (*DCI*), līdz piekļuves līmeņa optisko šķiedru tīkliem [9]–[14]. Čukstošās galerijas modas (*WGM*) rezonatoru *Kerr OFC* ķemmes ģeneratori, kas fiziski realizēti uz silīcija dioksīda mikrosfēras un mikrostiņa rezonatoriem, demonstrē jaunu tehnoloģisko risinājumu, kas spēj nodrošināt pievilcīgu risinājumu telekomunikāciju šķiedru optiskajiem sakaru tīkliem, nodrošinot zemas īstenošanas izmaksas un energoefektivitāti.

## 1.2. Promocijas darba mērķis un izvirzītās tēzes

Apkopojot iepriekš minētos faktus par mobilo sakaru un šķiedru optisko pārraides sistēmu attīstības virzieniem, tika definēts **promocijas darba mērķis**:

eksperimentāli izstrādāt hibrīdu šķiedru optisko viļņgarumdales blīvēto sakaru sistēmu risinājumus un tajos novērtēt spektrāli efektīvu intensitātes modulācijas formātu veikspēju.

**Lai sasniegtu darba mērķi, tika definētas sekojošas promocijas darba aizstāvamās tēzes:**

1. Ātrgaitas *PON* (*HS-PON*) pārraides sistēmās, izmantojot 10 Gigabitu *PON* (*XG-PON*) komponentes, maksimālo pārraides attālumu optiskajā C-joslā ar bitu kļūdu attiecību  $BER \geq 1 \times 10^{-3}$  ir iespējams realizēt, lietojot elektrisko duobināro (*EDB*) modulācijas formātu, savukārt ar *PAM-4* daudzlīmeņu modulācijas formātu iespējams sasniegt maksimālo pārraides ātrumu uz  $\lambda$ .
2. 5 Gbit/s *PAM-4* signālu ar  $BER \geq 1 \times 10^{-3}$  ir iespējams pārraidīt caur 20 km garu optisko šķiedru un vismaz 3 metru *mm-viļņu* bezvadu savienojumu, izmantojot heterodīnas uztveršanas un fotoniskās augšupvērstās pārvēršanas tehniku 28 GHz Ka joslā ar 2.5 GHz analogās joslas platumu.

3. Realizējot hibrīdu *ARoF-WDM-PON* sakaru sistēmu 2.5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētu 28 GHz mm-viļņu radio signālu un 10 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētu optisko signālu pārraidei kanālā caur 20 km optisko šķiedru, pie 100 GHz starpkanālu intervāla ( $\Delta F$ ) var lietot viļņa garuma maršrutētu *WDM-PON* arhitektūru (*WR-WDM-PON*), savukārt, ja  $\Delta F \leq 50$  GHz, jālieto viļņa garuma selektīvu *WDM-PON* arhitektūru (*WS-WDM-PON*).
4. Silīcija dioksīda mikrosfēras čukstošās galerijas modas rezonatora (*WGMR*) bāzes veidotu *Kerra OFC* gaismas avota jaunģenerētās harmonikas ir iespējams izmantot *WDM-PON* sakaru sistēmās ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu uz  $\lambda$  bez adaptīvās ekvalizācijas, savukārt *DCI* sistēmās ar datu pārraides ātrumu līdz 50 Gbit/s uz  $\lambda$  nepieciešama adaptīva ekvalizācija.

### 1.3. Promocijas darba uzdevumi

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

1. Matemātiskās modelēšanas vidē novērtēt daudzlīmeņu *PAM-M* un *EDB* intensitātes modulācijas formātu pielietojumu maksimālā pārraides attāluma palielināšanai *10 Gigabit PON* sakaru sistēmās ar intensitātes modulāciju un tiešo uztveršanu (*IM/DD*), nepārsniedzot uztvertā signāla BER  $\geq 1 \times 10^{-3}$  robežvērtību.
2. Eksperimentāli un matemātiskās modelēšanas vidē novērtēt hromatiskās dispersijas (*CD*) ietekmi un tās kompensācijas metodes maksimālā pārraides attāluma palielināšanai *NRZ-OOK* un *PAM-4* modulētās *IM/DD WDM-PON* sakaru sistēmās ar datu pārraides ātrumu līdz 40 Gbit/s uz  $\lambda$ , nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla BER  $\geq 1 \times 10^{-3}$ .
3. Eksperimentāli novērtēt spektrāli efektīvu *PAM-4*, *PAM-8* un *EDB* modulācijas formātu pielietojumu datu pārraides ātruma palielināšanai līdz 56 Gbit/s uz  $\lambda$  ar un bez adaptīvās ekvalizācijas izmantošanas ātrgaitas *PON (HS-PON) IM/DD* pārraides sistēmās, izmantojot 10 Gigabit *PON (XG-PON)* komponentes un nodrošinot BER  $\geq 1 \times 10^{-3}$ .
4. Eksperimentāli novērtēt telpdales (*SDM*) un viļņgarumdales blīvēšanas (*WDM*) tehnoloģiju kombinētā risinājuma pielietojumu vienmodas septiņu kodolu daudzkodolu optiskajā šķiedrā (*SMCF*) telpiski blīvētas *NRZ-OOK* modulētas 2.5 Gbit/s uz  $\lambda$  šķiedru optiskās *IM/DD* sakaru sistēmas izveidei.
5. Eksperimentāli un matemātiskās modelēšanas vidē novērtēt heterodīnās uztveršanas un fotoniskās augšupvērstās pārvēršanas uz 28 GHz mm-viļņu radiosignālu tehnikas pielietojumu, nodrošinot līdz 2.5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētu un spektrāli efektīvu līdz 5 Gbit/s *PAM-4* modulētu signālu pārraidi caur 20 km optisko šķiedru un vismaz 3 metru mm-viļņu bezvadu savienojumu.
6. Eksperimentāli un matemātiskās modelēšanas vidē izstrādāt un novērtēt hibrīdu *ARoF-WDM-PON* sakaru sistēmu, spējīgu nodrošināt atvilces maršrutēšanas darbības principu 2,5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētu 28 GHz mm-viļņu radio signālu un 10 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētu optisko signālu pārraidei kanālā caur 20 km optisko šķiedru līniju.

7. Eksperimentāli izstrādāt uz silīcija dioksīda mikrosfēras čukstošās galerijas modas rezonatora (*WGMR*) bāzes veidotu *Kerra OFC* kā daudzviļņu gaismas avotu, spējīgu nodrošināt optisko frekvenču ķemmi  $C$  – joslā, kur jaunģenerēto harmoniku skaits atbilst *ITU-T G.694.1* ŠOPS risinājumos izmantotajiem  $2^n$  ( $n$  – vesels skaitlis), un novērtēt to pielietojumu *NRZ-OOK* modulētu signālu pārraidei šādās *IM/DD* sistēmās ar datu pārraides ātrumu līdz 50 Gbit/s uz  $\lambda$ .

#### 1.4. Pētījumu metodika

Promocijas darba uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiski aprēķini, skaitliskās simulācijas, ka arī eksperimentāli mērījumi. Skaitliskās simulācijas realizētas *RSoft OptSim* un *VPI Design Suite* simulācijas programmatūrās, kuru pamatā tiek izmantots nelineārais Šrēdingera vienādojums pielietojot sadale-solis (angļu val. *Split-Step*) metodi, Furjē transformāciju, un arī Montekarlo metodi bitu kļūdu attiecības *BER* novērtēšanai.

Optisko signālu kvalitātes novērtēšanai simulāciju vidē un eksperimentālajās realizācijās izmantoti elektriskā un optiskā signāla spektri un jauda, uztvertā elektrisko signālu kvalitāte novērtēta, izmantojot bitu kļūdu attiecību *BER* un acu diagrammas. Eksperimentālo sistēmu realizācijā atsevišķos gadījumos reālā laika mērījumos uztvertā elektrisko signālu kvalitāte novērtēta pēc kvalitātes *Q*-faktora (angļu val. *Q-factor*), no kā aprēķināta pārraidītā signāla bitu kļūdu attiecība *BER*, kā arī atsevišķos gadījumos veikta uztvertā signāla bezsaistes ciparu signālu apstrāde *DSP MatLab* skaitļošanas vidē, piemēram, adaptīvās pēcekvalizācijas veikšanai un iegūto rezultātu apstrādei.

Darbā aprakstītie zinātniskās pētniecības eksperimenti un to rezultāti realizēti RTU Telekomunikāciju institūtā (TI), Latvijas Universitātē (LU) Astronomijas un spektroskopijas institūtā (ASI), Dānijas Tehniskajā universitātē (DTU), Zviedrijas Karaliskās Tehniskās universitātes (*KTH*) Lietišķās fizikas katedrā ciešā sadarbībā ar Zviedrijas pētniecības institūtu *RISE Acreo* Zviedrijā, kā arī *COVID-19* pandēmijas laikā izmantojot video zvanus mērījumu veikšanai tiešsaistē (digitālais darbs laboratorijā dēvēts par “*Zoom-lab*”) ciešā sadarbībā ar Federālais pētniecības centra Krievijas Zinātņu akadēmijas Lietišķās fizikas institūtu (*IPF-RAN*).

#### 1.5. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

##### Promocijas darba jaunieguvumi:

1. Noteikti *NG-PON2*, *XG-PON/HS-PON* pārraides sistēmās atkarībā no tās pielietojuma piemērotākie (*NRZ*, *PAM-4*, *PAM-8*, *EDB*) intensitātes modulāciju formāti, kā arī novērtēts *NRZ* un *PAM-4* modulācijas formātu pielietojums *ARoF* pārraides sistēmās 28 GHz (*ka-joslā*) milimetra viļņa radiosignālu pārraidei *WDM* sistēmās, nodrošinot atvilces maršrutēšanas darbības principu.
2. Novērtēti viļņgarumdales blīvētu *IM/DD PON* un *ARoF* topoloģijas pārraides sistēmās uztvertā signāla *BER* un pārraides attāluma ietekmējošie faktori (dispersija, intensitātes

modulācijas formātu pielietojums), kā rezultātā simulatīvi un eksperimentāli noteikti paņēmieni uztvertā signāla kvalitātes uzlabošanai.

3. Novērtēts telpdales *SDM* un viļņgarumdales blīvēšanas *WDM* tehnoloģiju kombinētais lietojums daudzkodolu *SMCF* šķiedrā datu pārraides ātruma palielināšanai *NG* telpiski blīvētas *IM/DD PON* un *RoF* sakaru sistēmu izveidē, noteikti uztvertā signāla kvalitātes ietekmējošie faktori (šķērsrunas ietekme, diferenciālā modu aizkave) daudzkodolu optiskajai šķiedrai.
4. Novērtēts *RoF* risinājumā pieejamās optisko signālu fotoniskās augšupvērstās pārvēršanas tehnikas uz 28 GHz (*ka-joslā*) milimetra viļņa radiosignālu, un eksperimentāli izstrādāta *ARoF-WDM-PON* sakaru sistēma *NRZ* kodētu signālu līdz 2.5 Gbit/s un *PAM-4* modulētu signālu līdz 5 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā 28 GHz (*ka-joslā*) milimetra viļņa radiosignālu pārraidei nodrošinot atvilces maršrutēšanas darbības principu caur 20 km *SMF* šķiedru.
5. Atbilstoši *NG-PON2 (ITU-T G.989.3)* rekomendācijas prasībām ir eksperimentāli izstrādāta un novērtēta hibrīda *ARoF-WDM-PON* sakaru sistēma, kas vienlaikus ļauj nodrošināt *NRZ* kodētu signālu pārraidi ar datu pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā optisko signālu pārraidei un līdz 2.5 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā 28 GHz (*ka-joslā*) milimetru viļņu radiosignālu pārraidei caur 40 km garu šķiedru optisko līniju.
6. Izstrādāts jauns inovatīvs uz silīcija mikrosfēras veidots čukstošās galerijas modas rezonatora *WGMR* bāzes *Kerr-OFC* gaismas avots, kur ar gaismas avota jaunģenerētajām harmonikām: *WDM-PON* sakaru sistēmas risinājumos iespējams veikt datu pārraidi ar ātrumu kanālā līdz 10 Gbit/s uz  $\lambda$  bez *AEQ*, savukārt, pielietojot *DCI* sistēmu risinājumos, iespējams veikt datu pārraidi ar datu pārraides ātrumu kanālā līdz 50 Gbit/s ar *AEQ*.
7. Izstrādāts jauns inovatīvs uz silīcija mikrosfēras un/vai mikrostiņa veidots čukstošās galerijas modas rezonatora *WGMR* bāzes *Kerr-OFC* kā daudzviļņu gaismas avots, kur ģenerēto harmoniku skaits atbilst ŠOPS risinājumos izmantotajiem  $2^n$  ( $n$  – vesels skaitlis) un starpkanālu intervāls starp jaunģenerētajām harmonikām atbilst *ITU-T G.694.1* rekomendācijai, kas spēj nodrošināt *NRZ* kodētu signālu pārraidi ar datu pārraides ātrumu līdz 50 Gbit/s uz  $\lambda$ .

### **Promocijas darba praktiskā vērtība**

1. Izstrādāts Latvijas patenta pieteikums “Hibrīdā šķiedru optiskā piekļuves sistēma milimetru viļņu radio signālu pārraidei caur šķiedru”, Nr. (P-19-73).
2. Izstrādāts Latvijas patenta pieteikums “Uz silīcija dioksīda mikrostiņa rezonatora veidots daudzviļņu gaismas avots datu pārraidei šķiedru optiskajās telekomunikāciju sistēmās” (iesniegts pieteikums).
3. RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes Telekomunikāciju institūtā izstrādāts jauns *NRZ* līdz 2.5 Gbit/s un spektrāli efektīvs *PAM-4* līdz 5 Gbit/s datu pārraides ātrumam kanālā optisko signālu modulēts *ARoF-WDM PON* sakaru sistēmas makets 28 GHz (*ka-*

*joslā*) milimetru viļņu radio signālu pārraidei caur 20 km šķiedru (paredzēts tālākiem eksperimentāliem pētījumiem).

4. RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes Telekomunikāciju institūtā izstrādāts jauns *M-PAM* modulēts hibrīds *ARoF-WDM-PON* sakaru sistēmas makets, kas vienlaikus ļauj nodrošināt *NRZ* kodētu signālu pārraidi ar datu pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s uz viļņa garumu optisko signālu pārraidei un līdz 5 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā 28 GHz (*ka-joslā*) milimetru viļņu signālu pārraidei caur 40 km garu šķiedru optisko līniju (paredzēts tālākiem eksperimentāliem pētījumiem).
5. RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes Telekomunikāciju institūtā izstrādāts jauns četru kanālu ar 100 GHz starpkanālu intervālu *NRZ-OOK* modulēts augsta blīvuma optiskās pārraides sistēmas (*DWDM-PON*) makets, kas spēj nodrošināt 160 Gbit/s kopējo pārraides ātrumu C-joslas apgabalā līdz 40 km attālumā, izmantojot datu kanālu plūsmas simetriski adaptīvā bitu aiztures tehniku (*SAD*) (paredzēts tālākiem eksperimentāliem pētījumiem).
6. RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes Telekomunikāciju institūtā izstrādāts jauns portatīvs uz silīcija mikroshēras un/vai mikrostiņa veidots čukstošās galerijas modas rezonatora *WGMR* bāzes *Kerr-OFC* optiskās frekvences ķemmes gaismas avots, kas spēj nodrošināt datu pārraidi kanālā līdz 50 Gbit/s (paredzēts tālākiem eksperimentāliem pētījumiem).

#### **Promocijas darbā iegūtie rezultāti izmantoti vairākos projektos.**

- *PostDoc* projektā “Nākamās paaudzes ātrdarbīgas šķiedru optiskās piekļuves sistēmas (*NG-FAST*)” Nr. 1.1.1.2/VIAA/1/16/044.
- ERAF projektā “Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators izstrāde un tā pielietojumi telekomunikācijās (*WCOMB*)” Nr. 1.1.1.1/18/A/155.
- ERAF projektā “Riņķa rezonatora modulatori optiskiem starpsavienojumiem (*RINGO*)”, Nr. 1.1.1.1/21/A/052.

### **1.6. Darba struktūra un apjoms**

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa par spektrāli efektīvu hibrīdu optisko sakaru sistēmu, to elementu izstrādi, izveidi un darbības novērtējumu.

### **1.7. Darba aprobācija un publikācija**

Promocijas darbā izmantotas 13 no 30 autora zinātniskajām publikācijām. Tās publicētas zinātnisko rakstu un konferenču tēzu (*SCOPUS*, *WoS*, *IEEE*) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos. Darba gaitā izstrādātajai tehnoloģijai “Hibrīdā šķiedru optiskā piekļuves sistēma milimetru viļņu radio signālu pārraidei caur šķiedru” piešķirts Latvijas valsts patents. Darba gaitā izstrādātā tehnoloģija “Uz mikro stiņa rezonatora veidots daudz viļņu gaismas avots datu

pārraidei šķiedru optiskajās telekomunikāciju sistēmās” iesniegta patenta valdē, lai piemērotu Latvijas valsts patentu. Darba rezultāti prezentēti 13 konferencēs.

