

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Uģis Senkāns

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

**HIBRĪDO *FBG* SENSORU UN *WDM-PON*
ŠĶIEDRU OPTISKO SISTĒMU IZSTRĀDE UN
NOVĒRTĒJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
profesors *Dr. sc. ing.*
SANDIS SPOLĪTIS

profesors *Dr. sc. ing.*
VJAČESLAVS BOBROVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Seņkāns U. Hibrīdo *FBG* sensoru un *WDM-PON* šķiedru optisko sistēmu izstrāde un novērtējums. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2021. – 38 lpp.

Darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” Nr. 8.2.2.0/18/A/017.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes “RTU P-08” 2021. gada 11. oktobra lēmumu, protokols Nr. 3.

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/10.7250/9789934226991>

ISBN 978-9934-22-699-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 17. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Vecākais pētnieks *Dr. sc. ing.* Xiaodan Pang,
KTH Karaliskais tehnoloģiju institūts, Zviedrija

Vadošais pētnieks *Dr. habil. sc. ing.* Manfreds Šneps-Šneppe,
Ventspils Augstskola, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Uģis Senkāns (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 1 pielikums, 55 zīmējumi un ilustrācijas, kopā 127 lappuses. Literatūras sarakstā ir 176 nosaukumi.

PATEICĪBA

Paldies promocijas darba vadītājiem – profesoram Sandim Spolītim un profesoram Vjačeslavam Bobrovam – par vērtīgajiem padomiem, ieteikumiem un atbalstu visā doktorantūras studiju, kā arī promocijas darba izstrādes laikā!

Liels paldies maniem kolēģiem Jānim Braunfeldam un Tomam Salgalam, ar kuriem man bija gods strādāt kopā doktorantūras laikā. Paldies jums par atbalstu un padomiem, kas veicināja šī darba izstrādi!

No sirds pateicos sievai Līvai un visai savai ģimenei, bez kuru palīdzības, sapratnes un mīlestības man tas nebūtu izdevies. Jūsu atbalsts ir nenovērtējams.

Paldies visiem, ar kuriem kopā esmu strādājis vai kuri mani ir atbalstījuši, bet kuru vārds šeit nav pieminēts!

ACKNOWLEDGMENT

I would like to thank my PhD supervisors, Professor Sandis Spolītis and Professor Vjačeslavs Bobrovs, for their valuable advice, suggestions and support throughout the doctoral study program, as well as the development of the Doctoral Thesis.

Thanks to my colleagues Jānis Braunfelds and Toms Salgals, with whom I had the honor to work together during my doctoral studies. Thank you for the support and advice that contributed to this work.

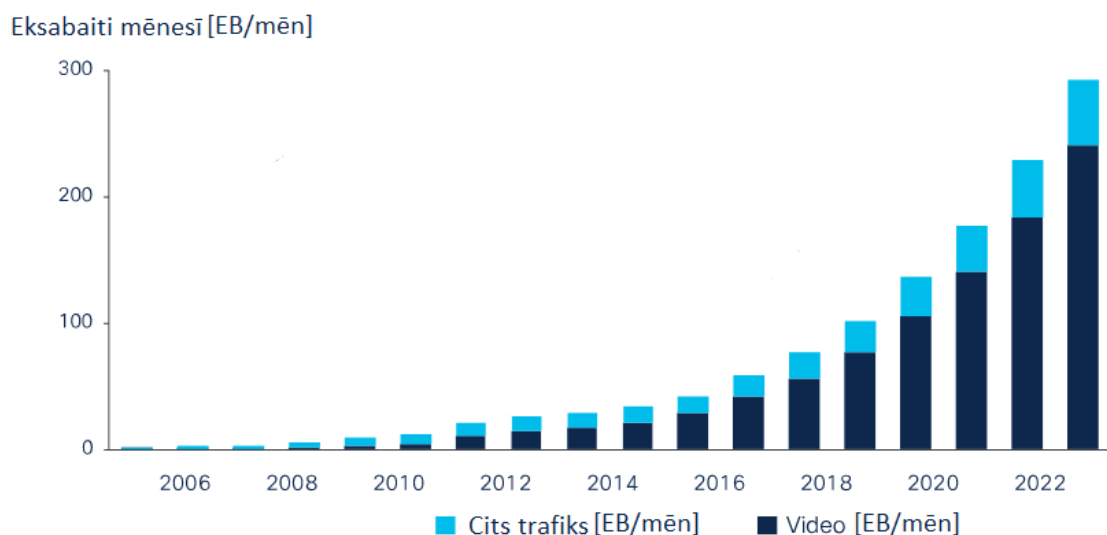
My heartfelt thanks to my wife Līva and my entire family, without whose help, understanding and love I would not have succeeded. Your support is invaluable.

Thank you to everyone I have worked with or who have supported me, but whose name is not mentioned here.

Tēmas aktualitāte

Šobrīd pasaulē notiek strauja telekomunikāciju tehnoloģiju attīstība un saplūšana konverģentās datu pārraides un sensoru sistēmās. Attīstoties šķiedru optikas datu pārraides tehnoloģijām un infrastruktūrai globālā mērogā, sensoru funkciju veikšanai arvien aktuālāka kļūst šķiedru optisko sensoru lietošana. Līdz ar to, lai nodrošinātu efektīvāku optisko sensoru tehnoloģiju lietošanu, ir nepieciešams izpētīt un meklēt jaunus risinājumus šķiedru optisko sensoru integrēšanai un izmantošanai esošajā, kā arī nākotnes optisko metro piekļuves sakaru sistēmu arhitektūrā.

Informācijas optisko datu pārraides apjoms ar katru gadu pieaug aizvien straujāk, ko apliecina arī *Cisco*, viens no pasaules lielākajiem un vadošajiem telekomunikāciju tīkla iekārtu ražotājiem. Pēdējo piecu gadu laikā kopējais interneta trafiks ir pieaudzis par vismaz 30 %, ņemot vērā faktoru, ka aizvien vairāk ierīču ir savstarpēji savienotas un aizvien lielāks informācijas apjoms patērēts. 1. attēlā redzams globālais patērētais eksabaitu apjoms mēnesī vairāku gadu griezumā, kā arī prognoze tuvākajiem diviem gadiem [38].



1. att. Mēnesī patērētais optisko tīklu datu apjoms pasaules mērogā [38].

Globāli tiek paredzēts kopējā interneta lietotāju skaita pieaugums no 3,8 miljardiem 2018. gadā līdz 5,3 miljardiem 2023. gadā. Populācijas ziņā šie dati ataino 51 % no pasaules iedzīvotājiem 2018. gadā un 66 % no pasaules iedzīvotājiem 2023. gadā [37].

Pieaugot optisko tīklu datu apjomam, attīstās arī ar to saistītās tehnoloģijas, pieaug to skaits un iespējas apvienot šīs tehnoloģijas ar šķiedru optisko pārraides sistēmu infrastruktūru. Viena no šādām tehnoloģijām ir šķiedru optiskie sensori, kas gūst aizvien lielāku pieprasījumu. Ņemot vērā nesenos pārskata un prognožu datus, ko publicējušas izpētes institūcijas, piemēram, *Grand View Research* [42] 2019. gada decembrī un *Global market Insights* [41] 2020. gada decembrī, ir redzams, ka šķiedru optisko sensoru tehnoloģijas globālais saliktais ikgadējais pieauguma rādītājs (*CAGR*) ir vairāk nekā 10 %, kas nozīmē, ka tuvākajā nākotnē (vismaz laika posmā līdz 2025.–2026. gadam) optisko sensoru tirgus vidējais gada pieaugums turpinās palielināties.

Straujā moderno informācijas pārraides tehnoloģiju un optisko šķiedru sakaru tīklu attīstība ir būtiska šķiedru optisko sensoru izpētei, uzlabošanai un attīstībai. Ja šķiedru optiskos sensorus salīdzina ar to priekšteču tehnoloģiju, tradicionālajiem – elektriskajiem un

mehāniskajiem – sensoriem, tad svarīgi ir uzsvērt šķiedru optisko sensoru unikālās priekšrocības, piemēram, viegls svārs, multipleksēšanas spējas, mazs izmērs un citas. Šāda tehnoloģija sniedz iespēju vairākus šķiedras Brega režģa (*FBG*) optiskos sensorus izvietot uz vienas optiskās šķiedras, tie ir izturīgi pret koroziju un elektromagnētiskajiem traucējumiem. Būtisko priekšrocību dēļ tos var efektīvi izmantot transporta un konstrukciju infrastruktūras uzraudzībai visā pasaulē. Tādējādi var tikt būtiski ietekmētas kopējās infrastruktūras izmaksas un kopējā nozares efektivitāte [7, 19, 33].

Promocijas darbā veikta šķiedru optisko sensoru izpēte, īpašu uzsvāru liekot uz *FBG* temperatūras un relatīvās deformācijas optiskajiem sensoriem, kā arī pētīta šķiedru optisko sensoru tīkla integrēšana *WDM* pasīvo optisko tīklu (*PON*) metro piekļuves sistēmās. Lai novērtētu šādu sistēmu veiktspēju vienotā sistēmā, veikta *FBG* optisko sensoru tīkla un šķiedru optiskās datu pārraides sistēmas kopdarbības izpēte, kā arī *FBG* sensoru tīkla iestrāde spektrāli sagrieztā *WDM-PON* pārraides sistēmā, kur kā gaismas avots uz visām tīkla galiekārtām tiek izmantots tikai viens nekoherents platjoslas gaismas avots.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot iepriekš minētos faktus, definēts **promocijas darba mērķis** – ar teorētiskiem un eksperimentāliem pētījumiem veikt vienotā sistēmā realizētu *FBG* šķiedru optisko sensoru tīklu un *WDM-PON* metro piekļuves pārraides sistēmu kopdarbības izpēti un novērtējumu.

Lai sasniegtu mērķi, noteikti vairāki **amatuzdevumi**.

1. Izpētīt šķiedru optisko sensoru izgatavošanas principus, tehnoloģisko attīstību, iedalījumu pēc to darbības principa un lietojuma, balstoties uz zinātniskās literatūras analīzi.
2. Veikt šķiedras *FBG* optisko sensoru tīkla savietojamības novērtējumu ar *WDM-PON* šķiedru optisko metro piekļuves pārraides sistēmu infrastruktūru.
3. Izstrādāt apvienotas piecu *FBG* temperatūras sensoru sistēmas un blīvas 10 Gbit/s *WDM-PON* pārraides sistēmas simulācijas modeli, veikt tā kopdarbības novērtējumu un izpētīt mērāmās temperatūras ietekmi uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām šādā sistēmā.
4. Izstrādāt uzlabotas precizitātes *FBG* sensoru atstaroto signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritmu, izpētīt minimāli pieļaujamo šādu optisko sensoru starpkānālu intervālu apvienotā piecu *FBG* sensoru un astoņu kānālu 10 Gbit/s *WDM-PON* pārraides sistēmā.
5. Novērtēt hibridas, līdz 10 Gbit/s simulācijas shēmas darbību, izveidojot slēptu septiņu kānālu spektrāli sagrieztu datu pārraides sistēmu un apvienot to ar astoņu datu kānālu *WDM-PON* datu pārraides sistēmu, kurā integrēta piecu optisko sensoru sistēma.
6. Eksperimentāli un simulācijas vidē izstrādāt un novērtēt apvienota *FBG* optisko sensoru un spektrāli sagrieztas 1,5 Gbit/s šķiedru optiskās metro piekļuves pārraides sistēmas modeli, kur par gaismas avotu tiek izmantots viens kopīgots platjoslas gaismas avots.

Pētījuma metode

Promocijas darbā noteikto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentāli mērījumi. *DWDM-PON*, *WDM-PON* un spektrāli sagrieztu *SS-WDM PON* sistēmu, kā arī *FBG* šķiedru optiskā sensoru tīkla realizācijai izmantota *RSoft Optsim* simulācijas programmatūra un *Mathworks MATLAB* skaitlisko aprēķinu programmatūra. Darbā izmantotas vairākas pētniecības metodes, piemēram, aproksimācijas, laika apgabala sadales-soļa (*time domain split-step*) metode, Montekarlo metode (bitu kļūdu attiecības (*BER*) novērtēšanai), kā arī individuāli autora izstrādāti signālu apstrādes algoritmi. Optisko sensoru un datu signālu kvalitātes novērtēšanai lietoti signāla jaudas, spektra, acu diagrammu un bitu kļūdu mērījumi. Promocijas darbā iekļautie zinātniskie eksperimenti realizēti Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Telekomunikāciju institūta (TI)

Sakaru sistēmu tehnoloģiju izpētes centra (SSTIC) Šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) zinātniskajā laboratorijā.

Pētījuma rezultāti

Promocijas darba **praktiskā vērtība un jaunieguvumi**

1. Izstrādāts apvienotas *FBG* šķiedru optisko temperatūras sensoru tīkla un viļņgarumdales blīvētas šķiedru optiskās metro piekļuves datu pārraides sistēmas modelis, kā arī noteikta mērāmās temperatūras ietekme uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām.
2. Noteikti minimāli pieļaujamie optisko sensoru starpkanālu intervāli apvienota piecu *FBG* optisko sensoru un astoņu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* datu pārraides sistēmas tīklā, darbībai optiskajā C joslā (1530–1565 nm).
3. Izstrādāts matemātisks algoritms, kas nodrošina iespēju noteikt *FBG* optisko sensoru minimāli pieļaujamo starpkanālu intervālu, kā arī atstaroto signālu apstrādes algoritms, kas, salīdzinot ar esošajiem risinājumiem un signālu spektrāli atšķirīgajiem maksimumiem, spēj precīzāk noteikt *FBG* optisko sensoru signālu atstarotos spektrālos maksimumus.
4. Izveidots spektrāli sagrieztas 10 Gbit/s *WDM-PON* 32 datu kanālu pārraides sistēmas un *FBG* optiskā sensora tīkla simulācijas modelis un eksperimentāla maketshēma, kur kā gaismas avots tiek izmantots viens kopīgots platjoslas gaismas avots.
5. Izveidots kopējs sistēmas modelis, kurā vienas optiskās šķiedras ietvaros ir izvietots piecu *FBG* optisko sensoru tīkls kopā ar astoņiem *WDM-PON* 10 Gbit/s pārraides datu kanāliem, kuru starpā ir noslēpta septiņu datu pārraides kanālu sistēma ar pārraides ātrumu 2,5 Gbit/s.