### **Promocijas darba izstrādes laikā sasniegtie rezultāti prezentēti 13 starptautiskās zinātniskās konferencēs.**

1. Piedalījies starptautiskajā konferencē (Photonics West 2021 Digital Forum), prezentējot darbu par tēmu: I. Brice, K. Grundsteins, A. Sedulis, **T. Salgals**, S. Spolitis, V. Bobrovs un J. Alnis, “*Frequency comb generation in whispering gallery mode microsphere resonators*”, 2021. gada 6.–11. marts.
2. Piedalījies starptautiskajā konferencē (64. starptautiskā fizikas un dabaszinātņu studentu konference — Atklātie lasījumi 2021), prezentējot darbu par tēmu: K. Draguns, I. Brice, **T. Salgals** un J. Alnis, “*Dispersion Engineering of Whispering Gallery Mode Resonators for Frequency Comb Generation and Telecommunication Applications*”, 2021. gada 16.–19. marts.
- Piedalījies starptautiskajā konferencē (4th International conference “Quantum Optics and Photonics 2021”): tiešsaistē Zoom vidē 2021. gada 22.–23. aprīlī, prezentējot darbus par tēmu:
  3. I. Brice, **T. Salgals**, V. Bobrovs, R. Vīter, un J. Alnis, “*Whispering gallery mode silica microsphere resonator applications for biosensing and communications*”.
  4. **T. Salgals**, J. Alnis, R. Murnieks, I. Brice, J. Porins, A. V. Andrianov, E. A. Anashkina, S. Spolitis, un V. Bobrovs, “*Microsphere-based OFC-WGMR multi-wavelength source and its applications in telecommunications*”.
5. Piedalījies starptautiskajā konferencē (Proceedings of Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019), Ķīna, Xiamen, 2019. gada 17.–20. decembrī), prezentējot darbu par tēmu: **T. Salgals**, A. Ostrovskis, A. Ipatovs, V. Bobrovs un S. Spolitis, “*Hybrid AROF-WDM PON Infrastructure for 5G Millimeter-wave Interface and Broadband Internet Service*”.
6. Piedalījies starptautiskajā konferencē (RTU 60. starptautiskajā zinātniskajā un tehniskajā konferencē, 2019. gada 15. oktobrī), prezentējot darbu par tēmu: “*Izmaksu ziņā efektīva ātrdarbīga līdz 32 Gbit/s WDM-PON nākamās paaudzes piekļuves tīkla veiktspējas analīze*”.
7. Piedalījies starptautiskajā konferencē RTU 60. starptautiskajā zinātniskajā un tehniskajā konferencē, 2019. gada 15. oktobrī, prezentējot darbu par tēmu “*Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators novērtējums un tā pielietojumi ŠOPS*”.
8. Piedalījies starptautiskajā konferencē ((RTUWO 2018) Advance in Wireless and optical Communications), prezentējot darbu par tēmu “*4-PAM, NRZ un DB modulācijas formātu veiktspējas novērtējums 20 Gbit/s DWDM-PON optiskās piekļuves sistēmā*”.
9. Piedalījies starptautiskajā konferencē ((RTUWO 2018) Advance in Wireless and optical Communications), sekcijas “Optiskās komunikācijas (angļu val. *Optical communications*) vadītājs (angļu val. *chair*), Rīga Latvija (2018).

10. Piedalījies starptautiskajā konferencē (RTU 59. starptautiskajā zinātniskajā un tehniskajā konferencē, 2018. gada novembrī), prezentējot darbu par tēmu “*Nākamās paaudzes spektrāli efektīvu piekļuves optisko tīklu novērtējums un izstrāde*”.
11. Piedalījies starptautiskajā konferencē (RTU 58. studentu zinātniskajā un tehniskajā konferencē 2017. gada jūnijā), prezentējot darbu par tēmu “*Nākamās paaudzes spektrāli efektīvu optisko sakaru sistēmu izpēte un novērtējums*”.
12. Piedalījies starptautiskajā konferencē (RTU 58. starptautiskajā zinātniskajā un tehniskajā konferencē, 2017. gada oktobrī), prezentējot darbu par tēmu: “*PAM-4 modulācijas formāta veiktspējas novērtējums optiskajos piekļuves tīklos*”.
13. Piedalījies starptautiskajā konferencē (RTU 57. starptautiskajā zinātniskajā un tehniskajā konferencē, 2016. gada novembrī), prezentējot darbu par tēmu “*Dispersijas un nelineāro efektu novērtējums 10 Gbit/s WDM pārraides sistēmā*”.

**Promocijas darba rezultāti izklāstīti 13 zinātnisko rakstu un konferenču tēzū (SCOPUS, WoS, IEEE) datubāzes iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos.**

- [PAPER-1] **T. Salgals**, **S. Spolitis**, S. Olonkins and V. Bobrovs, “Investigation of 4-PAM modulation format for use in WDM-PON optical access systems,” *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS)*, pp. 2450–2454, St. Petersburg, Russia, May 22–25, (2017), DOI: [10.1109/PIERS.2017.8262162](https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262162).
- [PAPER-2] **T. Salgals**, L. Skladova, K. Vilcane, J. Braunfelds and **S. Spolitis**, “Evaluation of 4-PAM, NRZ and Duobinary Modulation Formats Performance for Use in 20 Gbit/s DWDM-PON Optical Access Systems,” *2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, pp. 134–138, Riga, Latvia, Nov. 15–16, (2018), DOI: [10.1109/RTUWO.2018.8587887](https://doi.org/10.1109/RTUWO.2018.8587887).
- [PAPER-3] A. Udalcovs, **T. Salgals**, L. Zhang, X. Pang, A. Djupsjöbacka, **S. Spolitis**, V. Bobrovs, S. Popov, and **O. Ozolins**, “Optical Power Budget of 25+ Gbps IM/DD PON with Digital Signal Post-Equalization,” *Applied Sciences* 10 (17), 6106, (2020), DOI: <https://doi.org/10.3390/app10176106>.
- [PAPER-4] A. Korra, **T. Salgals**, J. Porins, E. Kazoks, R. Miho and **S. Spolitis**, “Performance Analysis of Cost-efficient High-speed up to 32 Gbit/s WDM-PON Next-generation Access Network with Dispersion Compensation,” *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring)*, pp. 2671–2678, Rome, Italy, June 17–20, (2019), DOI: [10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017854](https://doi.org/10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017854).
- [PAPER-5] **T. Salgals**, A. Supe, V. Bobrovs, J. Porins, and **S. Spolitis**, “Comparison of Dispersion Compensation Techniques for Real-Time up to 160 Gbit/s DWDM C-Band Transmission”, *ELEKTRON ELEKTROTECH* 26(2), 85–93, (2020), DOI: [10.5755/j01.eie.26.2.25892](https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.2.25892).
- [PAPER-6] G. K. M. Hasanuzzaman, **S. Spolitis**, **T. Salgals**, J. Braunfelds, A. Morales, L. E. Gonzalez, S. Rommel, R. Puerta, P. Asensio, V. Bobrovs, S. Iezekiel, I. Tafur.

- Monroy, “Performance Enhancement of Multi-Core Fiber Transmission Using Real-Time FPGA Based Pre-Emphasis”, *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Guangzhou, November 10–13, (2017), DOI: [10.1364/ACPC.2017.M2H.1](https://doi.org/10.1364/ACPC.2017.M2H.1).
- [PAPER-7] [T. Salgals](#), L. Skladova, J. Porins, V. Bobrovs and [S. Spolitis](#), “Analog Radio-over-fiber WDM-PON Architecture for 5G Millimeter-wave Interface,” *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring)*, pp. 2679–2686, Rome, Italy, June 17–20, (2019), DOI: [10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017431](https://doi.org/10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017431).
- [PAPER-8] [T. Salgals](#), I. Kurbatska, V. Bobrovs and [S. Spolitis](#), “Research of PAM-4 Modulated WDM-PON Architecture for 5G Millimeter-wave Hybrid Photonics-wireless Interface,” *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – Fall)*, pp. 728–734, Xiamen, China, Dec. 17–20, (2019), DOI: [10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021846](https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021846).
- [PAPER-9] [T. Salgals](#), A. Ostrovskis, A. Ipatovs, V. Bobrovs and [S. Spolitis](#), “Hybrid ARoF-WDM PON Infrastructure for 5G Millimeter-wave Interface and Broadband Internet Service,” *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – Fall)*, pp. 2161–2168, Xiamen, China, Dec. 17–20, (2019), DOI: [10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021479](https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021479).
- [PAPER-10] E. A. Anashkina, V. Bobrovs, [T. Salgals](#), I. Brice, J. Alnis, and A. V. Andrianov, “Kerr Optical Frequency Combs With Multi-FSR Mode Spacing in Silica Microspheres,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* 33 (9), 453–456, (2021), DOI: [10.1109/LPT.2021.3068373](https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3068373).
- [PAPER-11] E. A. Anashkina, M. P. Marisova, [T. Salgals](#), J. Alnis, I. Lyashuk, G. Leuchs, [S. Spolitis](#), V. Bobrovs, and A. V. Andrianov, “Optical Frequency Combs Generated in Silica Microspheres in the Telecommunication C-, U-, and E-Bands”, *Photonics* 8 (9), 345, (2021), DOI: [10.3390/photonics8090345](https://doi.org/10.3390/photonics8090345).
- [PAPER-12] [T. Salgals](#), J. Alnis, R. Murnieks, I. Brice, J. Porins, A. V. Andrianov, E. A. Anashkina, [S. Spolitis](#), and V. Bobrovs, “Demonstration of a fiber optical communication system employing a silica microsphere-based OFC source,” *Opt. Express* 29 (7), 10903–10913, (2021), DOI: [10.1364/OE.419546](https://doi.org/10.1364/OE.419546).
- [PAPER-13] [T. Salgals](#), J. Alnis, [O. Ozolins](#), A. V. Andrianov, E. A. Anashkina, I. Brice, R. Berkis, X. Pang, A. Udalcovs, J. Porins, [S. Spolitis](#), and V. Bobrovs, “Silica microsphere WGMR-based Kerr-OFC light source and its application for high-speed IM/DD short-reach optical interconnects”, *Applied Sciences* 12 (9), 4722, (2022), DOI: [10.3390/app12094722](https://doi.org/10.3390/app12094722).



## 2. PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, tās rezultāti izklāstīti 13 zinātniskās publikācijās. Promocijas darba pirmajā nodaļā aprakstīta tēmas aktualitāte, definēts promocijas darba mērķis un tēzes, aprakstīti darba uzdevumi, izklāstīta pētījumu metodika, darba struktūra un galvenie rezultāti.

Promocijas darba otrajā nodaļā aprakstīts viļņgarumdales blīvēto šķiedru optisko sakaru sistēmu, t. i., pasīvo optisko piekļuves tīklu (*PON*) un Datu centru starp savienojumu *DCI* attīstības virzienu novērtējums.

Trešajā nodaļā apskatīts spektrāli efektīvu daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācijas formātu pielietojuma novērtējums *WDM-PON* sistēmu veiktspējas palielināšanai (pirmais ieguldījums nāk no [PAPER-1], [PAPER-2] un [PAPER-3]).

Ceturtajā nodaļā ir veikts uztvertā signāla kvalitātes ietekmes novērtējums atkarībā no pielietotās optiskās pārraides vides ātrdarbīgas spektrāli efektīvas *WDM-PON* platjoslas pārraides sistēmas realizācijai. Veikta uztvertā signāla kvalitātes analīze nelineāro optisko efektu *NOE* un hromatiskās dispersijas *CD* iespaidā, kā arī novērtēts telpdales blīvēšanas *SDM* tehnoloģijas pielietojums spektrāli efektīvas viļņgarumdales blīvētas šķiedru optiskās sakaru sistēmas realizācijai (ieguldījums nāk no [PAPER-4], [PAPER-5] un [PAPER-6]).

Piektajā nodaļā apkopota informācija par radio caur šķiedru (*RoF*) risinājuma pielietojumu nākotnes mobilo sakaru risinājumā, t. sk. piektās paaudzes 5G risinājumam. Promocijas darba gaitā eksperimentāli izstrādāta spektrāli efektīva nākamās paaudzes mobilo sakaru optiskā sistēma milimetru viļņu radio signālu pārraidei caur šķiedru, kā arī jauna hibrīda šķiedru optiskās sakaru sistēmas arhitektūra, kas spēj vienlaikus nodrošināt platjoslas interneta datu pārraidi un radio signālu pārraidi caur vienu optisko šķiedru (ieguldījums nāk no [PAPER-7], [PAPER-8] un [PAPER-9]).

Sestajā nodaļā aprakstīts jauna veida spektrāli efektīvas *WDM* pārraides sistēmas realizācija ar silīcija mikrosfēras ( $\text{SiO}_2$ ) *WGMR* bāzes veidotu *Kerr-OFC* gaismas avotu. Eksperimentāli pirmo reizi pasaulē tika demonstrēta ātrdarbīga datu pārraide, izmantojot silīcija dioksīda mikrosfēras rezonatorā ģenerētas harmonikas. Šajā pasaules līmeņa eksperimentā iegūtie pētījuma rezultāti aprakstīti publikācijā, kuras pirmais autors un galvenais izpildītājs ir šī promocijas darba autors T.Salgals, “*Demonstration of a fiber optical communication system employing a silica microsphere-based OFC source*”, *Optics Express (Q1)*. Sestajā nodaļā pamatots un eksperimentāli pierādīts *WGMR Kerr-OFC* gaismas avotu lietojums īsas sasniedzamības, piemēram, datu centru starsavienojumiem *DCI* nodrošināt *NRZ* kodētu signālu pārraidi ar datu pārraides ātrumu līdz 50 Gbit/s uz viļņa garumu, sasniedzot jaunu datu pārraides rekordu konkrētajā jomā (ieguldījums nāk no [PAPER-10], [PAPER-11], [PAPER-12] un [PAPER-13]).

Secinājumu daļā veikts eksperimentālo un simulatīvo rezultātu salīdzinājums, novērtējums un sniegta atbildes promocijas darbā definētajiem uzdevumiem un tēzēm.

### 3. PROMOCIJAS DARBA NODAĻU KOPSAVILKUMS

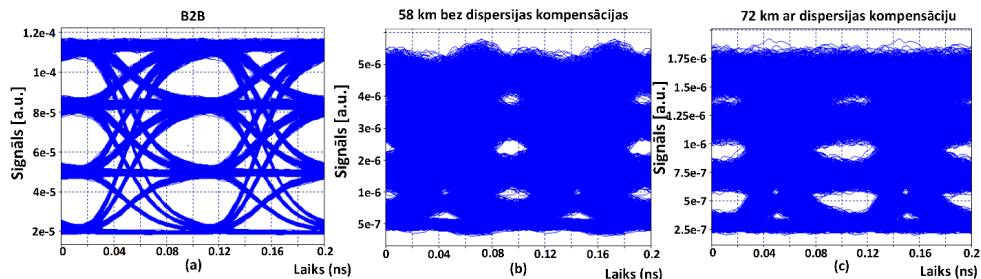
#### 3.1. Spektrāli efektīvu modulācijas formātu lietojuma novērtējums *WDM-PON* sistēmu veiktspējas palielināšanai (3. nodaļas apskats)

Trešajā nodaļā apskatīts spektrāli efektīvu daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācijas formātu lietojuma novērtējums *WDM-PON* sistēmu veiktspējas palielināšanai.

**3.1. apakšnodaļā** apspriests spektrāli efektīvas daudzlīmeņu impulsa amplitūdas modulācijas formātu pielietojums *WDM-PON* tīkla risinājumiem. Šķiedru optisko piekļuves tīklu ieviešanai ir divas galvenās arhitektūras – pasīvie optiskie tīkli *PON* un aktīvie optiskie tīkli (*AON*). Saskaņā ar [15], *PON* standartu turpmākie uzlabojumi jau tiek apspriesti, ņemot vērā ātruma palielināšanu kanālā no 10 līdz 25 Gbit/s. Turklāt ir plaši pētītas iespējas palielināt datu pārraides ātrumu uz viļņa garumu līdz 40 Gbit/s [15]–[16]. Jāuzsver, ka tradicionālās *NRZ* modulācijas izmantošana lieliem datu pārraides ātrumiem kanāla jeb katrā viļņa garumā var radīt būtiskas tehniskas grūtības attiecībā uz raiduztvērēja joslas platumu iespējām un ierosināto šķiedras dispersiju [17]. Līdz ar to modulācijas formāta izvēle būtiski ietekmē optiskās šķiedras piekļuves tīkla veiktspējas sasniegšanu, bitu kļūdu attiecību *BER*, jaudu un uztvērēja jutību. Tomēr ir maz zinātnisko publikāciju, kurās novērtēta *NRZ*, *PAM-4* un *EDB* izmantošana dažādu datu pārraides ātruma atbalstam, saglabājot to pašu pārvades sistēmas fizisko struktūru un galvenos parametrus. Tomēr tas ļautu salīdzināt modulācijas formātus, ņemot vērā vislabāko veiktspēju katram viļņa garumam. Promocijas darbā veiktajā pētījumā izmantoti tie paši pārraides sistēmas parametri katram lietotajam datu pārraides ātrumam. Tas ļauj izsekot katra modulācijas formāta veiktspējas izmaiņām, ko izraisa atbilstošā datu ātruma izmantošana, tādējādi nodrošinot katram datu pārraides ātrumam piemērotākā modulācijas formāta noteikšanu no pētāmajiem. Pētījuma gaitā novērtēti četri modulācijas formāti – *PAM-8*, *PAM-4*, *EDB* un *NRZ*. Pētījuma laikā visi pārvades sistēmas elementu parametri paliek nemainīgi, neskaitot datu pārraides ātrumu. Izpētīto modulācijas formātu pielietojumu (proti, *PAM-8*, *PAM-4*, *EDB*, *NRZ*) tika novērtēta to veiktspēja, ņemot vērā pārraides attālumu, uztvertās jaudas un uztvērēja joslas platumu ietekmi uz *BER*.

**3.2. apakšnodaļā** aprakstīts izstrādātais četru kanālu simulācijas modelis *RSoft Optsim* matemātiskās modelēšanas vidē, lai novērtētu *PAM-4* modulācijas formāta izmantošanas veiktspēju pašreizējos 10 G *WDM-PON* optiskās piekļuves tīklos. Šī simulācijas modeļa mērķis ir novērtēt *PAM-4* modulācijas formāta veiktspēju un maksimālo sasniedzamību, kā arī minimālo starpkanālu attālumu *PAM-4* modulētai *WDM-PON* sistēmai pielietojot 10 Gbaud/s (20 Gbit/s) datu pārraides ātrumu kanālā, ar nosacījumu, ka ir iespējams sasniegt bitu kļūdu attiecību (*BER*)  $1 \times 10^{-3}$  [18]. Centrālā frekvence vidējam optiskajam kanālam tika noteikta 193.1 THz, starpkanālu intervāls 50 GHz vai 100 GHz saskaņā ar *ITU G.694.1* rekomendāciju. Kopējā pārraides sistēmas attāluma nodrošināšanai papildus tika izmantota dispersijas kompensācija ar šķiedras Brega režģa (*FBG*) dispersijas kompensācijas moduli (*DCM*). Tika noteikts, ka maksimālo pārraides attālumu ar *BER* zem *FEC* robežas  $1 \times 10^{-3}$  *PAM-4* modulētai *WDM-PON* sistēmai ar 100 GHz starpkanālu intervālu var palielināt par 15 km jeb 25.4 % (no 59 km līdz 74 km), ja dispersiju *CD* kompensē ar *FBG-DCM*. Turklāt 50 GHz starpkanāla intervāla gadījumā

(nodrošinot  $BER < 1 \times 10^{-3}$ ), maksimālo pārraides sistēmas sasniedzamību var palielināt par 14 km jeb 24 % (no 58 km līdz 72 km), izmantojot papildu dispersijas kompensāciju ar *FBG-DCM* (skat. *1. att.*).

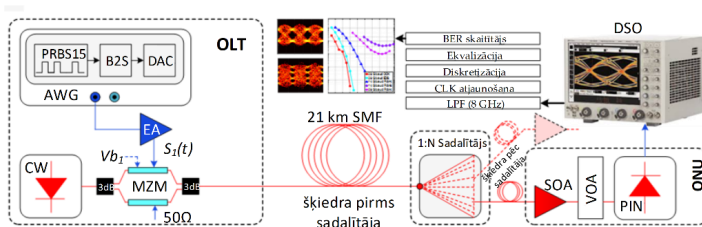


*1. att.* Acu diagrammas uztvertajam optiskajam signālam: (a) pēc *B2B* pārraides; (b) pēc 58 km pārraides bez dispersijas *CD* kompensācijas; (c) pēc 72 km pārraides ar dispersijas *CD* kompensāciju *PAM-4* modulētajai kanālu *WDM-PON* optiskajai pārraides sistēmai ar 50 GHz starpkanālu intervālu.

**3.3. apakšnodaļā** *RSoft Optsim* matemātiskās modelēšanas vidē tika izveidota 8-kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēma ar mērķi novērtēt maksimālo pārraides sasniedzamību, izmantojot dažādus modulācijas formātus: *PAM-4*, *EDB* un *NRZ*. Pirmais simulācijas modelis ar *PAM-4* modulāciju tika realizēts ar 10 Gbaud/s simbolu pārraides ātrumu, nodrošinot 20 Gbit/s datu pārraides ātrumu vienam optiskajam kanālam. Otrs simulācijas modelis ar *DB* modulāciju tika realizēts ar 20 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā. Trešais simulācijas modelis ir balstīts uz *NRZ* raidītāju un realizēts ar tādu pašu 20 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā kā *DB* modulētā pārraides sistēma. Galvenais uzdevuma mērķis ir salīdzināt *PAM-4*, *DB* un *NRZ* modulēto optisko signālu veikspēju *DWDM-PON* pārraides sistēmā un noskaidrot maksimālo tīkla sasniedzamību katrā konkrētajā modulācijas formāta gadījumā. Pēc pārraides (ar 50 GHz starpkanāla intervālu), ņemot vērā iegūtos rezultātus, secināts, ka lielāko tīkla sasniedzamību nodrošina *EDB* modulācijas formāts, kas optiskā tīkla sasniedzamību paplašina līdz 62 km (nodrošinot  $BER < 1 \times 10^{-3}$ ). *PAM-4* modulācijas formāts nodrošināja veiksmīgu datu pārraidi līdz 50 km attālumā, *NRZ* modulācijas formāts – līdz 27 km attālumā caur standarta vienmodas optisko šķiedru *SSMF* ar  $BER$  zem noteiktā sliekšņa (nodrošinot  $BER < 1 \times 10^{-3}$ ).

**3.4. apakšnodaļā** parādīts, kā 10G paredzēto *PON* arhitektūru var izmantot 25+ Gbps datu pārraides ātrumam, nodrošinot pilnīgu savietojamību ar *XG(S)-PON* un *10G-EPON* pārraides sistēmu standartiem. *10G PON* sistēmas nevar atbalstīt turpmākos pakalpojumus, īpaši pietās paaudzes 5G mobilo sakaru tīkliem, tāpēc 25G ir nākamais nepieciešamais solis [19]. Jaunākie *ITU-T* rekomendējošie ieteikumi pasīvo optisko tīklu *PON*, *ITU-T G.9807.1* (simetrisks *10G PON (XG(S)-PON)*) un *ITU-T G.989* (nākamās paaudzes *PON2 (NG-PON2)*) apraksta prasības līnijas pārraides ātrumam līdz 40 Gbit/s kanālā, savukārt tiek izstrādāti arī jauni ieteikumi lielākam datu pārraides ātrumam (piemēram, *G.HSP.Req*, *G.HSP.comTC*, *G.HSP.50Gpmd*, *G.HSP.TWDMpmd*) [20]–[22]. Uzlabojumi, kas tiek apspriesti attiecībā uz nākamās paaudzes *PON* standartiem, ietver kanālu datu pārraides ātruma palielināšanu no 10 Gbit/s līdz 25 Gbit/s [15]. Patlaban *100G-EPON* standartu joprojām izstrādā Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūta (*IEEE P802.3ca*

darba grupa. Tas ir paredzēts, lai palielinātu ātrumu līdz 25 Gbit/s vai 50 Gbit/s, atkārtoti izmantojot esošo *10G-EPON* infrastruktūru [22]–[24]. Kopumā nākotnes *PON* patlaban tiek izstrādāts un standartizēts nākotnes platjoslas tīkla risinājumiem, kas pārsniedz 10 Gbit/s kanālā [25]–[27]. Attīstību uz augstāku datu pārraides ātrumu galvenokārt veicina tiešā savienojuma punkts-punkts topoloģijas (*P2P*) savienojumi un bezvadu sakaru tehnoloģijas, piemēram, nākamās paaudzes mobilo sakaru tīkli (t. i., 5G un 5G+), kuriem drīzumā varētu būt nepieciešami 25G+ datu pārraides ātrumi kanālā, kā arī sakaru tīklu risinājumi, kas atbalsta funkcionālo sadalījumu. Tomēr izmaksu apsvērumu un komerciālās dzīvotspējas dēļ ir vēlams atkārtoti izmantot komponentes no 10 Gbit/s raidzuvērējiem, kas patlaban darbojas *10G PON* sistēmās [28]. Elektrisko un elektropoptisko komponentu joslas platuma ierobežojumi ievērojami palielinās, jo tiek izmantoti signāli ar lielāku datu pārraides ātrumu. Tāpēc šīs izpētes daļas mērķis ir pārvarēt zināšanu trūkumu, uzskaitot digitālā signāla pēcizlīdzināšanas (ekvalizācijas) ieguvumu, balstoties pēc jaudas budžeta, *IM/DD PON* pārraides sistēmā pielietojot NRZ-OOK, EDB, PAM-4 un PAM-8 modulācijas formātus. 25+ Gbit/s uz  $\lambda$  *IM/DD PON* eksperimentālā pārraides sistēma redzama **2. att.**



**2. att.** 25+ Gbps uz  $\lambda$  *IM/DD PON* eksperimentālās sistēmas blokshēma.

Šajā apakšnodaļā parādīts, kā signāla pēcizlīdzināšana ietekmē *IM/DD PON* sistēmas sasniedzamo optiskās jaudas budžetu. Pirms optiskās jaudas budžeta analīzes apkopota analīze par uztvērēju plusiem un mīnusiem, kuros izmanto iepriekš minētos modulācijas formātus (skat. **1. tabula**).

**1. tabula**

**Priekšrocības un trūkumi raidzuvērējiem (pēc modulācijas formāta pielietojuma) *IM/DD* sistēmā**

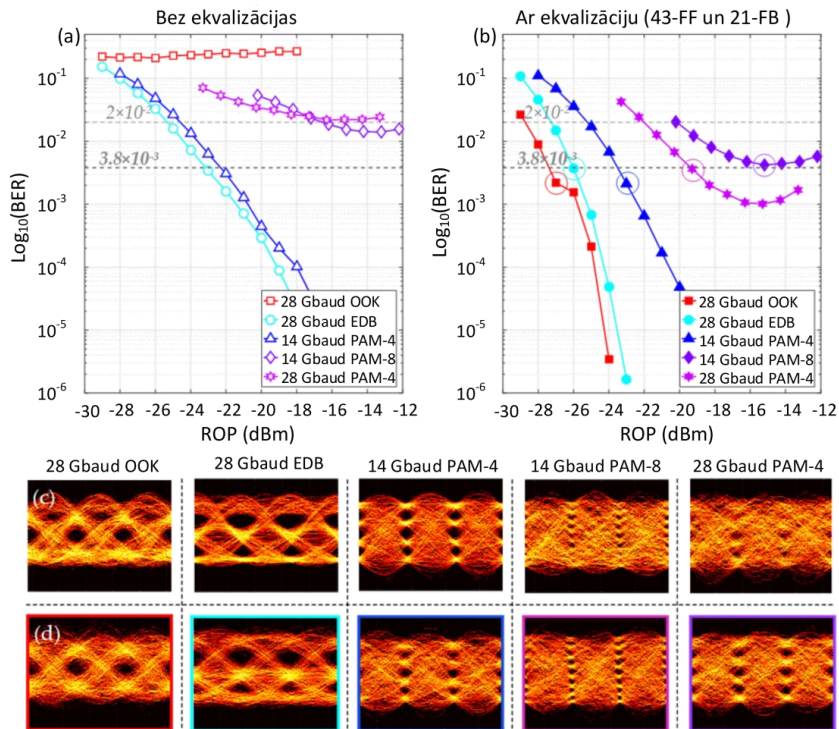
Modulācijas formāts	Spektrālā efektivitāte	Pārraides sasniedzamība	Enerģijas patēriņš	Raidītāja vienkāršība	Uztvērēja vienkāršība
<i>NRZ</i>	–	–	+	++	++
<i>EDB</i>	+	++	–	–	–
<i>PAM-4</i>	++	++	--	--	--
<i>PAM-8</i>	+++	+	--	--	--

Optiskās jaudas budžeta vērtības (kopā ar atbilstošajām pieejamās jaudas rezerves vērtībām), kas iegūtas visos aplūkotajos gadījumos, apkopotas **2. tabula**.

**Optiskās jaudas budžets un pieejamā jaudas rezerve izpētītajām alternatīvām un ekvalizācijas struktūrām (pēc *FF* un *FB* elementu normējuma)**

Signāls	w/o	4-FF	9-FF&5-FB	43-FF&21-FB
28 Gbaud <i>OOK</i>	–	29 dB / 5,1 dB	31 dB / 7,1 dB	31 dB / 7,1 dB
28 Gbaud <i>EDB</i>	27 dB / 3,1 dB	29 dB / 5,1 dB	30 dB / 6,1 dB	30 dB / 6,1 dB
14 Gbaud <i>PAM-4</i>	26 dB / 2,1 dB	27 dB / 3,1 dB	27 dB / 3,1 dB	27 dB / 3,1 dB
14 Gbaud <i>PAM-8</i>	–	–	–	–
28 Gbaud <i>PAM-4</i>	–	–	22 dB / -1,9 dB	23 dB / -0,9 dB

3. att. redzamas BER līknes un acu diagrammas 28 Gbaud/s *OOK/EDB/PAM-4* un 14 Gbaud/s *PAM-4/8* modulētajiem signāliem *IM/DD PON* sistēmā. Pirmkārt, tiek analizēta sistēmas veiktspēja bez jebkādas precizlīdzināšanas (3(a) un 3(c) att.) pēc tam koncentrējoties uz uzlabojumiem, ko piedāvā lineārā precizlīdzināšana (3(b) un 3(c) att.).



3. att. 28 Gbaud/s *OOK*, 28 Gbaud/s *EDB*, 14 Gbaud/s *PAM-4*, 14 Gbaud/s *PAM-8* un 28 Gbaud/s *PAM-4* signālu pārraides raksturlielumi *IM/DD PON* sistēmā: (a) BER pret uztverto optisko jaudu (*ROP*) pirms digitālās precizlīdzināšanas; (b) BER pret *ROP* pēc digitālās precizlīdzināšanas, izmantojot 43-FF un 21-FB normējumu; (c) acu diagrammas, kas uzņemtas *ONU* ar augstāko *ROP* pirms digitālās precizlīdzināšanas; (d) acu diagrammas, kas uzņemtas *ONU* pie *ROP* vērtības, kas nodrošina  $BER < 3,8 \times 10^{-3}$  pēc digitālās precizlīdzināšanas.

Iegūtie rezultāti liecina, ka: (i) *10G PON* komponentu joslas platums ir pietiekams, lai sasniegtu tīkla datu pārraides ātrumu virs 25 Gbit/s; (ii) optoelektronisko komponentu linearitāte ļauj tos darbināt, izmantojot shēmas ar daudzlīmeņu modulācijas formātiem; (iii) kombinācijā ar digitālā signāla pēcizlīdzināšanu iegūtais optiskās jaudas budžets atbilst *EI* klasei ( $OPB = 18\text{--}33$  dB). 28 Gbaud/s *EDB* un 14 Gbaud/s *PAM-4* shēmas var izmantot *PON* pat bez jebkādas pēcizlīdzināšanas. Visbeidzot, datu pārraides ātrumu līdz 56 Gbit/s var sasniegt, *PON* sistēmā izmantojot *PAM-4* modulāciju. Lai gan sadalīšanas attiecība 1 : 32 var nebūt iespējama šāda sadalītāja lielo ienesto zudumu dēļ, tas nodrošina optiskās jaudas budžetu 23 dB. Tāpēc aplūkotās *IM/DD PON* modulācijas formātu alternatīvas kopā ar digitālā signāla izlīdzināšanu spēj nodrošināt ilgtspējību nākotnes *PON* ar datu pārraides ātrumiem virs 25 Gbit/s optiskā tīkla piekļuves segmentā.

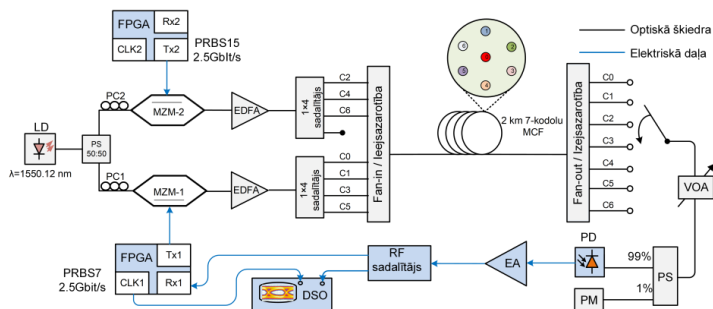
### 3.2. Uztvertā signāla kvalitātes ietekmes novērtējums atkarībā no lietotās optiskās pārraides vides spektrāli efektīvas *WDM-PON* platjoslas pārraides sistēmas realizācijai (4. nodaļas apskats)

**Ceturtajā nodaļā** veikts uztvertā signāla kvalitātes ietekmes novērtējums atkarībā no *pielietotās* optiskās pārraides vides ātrdarbīgas spektrāli efektīvas *WDM-PON* platjoslas pārraides sistēmas realizācijai.