Promocijas darba **galvenie secinājumi**

1. Darbā izstrādātais hibrīdās sistēmas modelis, kas ietver piecu *FBG* šķiedru optisko temperatūras sensoru tīklu un četru datu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* šķiedru optisko metro piekļuves sakaru sistēmu, var nodrošinot vismaz 20 km garas datu pārraides līnijas darbību ar pieņemtu uztvertā signāla $BER \leq 10^{-9}$, kā arī noteikt mērāmās temperatūras ietekmi uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām, kas šādā konfigurācijā vidēji ir 1 GHz (8 pm) uz 1 °C.
2. Ar darbā izstrādāto uzlabotas precizitātes *FBG* sensoru atstaroto signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritmu un matemātisku vienādojumu var aprēķināt un noteikt *FBG* optisko sensoru teorētisko starpkanālu intervālu šķiedru optisko *FBG* sensoru tīklā, kas piecu *FBG* optisko sensoru un astoņu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* datu pārraides sistēmas optiskajā C-joslā frekvenču diapazonā no 192 THz līdz 195,5 THz ir vismaz 207,746 GHz.
3. Izmantojot vienu kopīgotu platjoslas gaismas avotu, var izveidot apvienotu spektrāli sagrieztu 1,5 Gbit/s 32 datu kanālu *WDM-PON* pārraides un *FBG* optiskā sensora tīkla modeli, nodrošinot uztvertā datu signāla $BER \leq 9,7 \times 10^{-12}$ B2B (bez optiskās šķiedras līnijas) konfigurācijā un $BER \leq 6,1 \times 10^{-7}$ 20 km garā pārraides līnijas konfigurācijā.
4. Vienas optiskās šķiedras ietvaros var izveidot modeli, kurā ir izvietots piecu *FBG* optisko sensoru tīkls kopā ar astoņu *WDM-PON* 10 Gbit/s pārraides datu kanāliem, kuru starpā ir vizuāli noslēpta 2,5 Gbit/s septiņu datu kanālu sistēma, nodrošinot atbilstošu uztvertā signāla kvalitāti ($BER \leq 7,16 \times 10^{-17}$ *WDM-PON* sistēmai un $BER \leq 1,11 \times 10^{-5}$ slēptai datu kanālu sistēmai) pēc 20 km garas šķiedru optiskās datu pārraides līnijas.

Aizstāvamās tēzes

1. Ir iespējams izstrādāt hibrīdu piecu *FBG* šķiedru optisko temperatūras sensoru un četru viļņgarumdales blīvētu 10 Gbit/s datu pārraides kanālu metro piekļuves sistēmu, izmantojot kopīgu 20 km garu pārraides līniju, kur uztvertā signāla $BER < 10^{-9}$, kā arī noteikt mērāmās

- temperatūras ietekmi uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām, kas šādā konfigurācijā vidēji ir 1 GHz (8 pm) uz 1 °C.
2. Izmantojot darbā izstrādāto uzlabotas precizitātes *FBG* sensoru atstaroto signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritmu, kā arī matemātisku vienādojumu, ir iespējams aprēķināt *FBG* optisko sensoru teorētisko starpkanālu intervālu šķiedru optisko *FBG* sensoru tīklā, zinot prognozētās mērāmā objekta vai vides temperatūras izmaiņas diapazonu un šī sensora temperatūras/viļņa garuma nobīdi, kā arī vidējo spektrālo joslas platumu *FBG* optiskā sensora atstarotajam signālam jaudas kritumam -7 dB zonā.
 3. Minimālajam pieļaujamajam optisko sensoru starpkanālu intervālam apvienota piecu *FBG* optisko sensoru un astoņu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* datu pārraides sistēmas tīklā, optiskajā C joslā frekvenču diapazonā no 192,0 THz līdz 195,5 THz ir jābūt vismaz 207,746 GHz.
 4. Apvienotā *FBG* sensoru un *WDM* metro piekļuves sakaru sistēmā, izmantojot vienotu koplietojamu platjoslas gaismas avotu, ir iespējams nodrošināt gan *FBG* optiskā sensora stabīlu darbību, gan arī spektrāli sagrieztu 32 datu pārraides kanālu darbību ar pārraides ātrumu 1,5 Gbit/s, nodrošinot uztvertā signāla *BER* vismaz zem 2×10^{-3} sliekšņa, optiskajā raiduztvērējā lietojot turpvērsto kļūdu labošanu (*FEC*).
 5. Starp astoņiem 10 Gbit/s *WDM-PON* sistēmas kanāliem, papildus izmantojot divus nekoherentus platjoslas gaismas avotus, kur viena gaismas avota radītais optiskais spektrs ir sagriezts septiņās šķēlēs un izmantots datu pārraidei ar ātrumu 2,5 Gbit/s kanālā, savukārt otrs – piecu optisko sensoru izvietošanai, ir iespējams paslēpt šos spektrāli sagrieztos kanālus, kas, pieslēdzoties optiskās pārraides līnijas *ODN* posmā un gala lietotāja (*ONT*) pusē, optiskajā spektrā nav redzami. Šādas sistēmas darbība ar *BER* zem 2×10^{-3} *FEC* sliekšņa ir realizējama, ja šķiedru optiskās pārraides līnijas garums ir vismaz 20 km.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti piecās starptautiskās zinātniskās konferencēs, kā arī atspoguļoti četrās publikācijās zinātniskajos žurnālos, piecas publikācijas pilna teksta konferenču rakstu krājumos. Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas gan ekspluatācijā esošu optisko metro piekļuves tīklu uzlabošanai, gan arī jaunu šķiedru optisko pārraides sistēmu un sensoru tīklu ieviešanai.

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. 2020. gada 23. aprīlis. Dalība **RTU 61. studentu zinātniski tehniskajā konferencē** ar tēmu “WDM-PON un optiski slēptu signālu datu pārraide steganogrāfijas nolūkos”.
2. 2019. gada 15. oktobris. Dalība **RTU 60. studentu zinātniski tehniskajā konferencē** ar tēmu “Unified Multi-channel Spectrum-sliced WDM-PON Transmission System with Embedded FBG Sensors Network”.
3. 2018. gada 16. novembris. Dalība **starptautiskā konferencē “Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO’18”** ar tēmu “Research of FBG Optical Sensors Network and Precise Peak Detection”.
4. 2018. gada 12. oktobris. Dalība **RTU 59. studentu zinātniski tehniskajā konferencē** ar tēmu “Research of FBG Optical Sensors Network and Precise Peak Detection”.
5. 2017. gada 3. novembris. Dalība **starptautiskā konferencē “Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO’17”** ar tēmu “Evaluation and Research of FBG Optical Temperature Sensors Network”.
6. 2017. gada 13. oktobris. Dalība **RTU 58. studentu zinātniski tehniskajā konferencē** ar tēmu “Optical fiber temperature sensor functionality research and experimental analysis”.
7. 2017. gada 29. aprīlis. Dalība ar Maģistra darbu **RTU 57. studentu zinātniski tehniskajā konferencē**.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. Supe, A., Olonkins, S., Udalcovs, A., Senkans, U., Mūrnieks, R., Gegere, L., Prigunovs, D., Grube, J., Elsts, E., Spolītis, S., Ozolins, O., Bobrovs, V., “**Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks**”. *Applied Sciences*. 2021; 11 (4):1702. <https://doi.org/10.3390/app11041702>.
2. Braunfelds, J., Senkans, U., Skels, P., Janeliukstis, R., Salgals, T., Redka, D., Lyashuk, I., Porins, J., Spolītis, S., Haritonovs, V., Bobrovs, V., “**FBG-Based Sensing for Structural Health Monitoring of Road Infrastructure**”, *Journal of Sensors*, vol. 2021, Article ID 8850368, 11 pages, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8850368>.
3. Senkāns, U., Bobrovs, V., Ivanovs, Ģ., Spolītis, S. “**Research of Hybrid WDM-PON Data Transmission System with Embedded ASE-Powered Stealth Channels for Steganography Applications**”. *Optical Fiber Technology*, 2020, Vol. 58, pp. 1–8. ISSN 1068-5200. Available from: [doi:10.1016/j.yofte.2020.102300](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102300).
4. Senkāns, U., Braunfelds, J., Lyashuk, I., Poriņš, J., Spolītis, S., Bobrovs, V. “**Research on FBG Based Sensor Networks and Their Coexistence with Fiber Optical Transmission Systems**”. *Journal of Sensors*, 2019, Vol. 2019, pp. 1–13. ISSN 1687-725X. e-ISSN 1687-7268. Available from: [doi:10.1155/2019/6459387](https://doi.org/10.1155/2019/6459387).

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. Supe, A., Spolītis, S., Elsts, E., Mūrnieks, R., Doke, G., Senkāns, U., Matsenko, S., Grube, J., Bobrovs, V. “**Recent Developments in Cladding-Pumped Doped Fiber Amplifiers for Telecommunications System**”. In: *Proceedings of 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2020)*, Italy, Bari, 19–23 July, 2020. Piscataway: IEEE, 2020, pp. 1–6.
2. Senkāns, U., Braunfelds, J., Lyashuk, I., Poriņš, J., Spolītis, S., Haritonovs, V., Bobrovs, V. “**FBG Sensors Network Embedded in Spectrum-sliced WDM-PON Transmission System Operating on Single Shared Broadband Light Source**”. In: *Proceedings of Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019)*, China, Xiamen, 17–20 December, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 1–9.
3. Braunfelds, J., Senkāns, U., Lyashuk, I., Poriņš, J., Spolītis, S., Bobrovs, V. “**Unified Multi-channel Spectrum-sliced WDM-PON Transmission System with Embedded FBG Sensors Network**”. In: *Proceedings of Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019)*, Italy, Rome, 17–20 June, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 1–7.
4. Senkāns, U., Braunfelds, J., Spolītis, S., Bobrovs, V. “**Research of FBG Optical Sensors Network and Precise Peak Detection**”. In: *2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2018): Proceedings*, Latvia, Rīga, 15–16 November, 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 139–143. ISBN 978-1-5386-5559-7. e-ISBN 978-1-5386-5558-0. Available from: [doi:10.1109/RTUWO.2018.8587859](https://doi.org/10.1109/RTUWO.2018.8587859).
5. Senkāns, U., Spolītis, S., Bobrovs, V. Evaluation and “**Research of FBG Optical Temperature Sensors Network**” In: *2017 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2017): Proceedings*, Latvia, Rīga, 2–3 November, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 79–89. ISBN 978-1-5386-0586-8. e-ISBN 978-1-5386-0585-1. Available from: [doi:10.1109/RTUWO.2017.8228509](https://doi.org/10.1109/RTUWO.2017.8228509).

Promocijas darba laikā iegūtie un pētījumā atspoguļotie rezultāti ir izmantoti divos zinātniskās pētniecības projektos.

Starptautiskie zinātniskās pētniecības projekti

1. ESF projekts: “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”, Nr. 8.2.2.0/18/A/017.
2. ERAF projekts: “Efektīvu apvalkā pumpētu šķiedru optisko pastiprinātāju izstrāde telekomunikāciju sistēmām”, Nr. 1.1.1.1/18/A/068.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba kopējais apjoms ir 127 lappuse. Darbā ir ievads, četras nodaļas, literatūras saraksts un viens pielikums.

Darba pirmajā nodaļā ir veikts šķiedru optisko sensoru darbības tipu un klasifikācijas novērtējums, analizējot viļņa garuma modulētus, fāzes modulētus, intensitātes modulētus un polarizācijas modulētus optiskos sensorus. Veikta šķiedru optisko sensoru lietojuma klasifikācijas izpēte, īpaši novērtējot *FBG* optiskos sensorus. Analizēts šķiedru optisko sensoru lietojums *IoT* un *SHM* vajadzībām, kā arī aplūkotas šķiedru optisko pārraides sistēmu pārraidītā datu apjoma patēriņa tendences modernajā sabiedrībā. Nodaļā ir noformulēts promocijas darba mērķis, tā uzdevumi, zinātniskie jaunieguvumi, aizstāvamās tēzes, kā arī apkopoti galvenie rezultāti.

Darba otrajā nodaļā ir realizēta piecu šķiedru optisko *FBG* temperatūras sensoru tīkla izveide, kas ir apvienota ar četru 10 Gbit/s datu kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmu. Tiek analizēta raidītāja puses un optiskās līnijas terminālī ietilpstošo komponentu parametru izvēle un izveide, pētīta optiskās sadales tīkla un šķiedru optisko sensoru tīkla parametru izvēle un izveide, kā arī sakaru sistēmas uztvērēja puses izveide un optisko sensoru signālu apstrādes realizēšana. Rezultātā ir noteikta mērāmās temperatūras ietekme uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām (aptuveni 1 GHz uz 1 °C).

Trešajā nodaļā ir izveidota un analizēta piecu *FBG* optisko sensoru tīkla un 10 Gbit/s *WDM-PON* šķiedru optiskās astoņu datu kanālu pārraides sistēmas kopdarbības izpēte 20 km garā pārraides līnijā. Izveidots uzlabotas precizitātes *FBG* sensoru atstaroto signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritms. Šī kopdarbības sistēmas modeļa ietvaros ir izstrādāts matemātisks vienādojums, ar kā palīdzību ir noteikts minimāli pieļaujamais optisko sensoru starpkanālu intervāls (~ 208 GHz). Tālāk nodaļā aplūkota hibrīda 10 Gbit/s *WDM* astoņu datu kanālu sakaru sistēmas, 2,5 Gbit/s septiņu slēptu datu kanālu un piecu šķiedru optisko sensoru tīkla izstrāde 20 km garā pārraides līnijā, kas noder steganogrāfijas vajadzībām. Veikts šī izstrādātā modeļa iegūto spektra raksturlīkņu vizualizācijas novērtējums, kā arī veiktspējas analīze.

Darba ceturtajā nodaļā ir veidota un analizēta simulācijas modeļa izstrāde – septiņu *FBG* sensoru tīkla iestrāde spektrāli sagrieztā *WDM-PON* 32 datu kanālu pārraides sistēmā, kas darbojas ar vienotu koplietojamu platjoslas gaismas avotu dažādu scenāriju realizēšanā. Veikta izstrādātā modeļa 2,5 Gbit/s un 10 Gbit/s spektrāli sagrieztas *WDM-PON* sistēmas veiktspējas analīze 28 km garā pārraides līnijā ar un bez integrēta septiņu *FBG* šķiedru optiskā tīkla. Nodaļā aplūkota arī simulācijas un eksperimentāla modeļa kopīga arhitektūras izstrāde, izpētot uz vienotas platjoslas gaismas avota balsītu 1,25 Gbit/s un 1,5 Gbit/s spektrāli sagrieztu *WDM-PON* 32 datu kanālu šķiedru optiskās pārraides sistēmu (*B2B* un 20 km garā pārraides līnijā) ar integrētu *FBG* optisko sensoru.

Promocijas darba nobeigumā apkopoti, kā arī pamatoti darba laikā gūtie galvenie secinājumi. Pielikumā pievienoti publikāciju, konferenču un projektu saraksti.

DARBA NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Darba pirmajā nodaļā ir veikts šķiedru optisko sensoru darbības tipu un klasifikācijas novērtējums, kā arī izpētīts šķiedras Brega režģa lietojums šķiedru optisko sensoru realizācijā.