**4.1. apakšnodaļā** novērtēta pārraides veiktspēja atkarībā no datu pārraides ātruma kanālā. Šī pētījuma mērķis ir novērtēt *WDM-PON* pārraides sistēmas intervālu veiktspēju pie 100 GHz starpkanālu intervāla ar visbiežāk izmantotajiem pārraides ātrumiem līdz 32 Gbit/s kanālā un noteikt sistēmas maksimālo sasniedzamību ar hromatiskās dispersijas *CD* kompensāciju ar nosacījumu, ka ir iespējams panākt kļūdu labošanu *pre-FEC* ar  $BER = 1 \times 10^{-3}$ . Pirmkārt, eksperimentāli RTU TI ŠOPS laboratorijā tika izveidota vienkanāla *PON* pārraides sistēma un noteikta tās veiktspēja pēc 80 km pārraides caur standarta vienmoda optisko šķiedru (*SSMF*), papildus pielietojot dispersijas *CD* kompensāciju ar dispersijas kompensācijas moduli *FBG-DCM*. Otrkārt, šķērsrunas efekts starp optiskajiem kanāliem tiek noteikts ar simulatīvi eksperimentālu modeli. Eksperimentālās daļas mērķis bija novērot eksperimentālās sistēmas fizikālos parametrus un izmantoto komponentu ietekmi. Tāpēc jaunākajā *RSoft OptSim* simulācijas programmatūrā tika izveidots 16 kanālu *WDM-PON* pārraides sistēmas modelis, kas atbilstoši pielāgots eksperimentāli realizētajai *PON* sistēmai RTU TI ŠOPS laboratorijā. Atbilstoši *ITU-T G.989.2* nākamās paaudzes *PON* standartam (*NG-PON2*) tika izvēlēti *ODN* šķiedras *SMF* garumi 40 km un 80 km [20]. Tika pierādīts, ka, izmantojot *FBG-DCM* dispersijas kompensāciju *NRZ-OOK* modulētajā 16 kanālu *WDM-PON* pārraides sistēmā ar 100 GHz starpkanālu intervālu, maksimālais sasniedzamais pārraides attālums pie datu pārraides ātrumiem 25 Gbit/s, 28 Gbit/s un 32 Gbit/s kanālā ir 105 km, kur uztvertā signāla *BER* vērtība ir  $3,9 \times 10^{-4}$ ,  $9,9 \times 10^{-4}$  un  $7,5 \times 10^{-4}$ . Taču ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā maksimālais sasniedzamais pārraides attālums tika noteikts 109 km, kur uztvertā signāla *BER* vērtība ir  $8,1 \times 10^{-4}$ . Otrs labākais rezultāts ar 106 km maksimālo sasniegto pārraides attālumu bija 20 Gbit/s datu pārraides ātrumam kanālā, kur uztvertā signāla *BER* vērtība ir  $9,4 \times 10^{-4}$ .

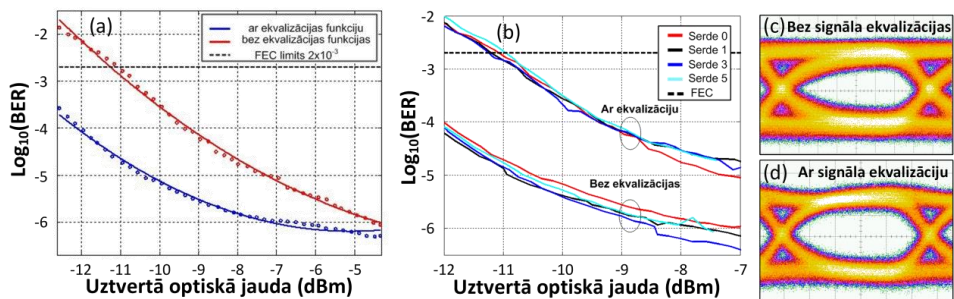
**4.2. apakšnodaļā** eksperimentāli izstrādāta blīva viļņgarumdales blīvēta (*DWDM*) pārraides sistēma ar 100 GHz starpkanālu intervālu un veikts tās veiktspējas novērtējums atkarībā no komerciāli visbiežāk izmantotajām *CD* kompensācijas metodēm, piemēram, realizējot *CD* kompensāciju, kuras pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra (*DCF*), vai *CD* kompensāciju, kuras pamatā ir šķiedras Brega režģa *FBG* dispersijas kompensācijas modulis *DCM*. Dispersijas *CD* pēc kompensācija tiek secīgi pēfīta, izmantojot: (1) pārskanojamo šķiedras Brega režģa dispersijas kompensācijas moduli *FBG-DCM*, kam ir 3,5 dB ienestais vājinājums pie viļņa garuma  $\lambda = 1550$  nm, dispersijas koeficients  $-680$  ps/(nm  $\times$  km); (2) dispersijas kompensējošo šķiedru (*DCF*) ar garumu 5,684 km, kurai ir 4,75 dB ienestais vājinājums (pie  $\lambda = 1550$  nm viļņa garuma) ar dispersijas koeficientu  $-686,76$  ps/nm/km un  $-2,48$  ps/nm<sup>2</sup> dispersijas slīpumu. Eksperimenta laikā secināts, ka papildu ienestais vājinājums optiskajā līnijā no *DCF* un radīto *NOE* ietekme uz pārraidītajiem optiskajiem signāliem izraisa eksperimentālās 4 kanālu *DWDM* optiskās pārraides sistēmas ar 100 GHz starpkanālu intervālu veiktspējas samazināšanos, kur *BER* pie 20 Gbit/s un 40 Gbit/s datu pārraides ātrumiem kanālā tika noteikts  $5,8 \times 10^{-2}$  un  $1,27 \times 10^{-5}$ , pie fotodiodes (*PIN*) uztvertās optiskās jaudas līmeņa  $-1,65$  dBm un  $+2,36$  dBm. Samazinot kopējo optiskās pārraides sistēmas līnijas garumu, aizstājot *DCF* ar šķiedras Brega režģa pārskanojamo *DCM* modulim nelineārie optiskie efekti *NOE* tiek ievērojami samazināti, kur *BER* pie 20 Gbit/s un 40 Gbit/s datu pārraides ātrumiem kanālā tika noteikts  $5,0 \times 10^{-2}$  un  $2,45 \times 10^{-5}$ , *PIN* uztvertās optiskās jaudas līmeņa  $-0.21$  dBm un 3.3 dBm.

**4.3. apakšnodaļā** vienmodas daudzkodolu optiskās šķiedras (*SMCF*) risinājums nodrošina telpdales blīvēšanas *SDM* tehnoloģijas pielietojumu. Daudzkodolu optiskā šķiedras (*MCFs*) tiek izskatīts kā risinājums bezvadu sakaru sistēmām, piemēram, saderīgs ar *802.11ac*,  $3 \times 3$  vairāku ieeju vairāku izvadu (*MIMO*) sistēmu, izmantojot septiņu kodolu šķiedru [29], un centralizētiem radio piekļuves tīkliem (*C-RAN*) [30]. Promocijas darba gaitā eksperimentāli izstrādātā septiņu kanālu *NRZ-OOK* modulētā optiskās pārraides sistēma ar datu pārraides ātrumu 2,5 Gbit/s uz  $\lambda$ , izmantojot jaunās paaudzes 2 km garu *SMCF* optisko šķiedru ar septiņiem kodoliem, redzama *Error! Reference source not found*. Eksperimentālā iestatīšana ietver 2 km garu septiņu kodolu *MCF* ar četriem augšupvēršiem datu pārraides kanāliem (0, 1, 3, 5 serdeņi) un trīs lejupvēršiem datu pārraides kanāliem (2, 4, 6 serdeņi).



4. att. Izstrādātā optiskās pārraides sistēmas ar datu pārraides ātrumu 2,5 Gbit/s uz  $\lambda$ , izmantojot jaunās paaudzes 2 km garu *SMCF* optisko šķiedru ar septiņiem kodoliem blokslēma.

Ņemot vērā iegūtos rezultātus, var secināt, ka *SMCF* optiskās šķiedras ieviestais vājinājums ir 5 līdz 10 reizes lielāks nekā standarta vienmodas *SMF* šķiedrai ( $0,2 \text{ dB/km}$  @  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ), kas skaidrojams ar ienesto vājinājumu *SMCF* šķiedras metinājuma vietā pie *FAN-IN* un *FAN-OUT* pārejām. Centrālajam kodolam (0 kodolam) ir vislielākā šķērsrunas ietekme, savukārt pārējiem apliecošajiem kodoliem (1, 2, 4, 6) ir aptuveni vienāda šķērsrunas ietekme, savukārt 3. un 5. kodolam ir daudz zemāka un augstāka nekā pārējiem ārējiem kodoliem. Uztvertā optiskā signāla (pārraidīts caur 0 kodolu) *BER* atkarībā no uztvertās optiskās jaudas līmeņa uz fotodiodes *PD* redzams *5.att.*



*5. att.* Uztvertā 2,5 Gbit/s NRZ-OOK signāla *BER* atkarībā no uztvertās optiskās jaudas līmeņa ar un bez *FPGA* iespējotas signāla priekšizlīdzināšanas: (a) centrālajam MCF kodolam (0 kodols); (b) centrālajam kodolam 0 un apliecošajiem 1., 3. un 5. kodolam. Acu diagramma uztvertajam 2,5 Gbit/s NRZ signālam: (c) bez izlīdzināšanas; (d) ar *FPGA* izlīdzināšanu centrālajam “0” MCF kodolam.

### 3.3. Spektrāli efektīvas nākamās paaudzes mobilo sakaru optiskās sistēmas milimetru viļņu radio signālu pārraidei caur šķiedru izstrāde un novērtējums (5. nodaļas apskats)

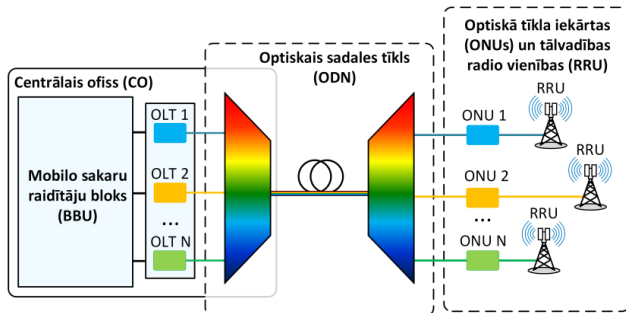
**Piektajā nodaļā** ir apkopota informācija par radio caur šķiedru (RoF) risinājuma lietojumu nākotnes mobilo sakaru risinājumā, t. sk. piektās paaudzes 5G risinājumam.

**5.1. apakšnodaļā** aprakstīti un noteikti piektās paaudzes 5G ieviešanas risinājumi un to galvenie darbības rādītāji (*KPI*). Eiropas Telekomunikāciju pārvalžu konferences komitejas (*CEPT*) ir jau saskaņojusi pirmās joslas 5G lietojumiem. Šīs joslas ir 3,4–3,8 GHz (josla līdz 6 GHz) un 24,25–27,5 GHz (tā sauktā 26 GHz josla). Turklāt *CEPT* ir noteikusi 26 GHz frekvenču joslas diapazonu agrīnai Eiropas saskaņošanai 5G, jo tā nodrošina vairāk nekā 3 GHz joslas spektru ar labvēlīgāku izplatību nekā augstāko frekvenču joslas, kas arī pašreiz tiek izskatītas. Papildus 26 GHz joslai 28 GHz josla ir kļuvusi par otro svarīgāko joslu 5G tīkliem [31]. Šobrīd notiek 5G mobilo sistēmu izpēte un attīstība augstākās frekvencēs, piemēram, 28 GHz frekvenču josla ir paredzēta pilsētu teritorijām un saziņai starp transportlīdzekļiem. Šīs nelicencētās vai daļēji licencētās milimetru viļņu (*mm-viļņu*) frekvenču joslas ir ļoti pievilcīgas nākotnes 5G mobilo sakaru tīkliem. Tāpēc, lai sasniegtu īpaši lielu jaudu un nodrošinātu visuresošu augsta datu pārraides ātruma bezvadu savienojumu vienam mobilajam lietotājam, ir nepieciešamas rentablas hibrīdas fotoniskas bezvadu mm-viļņu sakaru sistēmas, kurās var realizēt bezvadu pārraidi milimetru viļņu joslās [32]. Saskaņā ar *ITU-T G. 9803 rec.*, aplūkojot radio caur šķiedru RoF



sistēmas, *PON* tīkls ir galvenais kandidāts jaunākajām 5G sakaru sistēmām, kas nodrošina savienojumu starp mobilo sakaru raidītāju bloku *BBU* un bāzes stacijas uztvērēja bloku vienībām.

6. att. parādīts 5G sakaru sistēmu risinājums, izmantojot viļņgarumdales blīvēto pasīvo optiskās piekļuves tīklu *PON* ar centralizētu/mākoņa radio piekļuves tīkla *C-RAN* arhitektūru.

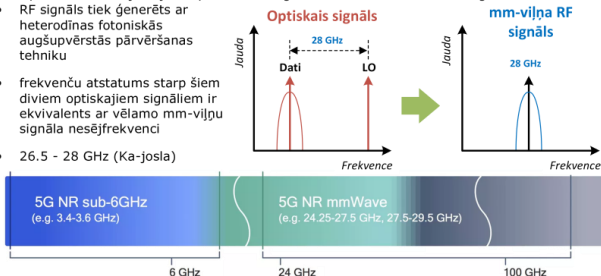


6. att. Centralizēts mobilo sakaru risinājums izmantojot viļņgarumdales blīvēto pasīvo optiskās piekļuves tīklu *PON*.

5.2. apakšnodaļā *RSoft Optsim* simulācijas programmatūrā izveidots simulācijas modelis ar mērķi novērtēt veiktspēju un maksimālo sasniedzamību *A-RoF WDM-PON* pārraides sistēmai ar četriem 2.5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētiem kanāliem (*BBU* atrodas centrālajā ofisā; *CO*), kas ļauj transportēt starpfrekvences esošajā optisko šķiedru sadales tīklā *ODN* ar nosacījumu, ka joprojām ir iespējams uztvertajam signālam ar pirms-*FEC* sasniegt  $BER \geq 1 \times 10^{-3}$ . Izveidotais *A-RoF WDM-PON* optiskās pārraides sistēmas modelis sastāv no 4 kanāliem, kur katrs no tiem darbojas ar 2.5 Gbit/s datu pārraides ātrumu. Saskaņā ar *ITU-T G.964.1 rec.* tiek izvēlēta blīva *WDM* arhitektūra ar 100 GHz starpkanālu atstatumu un 193.1 THz centrālo frekvenci. Tiek pētīta trīs iespējamie *A-RoF* sistēmas mm-viļņa raidītāju *Tx* izveide. Pirmā *A-RoF* raidītāja simulācijas modelis tika izstrādāts, izmantojot divus nepārtraukta viļņa garuma (*CW*) gaismas avotus, kur viens no tiem ir tieši savienots ar intensitātes *Mach-Zehnder* modulatoru (*MZM*). Otrais gaismas avots darbojas kā lokālais oscilators (*LO*). Frekvenču atstatums starp abiem iepriekš minētajiem lāzēriem ir iestatīts 28 GHz, attiecīgi ļaujot ģenerēt 28 GHz (*ka-joslās*) mm-vilni (skat. 7. att.).

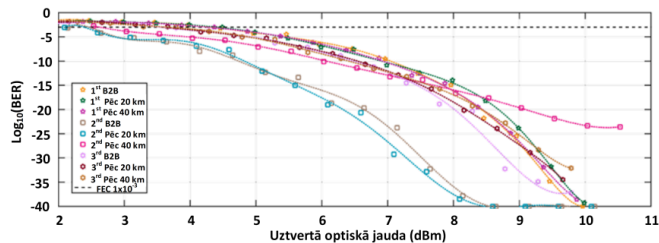
#### mm-viļņu (24 GHz – 300 GHz) ģenerēšanas princips optiskā veidā:

- Optiskais uztvērējs saņem optisko datu signālu vienā frekvencē un *LO* signālu citā frekvencē
- RF signāls tiek ģenerēts ar heterodīnas fotoniskās augšupvērsts pārvēršanas tehniku
- frekvenču atstatums starp šiem diviem optiskajiem signāliem ir ekvivalents ar vēlamo mm-viļņu signāla nesējfrekvenci
- 26.5 - 28 GHz (*Ka-joslā*)



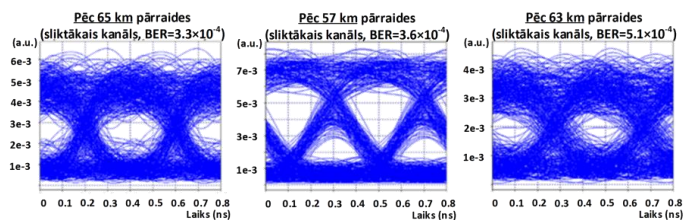
7. att. Optiskā mm-viļņa ģenerācija pēc homodīnas augšupvērsts ģenerēšanas principa.

Pirmā datu modulētā optiskā nesēja ( $F_1$ ) un otrā lokālā oscilatora optiskā nesēja ( $F_{LO1}$ ) starpkanālu intervāla starpība ir vienāda ar nepieciešamo mm-viļņa radiofrekvenci  $RF$  bezvadu signālu pārraidīšanai uztvērēja pusē. **Otrais A-RoF raidītājs WDM-PON** optiskajai pārraides sistēmai tika realizēts, izmantojot divus atsevišķi savienotus nepārtraukta viļņa garuma gaismas avotus ar 28 GHz starpkanālu intervālu, abas optiskās nesēju harmonikas šajā gadījumā tiek modulētas. **Trešā A-RoF raidītāja** realizācija starpfrekvenču  $IF$  ģenerēšanai ir sarežģītāka,  $CW$  lāzera avots ir tieši savienots ar pirmo  $MZM$ , kur modulatora  $BIAS$  punkts ir noregulēts tā nulles punktā. Sinusoidālā signāla ģenerators ar 14 GHz sinusoidālo elektrisko signālu (puse no paredzētās  $IF$  frekvences no mm-viļņa) ir tieši savienots ar pirmo  $MZM$  elektriskā signāla ieeju. Pēc  $MZM$  katrs optiskais signāls tiek izfiltrēts. Pirmais optiskais signāls tiek modulēts. Otrais optiskais signāls ir vājināts. Visbeidzot, abi optiskie signāli tiek savienoti kopā un sagatavoti pārraidei optiskās šķiedras daļā caur  $ODN$ . Katra A-RoF raidītāja veiktspēja un uztvertā signāla  $BER$  atkarībā no uztvertās optiskās jaudas  $PIN$  fotouztvērējā redzama 8. att.. Rezultāti iegūti divos dažādos scenārijos ar 20 un 40 km  $ODN$  šķiedras garumu.



8. att. Salīdzinājums noteiktajām  $BER$  vērtībām pēc  $ED$  atkarībā no uztvertās optiskās jaudas līmeņa 2,5 Gbit/s NRZ- $OOK$  signāliem un atkarībā no A-RoF realizācijas veida un signālu augšupvērsts pārvēršanas metodes 28 GHz nesējfrekvencēm.

Tika secināts, ka maksimālais iespējamais sasniegtais attālums (2.) ieviestajam A-RoF raidītājam ir 57 km ar  $BER 3,6 \times 10^{-4}$  (9(b) att.). Kā redzams 9(a) un 9(c) att., ar (1.) ieviesto A-RoF raidītāju, izmantojot vienu lāzera avotu kā LO, un (3.) ieviesto A-RoF raidītāju, izmantojot sinusoidālo signāla ģeneratoru kā LO, uztvertā signāla  $BER$  tika iegūts  $3,3 \times 10^{-4}$  un  $5,1 \times 10^{-4}$  ar maksimālo sasniegto attālumu 65 km un 63 km.

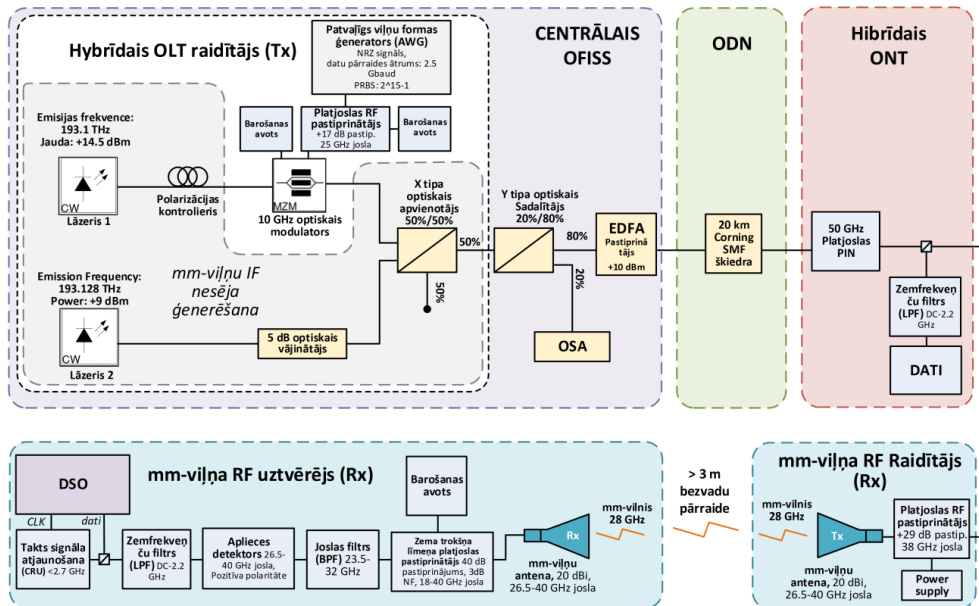


9. att. Uztvertā 28 GHz nesēja signāla acu diagrammas pēc  $ED$  lejupvērsts pārveidošanas pamatjoslā: (a) pēc 65 km pārraides, izmantojot vienu lāzera avotu kā LO; (b) pēc 57 km, izmantojot divus savienotus gaismas avotus; (c) pēc 63 km pielietojot sinusoidālo viļņu ģeneratoru kā LO 4 kanālu WDM-PON pārraides sistēmai ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 2,5 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā.

**5.3. apakšnodaļā** milimetru viļņu hibrīdas fotoniskās bezvadu piekļuves sistēmas izpētei tika izmantota programmatūra *VPI Photonics Design Suite*. Izstrādāta un matemātiski modelēta 8 kanālu 2.5 Gbaud/s *PAM-4* modulēta *WDM-PON* optiskā pārraides sistēma, nodrošinot *RoF* pārraidi 28 GHz 5G mm-viļņu signāla saskarnei. Šīs hibrīdās fotoniskās bezvadu analogās mm-viļņu *RoF-WDM-PON* sistēmas simulācijas modeļa mērķis ir novērtēt veiktspēju un sistēmas sasniedzamību (līdz 40 km atbilstoši *NG-PON2 rec.* prasībām) ar nosacījumu, ka joprojām ir iespējams sasniegt *pre-FEC BER*  $\geq 1 \times 10^{-3}$ . Mobilo sakaru raidītāju bloks *BBU* atrodas pakalpojumu sniedzēja centrālajā ofisā *CO*, ļaujot transportēt starpfrekvences *IF* pa optisko tīklu, un, visbeidzot, signāla augšupvērstā pārveidošana norisinās bāzes stacijas uztvērēja blokos *RU*, kas atrodas bāzes stacijas (*BS*) pusē. Sistēmas ietvaros mm-viļņa signāla ģenerēšanai tika izmantota vienkāršākā realizācijas shēma – divi savienoti lāzera avoti (*CW1* un *CW2*). Šajā pētījumā 8 kanālu *PAM-4* modulētā *ARoF-WDM-PON* optiskā pārraides sistēma ar 2.5 Gbaud/s simbolu pārraides ātrumu un 100 GHz starpkanālu intervālu spēj nodrošināt pārraidi caur *ODN* sekcijas *SSMF* šķiedru vismaz 20 km attālumā, kur *BER* ir ievērojami mazāks par *FEC* sliekšni ( $BER = 4 \times 10^{-8}$ ). Savukārt pēc 40 km pārraides 50 GHz starpkanāla intervāla gadījumā uztvertā un pārveidotā pamatjoslā mm-viļņa signāla *BER* ir  $2,8 \times 10^{-3}$ , kas ir nedaudz virs *FEC* sliekšņa. Tas nozīmē, ka, izmantojot 100 GHz starpkanālu intervāla komerciālo *AWG*, ir tehniski grūti nodrošināt šādu pārraides attālumu. 50 GHz starpkanālu izmantošana tādām hibrīda sistēmām ir ierobežota. Nav iespējams ieviest 50 GHz starpkanālu intervālu, izmantojot komerciālo *AWG*, kur 3-dB joslas platums ir 35 GHz, un līdz ar to *WR-WDM-PON* arhitektūru, jo *AWG* multiplexoram/demultiplexeram ir zema robežfrekvences caurlaides josla, kas rada ievērojamas 28 GHz *IF* signāla pārtraukšanos. Rezultātā tika secināts, ka izmantotā *WR-WDM-PON* arhitektūra var tikt izmantota 2.5 Gbaud/s *PAM-4* modulēta mm-viļņa signāla ģenerēšanai un pārraidei, nodrošinot 100 GHz starpkanālu intervālu, taču mazākam kanālu intervālam, piemēram,  $\leq 50$  GHz, var apsvērt iespēju izmantot viļņa garuma selektīvo slēdzi (*WSS*) ar regulējamu joslas platumu.

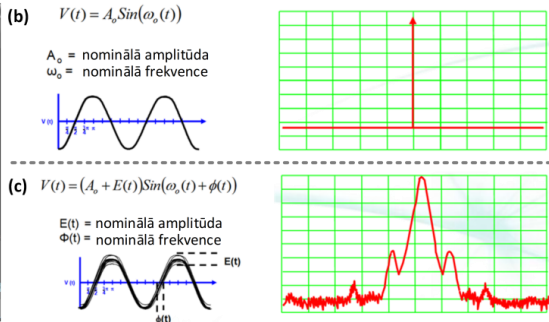
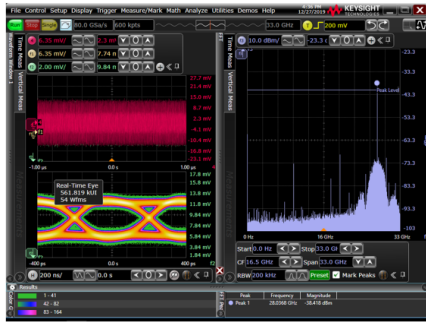
**5.4. apakšnodaļā** iepriekš iegūto simulācijas rezultātu koncepcijas validācijai RTU TI ŠOPS laboratorijā tika uzbūvēts pirmais hibrīda mm-viļņu *RoF* optiskās piekļuves sistēmas modelis ar diviem atsevišķi savienotiem nepārtraukta viļņa *CW* lāzera avotiem, kur viens no tiem tika modulēts ar 2.5 Gbits/s (2.5 Gbaud/s) *NRZ* signālu (*PRBS15*), izmantojot 10 GHz *MZM* modulatoru, kā redzams **10. att.** Eksperimentālā validācija parāda 28 GHz mm-viļņu starpfrekvences *IF* signāla pārraidi (lāzera 1 centrālā frekvence ir 193,1 THz, lāzera 2 centrālā frekvence ir 193,128 THz, veidojot starpfrekvenci 28 GHz) caur optisko piekļuves sistēmas *ODN* sekciju, kā arī bezvada pārraidi (vismaz 3 m), izmantojot 28 GHz radiofrekvenci, ko ir grūti modelēt simulācijas vidē. Katras eksperimentā izmantotās komponentes galvenie tehniskie parametri un attiecīgās sastāvdaļas redzamas **10. att.** Pirmajā izmēģinājumā bezvadu datu pārraides attālums bija 3 m, kur pārraides pamatzudumi brīvajā telpā (*FSPL*) 28 GHz signālam bija 30,93 dB. Neskatoties uz to, ka tika modulēts tikai viens no lāzera avotiem (1. lāzers), pirmie testi ar 2.5 Gbit/s *NRZ-OOK* signālu parādīja, ka *RF* signāls pie 28 GHz ir nestabils, jo tam ir

nesēja nestabilitāte  $\pm 80$  MHz. Rezultējoši nesējfrekvence nav tieši 28 GHz, kā rezultātā tika novērota NRZ signāla trīce un zems acs diagrammas atvērums.



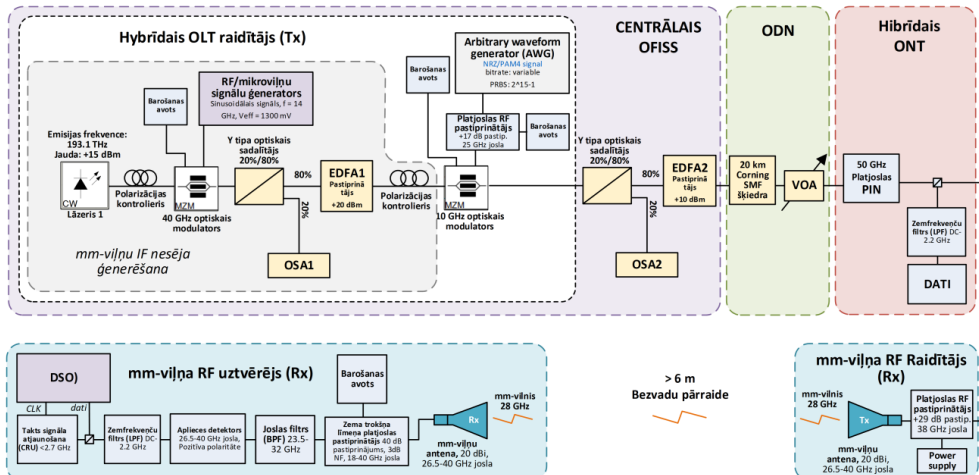
10. att. Pirmā eksperimentālā 2.5 Gbit/s NRZ-OOK modulētā 28 GHz mm-viļņu hibrīda ARoF optiskās piekļuves sistēma ar bezvadu pārraides attālumu vismaz 3 m.

Sakarā ar mm-viļņu nesējfrekvences nestabilitāti šīs variācijas ierobežo spektrāli efektīvu 5G kanālu izvietojumu. Kā redzams **11(a) att.**, nesējfrekvence (spektrs labajā pusē) nav stabila un vienāda ar 28 GHz. Turklāt no acs diagrammas kreisajā pusē var redzēt augstu signāla-trokšņa attiecību (SNR), kā arī atvērums starp loģisko “1” un “0” līmeņiem ir salīdzinoši neliels ar nestabilu amplitūdas variāciju, tādējādi spiežot ciet acs atvērumu. Nesējfrekvences nestabilitāte ir saistīta ar izmantoto lāzera avotu dabisko nestabilitāti, ko izraisa fāzes troksnis (skat. **11(a) un 11(b) att.**), tomēr 2.5 Gbit/s NRZ signālam, kā redzams **11(a) att.**, bija iespējams nodrošināt bez kļūdu pārraidi vismaz 3 m attālumā, kur tika nodrošināti tiešas redzamības apstākļi. PAM-4 signālam 2 loģisko signālu līmeņu vietā ir 4 līmeņi, kuriem ir augstākas optiskā signāla-trokšņa attiecības (OSNR) prasības. Izmantojot šo eksperimentālo sistēmas risinājumu, tika novērots, ka IF nesēja (28 GHz) frekvences nestabilitātes un līdz ar to saņemto viļņu formas kropļojumu dēļ pārraide bez kļūdām nav iespējama (visas trīs PAM-4 signāla acis bija aizvērtas).



11. att. (a) Reālā laika 2.5 Gbaud/s NRZ-OOK signāla acu diagramma (ko iegūst Keysight DSO, izmantojot iebūvētu reālā laika aploces detektoru un DC-2,2 GHz zemas caurlaidības filtru); (b) ideāla signāla; (c) reāla signāla ar nejausām amplitūdas un fāzes izmaiņām salīdzinājums [33].

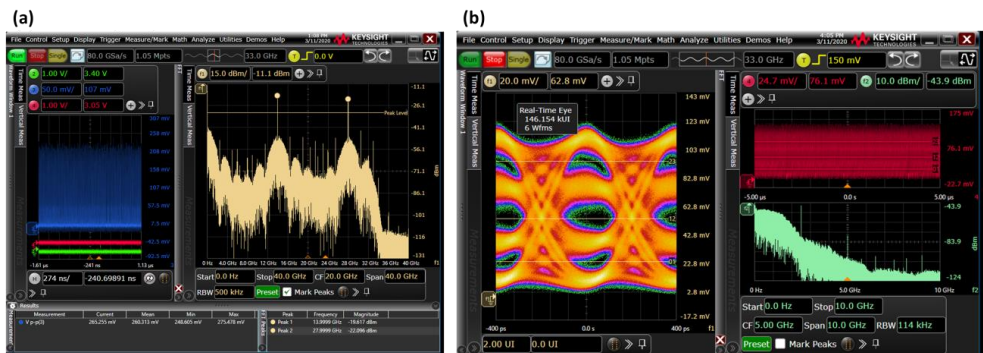
5.5. apakšnodaļā aprakstīta sistēmas realizācija, lai mazinātu lāzera fāzes trokšņa izraisītās 28 GHz IF frekvences nestabilitātes problēmu. Tika mainīts veids, kā tiek ģenerēta IF starpfrekvence, salīdzinot ar iepriekšējo sistēmas realizāciju, kur tika izmantoti divi lāzera signāli (dati un LO). Tā vietā, lai izmantotu divus neatkarīgus pārskaņojamus optiskos šaurjoslas lāzera avotus, tika izmantots tikai viens no tiem (lāzers 1 ar 193.1 THz centrālo frekvenci), un 40 GHz MZM modulators (BIAS tuvu nulles punktam), modulējot ar sinusoidālo signālu, kura frekvence ir vienāda ar pusi (14 GHz) no paredzamās mm-viļņu frekvences, kā redzams 12. att.. Vairāku optisko nesēju ģenerēšanai 40 GHz MZM modulators tika nobīdīts tā nulles punktā ( $V_{DC} = 2,7$  V, kā redzams 12. att.) un darbināts ar 14 GHz sinusoidālu signālu ( $V_{pp} = 3,68$  V) no 31.8 GHz Anritsu RF/mikroviļņu signālu ģeneratora.