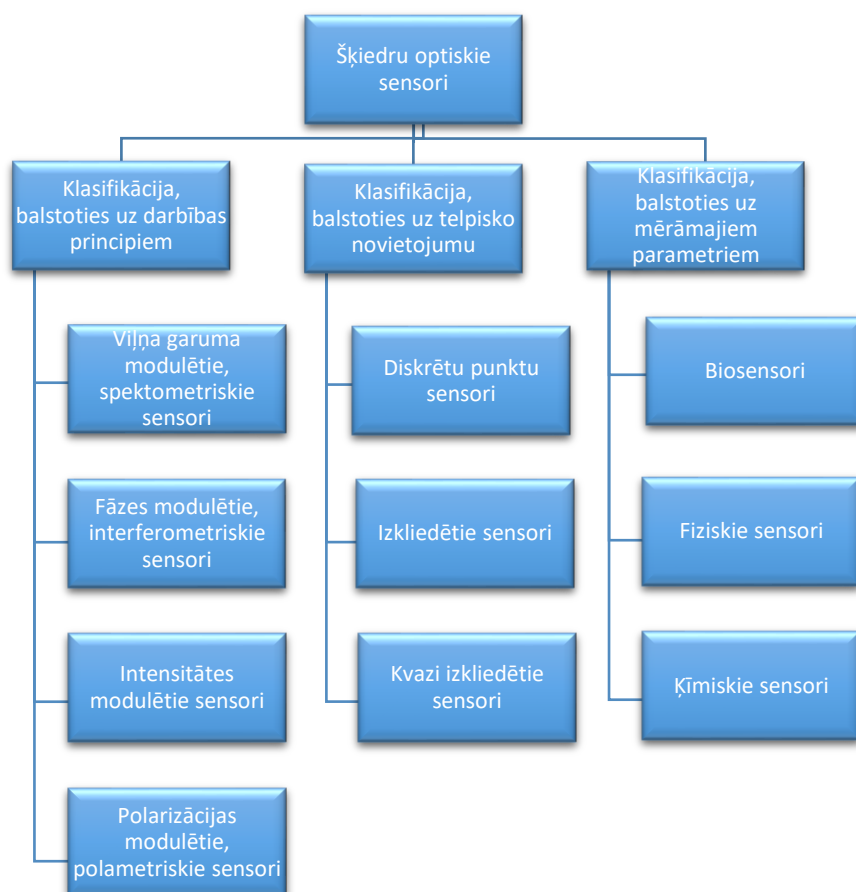
Šķiedru optiskos sensorus var izmantot dažādu mērījumu veikšanai, taču pastāv būtiskākie fiziskie parametri, kas tiek gan mērīti, gan konstanti novēroti, piemēram, relatīvā deformācija, temperatūra, gāzes konsistence, pretestība, mehānismu un struktūru vibrācijas, attālums starp stacionārām un kustīgām komponentēm, elektriskā strāva, augstspriegums, spiediens un citi [3, 4, 18, 27].

Veicot šķiedru optisko sensoru izstrādi, ir iespējami vairāki realizācijas varianti. Viens no relatīvi vieglākajiem veidiem mērījumu gaitā ir modulēt gaismas amplitūdu, kas savukārt nodrošina amplitūdas modulētu sensoru. Šāda veida sensori bija kā standarts šķiedru optisko sensoru sākotnējā ražošanā, tomēr laika gaitā tie tika aizstāti ar optiskajiem sensoriem, kuru darbības pamatā ir viļņa garuma modulēšanas izmaiņas. Tāda veida izmaiņas pamatā balstījās uz faktu, ka viļņa garuma izmaiņu tipa sensori ir daudz stabilāki un kalibrētāki jau ražošanas procesā. Tas ir skaidrojams ar to, ka savienotāju izraisītie zudumi, modālās izmaiņas, kā arī pašu lāzeru izmaiņas vai to tehnoloģiskais dzīves cikls tiešā veidā neietekmē viļņa garuma izmaiņas [18, 39].

Detalizētāk analizējot šķiedru optisko sensoru darbību, ir redzams, ka eksistē daudzi un dažādi šķiedru optiskie sensoru tipi, līdz ar to ir jāveic to klasifikācija. Pirmkārt, ir iespējams tos iedalīt divās galvenajās pamatgrupās – ārējie sensori (angļu val. *extrinsic*) un iekšējie sensori (angļu val. *intrinsic*). Aplūkojot ārējo sensoru izmantošanu, ir redzams, ka optiskā šķiedra šajā gadījumā tiek lietota kā signāla pārraides vide, lai spētu pārraidīt informācijas datu saturošu signālu – optisko signālu – uz vai no ārējās sistēmas. Savukārt iekšējo optisko sensoru realizācijā optiskais signāls var neatstāt optisko šķiedru, lai nodrošinātu sensora funkcijas. Iekšējo sensoru tipus izvēlās, izmanto un pēta biežāk, ņemot vērā to daudzās priekšrocības, salīdzinot ar ārējā tipa optiskajiem sensoriem. Par piemēru var minēt to dizaina pielāgošanu attiecībā pret sensora uztverošo daļu. Otrkārt, plašāk izpētot klasifikāciju iedalījumu, atkarībā no tā, kādi elementi tiek pārveidoti un modificēti, optisko šķiedru sensorus var iedalīt vēl detalizētākās četrās kategorijās [25]:

- 1) viļņa garuma modulētie (spektrometriskie) sensori;
- 2) fāzes modulētie (interferometriskie) sensori;
- 3) intensitātes modulētie sensori;
- 4) polarizācijas modulētie (polarimetriskie) sensori.

Bez šīm kategorijām šķiedru optiskos sensorus papildus var iedalīt arī pēc to mērījumu veidiem, kā arī telpiskā izvietojuma (2. att.).



2. att. Šķiedru optisko sensoru klasifikācija [25].

Šķiedru optiskos sensorus lieto dažāda veida kompozītmateriālu struktūrās, lai nodrošinātu daudzpusīgu datu – vibrācijas mērījumu, temperatūras novērošanu, ārstniecības procesa informācijas – monitorēšanu, kā arī deformācijas, plaisu un citu raksturlielumu uzskaitīšanu. Šāda veida mērījumu realizācijai ir cieša saistība gan tieši, gan arī kalibrēšanas nolūkos, veicot relatīvās deformācijas (angļu val. *strain*), temperatūras vai abu divu parametru mērījumus.

Trūkums šāda veida mērījumu veikšanā ir tas, ka šķiedru optiskie relatīvās deformācijas sensori ir jutīgi pret temperatūras un relatīvās deformācijas izmaiņām (pētījums [1] norāda, ka *FBG* optiskā sensora mērījuma kļūda kompozītmateriālos vienas standartnovirzes ietvaros ir $\pm 62 \mu\epsilon$ deformācijas mērījumos un $\pm 1,94 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūras mērījumos). Efektīvs veids, kā nodrošināt, lai šie parametri tiktu veiksmīgi nodalīti, ir izmantot šķiedras vairogu (angļu val. *fiber shield*). Tas savukārt sniedz iespēju realizēt optiskos sensorus, kas ir temperatūras nejutīgi (0,01 nm precizitāte, novērojot temperatūras šķērsotās jutības ietekmi temperatūras diapazonā $5\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$ [34]) vai relatīvās deformācijas nejutīgi (sasniedzot temperatūras noteikšanu ar augstu jutību – $106,64 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ temperatūras diapazonā no $200 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, ar zemu šķērsotās jutības ietekmi – $0,00675 \text{ }^\circ\text{C}/\mu\epsilon$ [35]), tādējādi krietni uzlabojot vēlamā un mērāmā parametra datu precizitāti.

Temperatūras mērījumos bāzētos optiskos sensorus var izmantot dažāda veida industrijās, piemēram, aviācijas nozarē [13], medicīnā [22], jūrniecībā [2] un citās. Tos var lietot augstu temperatūras mērījumu veikšanā (virs $1000 \text{ }^\circ\text{C}$) [31]. Šķiedru optisko temperatūras sensoru risinājumus var pielāgot, nodrošinot ļoti augstu jutību ($21,86 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [24], $24,68 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [32] un pat $2,16 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ [16], kā arī $21,2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ [9]). Kā vienu no piemēriem var aplūkot garu līniju ($>100 \text{ km}$) optisko šķiedru sensoru risinājumu, piemēram, naftas cauruļu noplūdes uztveršanas sistēmās.

Līdz mūsdienām ir izstrādāti dažādi šķiedru optiskā tipa sensori, ko var klasificēt atbilstoši tam, kā minēts iepriekš. Neatkarīgi no klasifikācijas, ir tādi sensori, kas tiek izvēlēti biežāk nekā citi, piemēram, relatīvās deformācijas un temperatūras mērījumos bāzēti sensori. Piemēram, šķiedras Brega režģa tehnoloģijas sensori, kas tiek lietoti to relatīvi vienkāršās ražošanas un stipra atstarotā signāla dēļ (par augstu atstarošanas optiskajiem sensoriem galvenokārt tiek minēts >95 % sliekšnis [43]). No terminoloģijas viedokļa šķiedras Brega režģa definīcija ir atvasināta no Brega likuma, to izmanto periodiskās struktūrās telekomunikāciju optisko šķiedru nozarē [18]. Fizikas zinātnē definētais Brega likums nosaka sakarību starp atomu plakņu atstarpi kristālos un krituma leņķiem, pie kuriem šīs plaknes rada visintensīvākās elektromagnētiskā starojuma, piemēram, rentgena un gamma staru atstarojumu. Matemātiskajā Brega likuma vienādojumā

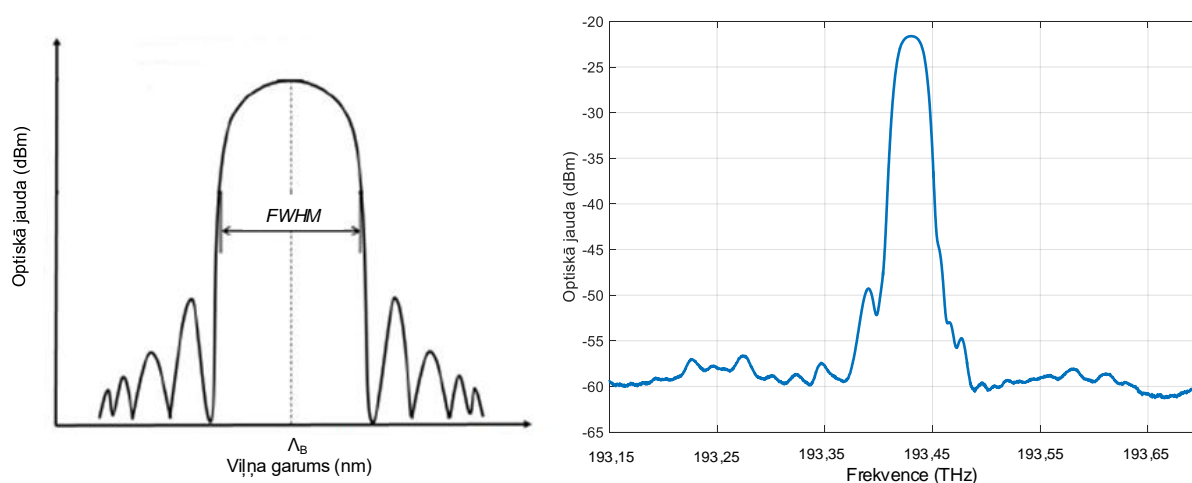
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

n ir novēroto gaismas staru skaits, λ – viļņa garums, d – attālums starp secīgiem atomu slāņiem jeb plaknēm, savukārt θ – krītošā vai atstarotā gaismas stara leņķis [36].

Tālāk tekstā norādīta ir Brega viļņa garuma formula, kur λ_B apzīmē Brega viļņa garumu, kas faktiski norāda uz reizinājumu starp η_{eff} – efektīvo gaismas laušanas koeficientu – un režģa periodu jeb Λ [18].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2)$$

Tāpat ir iespējams aplūkot arī tipisku šķiedras Brega režģa raksturlīkni (3. a att.), kur λ_B ir sensora atstarotā optiskā signāla spektra maksimuma centrālā frekvence vai viļņa garums un pilns platums līmenī viena puse (angļu val. *Full Width Half Maximum*; *FWHM*) apzīmē tā atstarotā signāla spektra pilnu platumu līmenī viena puse no maksimuma. Šo parametru ietekmē vairāki parametri, it īpaši režģa platums jeb atstarotā signāla joslas platums. 3. b attēlā redzams RTU TI Sakaru sistēmu tehnoloģiju izpētes centra (RTU TI SSTIC) Šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) zinātniskajā laboratorijā eksperimentāli nomērīts Brega režģa atstarotā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs.



3. att. Tipisks šķiedras Brega režģa atstarotā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (a) un RTU TI SSTIC ŠOPS laboratorijā eksperimentāli nomērīts Brega režģa atstarotā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (b) [18].

Mūsdienās katru gadu telekomunikāciju nozarē pilnveido un paplašina šķiedru optiskās tehnoloģijas realizēšanu ne tikai uzņēmējdarbībā un publiskajā telpā, bet arī privātajā sektorā. No pieejamās “Šķiedra-līdz-mājai” (angļu val. *Fiber-to-the-home*; *FTTH*) izvietojuma statistikas, piemēram, Amerikas Savienotās Valstis (ASV) ir sasniegušas līdz šim augstāko

rādītāju. Līdz 2017. gadam ASV to mājsaimniecību skaits, kurām ir pieeja platjoslas šķiedru optikas pārraides tīklu infrastruktūrai, sasniedza 4,4 miljonus. Kopumā aptuveni 28 % no visām ASV mājsaimniecībām, kas ir 35 miljoni, tagad var piekļūt šķiedru optiskajiem sakaru tīkliem [8].

Latvija ir labs piemērs veiksmīgai optisko šķiedru tīkla ieviešanai un saglabā līderpozīcijas Eiropas *FTTH* reitingā ar šķiedru pārklājumu līdz mājai/ēkai, 2019. gada septembrī tas bija aptuveni 95,6 % [40]. Tas nozīmē, ka gandrīz katrā Latvijas mājvietā ir fiziski iespējams nodrošināt šķiedru optiskā tīkla slēgumu, kā arī to, ka Latvijas iedzīvotāji aizvien vairāk izmanto šīs iespējas.

Līdz ar optisko šķiedru sistēmu attīstību un to sadarbību ar datu pārraides sistēmām ir attīstījušies risinājumi, lai nodrošinātu ātru pārraidi, izmantojot pasīvos optiskos tīklus (*PON*), kas nodrošina arī optisko šķiedru sensoru izvietojuma veidu. ASV strādā pie projekta “*Connecting America: The National Broadband plan*”, lai nodrošinātu vietējās kopienas ar vismaz 1 Gbit/s ātru savienojumu. Šajā gadījumā *PON* tiek uzskatīts par labāko risinājumu, vienlaikus nodrošinot rentablu veidu, kā realizēt *FTTH* tīkla izveidi [20].