12. att. Otrā eksperimentālā 2.5 Gbaud/s NRZ-OOK un PAM-4 modulēta 28 GHz mm-viļņu hibrīda ARoF optiskās piekļuves sistēma ar bezvadu pārraides attālumu vismaz 3 m.

Tādā veidā uz pirmā 40 GHz *MZM* modulatora izejas tika iegūti trīs optiskie nesēji ar 14 GHz intervālu starp katru no tiem, kur attālums starp pirmo un trešo nesēju ir 28 GHz. Attiecīgi šādam optiskajam signālam (satur 3 nesējus) platjoslas 50 GHz *PIN* izeja elektriskajā spektrā pēc heterodīnas uztveršanas ir novērojama pamatjoslas daļa un divi nesēji 14 GHz un 28 GHz frekvencēs. Līdz ar to rezultātu datus tika apkopota arī tā ietekme uz pārraidītā mm-viļņu *RF* signāla viļņu formas kvalitāti, kas samazina heterodīnas augšup-pārveidošanas procesa efektivitāti. Eksperimenta laikā tika konstatēts, ka radītā vidējā 14 GHz nesēja ietekme identificējas kā nenozīmīga, jo vēlāk to dabiski nofiltrēja mm-viļņu *RF* antenas (kuru caurlaides josla ir no 26.5 GHz līdz 40 GHz), zema trokšņa platjoslas pastiprinātājs (*LNA*) ar ierobežotu caurlaides joslu (no 18 GHz līdz 40 GHz) un filtri (*BPF*, 23.5 GHz līdz 32 GHz joslas platums), kā arī aplieces detektors. Jaudas budžeta aprēķini parādīja, ka pārraides attālumu, saglabājot tiešās redzamības apstākļus konkrētajai sistēmai, var palielināt arī līdz 150 metriem.

**13(a) att.** redzams elektriskais signāls (modulēts, 2.5 Gbit/s *NRZ-OOK*, *PRBS15*) un tā spektrs platjoslas *PIN* uztvērēja izejā. Šajā attēlā galvenā uzmanība tiek pievērsta spektram (labajai daļai) – ir novērojams, ka abi nesēju signāli tagad ir stabili, salīdzinot ar pirmo eksperimentālo sistēmas risinājumu. Var novērot 28 GHz nesēju (27.9999 GHz), kā arī nevajadzīgo 14 GHz nesēju (13.9999 GHz).



**13. att.** (a) Uztvertā viļņu forma un tās spektrs platjoslas *PIN* uztvērēja *RF* izvadē. *Pa kreisi* – jaukta bāzes joslas un modulēta 2.5 Gbit/s *NRZ-OOK* signāla viļņu forma uz 14 GHz un 28 GHz nesējiem (pastiprināms un tālāk pārraidāms uz mm-viļņu joslas antenu). *Pa labi* – šīs viļņu formas spektrs *PIN* uztvērēja izejā pēc 20 km pārraides (uzņemts ar Keysight 33 GHz, 80 GSa/s DSO). (b) Uztvertā viļņu forma (*sarkanā krāsā, augšā*) saņemtais un pārveidotais pamatjoslā 5 Gbit/s (2.5 Gbaud) *PAM-4* modulētais 28 GHz mm-viļņu *RF* signāls, tā acu diagramma (*pa kreisi, apakšā*) un spektrs (*labajā pusē, zaļā krāsā*).

**13(a) att.** labajā pusē redzams uztvertā 2.5 Gbit/s *NRZ* signāla spektrs, kas aizņem aptuveni 2.5 GHz. **13(b) att.** redzams, ka pārraidītā un uztvertā 5 Gbit/s *PAM-4* modulēta signāla reālā laika acu diagramma ir plaši atvērta. Kā redzams **13(b) att.**, visas trīs uztvertā *PAM-4* signāla acis ir plaši atvērtas, kas nozīmē, ka var nodrošināt pārraidi bez kļūdām ( $BER < 10^{-9}$ ).

**5.6. apakšnodaļas** mērķis ir izstrādāt hibrīdu *AROF-WDM-PON* pasīvo optisko piekļuves sakaru sistēmu, novērtēt tādas datu un radio signālu pārraides sistēmas veiktspēju, kas realizē bāzes joslas radio signālu apstrādi pakalpojumu sniedzēja centrālā ofisa *CO* daļā, kas ļauj efektīvi nodrošināt platjoslas interneta un mobilo datu pārraides savienojumu starp pakalpojumu sniedzēja

*CO* un galalietotājiem. Mobilo sakaru mm-viļņu raidītāja daļa sastāv no mobilo sakaru raidītāju bloka (*BBU*), kas integrētas *WDM-PON* OLT (atrodas *CO* pusē). Saskaņā ar tipiskas *RoF* sistēmas pamata arhitektūru pakārtotās pārraides gadījumā *CO* ietver OLT ar četriem raidītājiem, kur katrs no tiem ir pārveidots, lai darbotos kā *RoF* raidītājs (*ROF\_Tx*), t. i., paredzēts *A-RoF* sistēmas datiem, nodrošinot 28 GHz starpfrekvenču *IF* ģenerēšanu. Katrs no *ARoF* raidītājiem, kas atrodas OLT, ģenerē mm-viļņu *IF* signālu pēc heterodīnas augšupvērstās pārveidošanas principa un ir izstrādāts, izmantojot divus nepārtraukta viļņa starojuma (*CW*) lāzera gaismas avotus ar līnijas platumu 30 MHz, kur viens no tiem (+8 dBm izejas jauda) ir tieši savienots ar intensitātes *Mach-Zehnder* modulatoru *MZM* [34]. Platjoslas interneta raidītāja daļa atrodas optiskās līnijas terminālī OLT, un sastāv no četriem raidītājiem (OLT\_Tx). Katrs OLT\_Tx raidītājs satur nepārtraukta viļņa starojuma *CW* lāzera avotu (30 MHz līnijas platums, +9 dBm izejas jauda), kas ir tieši savienots ar intensitātes *MZM* modulatoru. *MZM* tiek darbināts ar 10 Gbit/s *NRZ* signālu, iepriekš veicot filtrāciju ar Beselja zemfrekvences filtru (3-dB joslas platums ir 10 GHz). Uztvertā signāla *BER* atkarībā no optiskās jaudas *PIN* fotouztvērējā tika noteikts divos dažādos scenārijos ar 50 un 100 GHz starpkanālu intervālu 8 kanālu hibrīdai *ARoF-WDM-PON* pārraides sistēmai abiem pārraides gadījumiem: (1.) 10 Gbit/s *NRZ* signālam (platjoslas internets); (2.) pēc lejuvērtās pārveides pamatjoslā 2.5 Gbit/s (28 GHz mm-viļņu) 5G signālam iepriekš veicot pārraidi caur 20 līdz 40 km garu *ODN* saturošu *SSMF*. Pēc pārraides ar 50 un 100 GHz starpkanālu intervālu 40 km *ODN* (1.) scenārijā (platjoslas interneta pakalpojumam) *NRZ* signālam, kas darbojas ar datu pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā, galvenokārt signāla kvalitāti ietekmēja *CD*, kur *BER* bija  $1,3 \times 10^{-38}$  un  $9,6 \times 10^{-37}$ .

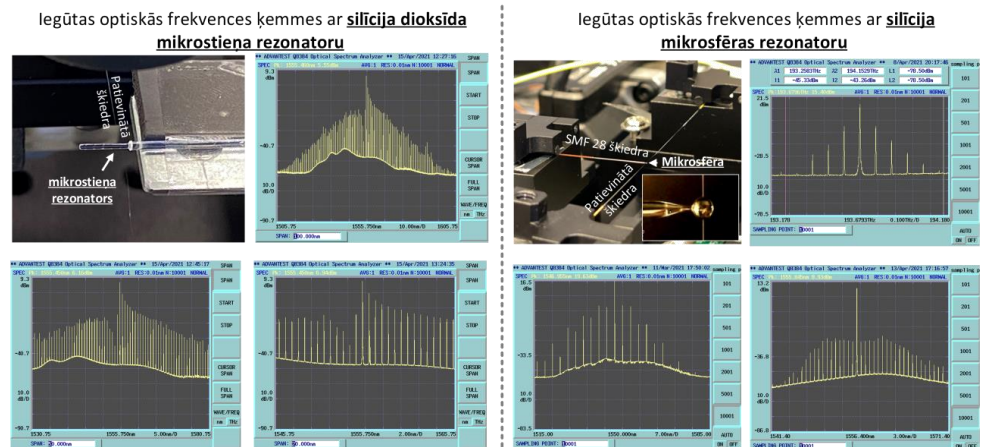
### 3.4. Spektrāli efektīvas *WDM* pārraides sistēmas realizācija ar silīcija mikrosfēras ( $\text{SiO}_2$ ) *WGMR* bāzes veidotu *Kerr OFC* gaismas avotu (6. nodaļas apskats)

Sestajā nodaļā aprakstīts jauna veida spektrāli efektīvas *WDM* pārraides sistēmas realizācija ar silīcija mikrosfēras ( $\text{SiO}_2$ ) *WGMR* bāzes veidotu *Kerr-OFc* gaismas avotu.

**6.1. apakšnodaļā** aplūkotas *Kerr* optisko frekvenču ķemmes *OFc*, kuru pamatā ir čukstošās galerijas režīma mikrorezonators *WGMR*. Konkrētāk, uz *WGMR* balstītie *Kerr-OFc* ķemmes ģeneratori, kas fiziski realizēti uz silīcija dioksīda ( $\text{SiO}_2$ ) mikrosfēras, demonstrē [9] jaunu koncepciju, kas nodrošina pievilcīgu risinājumu *WDM-PON* un iekšējiem *DCI* zemo izmaksu un enerģijas patēriņa dēļ. Datu centra ierīcēm un sistēmām, kas balstās uz skaitļošanas resursu koplietošanu, ir nepieciešama ne tikai liela jauda, bet – pats galvenais – augsta mērogojamība un zems enerģijas patēriņš. Tāpēc šīm prasībām ir nepiešams nodrošināt jaunas pārraides tehnoloģijas tuviem sakariem. Galvenais izdevumu samazināšanas aspekts ir sakaru sistēmas energoefektivitāte un spektrālā efektivitāte. Abus šos kritērijus var sasniegt lāzera bloku vietā, ieviešot *OFc* ģeneratoru. No energoefektivitātes (kā arī spektrālās efektivitātes) viedokļa labāk izmantot vienu gaismas avotu, nevis vairākus lāzerus. **Potenciāli ekonomiski izdevīgi risinājumi datu pārraides realizācijai optiskajos *WDM* tīklos ir *OFc* ģenerēšana silīcija čukstošās galerijas modu rezonatorā. Rezonatorā, kas veidots no kausētas telekomunikāciju šķiedras**

**mikrosfēras, piemēram, Corning SMF 28e (ITU-T G.652), vai mikrotoroīdi un rezonatori, kas ražoti uz silīcija mikrostiņa** un tiek realizēti kā augstas kvalitātes (augsts  $Q$  faktors) optiskais rezonators ar Kerra nelinearitāti, pumpēšanai izmantojot vienu nepārtraukta viļņa lāzeru.

Kad ir izpildīti optimālie nosacījumi, pumpējošā gaismas avota fotoni tiek pārdaļīti, izmantojot četru viļņu sajaukšanu ( $FWM$ ) blakus esošajos darba režīmos, tādējādi izveidojot tā saukto *Kerr OFC*. Pumpējošā avota optiskais signāls tiek ievadīts *Kerr-OFK* rezonatorā caur patievināto šķiedru, un šīs patievinātās šķiedras izvadā tiek ģenerēts *OFK*. ***Kerr-OFK* izejas spektrs optiskās frekvences ķemmi, kas iegūts silīcija dioksīda mikrosfēru rezonatorā ražotā no kausētas telekomunikāciju šķiedras un OFK ķemmes iegūtās silīcija dioksīda mikrostiņi, redzams 14. att.** *Kerr* mikrorezonatora *OFK* var sasniegt simtiem nanometru joslas platumu, kas aptver dažādas (piemēram, E-, S-, C- un L-) telekomunikāciju joslas. *OFK* avots var izveidot vienādi izvietotu (saskaņā ar ITU-T G. 694.1 rekomendāciju) optisko spektrālo līniju (nesēju) režģi, kas nepieciešams datu kanālu uzturēšanai.



Mikrostiņa rezonatori var nodrošināt labāku optiskās ķemmes stabilitāti laikā un iespējot fotonisko integrāciju, savukārt silīcija dioksīda mikrosfēru rezonatoru ražošanas izmaksas un sarežģītības pakāpe ir nesalīdzināmi zemākas.

**14. att.** RTU TI ar silīcija mikrostiņa un silīcija mikrosfēras rezonatoriem iegūtās optiskās frekvenču ķemmes.

Šīs ķemmes līnijas pēc tam tiek izmantotas kā optiskie nesēji datu pārraidei, izmantojot intensitātes modulācijas tiešo noteikšanu *IM/DD*, kur var izmantot *NRZ-OOK* vai sarežģītāku *PAM-4* modulācijas formātu.

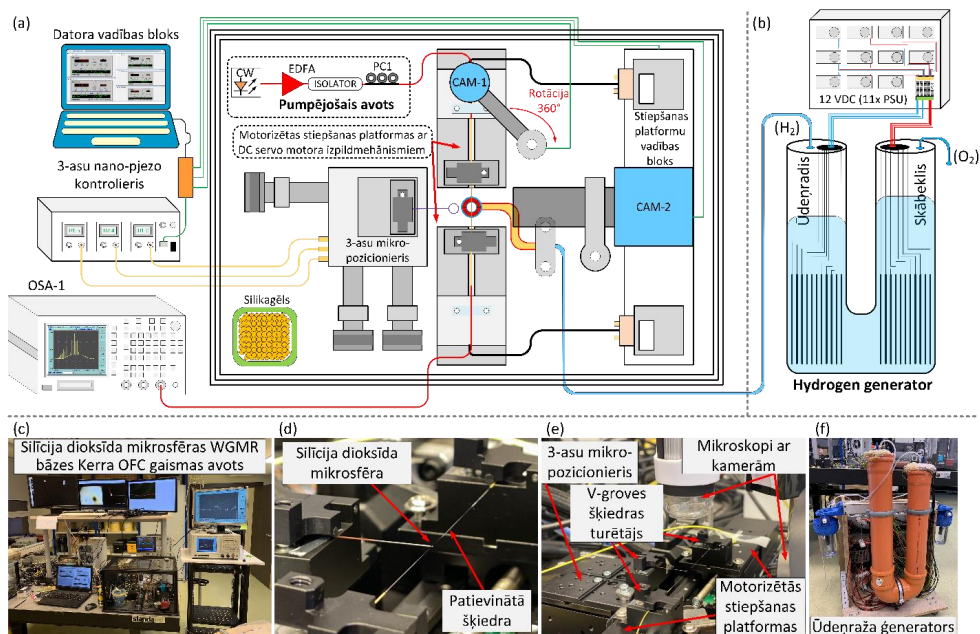
**Promocijas darba ietvaros autors spēj parādīt iegūtos un publicētos rezultātus par silīcija dioksīda mikrosfērām telekomunikāciju pielietojumam; diemžēl mikrostiņu *Kerr-OFK* avota rezultāti (izmantoti kā gaismas avots telekomunikāciju lietojumprogrammām) ir pakļauti intelektuālā īpašuma tiesībām, kas noteiktas ERAF projekta līgumā!**

Ir svarīgi minēt, ka projekta komanda eksperimentāli pirmo reizi pasaulē demonstrēja atdrabīgu datu pārraidi, izmantojot silīcija dioksīda mikrosfērā ģenerētas harmonikas. Šajā



pasaules līmeņa eksperimentā iegūtie pētījuma rezultāti ir aprakstīti publikācijā, kuras pirmais autors un galvenais izpildītājs ir **Toms Salgals** – “*Demonstration of a fiber optical communication system employing a silica microsphere-based OFC source*”, Optics Express (Q1 Journal), 29, 10903-10913 (2021).

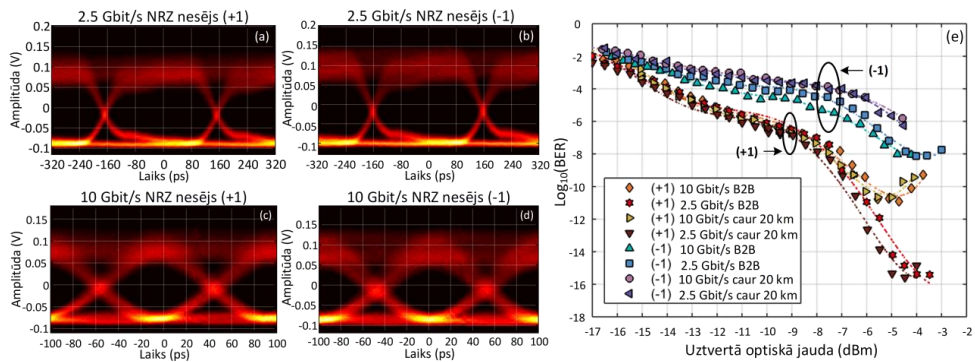
**6.2. apakšnodalā** tiek aprakstīta ar *WGMR* balstīta *Kerr-OFc* gaismas avota eksperimentāla uzstādīšana, kas darbojas C joslā un tiek izmantots 400 GHz optisko nesēju ģenerēšanai. Šajā apakšnodalā aprakstīts arī patievinātās šķiedras (adiabātiski patievinātas optiskās SMF šķiedras) ražošanas process, ko izmanto gaismas ievadīšanai/izvadīšanai silīcija dioksīda mikrosfērā un no tās, un eksperimentālā iekārta, ko izmanto, lai raksturotu savienojuma apstākļus starp silīcija dioksīda mikrosfēru un patievināto šķiedru. Izstrādātā eksperimentālā sistēmā, kas izmantota *WGMR* balstītai *Kerr-OFc* ģenerēšanai, redzama **15. att.**



**15. att.** (a) Eksperimentālā sistēma, kas demonstrē izstrādāto silīcija dioksīda mikrosfēras *WGMR* balstītu *Kerr-OFc* kā gaismas avotu optiskajiem sakariem. (b) Ūdeņraža ģeneratora shēma ūdeņraža ( $H_2$ ) un skābekļa ( $O_2$ ) ražošanai ar ūdens elektrolīzi. (c) Foto ilustrācija, kas demonstrē silīcija dioksīda mikrosfēras *WGMR* bāzes *Kerr-OFc* gaismas avotu. (d) Patievinātās adiabātiskas šķiedras un silīcija dioksīda mikrosfēras rezonatora pozīcijas korpusa kastē, kas novērš putekļu un gaisa plūsmu. (e) Trīs asu X, Y un Z mikropozicionieris ar iebūvētu pjezo kontrolleri un kompaktiem motorizētiem stiepsšanas galdīņiem kopā ar tālummaiņas mikroskopiem, ko izmanto, lai uzraudzītu *WGMR* rezonatora pozīciju. (f) Foto ilustrācija, kurā attēlots ūdeņraža ģenerators tīra ūdeņraža un skābekļa ražošanai.

**6.3. apakšnodalā** parādīta pirmā veiksmīgā eksperimentālā datu pārraides demonstrācija, kuras pamatā lāzera gaismas avotu vietā kā gaismas avots ir izmantotas mikrosfēras rezonatorā *OFc* ģenerētās harmonikas. Pirmo reizi pasaulē eksperimentāli tika prezentēts izstrādātais silīcija

dioksīda mikrosfēras čukstošās galerijas modu mikrorezonatora (*WGMR*) *OFC* kā *C* joslas gaismas avots, kura jaunģenerētās harmonikas ar 400 GHz *FSR* nodrošina datu pārraidi līdz pat 10 Gbps *NRZ-OOK* modulētiem signāliem caur standarta *ITU-T. G.652* telekomunikāciju šķiedru 20 km garumā. Sākotnēji *OFC* ģenerēšana tika sākta, meklējot stabilas ķemmes optiskā spektra analizatorā. Pēc *OFC* ģenerēšanas tika novērots, ka ķemmes līnijām (-1) un (+1) harmonikām ir atšķirīga veiktspēja – jaudas nestabilitāte 10 stundu periodā ir aptuveni 3 dB robežās, jo rezonators spēj atbalstīt vairākus telpiskos režīmus. Atbilstoši *NG-PON2* prasībām tika izvēlēts 20 km pārraides attālums. **16(e) att.** redzams, ka optiskais nesējs, kas apzīmēts kā (+1), nodrošināja augstāko sistēmas veiktspēju, kur saņemtā optiskā jauda svārstās no -4 līdz -17,5 dBm, un *BER* 2.5 Gbps *NRZ-OOK* signālam ir diapazonā no  $1,39 \times 10^{-15}$  līdz  $7,76 \times 10^{-3}$ . Kā redzams **16(e) att.**, *BER* līknes, kas liecas uz augšu, tiek novērotas pie salīdzinoši augstiem konstatētajiem jaudas līmeņiem *WGMR-OFC* ķemmes nesējam (+1) pie 10 Gbit/s datu pārraides ātruma *B2B* slēgumā un pēc 20 km pārraides, kā arī (-1) nesējam ar 2.5 Gbit/s datu pārraides ātrumu *B2B* slēgumā. To varētu izskaidrot ar detektora piesātinājumu, nelineāriem optiskiem procesiem rezonatorā vai pārraidi šķiedrā.



**16. att.** Uztvertā signāla acu diagrammas pēc 20 km pārraides caur SMF šķiedru ar datu pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s (a) nesējam “+1” un (b) nesējam “-1”, un ar datu pārraides ātrumu 10 Gbit/s (c) nesējam “+1” un (d) nesējam “-1”. (e) BER pret vidējo saņemto optisko jaudu B2B un pēc 20 km pārraides gadījumos NRZ-OOK modulētajiem optiskajiem signāliem ar datu pārraides ātrumu 2.5 Gbit/s un 10 Gbit/s izmantojot “+1” un “-1” nesējus.

**6.4. apakšnodaļā** uz *WGMR* balstītu *Kerr-OFC* kā gaismas avotu izmanto, lai demonstrētu *NRZ-OOK* modulētu datu pārraidi līdz 50 Gbit/s uz  $\lambda$  caur 2 km *SMF* (**datu pārraides ātruma rekords konkrētajā jomā**). Bez pēcizlīdzināšanas uztvertie 40 Gbaud/s un 50 Gbaud/s *NRZ-OOK* signāli lielākoties nerasniedz 7 % spēcīga lēmuma turpvērstās kļūdas labošanas koda (*HD-FEC*) definēto sliekšni *Kerr-OFC* ģenerētajiem nesējiem (-1), (0) un (+1). Šādos gadījumos galvenie ierobežojumi ir salīdzinoši zems elektrisko komponentu efektīvais joslas platums un *ISI*. Lielākam datu pārraides ātrumam ir jāsamazina dispersijas izraisītā jaudas izkliedēšana un jāpiemēro signāla izlīdzināšana, lai sasniegtu *BER* sliekšni  $5 \times 10^{-3}$ . Tāpēc tiek lietota adaptīvā lineārā ekvalizācija (struktūra sastāv no *33-FF* un *15-FB* normējumiem). Normējuma skaits ekvalizācijai ir izvēlēts tā, lai maksimāli uzlabotu veiktspēju, novēršot elektrisko komponentu joslas platuma ierobežojumus

un hromatisko izkliedi. Rezultāti liecina, ka šāda pēcizlīdzināšana ievērojami uzlabo *BER* veikspēju, salīdzinot ar iepriekšējo gadījumu bez pēcizlīdzināšanas. Pēcizlīdzināšana var ievērojami uzlabot signāla kvalitāti *Kerr-OFD* ģenerētajiem nesējiem (-1), (0) un (+1) vai pat iespējot jaunas modulācijas formāta alternatīvas. Ar lineāro pēcizlīdzināšanu (*33-FF* un *15-FB* normējumu) *BER* veikspēja ir ievērojami uzlabota nesējam (+1), kas ļauj sasniegt *BER* zemāko robežu zem 7 % *HD-FEC* robežas *NRZ-OOK* signāliem pat pie 60 GBbaud/s.

## SECINĀJUMI

1. Datu pārraides attāluma palielināšanai virs 27 km *WDM-PON* pārraides sistēmas ar 50 GHz starpkanālu intervālu ir nepieciešams aizvietot *NRZ-OOK* ar daudzlīmeņu modulācijas formātiem (*PAM-4*, *EDB*), lai nodrošinātu pārraides sasniedzamību līdz 50 km vai 62 km, kur *EDB* modulācijas formāta pielietojumam ir par 19 % labāka pārraides sasniedzamība nekā spektrāli efektīvam (10 Gbaud/s) *PAM-4*, kas skaidrojams ar hromatiskās dispersijas un *SNR* ietekmei saistītu ar atstatumu starp *PAM-4* signāla līmeņiem.
2. Novērtējot dispersijas kompensācijas metodes *NG-PON2 ITU-T G.989.3* rekomendācijas prasībām atbilstoši *WDM-PON* pārraides sistēmai, ir iespējams nodrošināt 40 km pārraides attālumu *NRZ* modulētam signālam ar datu pārraides ātrumu no 20 Gbit/s līdz 40 Gbit/s uz  $\lambda$  ar sistēmas darbības diapazonā (C-joslās) platumā piemērotu *FBG-DCM*, nepārsniedzot uztvertā signāla *BER*  $\geq 1 \times 10^{-3}$  robežvērtību ar 3 dB mazāku uztvertā signāla jaudu nekā *DCF* gadījumā, būtiska ietekme uz *BER* (2–5 *BER* pakāpes pie 20 Gbit/s un 40 Gbit/s pārraides ātruma) rodas *NOE* iespaidā.
3. Datu pārraides ātruma palielināšanai 10 Gigabitu *PON (XG-PON)* un ātrgaitas *PON (HS-PON)* pārraides sistēmās novērtējot intensitātes modulāciju (*NRZ*, *PAM-4*, *PAM-8*, *EDB*) nodrošināto veikspēju pēc 20 km pārraides, tika secināts, ka pie 28 Gbit/s datu pārraides ātruma uz  $\lambda$  nepārsniedzot *BER*  $\geq 1 \times 10^{-3}$  robežvērtību bez *AEQ* iespējams sasniegt, pielietojot 28 Gbaud/s (*NRZ*, *EDB*) un 14 Gbaud/s (*PAM-4*) signālu modulāciju, savukārt 42 Gbit/s un 56 Gbit/s datu pārraides ātrumu uz  $\lambda$ , nepārsniedzot *BER*  $\geq 1 \times 10^{-3}$  sliekšni, iespējams nodrošināt ar adaptīvi normētu *43-FFT* un *21-FBT AEQ* uzstādīšanu pielietojot 14 Gbaud/s (*PAM-8*) un 28 Gbaud/s (*PAM-4*) signāla modulāciju.
4. Balstoties uz eksperimentālajiem rezultātiem un promocijas darbā apkopoto informāciju, var secināt, ka *SMCF* šķiedras ir piemērotas īsa attāluma ( $\leq 10$  km) lielu datu pārraides gadījumā datu centru savstarpējo savienojumu (*DCI*) risinājumos. *SDM-WDM* tehnoloģiju kombinētajā risinājumā – daudzkodolu septiņu kodolu *SMCF* šķiedrā spektrāli efektīvas telpiski kapacitatīvas *IM/DD PON* sakaru sistēmas realizācijā 2.5 Gbit/s (*NRZ*) modulētu signālu pārraidi ietekmējošie faktori ir kodolu nevienlīdzīgie ienestie zudumi, šķērsrunas ietekme, kas ietekmē katras  $1 \times 7$  *SMCF* serdes uztvertā signāla jaudu ( $\sim 8,2$  dB kodolu *IL* starpība), būtiski ietekmējot katrā serdē uztvertā signāla *BER* (ap piecām *BER* pakāpēm). Savukārt *A-RoF* sakaru sistēmu realizācijā *SDM-WDM* tehnoloģijas kombinētajā risinājumā *SMCF* optiskās šķiedras ir pielietojamas gadījumā, ja starpfrekvences *IF* viena optiskā kanāla ietvaros

pārraidei tiek izmantots viens *SMCF* šķiedras kodols. Tas skaidrojams ar augstu diferenciālo modu aizkavi (*DMD*) (gadījumā, ja tiek izmantoti divi atsevišķi vienas *MCF* šķiedras kodoli), kas rezultātā noved pie uztvertā signāla degradācijas laika aizkaves iespaidā.

5. *ARoF-WDM-PON* koherentas optiskās pārraides sistēmās ar intensitātes modulāciju (*NRZ*, *PAM-4*) signāla augšupvērstās pārvēršanas tehnikas nodrošinātai milimetra-viļņa radiosignālu pārraidei caur šķiedru vismazāk uztvertā signāla *BER* vērtību iespējams sasniegt, izmantojot heterodīnu pārraides un detektēšanas tehniku. Primāri *RoF* raidītājam, izmantojot vienu *CW* nepārtraukta starojuma lāzera gaismas avotu, nepieciešamās optiskās joslas apgabala centrālajā emisijas frekvencē (atbilstoši *ITU-G694.1* rekomendācijai) un sinusoidāla elektriskā signāla ģeneratoru kā *LO*, kur *RF* ir puse no milimetra-viļņa signāla nesējfrekvences *IF*. Sekundāri izfiltrējot iegūto  $F_n$  nesējfrekvenci un veicot (*NRZ*, *PAM-4*) modulāciju, apvienojot  $F_n$  un  $F_{LO}$  vienā optiskā kanālā. Izmantojot vienu *CW* nepārtraukta starojuma lāzera gaismas avotu slēgumā, kur elektriskā signāla ģenerators tiek izmantots kā *LO*, divi izveidotie optiskie nesējsignāli  $F_n$  un  $F_{LO}$  ar atbilstošu frekvenču intervālu *IF* ģenerētajam milimetra-viļņa signālam ir noturīgi pret  $\lambda$  nevienmērīgi ierosinātām svārstībām atkarībā no temperatūras izmaiņām (nesēja nestabilitāte  $\pm 80$  MHz), kā arī tiek nodrošināts zems fāzes troksnis, līdz ar to neierobežojot fāzes modulācijas izmantošanu milimetru-viļņa radiosignāla pārraidei. Ja abiem lāzera avotiem ir nestabila centrālā frekvence, arī mm viļņu frekvence ir nestabila – tā dreifē.
6. Hibrīdajā *ARoF-WDM-PON* sakaru sistēmā *NRZ* kodētu optisko signālu pārraidei ar datu pārraides ātrumu līdz 10 Gbaud/s uz  $\lambda$  optisko signālu pārraidei un 2.5 Gbaud/s (*NRZ*, *PAM4*) kodēta 28 GHz (*ka-josla*) milimetru-viļņu signālu pārraidei ar datu pārraides ātrumu kanālā līdz 5 Gbit/s caur 20 km garu šķiedru optisko līniju galvenie kanālu pārraidi ietekmējošie faktori ir hromatiskā dispersija, pārraides sistēmas amplitūdas frekvenču raksturojums, kā arī pārraides pamatzudumi brīvā telpā (*FSPL*). Savukārt 28 GHz milimetra-viļņa *IF* radio signālu nav iespējams ieviest *ARoF-WDM-PON* ar 50 GHz starpkanālu intervālu, izmantojot komerciālu *AWG* (būtiska ietekme uz  $BER \leq 1 \times 10^{-3}$ ), kur 3-dB joslas platums ir 35 GHz, līdz ar to *WR-WDM-PON* arhitektūra zemās *AWG* multiplexera/demultiplexera frekvences caurlaides joslas dēļ izraisa ievērojamu 28 GHz *IF* signāla izfiltrēšanu. Tāpēc *WR-WDM-PON* arhitektūru var izmantot 2.5 Gbaud/s *PAM-4* modulēta milimetra-viļņa signāla ģenerēšanai, kā arī 10 Gbaud/s (*PAM-4*) modulēta platjoslas interneta signālu pārraidīšanai pie 100 GHz starpkanālu intervāla. Tomēr mazāku strpakanālu intervālu, piemēram, 50 GHz, tehniski ir iespējams realizēt, izmantojot viļņa garuma selektīvo optisko slēdzi (*WSS*).
7. Potenciāli ekonomiski izdevīgi risinājumi datu pārraides realizācijai optiskajos *WDM* tīklos ir *OFC* ģenerēšana silīcija *WGMR* – no kausētas telekomunikāciju šķiedras ražotas mikrosfēras, piemēram, *Corning SMF 28e (ITU-T G.652)* optiskās šķiedras, kas tiek realizēts kā augstas kvalitātes (*Q* falotora) optiskais rezonators, kas tiek pumpēts, izmantojot vienu *CW* nepārtraukta starojuma lāzera gaismas avotu. *Kerra* mikrorezonatora *OFC* var sasniegt simtiem nanometru joslas platumu, kas aptver (piemēram, E-, S-, C- un L-joslas)

telekomunikāciju joslas. *OFC* avots spēj nodrošināt (saskaņā ar *ITU-T G. 694.1* rekomendāciju) optiskās spektrālās harmonikas, kas nepieciešams datu kanālu pārraidīšanai telekomunikāciju sistēmās. Šī vairāku spektrālo harmoniku ģenerēšanas priekšrocība attiecas arī uz *WDM* uztvērējiem, kur lokālo oscilatoru LO masīvu var aizstāt ar vienu *OFC*. Šādi risinājumi ir svarīgi mobilo tīkla 5G (un nākamajai) paaudzei, kur optiskā signāla lejupvēršana milimetru-viļņu joslās (piemēram, Ka-josla (26–28 GHz)), izmantojot stabilu LO, pie uztvērēja puse var būt nepieciešama kā arhitektūras risinājuma sastāvdaļa. Silīcija dioksīda mikrosfēras *OFC* avoti viļņgarumadales blīvētājām (*WDM*) sistēmām aptver vairākus izmantošanas lietojumus, sākot no īsas sasniedzamības (piemēram, datu centru starpsavienojumiem (*DCI*)) līdz metro piekļuves optiskās šķiedras sistēmām, kas savieno lielas ģeogrāfiskas teritorijas.