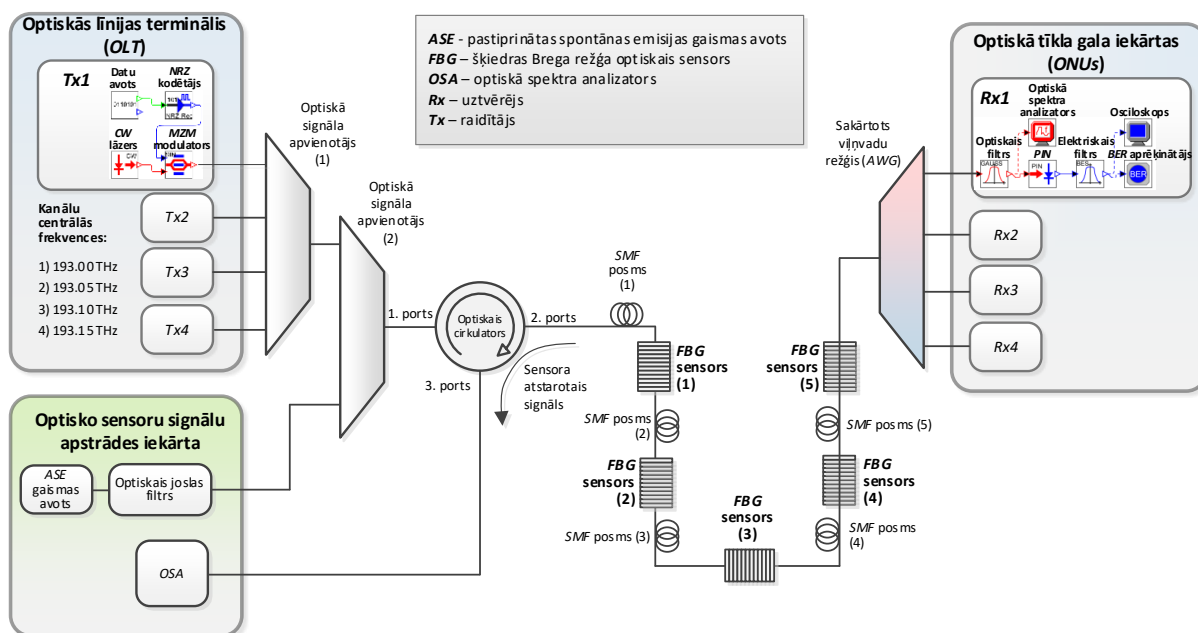
Tehnoloģiski *PON* ir uzlaboti un definēti pēc dažādiem standartiem. Sākot jau no platjoslas *PON* (*BPON*) standartizācijas, ko veica Starptautiskā telekomunikāciju savienība (*ITU-T*) G.983.1–G.983.5 2000. gadā (nodrošinot 1,25 Gbit/s lejupielādes ātrumu un 0,625 Gbit/s augšupielādes ātrumu), līdz mūsdienām, kad notiek izstrāde un diskusijas par nākamās paaudzes *Ethernet* tīklu *PON* (*NG-PON*), ko standartizē *ITU-T* un Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūta (*IEEE*) 802.3ca darba grupa (nodrošinot 25 Gbit/s, 50 Gbit/s, kā arī pat augstākus datu pārraides ātrumus). Pētījumi saistībā ar *FTTH* liecina, ka pasaules mērogā no tehnoloģiskā viedokļa 2020.–2022. gadā notiks pārslēgšanās no 2,5 Gbit/s *GPON* uz *XGS-PON* un *NGPON-2* [10, 20].

Līdz pat šim brīdim telekomunikāciju tīkli tiek iedalīti un būvēti trīs galvenajās kategorijās – maģistrālie tīkli (angļu val. *long-haul network*) ierasti 1000 km un garākās distancēs, metro jeb reģionālie tīkli (angļu val. *metropolitan network*) – nodrošina savienojumu starp pakalpojumu sniedzēju un pilsētu, kā arī piekļuves tīkli (angļu val. *access network*) – nodrošina savienojumu starp pakalpojumu sniedzēju un gala lietotāju. Piekļuves tīkli un metro jeb reģionālie tīkli mēdz tikt apvienoti vienotos metro piekļuves tīklos, nodrošinot no desmitiem līdz vairākiem simtiem kilometru garus savienojumus starp gala lietotājiem, pakalpojumu sniedzēju un reģioniem (pilsētām), tādējādi paverot plašākas iespējas dažādu aplikāciju (piemēram, optisko sensoru) ērtākai izmantošanai un pārvaldībai [21].

Ņemot vērā visu iepriekš minēto, ir skaidrs, ka laika gaitā aizvien vairāk lietotāju pieprasīs telekomunikāciju risinājumu pieeju dažādās vietās visā pasaulē. Tas nozīmē, ka palielināsies arī pārsūtīto datu apjoms – lietotāju un dažāda veida sistēmu, piemēram, optisko sensoru. Savukārt tas radīs vajadzību pēc pieejamā frekvenču joslas platuma optimizācijas, lielākas datu apstrādes kapacitātes, uzglabāšanas apjoma palielināšanas un datu pārraides ātruma izaugsmes.

Otrā nodaļa

Šīs nodaļas pētījums koncentrējas uz *FBG* optiskajiem sensoriem, īpašu uzmanību pievēršot optiskās šķiedras temperatūras sensoriem. Eksperimentālajā daļā ir izstrādāts simulācijas modelis, izmantojot *RSoft* programmatūru *OptSim*, un pētīta temperatūras ietekme uz piecu *FBG* optisko sensoru centrālajām frekvencēm jeb viļņa garumiem. Šis izstrādātais optisko sensoru tīkls ir apvienots ar optiskās pārraides sistēmu vienā kopējā 20 km garā optiskās šķiedras līnijā. Ir izpētīta un novērtēta vairāku sensoru tīkla un 50 GHz atdalītu četru kanālu bez atgriešanās pie nulles (angļu val. *non-return-to-zero*; *NRZ*) intensitātes modulēta, blīva *WDM* optisko sakaru sistēma ar pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā (4. att.).



4. att. Realizēta piecu optisko *FBG* temperatūras sensoru sistēma, kas integrēta četru kanālu 10 Gbit/s *NRZ-OOK* blīvā *WDM-PON* pārraides sistēmā.

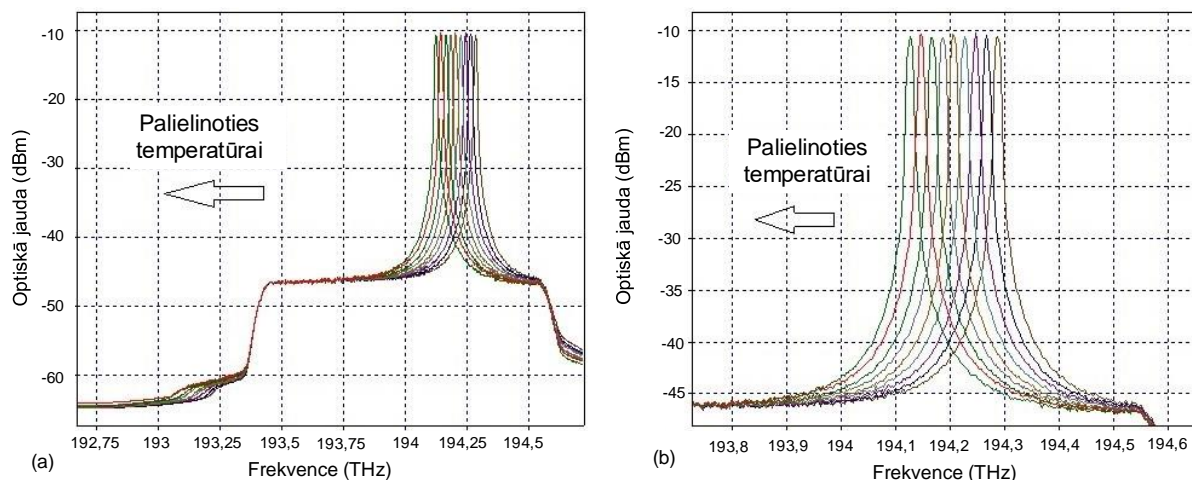
Vis svarīgākais uzdevums šīs nodaļas pētījumā ir elastīga sensoru un sakaru simulācijas modeļa izstrāde, kas vienlaikus nodrošina *FBG* optisko sensoru tīkla un datu kanālu pārraidi. Ir svarīgi izpētīt temperatūras izmaiņu ietekmi un saprast, cik lielā mērā temperatūra ietekmē optisko sensoru atstaroto signālu viļņu garumus jeb frekvences. Tas ļauj noteikt šo sensoru precizitāti un praktisko lietojumu. Simulācijas laikā pieci *FBG* šķiedras optiskie sensori ir pakļauti temperatūras izmaiņām no $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ar soli $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1. tab.).

1. tabula

Temperatūras ietekme uz *FBG* sensoru atstarotā signāla centrālo frekvenci

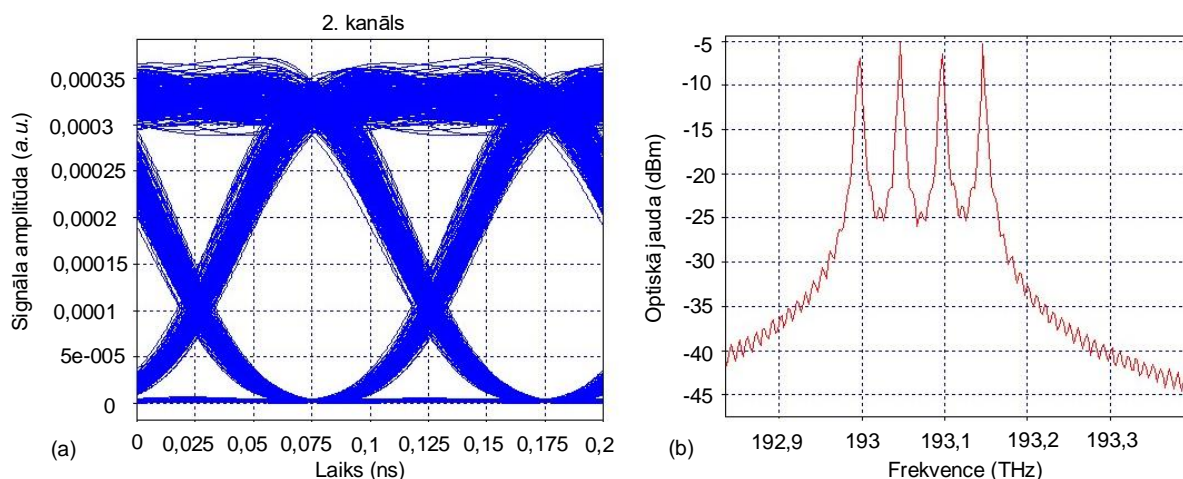
Sensora temperatūra ($^{\circ}\text{C}$)	<i>FBG</i> atstarotā signāla centrālā frekvence (THz)				
	1. sensors	2. sensors	3. sensors	4. sensors	5. sensors
-40	194,288	194,157	194,027	193,907	193,776
-20	194,268	194,137	194,009	193,889	193,758
0	194,247	194,117	193,986	193,868	193,738
+20	194,227	194,096	193,969	193,848	193,718
+40	194,207	194,076	193,948	193,827	193,699
+60	194,188	194,057	193,927	193,807	193,679
+80	194,166	194,037	193,907	193,787	193,658
+100	194,147	194,017	193,889	193,766	193,638
+120	194,127	193,997	193,868	193,748	193,618
Kopējās temperatūras izmaiņas ($^{\circ}\text{C}$)	0,161	0,160	0,159	0,159	0,158
Vidējās aprēķinātās frekvences izmaiņas uz $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (GHz)	1,0063	1,0000	1,0125	0,9938	0,9875

No 1. tabulā apkopotajiem datiem ir redzams, ka vidējās aprēķinātās frekvences izmaiņas uz 1 °C ir 1 GHz, kā arī pastāv cieša korelācija starp visu *FBG* sensoru iegūtajiem datiem šāda veida konfigurācijā. Līdz ar temperatūras pieaugumu katra sensora atstarotā optiskā signāla frekvence samazinājās, savukārt viļņa garums apgriezti proporcionāli pieauga (5. att.).

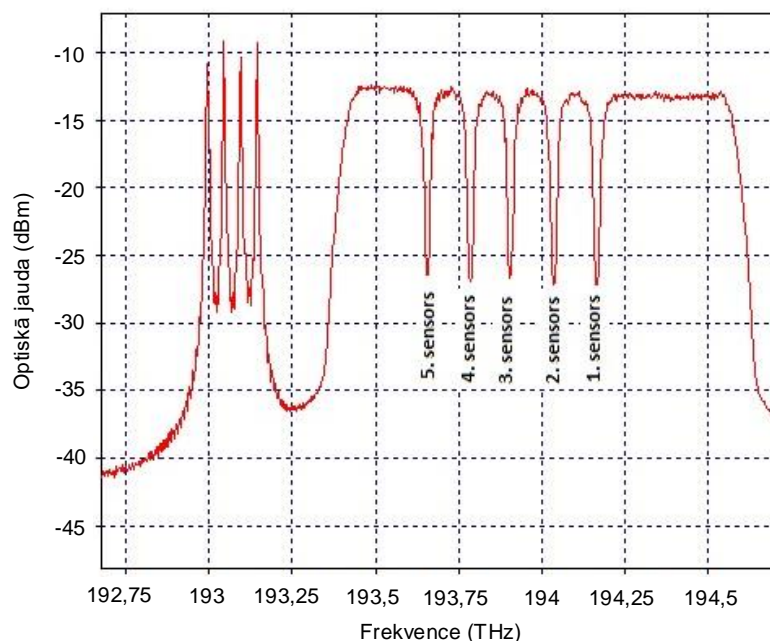


5. att. Pirmā *FBG* optiskā sensora atstarotā signāla centrālās frekvences izmaiņas, paaugstinoties vides temperatūrai (a), un šo izmaiņu pietuvinājums (b).

6. attēlā ir redzams, ka šāda optiskā sensoru sistēma var tikt integrēta optiskajā datu pārraides sistēmā. Savukārt 7. attēlā var redzēt, ka, izmantojot *AWG* iekārtu, visi četri datu kanāli var tikt relatīvi vienkārši izņemti no kopējā signāla, kas arī ietver *FBG* filtrētu *ASE* avota spektru. Autora pētījumā ir aplūkota līdzspastāvēšana ar *FBG* sensoru tīklu un *DWDM-PON* četru kanālu sistēmu, kuras pārraides ātrums ir 10 Gbit/s ar 50 GHz starpkanālu intervālu 20 km garā pārraides līnijā, nodrošinot bezklūdu signāla pārraidi (angļu val. *error-free*), pieņemts $BER < 10^{-9}$ [6, 17, 29]). Statistiski aprēķinātais BER uztvertajam signālam ir aprēķināts kā 1×10^{-40} .



6. att. (a) uztvertā signāla acs diagramma (2. kanāls) pēc 20 km garas pārraides līnijas; (b) blīvas 10 Gbit/s *NRZ-OOK DWDM* pārraides sistēmas pārraidītais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ar 50 GHz starpkanālu intervālu.



7. att. Uztvertā optiskā signāla spektrs pirms uztvērēja pusē esošā *ONU* iekārtu demultiplexora, kur ir novērojami četri 10 Gbit/s *NRZ-OOK* datu kanāli un pieci *FBG* optiskie sensori.

Kopumā, balstoties uz autora rekomendācijām, šāds *OptSim* modelis var tikt izmantots, lai to varētu pielāgot turpmākai izpētei objektu *SHM* vajadzībām.