**Promocijas darba gaitā pirmo reizi tika izstrādāta 170 μm silīcija mikrosfēras (SiO<sub>2</sub>) čukstošās galerijas modas rezonatora (*WGMR*) bāzes veidots *Kerr OFC* kā C joslas gaismas avots, kur 400 GHz starpkanālu intervālā esošie nesēji nodrošina datu pārraidi līdz 10 Gbit/s uz λ *NRZ* modulētiem signāliem bez *AEQ* caur *ITU-T G.652* telekomunikācijai atbilstošu šķiedru 20 km garumā, kas ir piemērota *IM/DD XG-PON* pārraides sistēmu arhitektūrai. Izstrādātajam jaunajam gaismas avotam ir arī potenciāls demonstrēt jaunu zemu izmaksu koncepciju, kas nodrošina pievilcīgu risinājumu datu centra starpsavienojumiem (*DCI*), tādējādi var nodrošināt zemu izmaksu un zemas sarežģītības *IM/DD* shēmu *NRZ* modulētu optisko signālu pārraidei ar datu pārraides ātrumu līdz 50 Gbit/s uz λ caur 2 km *SMF*. Šāds datu pārraides ātrums (50 Gbps uz λ) silīcija mikrosfēras *WGMR* bāzes *Kerr-OFC* gaismas avotam ir datu pārraides ātruma rekords. Iegūtie rezultāti pierāda, ka pirms un pēc izlīdzināšanas *AEQ* metodes ļauj pārvarēt *ISI* un palīdz atgūt signālu no kropļojumiem, ko izraisa ierobežots joslas platums, tādējādi nodrošinot lielākas datu pārraides ātruma alternatīvas iekšējiem *DCI* starpsavienojumu risinājumiem. Pārraides eksperimenti abos gadījumos tika veikti ar diviem jaunģenerētiem *OFC* nesējiem (*FSR* 400 GHz) ar augstāko maksimālo optiskās jaudas līmeni ( $\geq -15$  dBm).**

Zemāku *FSR* starp ķemmes harmonikām var panākt, izmantojot *WGMR* ar lielāku diametru. Lai iegūtu 200 GHz *FSR* jeb starpkanālu intervālu, var izmantot ~ 330 μm diametra silīcija dioksīda mikrosfēras. Lai iegūtu standarta 100 GHz *FSR*, var izmantot ~ 660 μm diametra silīcija dioksīda rezonatoru. Optimālam 100 GHz starpkanāla intervāla variantam mikrosfēras var nebūt ļoti optimāla izvēle, jo tiek ierosināti *WGM* no pamata režīma, tāpēc šim nolūkam būtu lietderīgi izmantot silīcija dioksīda mikrostriņus. Turklāt, izmantojot lielākus *WGMR*, salīdzinot ar 170 μm, pamata režīmu efektīvā lauka platība būs lielāka, tāpēc nelineārais *Kerra* koeficients  $\gamma$  būs mazāks. Nelineārie procesi, kas izraisa *OFC* ģenerēšanu, ir atkarīgi no  $\gamma \times P_{pump}$ , tāpēc ir jāpalielina sūkņa jauda  $P_{pump}$ , kas nozīmē, ka pieaug arī jauda katrā harmonikā.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] The Zettabyte Era – Trends and Analysis Cisco, see online: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html>.
- [2] J. L. Wei, K. Grobe, and H. Griesser, “High speed next generation passive optical networks: performance, cost, and power dissipation,” *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, pp. 4856–4857, Shanghai, China, 8–11 Aug (2016), DOI: [10.1109/PIERS.2016.7735774](https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735774).
- [3] Bobrovs, V., A. Udalcovs, and G. Ivanovs, “Power efficiency vs. spectral efficiency and trans-mission distance in 2.5-10-40 Gbps backbone optical networks,” *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, pp. 202–205, Athens, Greece, May 21–23, (2014), DOI: [10.1109/ISCCSP.2014.6877850](https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2014.6877850).
- [4] S. Spolitits, V. Bobrovs, S. Berezins, and G. Ivanovs, “Optimal design of spectrally sliced ASE seeded WDM-PON system,” *2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)*, pp. 1–5, Rome, Italy, Oct. 15–18, (2012), DOI: [10.1109/NETWKS.2012.6381687](https://doi.org/10.1109/NETWKS.2012.6381687).
- [5] B. Zhu, T. F. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M. F. Yan, J. M. Fini, E. M. Monberg, and F. V. Dimarcello, “112-Tb/s Space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 768-km seven-core fiber,” *Opt. Express* 19 (17), 16665 (2011), DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.19.016665>.
- [6] K. Saitoh and S. Matsuo, “Multicore Fiber Technology,” *J. Lightwave Technol.* 34 (1), 55–66 (2016), DOI: [10.1109/JLT.2015.2466444](https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2466444).
- [7] C. Xiong, D. M. Gill, J. E. Proesel, J. S. Orcutt, W. Haensch, and W. M. J. Green, “Monolithic 56 Gb/s silicon photonic pulse-amplitude modulation transmitter,” *Optica* 3 (10), 1060 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.001060>.
- [8] K. Zeb, X. Zhang, and Z. Lu, “High Capacity Mode Division Multiplexing Based MIMO Enabled All-Optical Analog Millimeter-Wave Over Fiber Fronthaul Architecture for 5G and Beyond,” *IEEE Access* 7, 89522–89533 (2019), DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2926276](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926276).
- [9] T. Salgals, J. Alnis, R. Murnieks, I. Brice, J. Porins, A. V. Andrianov, E. A. Anashkina, S. Spolitits, and V. Bobrovs, “Demonstration of a fiber optical communication system employing a silica microsphere-based OFC source,” *Opt. Express* 29, 10903–10913 (2021), DOI: [10.1364/OE.419546](https://doi.org/10.1364/OE.419546).
- [10] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt, “Optical atomic clocks,” *Rev. Mod. Phys.* 87, 637–701 (2015), DOI: [10.1103/RevModPhys.87.637](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.637).
- [11] D. Kwon, I. Jeon, W. K. Lee, M. S. Heo, and J. Kim, “Generation of multiple ultrastable optical frequency combs from an all-fiber photonic platform,” *Science Advances* 6, (2020), DOI: [10.1126/sciadv.aax4457](https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4457).

- [12] H. H. Lu, A. M. Weiner, P. Lougovski, and J. M. Lukens, "Quantum Information Processing With Frequency-Comb Qudits," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 23, 1858–1861, (2019), DOI: [10.1109/LPT.2019.2942136](https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2942136).
- [13] J. Pfeifle, V. Brasch, M. Lauermaun, Y. Yu, D. Wegner, T. Herr, K. Hartinger, P. Schindler, J. Li, D. Hillerkuss, R. Schmogrow, C. Weimann, R. Holzwarth, W. Freude, J. Leuthold, T. J. Kippenberg, and C. Koos, "Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs," *Nature Photon* 8 (5), 375–380 (2014), DOI: [10.1038/nphoton.2014.57](https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.57).
- [14] D. Kong, H. Xin, K. Kim, Y. Liu, L. K. Oxenløwe, P. Dong, and Hao Hu, "Intra-Datacenter Interconnects With a Serialized Silicon Optical Frequency Comb Modulator," *J. Lightwave Technol.* 38, 4677–4682, (2020), DOI: [10.1109/JLT.2020.2996410](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2996410).
- [15] D. Nasset, "PON Roadmap [Invited]," *J. Opt. Commun. Netw.* 9 (1), A71 (2016), DOI: [10.1364/JOCN.9.000A71](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000A71).
- [16] Y. Zhicheng, L. Shengping, C. Ning, L. Xiang, "Demonstration of high-performance cost-effective 100-Gb/s TWDM-PON using 4x 25-Gb/s optical Duobinary channels with 16-GHz APD and receiver-side post-equalization," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Sept. 27–Oct. 1, (2015), DOI: [10.1109/ECOC.2015.7341627](https://doi.org/10.1109/ECOC.2015.7341627).
- [17] J. L. Wei, K. Grobe, C. Wagner, E. Giacomidis, and H. Griesser, "40 Gb/s Lane Rate NG-PON using Electrical/Optical Duobinary, PAM-4 and Low Complex Equalizations," *Optical Fiber Communication Conference*, (2016), DOI: [10.1364/OFC.2016.Tu3C.5](https://doi.org/10.1364/OFC.2016.Tu3C.5).
- [18] D. Brunina, S. Porto, A. Jain, C. P. Lai, C. Antony, N. Pavarelli, M. Rensing, G. Talli, P. Ossieur, P. O'Brien, and P. D. Townsend, "Analysis of Forward Error Correction in the Upstream Channel of 10Gb/s Optically Amplified TDM-PONs," *Optical Fiber Communication Conference*, 1–3, Los Angeles, CA, (2015), DOI: [10.1364/OFC.2015.Th4H.3](https://doi.org/10.1364/OFC.2015.Th4H.3)
- [19] A. Korra, T. Salgals, J. Porins, E. Kazoks, R. Miho and S. Spolitis, "Performance Analysis of Cost-efficient High-speed up to 32 Gbit/s WDM-PON Next-generation Access Network with Dispersion Compensation," *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring)*, pp. 2671–2678, Rome, Italy, June 17–20, (2019), DOI: [10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017854](https://doi.org/10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017854).
- [20] ITU-T Recommendation G.989.2, "Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks–40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification", pp. 1–122, (2019), See online: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.989.2-201902-I!!PDF-&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.989.2-201902-I!!PDF-&type=items).
- [21] ITU-T Recommendation G.9807.1., "Access Networks–Optical Line Systems for Local and Access Networks, 10-Gigabit-Capable Symmetric Passive Optical Network (XGS-PON)," see online: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9807.1-202010-I!Amd2!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9807.1-202010-I!Amd2!PDF-E&type=items).

- [22] ITU-T PON Standards-Progress and Recent Activities Q2/SG15, (accessed on 30 July 2020). See online: [https://www.itu.int/ne/ITU-T/studygroups/2017-2020/15/Documents/OFC2018-2-Q2\\_v5.pdf](https://www.itu.int/ne/ITU-T/studygroups/2017-2020/15/Documents/OFC2018-2-Q2_v5.pdf).
- [23] P. Li, L. Yi, L. Xue and W. Hu, "56 Gbps IM/DD PON based on 10G-Class Optical Devices with 29 dB Loss Budget Enabled by Machine Learning," *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, pp. 1–3, San Diego, CA, USA, 11–15 March (2018), DOI: [10.1364/OFC.2018.M2B.2](https://doi.org/10.1364/OFC.2018.M2B.2).
- [24] ITU-T standards. LS–High Speed PON Liaison to IEEE P802.3ca, (accessed on 30 July 2020). See online: [http://www.ieee802.org/3/minutes/mar18/incoming/ITU\\_SG15-LS-95\\_to\\_IEEE\\_802d3.pdf](http://www.ieee802.org/3/minutes/mar18/incoming/ITU_SG15-LS-95_to_IEEE_802d3.pdf).
- [25] P. Torres-Ferrera, H. Wang, V. Ferrero, R. Mercinelli, and R. Gaudino, "Towards 50 Gb/s in High-Speed PON: Optimization of Modulation Formats Using Pre-Chirping," *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bucharest, Romania, 1–5 July, (2018), DOI: [10.1109/ICTON.2018.8473857](https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473857).
- [26] P. Torres-Ferrera, V. Ferrero, M. Valvo, and R. Gaudino, "Impact of the Overall Electrical Filter Shaping in Next-Generation 25 and 50 Gb/s PONs," *J. Opt. Commun. Netw.* 10 (5), 493 (2018), DOI: [10.1364/JOCN.10.000493](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000493).
- [27] S. Barthomeuf, F. Saliou, L. Anet Neto, P. Chanclou, and D. Erasme, "TDM-PON PAM Downstream Transmission for 25 Gbit/s and Beyond," *Photonics* 5 (4), 45 (2018), DOI: [10.3390/photonics5040045](https://doi.org/10.3390/photonics5040045).
- [28] R. Lin, J. Van Kerrebrouck, X. Pang, M. Verplaetse, O. Ozolins, A. Udalcovs, L. Zhang, L. Gan, M. Tang, S. Fu, R. Schatz, U. Westergren, S. Popov, D. Liu, W. Tong, T. De Keulenaer, G. Torfs, J. Bauwelinck, X. Yin, and J. Chen, "Real-time 100 Gbps/ $\lambda$ /core NRZ and EDB IM/DD transmission over multicore fiber for intra-datacenter communication networks," *Opt. Express* 26 (8), 10519 (2018), DOI: [10.1364/OE.26.010519](https://doi.org/10.1364/OE.26.010519).
- [29] Y. F. Yuting Fan, J. L. Jianqiang Li, Y. L. Yi Lei, M. T. Ming Tang, F. Y. Feifei Yin, Y. D. Yitang Dai, and K. X. and Kun Xu, "Full-duplex transmission of IEEE 802.11ac-compliant MIMO WLAN signals over a 2-km 7-core fiber," *Chin. Opt. Lett.* 15 (1), 010011–010015, (2017), DOI: [10.3788/COL201715.010011](https://doi.org/10.3788/COL201715.010011)
- [30] J. M. Galve, I. Gasulla, S. Sales, and J. Capmany, "Reconfigurable Radio Access Networks Using Multicore Fibers," *IEEE J. Quantum Electron.* 52 (1), 1–7, (2016), DOI: [10.1109/JQE.2015.2497244](https://doi.org/10.1109/JQE.2015.2497244).
- [31] GSM association (GSMA), "Study on socio-economic benefits of 5G services provided in mmWave bands," research report, available online, pp. 1–64, December, (2018), See online: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/mmWave-5G-benefits.pdf>.
- [32] K. Zeb, Z. G. Lu, J. R. Liu, P. J. Poole, M. Rahim, G. Pakulski, Y. X. Mao, C. Y. Song, and X. Zhang, "Experimental Demonstration of Photonic MMW-over Fiber System for Next Generation Access Networks," *2019 Photonics North (PN)*, pp. 1–1, Quebec City, QC, Canada, May 21–23, (2019), DOI: [10.1109/PN.2019.8819583](https://doi.org/10.1109/PN.2019.8819583).



- [33] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, R. Stuhlaufth “5G New Radio Fundamentals, procedures, testing aspects”, *Rohde & Schwarz*, pp. 1–462, July 1, (2019), See online: [https://cdn.rohdeschwarz.com/fr/general\\_37/local\\_webpages/2019\\_demystifying\\_5g\\_and\\_ota/5G\\_NR\\_France\\_June2019\\_Fundamentals\\_procedures\\_TM\\_aspects\\_RS\\_France\\_June2019.pdf](https://cdn.rohdeschwarz.com/fr/general_37/local_webpages/2019_demystifying_5g_and_ota/5G_NR_France_June2019_Fundamentals_procedures_TM_aspects_RS_France_June2019.pdf)
- [34] A. T. Latunde, M. Milosavljevic, P. Kourtessis, J. Senior, “OQAM-OFDM RoF with IM-DD remote heterodyne 28 GHz upconversion for 5G millimeter RANs,” *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–4, Trento, Italy, July 10–14, (2016), DOI: [10.1109/COMST.2015.2409154](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2409154).



**Toms Salgals** dzimis 1993. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu elektrozinātnē (2015) un inženierzinātņu maģistra grādu telekomunikācijās (2017). Patlaban ir RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes (ETF) Telekomunikāciju institūta mācītājspēks un pētnieks. Pētījumu joma saistīta ar *WDM* optisko šķiedru piekļuves tīkliem, radio cauršķiedru (*RoF*) tehnoloģiju jaunākās paaudzes 5G/5G+ mobilajiem tīkliem, pasīvo optisko tīklu tehnoloģiju izstrādi un izpēti, kas galalietotājiem nodrošina ātrdarbīgu platjoslas interneta savienojumus, optisko frekvenču ķemmju (*OFC*) izstrādi u. c. virzieniem. Darbība vērsta uz inovāciju attīstības nodrošināšanu, mērījumu un eksperimentu nodrošināšanu zinātniskajām institūcijām, nozarei, kā arī atbalsta izglītības procesu informācijas un komunikācijas tehnoloģiju jomā RTU.