Šajā nodaļā tika izpētīts viens no optiskās sensoru tehnoloģijas veidiem, kas ir balstīts uz šķiedras Brega režģi, kā arī testēta vairāku *FBG* sensoru darbība, kas var tikt izvietoti vienas optiskās šķiedras ietvaros, samazinot signālu apstrādes iekārtu nepieciešamo daudzumu kopējās sistēmas vajadzībām. Tika konstatēts, ka optiskais piecu sensoru tīkls var tikt pilnībā integrēts jau esošā vai arī jaunā optiskā pārraides sistēmā, nodrošinot bezklūdu datu pārraidi ($BER < 10^{-9}$) pie 10 Gbit/s bitu pārraides ātruma 20 km garā, standarta vienmodas optiskās šķiedras līnijā, ar četriem datu kanāliem, kuru starpkanālu intervāls ir 50 GHz, atbilstoši *ITU-T G.694.1* rekomendācijām [11]. Izmantojot *OptSim* simulācijas programmatūru, ir noteikts, ka temperatūras diapazonā no $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ neatkarīgi no *FBG* optiskā sensora noklusējuma centrālās signāla frekvences (Brega atstarotais viļņa garums) atstarotā signāla centrālā frekvence mainās par vidēji 1 GHz (8 pm) uz $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pieejamā frekvenču josla šajā gadījumā bija no 192 THz līdz 195,9 THz, ko ierobežoja izmantotā platjoslas *ASE* gaismas avota spektra platums. Ņemot to vērā, var novērtēt, ka trešajā caurspīdības logā, zinot, ka paredzamā temperatūra būs robežās no $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, *FBG* atstarotā signāla centrālās frekvences mainīsies par 0,16 THz jeb 160 GHz. Līdz ar to vismaz 23 optisko šķiedru *FBG* sensorus var izvietot uz vienas optiskās šķiedras. Tomēr ir jāatceras arī par katra optiskā sensora ienestajiem zudumiem. Jāatzīmē, ka maksimālais sensoru skaits ir ierobežots ienesto zudumu, kā arī šķiedru, savienotāju, slēgumu, cirkulatoru, pieejamās frekvenču joslas un optisko spektra analizatoru (ko izmanto uztverto sensoru signālu apstrādē) dēļ.

Trešā nodaļa

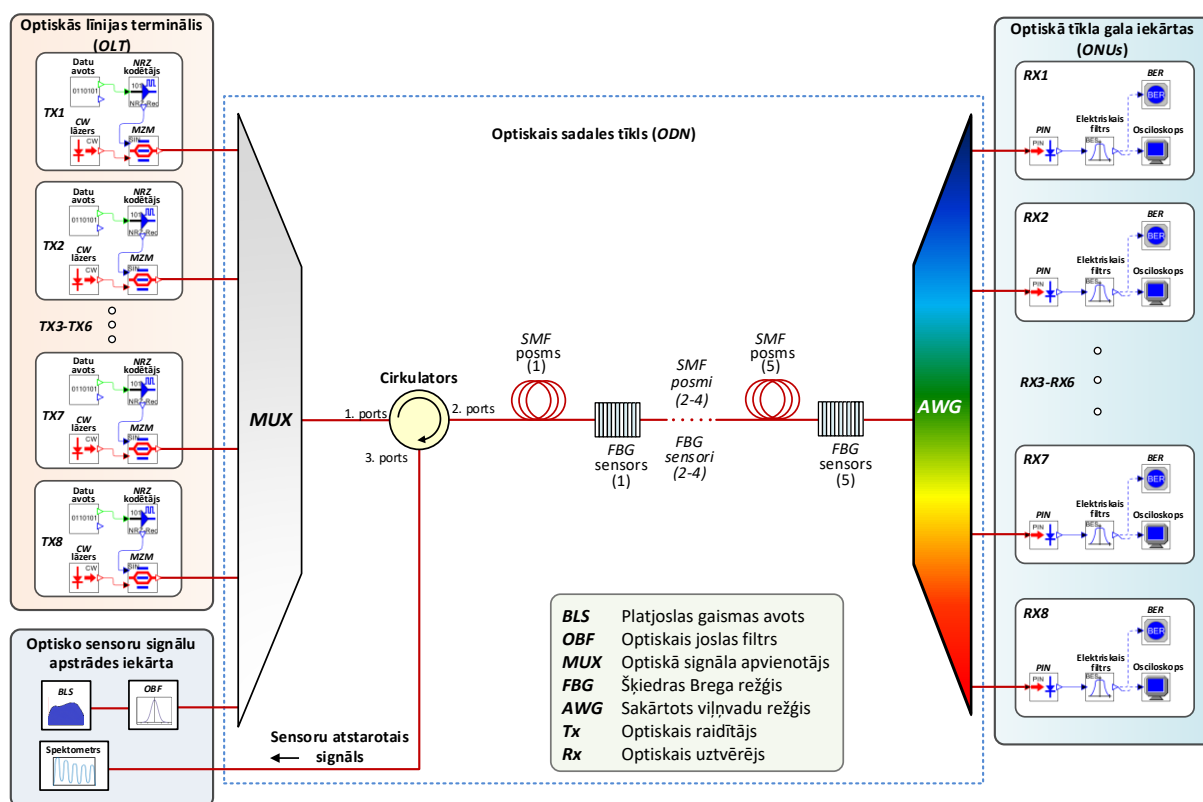
Kā minēts iepriekšējās nodaļās, ir svarīgi aplūkot un izpētīt *FBG* optisko sensoru tīkla infrastruktūras kopdarbību ar šķiedru optiskajām datu pārraides sistēmām. Izpētot šādas sistēmas darbības kvalitātes rādītājus, kopējo un katras atsevišķas sistēmas veiktspēju, kā arī iespējamus risinājumus, lai realizētu efektīvāku kopējās sistēmas darbību, lietojot vienotus, sistēmām nepieciešamus tehniskus risinājumus un komponentes. Papildu tam, neaizmirstot par

pieejamā optiskā spektra efektīvu lietošanu un optimizēšanu, reizē nezaudējot pārraidāmās informācijas kvalitāti un sistēmas stabilitāti.

Šajā nodaļā izveidota un analizēta piecu *FBG* optisko sensoru tīkla un 10 Gbit/s *WDM-PON* šķiedru optiskās astoņu datu kanālu pārraides sistēmas kopdarbības izpēte 20 km garā pārraides līnijā. Izveidots uzlabotas precizitātes *FBG* sensoru atstaroto signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritms. Šī kopdarbības sistēmas modeļa ietvaros ir izstrādāts matemātisks vienādojums, ar kuru ir noteikts minimāli pieļaujamais optisko sensoru starpkanālu intervāls (~208 GHz). Nodaļā aplūkota arī hibrīda 10 Gbit/s *WDM* astoņu datu kanālu sakaru sistēmas, 2,5 Gbit/s septiņu slēptu datu kanālu un piecu šķiedru optisko sensoru tīkla izstrāde 20 km garā pārraides līnijā, kas noder steganogrāfijas vajadzībām. Veikts šī izstrādātā modeļa iegūto spektra raksturlīkņu vizualizācijas novērtējums, kā arī veikspējas analīze.

Simulācijas veidošanai izmantota *RSoft OptSim* programmatūra, kurā lietoti nomērītie amplitūdas frekvence reakcijas dati, kas iegūti no komerciāli pieejama optiskā temperatūras sensora. Esošais optiskais sensors ir jutīgs, izturīgs temperatūras sensors, kas balstīts uz *FBG* tehnoloģiju. Šis modelēšanas mērķis ir izstrādāt simulācijas darbības modeli, kas nodrošina veiksmīgu *FBG* optisko temperatūras sensora tīkla sadarbību ar astoņu kanālu viļņgarumdales blīvētu pasīvo optisko tīklu (*DWDM-PON*; 8. att.).

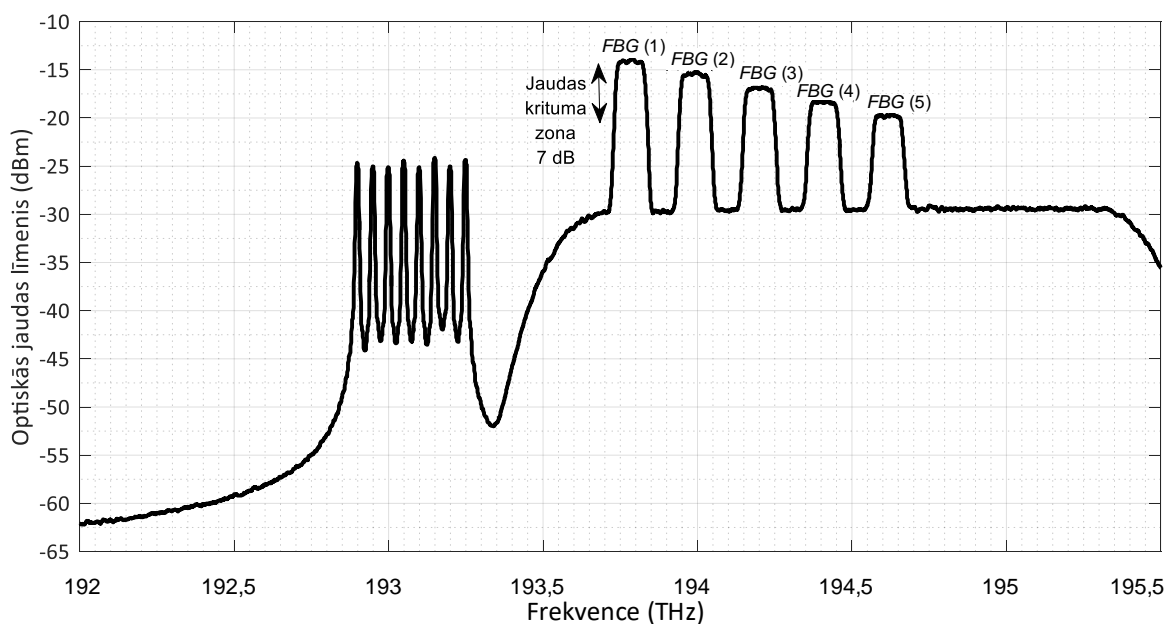
Izstrādātais modelis tālāk tika izmantots temperatūras ietekmes novērošanai attiecībā uz sensoru signāliem (optiski atstarotajiem signāliem no *FBG*), kā arī tam, lai novērotu un aprēķinātu minimālo starpkanālu intervālu, kas bija būtiski tālāk analizētajam un izstrādātajam optisko sensoru atstaroto signālu centrālo frekvenču maksimumu noteikšanas algoritmam. Kas attiecas uz datu pārraidi sistēmā, šis izveidotais modelis lieto neatgriešanās līdz nullei ieslēgtu un izslēgta režīma modulācijas shēmu *NRZ-OOK*. *OLT* ar 10 Gbit/s raidītājiem atrodas pakalpojuma sniedzēja pusē.



8. att. Izstrādātais sistēmas modelis, kas ietver piecu *FBG* temperatūras sensoru tīklu un ir apvienots ar astoņu kanālu 10 Gbit/s *NRZ-OOK DWDM-PON* pārraides sistēmu.

Pētījuma realizēšanā precīza minimālo starpkanālu intervālu noteikšana optiskajiem sensoriem, kā arī to atstaroto signālu centrālo frekvenču maksimumu noteikšana, izmantojot dažādas metodes, ir būtiska. Saskaņā ar komerciāla optiskā *FBG* temperatūras sensora tehnisko specifikāciju, tā kalibrētā frekvence pie +26 °C ir 191,53713 THz jeb 1565,191 nm, frekvences atbildes reakcija uz temperatūras izmaiņām ir 1,279 GHz pret 1 °C. Šī *FBG* temperatūras optiskā sensora atstarošanas spēja ir lielāka par 15 %.

9. attēlā var redzēt kombinētās sistēmas simulēto spektru pie 0 °C vides temperatūras, kas ietver piecus optiskos *FBG* sensoru kanālus (*FBG* atstarotos signālus), kā arī astoņus datu kanālus, kas ir nomērīti ar simulācijas modelī iestrādāto spektrometru (iestatītā joslas platuma izšķirtspēja – 0,07 nm, tas ievietots optisko sensoru signālu apstrādes iekārtā). Svarīgi ir akcentēt, ka šīs amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ir atstarotā signāla spektrs, nevis caurejošā signāla spektrs, līdz ar to astoņu datu kanāli šeit ir redzami kā ievērojami pavājināti.



9. att. Apvienotās sistēmas amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ar piecu *FBG* optisko sensoru atstarotajiem signālu centrālo frekvenču maksimumiem un astoņu datu kanāliem (spektrs iegūts, izmantojot spektrometru, kas iekļauts optisko sensoru apstrādes iekārtā) pie 0 °C vides temperatūras.

Sagaidāms, ka *FBG* sensora darba temperatūra atbilstoši konfigurācijai būs 80 °C diapazonā (no –20 °C līdz +60 °C), kā tas ir novērojams *SHM* lietojumos. Zinot frekvenci, kas ir temperatūras atbildes reakcija, kā arī *FBG* optisko sensoru atstaroto signālu centrālo frekvenču maksimumu spektrālo platumu, ir izstrādāts vienādojums, lai noteiktu teorētiski minimālo starpkanālu intervālu (*CS*) starp katru optisko sensoru, kas tika integrēts esošajā sistēmā.

$$CS = bw_{avg} + (T_{tot} \times f_{var}), \quad (3)$$

kur:

CS (GHz) – sensoru starpkanālu intervāls;

bw_{avg} (GHz) – *FBG* sensoru atstaroto signālu vidējais spektrālais platums optiskajā jaudas krituma zonā 7 dB;

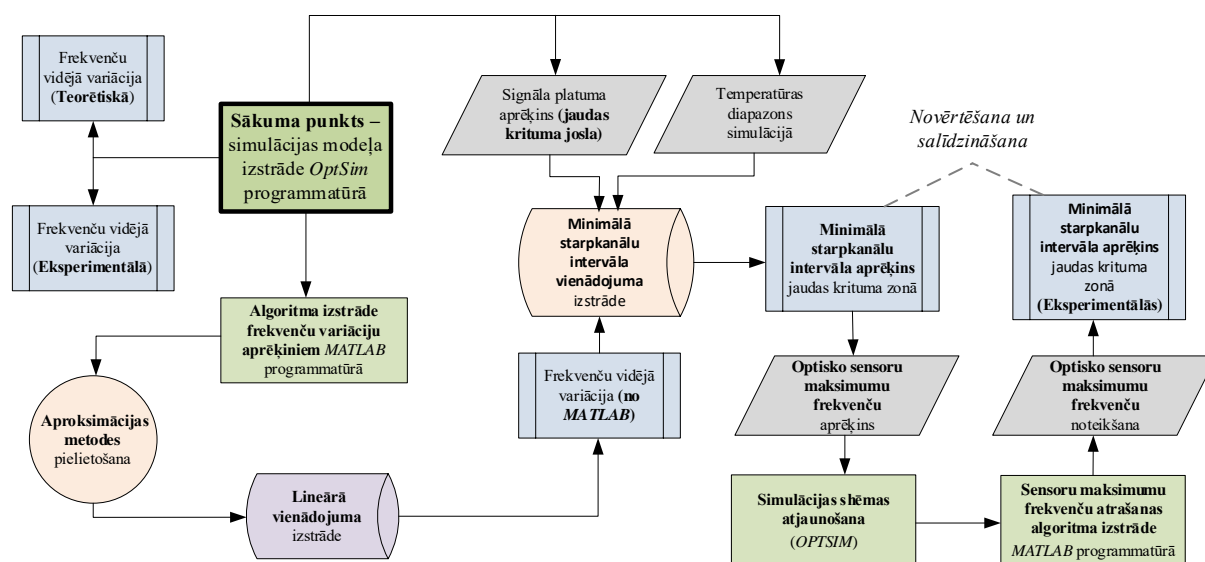
T_{tot} (°C) – kopsummā paredzētais jeb sagaidāmais temperatūras svārstību diapazons;

f_{var} (GHz) – FBG temperatūras sensoru atbildes reakcija uz atstarotā signāla centrālā maksimuma frekvences izmaiņām, citiem vārdiem sakot, frekvences izmaiņa uz 1 °C.

Šis vērtības eksperimentālais mērījums tika atspoguļots iepriekšējā nodaļā. Ievietojot vienādojumā visus zināmos mainīgos, minimālais sensoru starpkanālu intervāla aprēķins ir:

$$CS = bw_{avg} + (T_{tot} \times f_{var}) = 109,8278 + (80 \times 1,231) = 208,285 \text{ GHz} \quad (4)$$

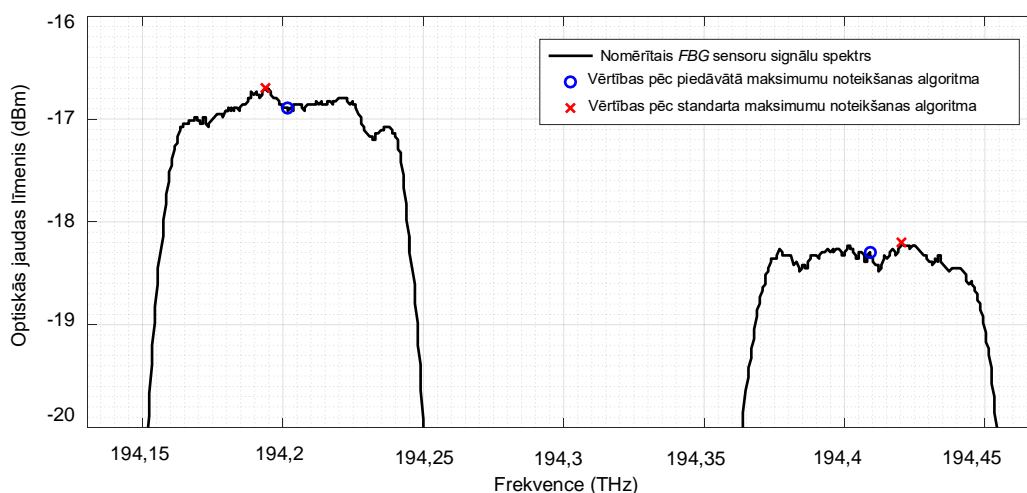
Autors piedāvā precīzu optisko sensoru atstaroto signālu centrālo frekvenču maksimumu noteikšanas risinājumu, kas izstrādāts *MATLAB* programmatūrā. Darba struktūra un sensoru signālu apstrādes secība ir vizualizēta diagrammā (10. att.). Šis attēls atspoguļo izpēti procesu, sākot no simulācijas modeļa un beidzot ar algoritma izstrādi (*MATLAB* algoritms), lai noteiktu precīzas sensoru atstarotā optiskā signāla spektra maksimumu centrālās frekvences.



10. att. Optisko sensoru atstaroto signālu precīza maksimumu (centrālo frekvenču) noteikšanas algoritma izstrādes diagramma.

Lai pārliecinātos, ka ir noteikts precīzs optisko sensoru starpkanālu intervāls, ir svarīgi atrast arī precīzu katra signāla centra maksimumu. Jāpaskaidro, ka ne vienmēr augstākā vērtība optiskā sensora atstarotā signāla maksimuma reģionā ir tā centrs. Šajā gadījumā visāda veida standarta izmantotie algoritmi (11. att. – “x”), kas nodrošina automātisku optisko sensoru atstaroto signālu maksimumu meklēšanu, atšķirībā no autora piedāvātā algoritma, nesniedz nepieciešamos rezultātus, kā tas redzams 11. attēlā.

Zinot, ka *FBG* starpkanālu intervāls tiek aprēķināts kā starpība starp diviem blakus esošiem *FBG* signālu maksimuma centriem un ka mainīsies jauniegūtās maksimālās centrālās frekvences vērtības, kas iegūtas aprēķinu laikā, bija saprotams, ka mainīsies arī starpkanālu intervāls jeb atstatums. 2. tabulā ir apkopotas noteiktās jaunās centrālās frekvences *FBG* optisko sensoru signāla maksimumiem, kā arī veikts salīdzinājums ar iepriekš iegūtajām vērtībām, kas tika aprēķinātas pēc sākotnējās standarta optiskā spektra maksimumu nolašu metodes. Pēc šiem rezultātiem var noteikt un salīdzināt arī starpkanālu intervālu vērtības.



11. att. Standarta automātisko optisko sensoru atstaroto centrālo maksimumu noteikšanas (balstītas uz augstāko vērtību maksimuma reģionā) un autora piedāvātā algoritma, kas nosaka precīzu maksimuma centru trešajam un ceturtajam *FBG* optiskajiem sensoriem, salīdzinājums.

Kā redzams 2. tabulā, starp aprēķinātajām un nomērītajām frekvenču vērtībām ir redzama starpība (GHz). Šī vērtība attēlo kļūdu starpību starp abiem izmantotajiem algoritmiem.

2. tabula

Aprēķinātās un noteiktās *FBG* optisko sensoru centrālās signālu frekvences, izmantojot abas metodes

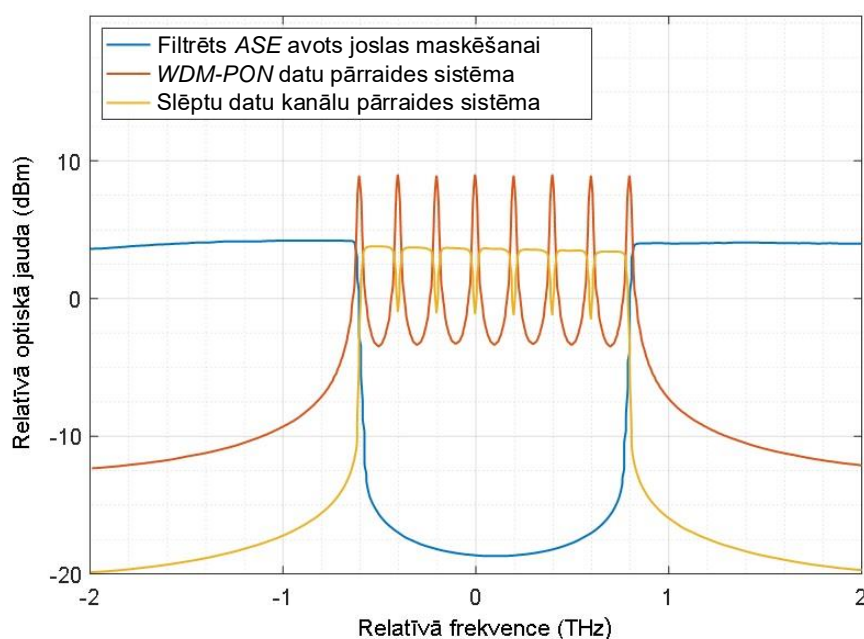
<i>FBG</i> sensora kārtas numurs	Iegūtās centrālās maksimumu frekvences (THz)		Starpība (GHz)
	Aprēķinātās centrālās frekvences	Nomērītās vērtības ar piedāvāto maksimumu noteikšanas algoritmu	
1	193,800	193,785	15,166
2	194,008	193,994	14,084
3	194,217	194,201	15,385
4	194,425	194,409	15,642
5	194,633	194,616	17,322
Starpkanālu intervāls (GHz)	208,285	207,746	0,539

Iegūtie rezultāti liecina, ka šāda maksimuma noteikšanas algoritmu var integrēt *FBG* optisko sensoru apstrādes iekārtās, lai veiktu vēl precīzāku katra *FBG* optiskā sensora atstarotā signāla centrālo maksimuma noteikšanu un starpkanālu intervāla vērtības piemērošanu.

Šajā nodaļā ir parādīta piecu *FBG* optisko sensoru tīkla un astoņu kanālu *NRZ-OOK* modulētu 10 Gbit/s optiskās šķiedras datu pārraides sistēma. Pētījuma laikā izstrādāts vienādojums, lai aprēķinātu optisko sensoru minimālo starpkanālu intervālu, kas sniedz iespēju noteikt minimālo frekvenču joslu starp blakus esošiem optiskajiem *FBG* sensoriem, nodrošinot, ka to atstarotie signāli nepārklājas noteiktajā frekvenču apgabalā. Iegūtie rezultāti parādīja, ka šajā gadījumā starpkanālu intervāls starp diviem blakus esošajiem *FBG* temperatūras sensoriem ir jānodrošina vismaz 208 GHz. Tradicionāli lietotie optiskā sensora atstarotā signāla spektra

frekvenču maksimumu noteikšanas algoritmi nosaka, ka šī centrālā frekvence ir maksimuma punkts ar visaugstāko intensitāti – vērtību. Tomēr ne vienmēr augstākais punkts ir optiskā sensora atstarotā signāla spektra centrālās frekvences maksimuma centrs, ņemot vērā jaudas svārstības un *FBG* atstarotā signāla frekvences spektra neregularitāti. Šajā nodaļā ir piedāvāts un apstiprināts algoritms precīzu šādu signālu maksimumu centrālo frekvenču noteikšanai. Algoritmam ir tiešs lietojums *FBG* signālu apstrādes risinājumos.

Nodaļā veikta arī hibrīda *WDM* sakaru sistēmas ar slēptiem datu kanāliem un šķiedru optisko sensoru tīklu izstrāde. Iepriekš veiktajos pētījumos [15, 28] *WDM* datu kanāli tiek apvienoti ar *ASE* troksni (kas reprezentē slēptu datu pārraidi vai kanālu maskēšanu tieši pieejamajā *ASE* spektrā). Šajā darbā tā vietā, lai rezervētu visu frekvenču spektru, ko aizņem *ASE*, kas ir rezervēts slēptiem datiem frekvenču joslā, autora pētījums tiek veikts citādi. Viena modulēta *ASE* šķēle, kas satur slēptus datus, tiek ievietota starp katru uz lāzera gaismas avota balstītu *WDM-PON* datu pārraides kanālu, kā tas ir redzams 12. attēlā.

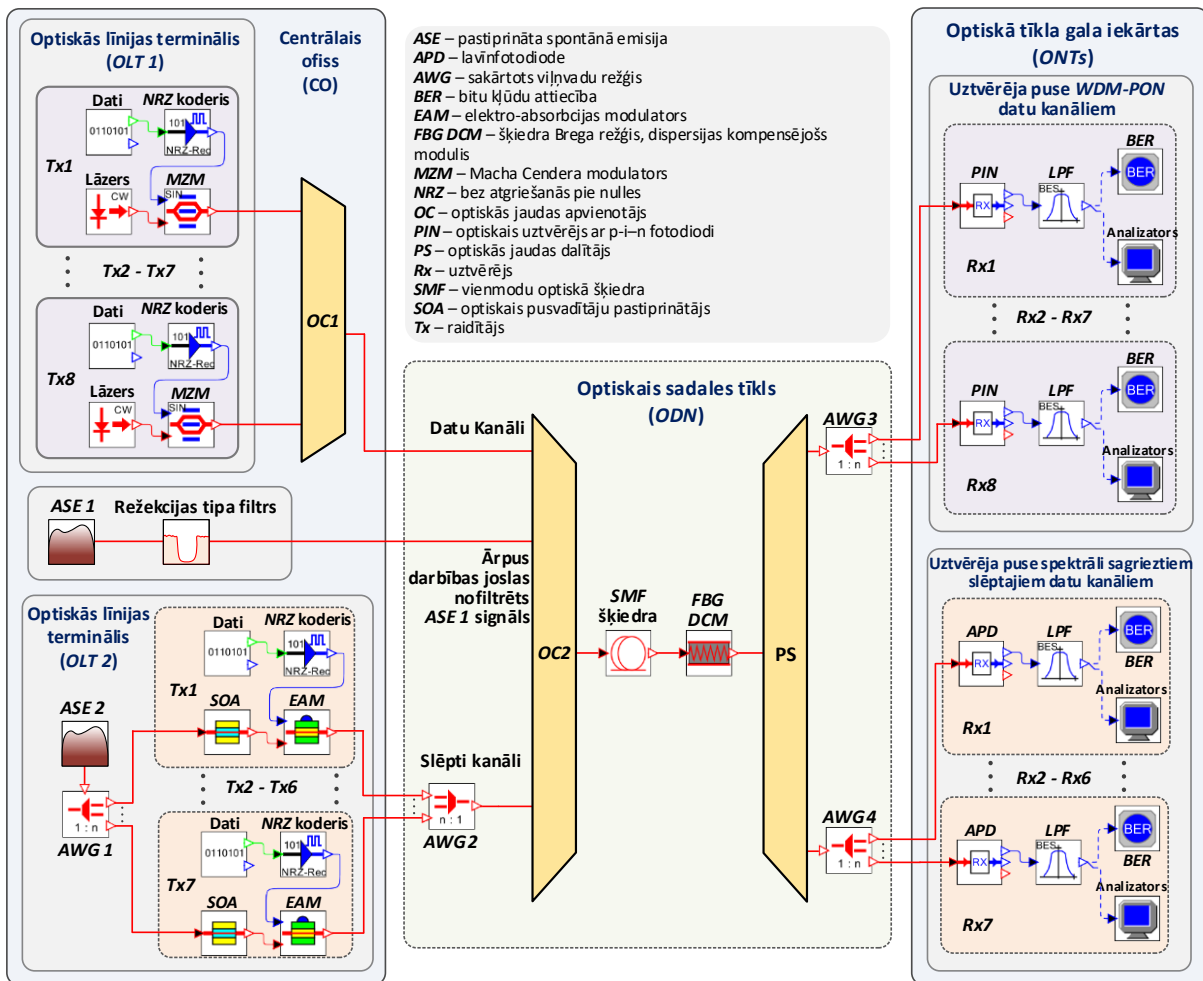


12. att. Piedāvātais risinājums lāzera veidotas *WDM-PON* sistēmas un spektrāli sadalītas (uz *ASE* signāla balstītas) maskēšanās pārraides sistēmas spektra sadalīšanai (optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs tiek mērīts pirms signāla pārraides 20 km garā pārraides šķiedras līnijā).

Vēl viens *ASE* avots tiek lietots, lai pievienotu *ASE* troksni ārpus hibrīda *WDM-PON* un slēptu kanālu sistēmas frekvenču darbības joslas, kas ir nepieciešams, lai veiktu spektra izlīdzināšanu un ir pieejams citiem frekvenču joslas lietotājiem un to vajadzībām [26], piemēram, optisko sensoru datu pārraidei, kā tas tiks realizēts šajā pētījumā. Kā minēts vairākās publikācijās [5, 23], ierobežot iespēju novērot un analizēt pārraidīto datu likumsakarības ir kritiski svarīgi, lai tādējādi nodrošinātu vērtīgu papildu drošības slāni optisko sakaru tīklos, kas papildina datu šifrēšanas mehānismus.

Izveidotā simulācijas shēma (13. att.) ietver tipisku *WDM-PON* sistēmas arhitektūru (izņemot slēptu datu pārraides daļu). Kopumā šī hibrīda šķiedras optiskā sakaru sistēma sastāv no *CO*, *ODN* un *ONT*. Centrālajam ofisam ir divi galvenie *OLT* veidi, kas sastāv no dažādiem raidītāju blokiem – viens paredzēts *WDM-PON* sistēmai (*OLT 1*), savukārt otrs – *ASE* avota darbinātai slēptu kanālu sistēmai (*OLT 2*). Papildus tam vēl viens *ASE* avots (*ASE 1*) kopā ar caurejošo režekcijas optisko filtru tiek izmantots centrālajā ofisā, lai nodrošinātu slēptu kanālu maskēšanu ārpus optiskās, slēptu kanālu sistēmas, darbības joslas. Šis gaismas avots ir pamats optisko sensoru darbības nodrošināšanai, tādējādi optimizējot arī esošo resursu izmantošanu.

Līdzīgi kā raidītāja daļai, arī uztvērēja daļai ir divu veidu uztvērēji – vieni *WDM-PON* datu kanālu uztveršanai un apstrādei, savukārt otri – spektrāli sagrieztu ASE slēpto datu kanālu uztveršanai.



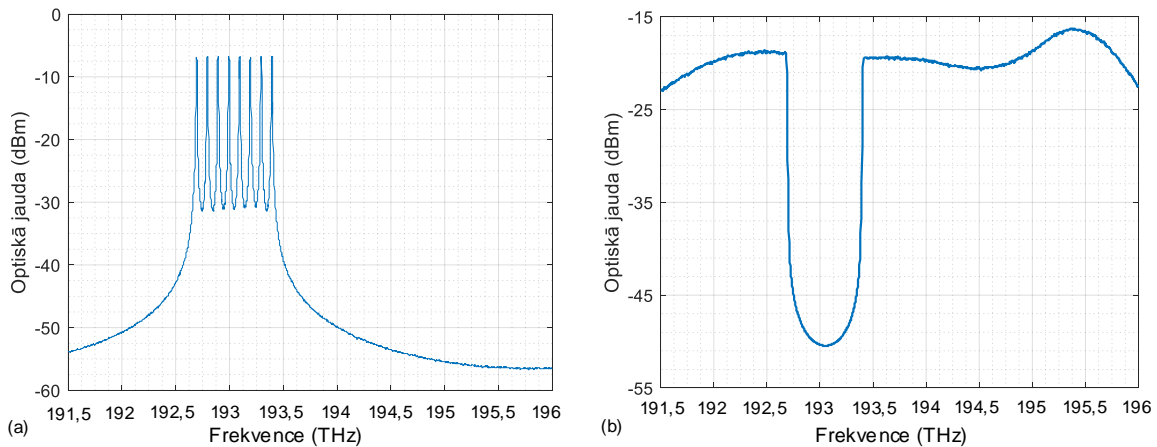
13. att. Hibrīda optiskās sakaru sistēmas simulācijas shēma ar astoņu kanālu 10 Gbit/s (10,7 Gbit/s ieskaitot 7% *FEC OH*) NRZ-OOK modulētu WDM-PON pārvades sistēmas daļu (augšējā daļa) un septiņu kanālu 2,5 Gbit/s (2,675 Gbit/s ieskaitot 7% *FEC OH*) NRZ-OOK slēptu maskēšanas kanālu sistēmas daļu (apakšējā daļa).

Ņemot vērā 7% datu virstēriņu *FEC OH* (angļu val. *overhead*), simulētā bitu pārraide bija 10,7 Gbit/s. Kā gaismas avots *OLT 1* tika ieviests CW lāzers ar izejas jaudu +3 dBm un 3-dB līnijas platumu 50 MHz. Uztvertais *OLT 1* izejas amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ir redzams 14. a attēlā.

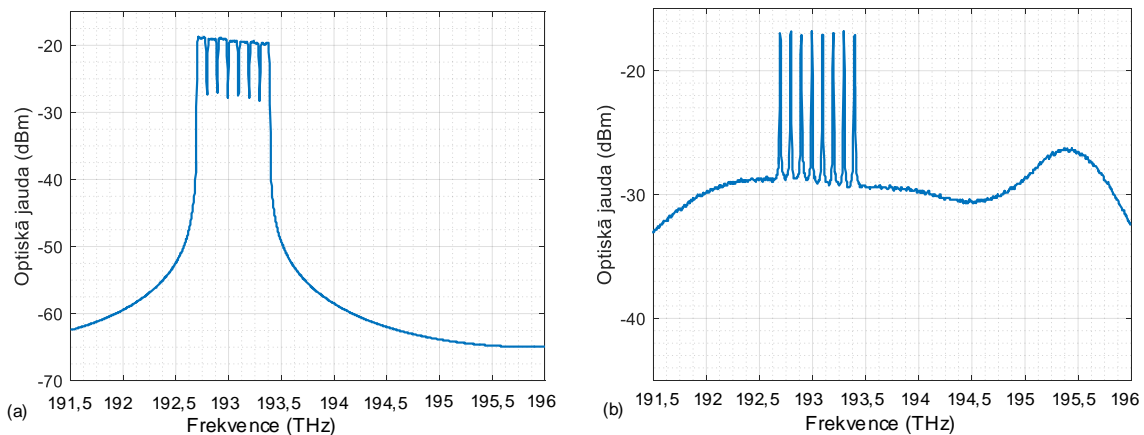
CO kreisajā vidusdaļā atrodas pirmais *ASE 1* gaismas avots, kas bija svarīgs, lai vienmērīgi iestatītu signāla jaudas līmeni kopējā spektrā (ārpus *WDM-PON* astoņu datu pārraides kanālu darbības joslas), tādējādi palīdzot veikt vienmērīgāku maskēšanu slēptajiem datu kanāliem. Pēc tam filtrētais *ASE 1* signāls tiek pārraidīts uz optisko apvienotāju (14. b att.). Visbeidzot, CO apakšējā kreisajā pusē atrodas *OLT 2* ar septiņiem slēptiem signālu raidītājiem ($T \times 1$ līdz $T \times 7$). Noteiktais *OLT 2* izejas optiskais amplitūdas frekvenču raksturlīknes pārvades spektrs redzams 15. a attēlā.

Piedāvātajā hibrīda sistēmā ir pārbaudīti divi pārraides scenāriji – *B2B* un ar 20 km garu vienmodas optisko šķiedras pārraides līniju. Uzņemtais optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs, kas satur visus trīs signālus (datu pārraides kanāli, pirmais

filtrētais ASE, ko izmanto slēpto datu kanālu maskēšanai, un ASE slēptie datu kanāli) pēc 20 km garas vienmodas optiskās šķiedras pārraides līnijas redzams 15. b attēlā.

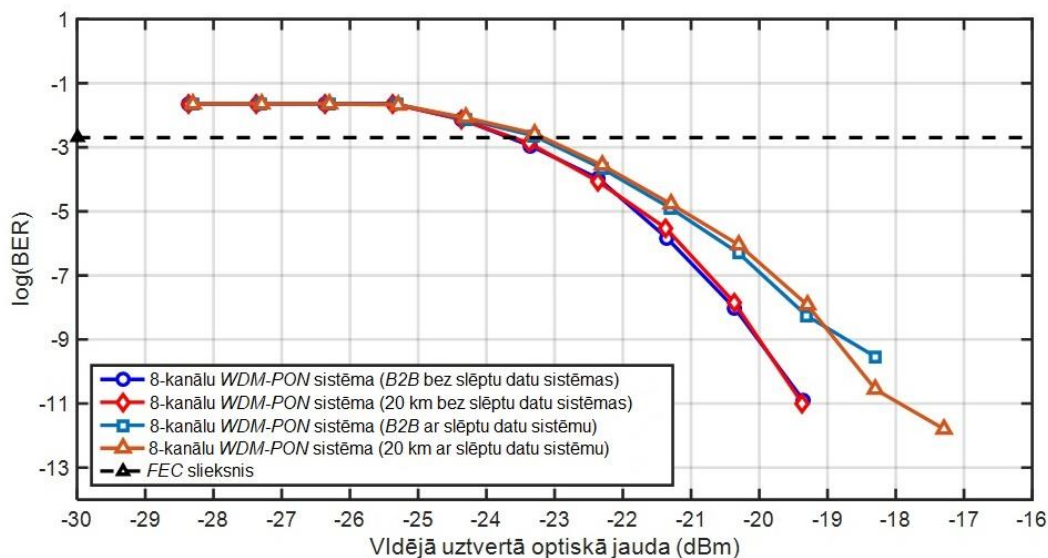


14. att. (a) Simulētais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs astoņu kanālu WDM-PON pārraides sistēmai (10,7 Gbit/s pārraides ātrums); (b) platjoslas ASE I avots, kas filtrēts ar platjoslas (710 GHz 3-dB joslas platumu) režekcijas tipa filtru, lai maskētu spektrāli sagrieztus datu kanālus.



15. att. (a) Spektrāli sagriezts septiņu slēptu datu pārraides kanālu sistēmas AWG2 izejas amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (2,675 Gbit/s bitu pārraides ātrums); (b) visu trīs signālu uztvertais optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (datu pārraides kanāli, filtrēts ASE, ko izmanto ASE slēpto kanālu maskēšanai, un ASE slēptie kanāli) pēc 20 km garas pārvades līnijas.

Visbeidzot, it īpaši svarīgi ir salīdzināt BER attiecībā pret uztverto optisko jaudu starp visiem scenārijiem, lai saprastu signāla kropļojuma apjomu, ko slēptā sistēma var ieviest WDM-PON sistēmā (16. att.). Attēlā redzama tieša korelācija starp visiem scenārijiem, līdz ar to var droši teikt, ka slēptu datu kanālu ievietošana šādos sistēmas sadarbības modeļos ir efektīvi iespējama.



16. att. BER attiecībā pret uztverto optisko jaudu astoņu kanālu WDM-PON datu pārraides sistēmai B2B apstākļos, salīdzinot ar 20 km garu pārvades līniju ar un bez slēptu datu kanālu sistēmas integrāciju.

Skaitliski, atsaucoties uz 16. attēlu, ir nepieciešams veikt jaudas soda aprēķinu WDM-PON sistēmai ar un bez slēptu kanālu sistēmas ievietošanas kopējā pārraides sistēmas arhitektūrā. 3. tabulā ir redzams, ka B2B, kā arī 20 km garā pārvades līnijas konfigurācijas scenārijā, jaudas sods starp abiem (vienkārša WDM-PON sistēma attiecībā pret WDM-PON sistēmu ar slēptiem datu kanāliem) ir mazāks par 0,5 dB.

3. tabula

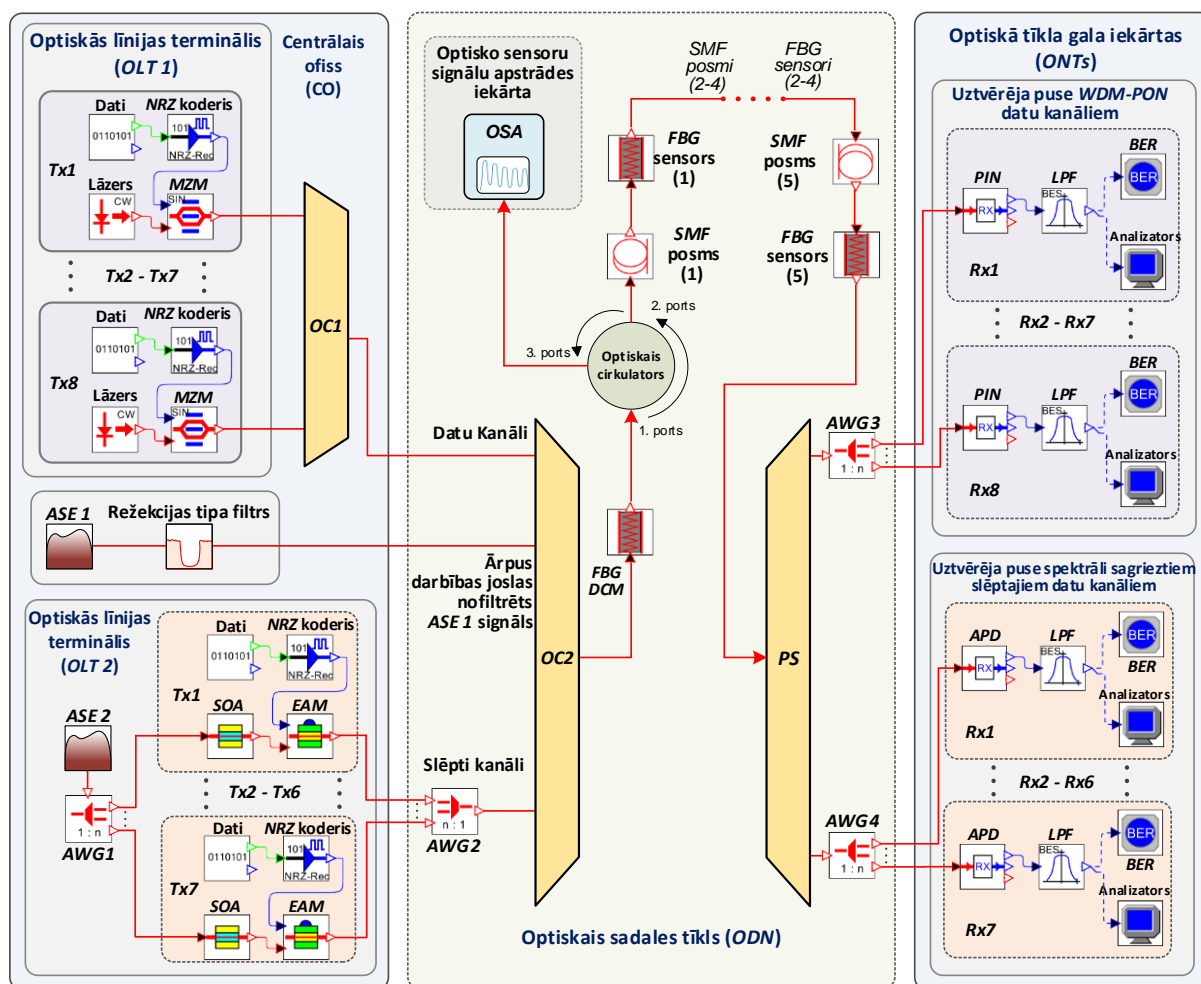
Jaudas sods starp vienkāršu WDM-PON sistēmu un WDM-PON sistēmu ar autora piedāvātu spektrāli sagrieztu maskēšanas sistēmu

Simulācijas scenārijs	Jaudas sods pirms FEC BER līmeņa 2×10^{-3}
10,7 Gbit/s WDM datu kanālu sistēma B2B konfigurācijā (ar slēptu datu kanālu sistēmu)	0,42 dB
10,7 Gbit/s WDM datu kanālu sistēma B2B konfigurācijā (bez slēptu datu kanālu sistēmas)	
10,7 Gbit/s WDM datu kanālu sistēma 20 km garas optiskās pārvades līnijas konfigurācijā (ar slēptu datu kanālu sistēmu)	0,43 dB
10,7 Gbit/s WDM datu kanālu sistēma 20 km garas optiskās pārvades līnijas konfigurācijā (bez slēptu datu kanālu sistēmas)	

Ņemot vērā 16. attēlā un 3. tabulā apkopotos datus, ir iespējams novērot svarīgus faktorus, kas ir saistīti ar maskētu signālu integrāciju WDM-PON datu pārraides sistēmās. Pirmkārt, ir redzama cieša korelācija BER rezultātos starp B2B pārraides scenāriju un 20 km garu pārraidi. Tas nozīmē, ka piedāvātais kombinētās hibrīda sistēmas modelis negatīvi neietekmē veiktspēju optisko piekļuves tīkliem raksturīgos pārraides attālumus, piemēram, 20 km. Otrkārt, spektrāli sagrieztās slēptās sistēmas integrācija joprojām nodrošina pietiekami augstu WDM-PON datu pārraides kvalitāti – aprēķinātais jaudas sods visos apstākļos ir

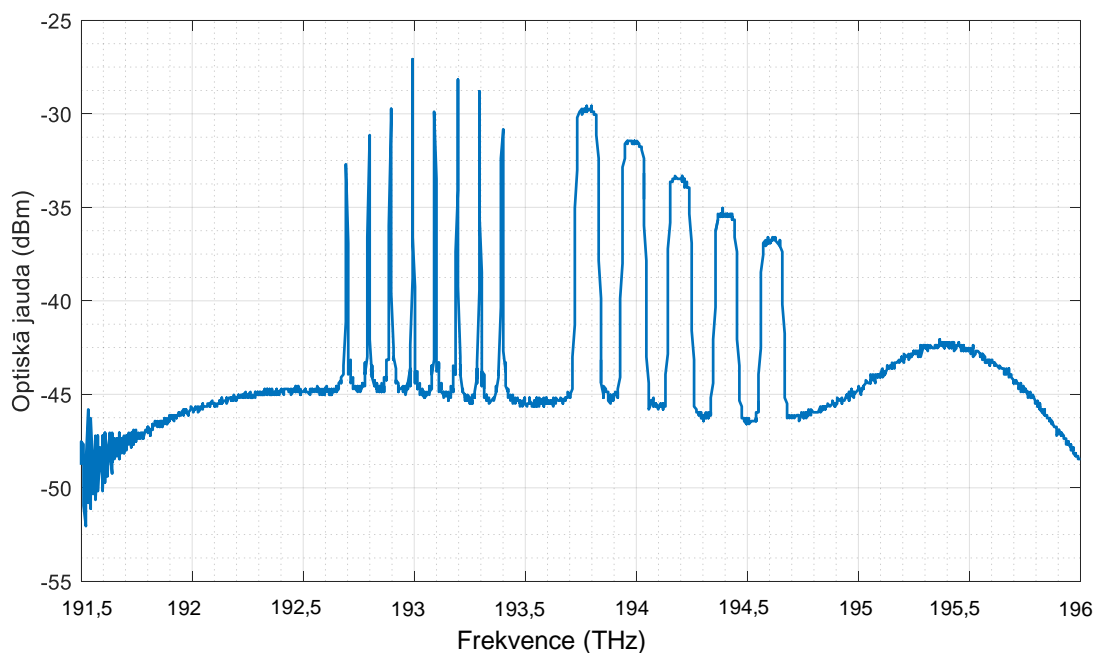
mazsvarīgs pie pirms *FEC BER* līmeņa 2×10^{-3} (atbilstoši *ITU-T G.975.1* standartam un pieņemtajai prakse zinātniskajās publikācijās [12, 14, 30]).

Ņemot vērā iepriekšējās apakšnodaļas realizēto risinājumu un veiksmīgu slēptu datu kanālu iestrādi *WDM-PON* sistēmā, tālāk tiek integrēta un novērota piecu *FBG* optisko sensoru tīkla iestrāde kopējā sistēmā. 17. attēlā ir redzama jaunā shēma, ko papildina augšējā vidus daļa. Optiskās pārraides līnijā starp pārraidāmo un uztverošo pusi ir izvietoti pieci *FBG* optiskie sensori. Katrs no šiem sensoriem ir atdalīts ar 4 km garu *SMF* šķiedras posmu. Atbilstoši iepriekšējās nodaļās izpētītajam starp katru optisko sensora signālu ir uzstādīts 208 GHz plats optisko sensoru starpkanālu intervāls.



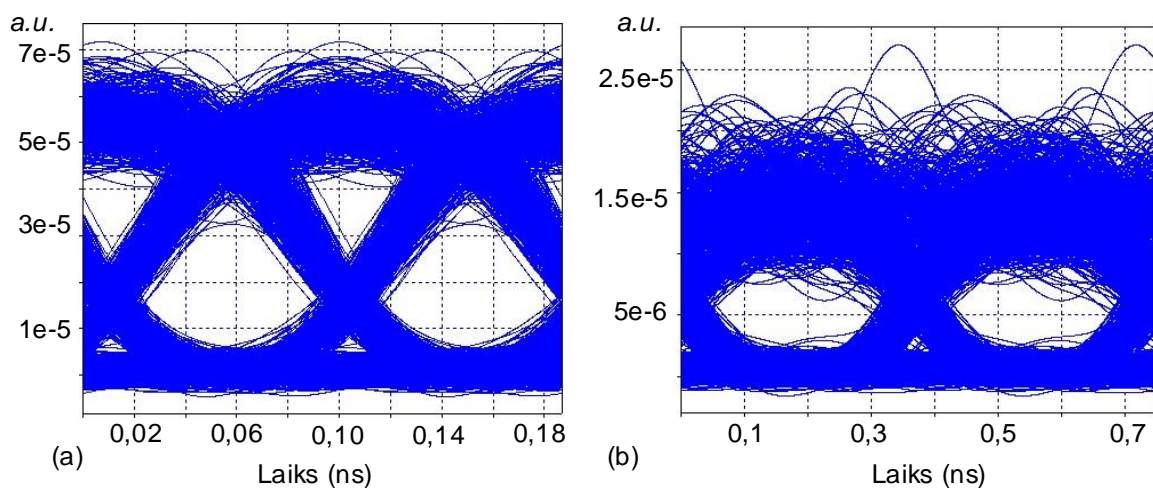
17. att. Hibrīda optiskās sakaru sistēmas simulācijas shēma ar astoņu datu kanālu, septiņu slēptu datu kanālu un piecu *FBG* optisko sensoru sistēmu.

Savukārt 18. attēlā ir redzams atstarotā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs, ko var novērot optisko sensoru apstrādes iekārtā, izmantojot optisko spektra analizatoru. Šeit būtiski ir atzīmēt, ka atstarotais signāls kopējā sistēmā tiek pārraidīts divkārsā apjomā. Tas nozīmē, ka pēc optiskās pārraides līnijas visa kopējā garuma optiskais signāls tiek atstarots un pārraidīts atkārtoti cauri visai kopējai sistēmai, cauri katram optiskajam sensoram, kas atrodas 4 km attālumā viens no otra. Tas arī ietekmē optisko sensoru atstarotā signāla maksimumu starpību un kopējo spektru.



18. att. Hibrīda optiskās sakaru sistēmas atstarotā signāla optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs.

Tālāk, izmantojot iepriekš noteikto sistēmas elementu konfigurāciju, lai pārlicinātos, ka hibrīda sistēmas konfigurācija nelabvēlīgi neietekmē *WDM-PON* datu kanālu un slēpto datu kanālu sistēmas, ir aplūkota uztvertā signāla kvalitāte, analizējot acu diagrammas (19. att.).



19. att. (a) Acu diagramma nekvalitatīvākajam *WDM-PON* datu pārraides kanālam (2. kanāls); (b) acu diagramma nekvalitatīvākajam slēptajam datu kanālam (4. kanāls) 20 km garā datu pārraides līnijā pēc optisko sensoru sistēmas ievietošanas.

Šajā gadījumā hibrīda konfigurācijas realizācijā ar datu kanāliem, slēptu datu kanāliem un optiskajiem sensoriem, slēptu datu kanālu visaugstākais *BER* tika novērots 4. kanālam, kas ir $2,16 \times 10^{-5}$. Savukārt datu kanāliem tas ir 2. kanāls ar *BER* vērtību $2,86 \times 10^{-16}$. Vidējā slēptu datu kanālu *BER* vērtība ir $1,11 \times 10^{-5}$, turpretī *WDM* datu kanālu *BER* vidējā vērtība ir $7,16 \times 10^{-17}$. 4. tabulā redzams *BER* vidējo vērtību *WDM-PON* datu un slēptu datu kanālu gan ar, gan bez optiskās sensoru sistēmas integrācijas salīdzinājums, lai labāk izprastu optisko sensoru sistēmas ietekmi uz slēptu datu kanālu un *WDM-PON* datu kanālu kvalitāti.

BER vidējās vērtības *WDM-PON* datu kanāliem un slēptiem datu kanāliem ar un bez optisko sensoru sistēmas integrācijas pēc 20 km garas pārraides līnijas

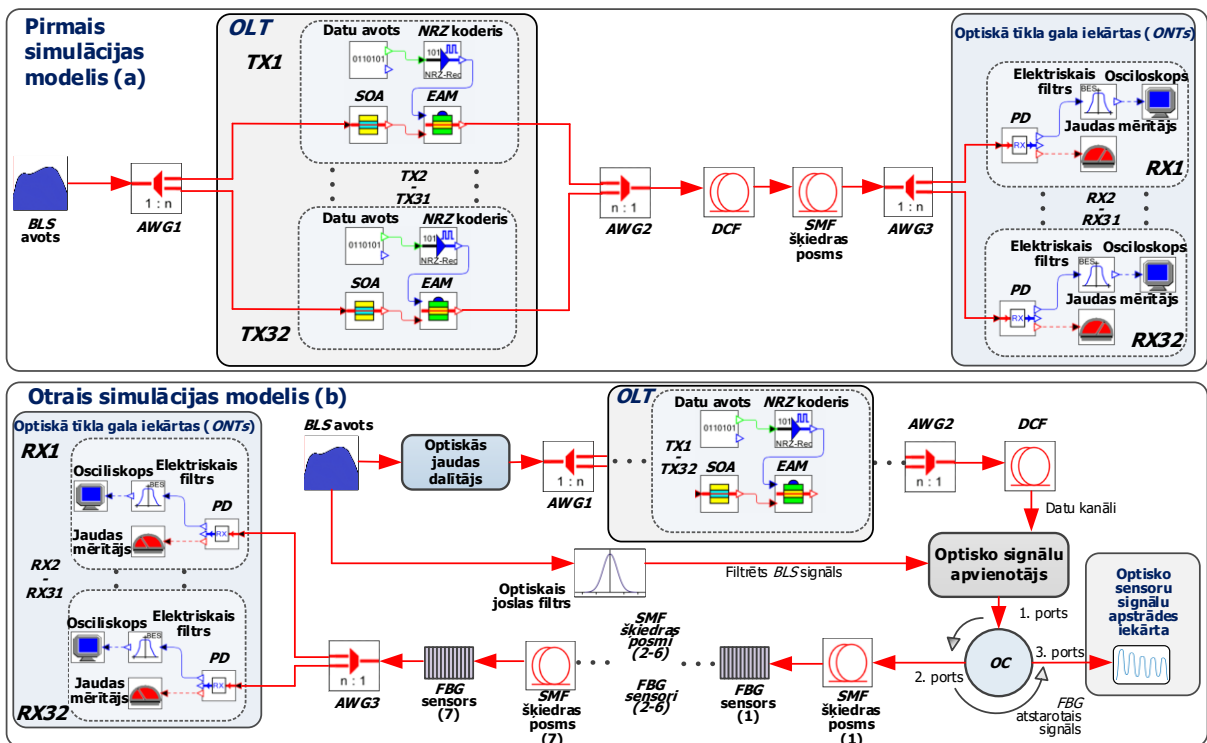
Vidējā <i>BER</i> vērtība	Bez optisko sensoru sistēmas integrācijas	Ar optisko sensoru sistēmas integrāciju
<i>WDM-PON</i> datu kanālu sistēma	$7,23 \times 10^{-19}$	$7,16 \times 10^{-17}$
Slēptu datu kanālu sistēma	$1,13 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-5}$

Kā redzams 4. tabulā, pēc iegūtajām vidējām *BER* vērtībām ir redzams, ka piecu *FBG* optisko šķiedru sensoru sistēmas ievietošana nav radījusi būtisku negatīvu ietekmi uz *WDM-PON* un slēptu datu kanālu sistēmām un to uztverto signālu kvalitāti. Tas nozīmē, ka šāds hibrīda risinājums var tik realizēts un pilnveidots arī nākotnes vajadzībām.

Ceturtnā nodaļa

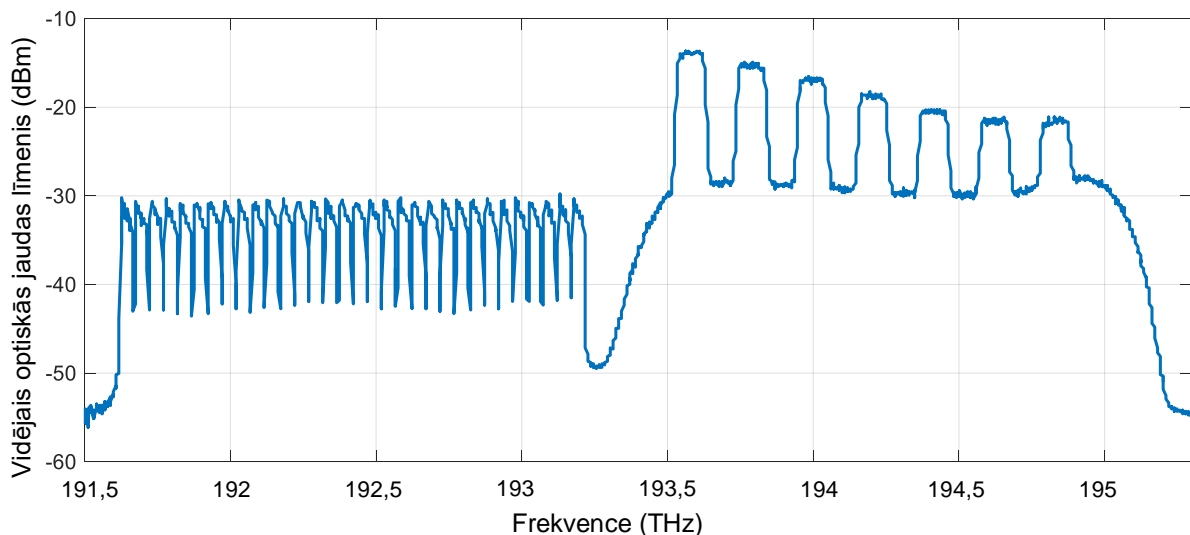
Šīs nodaļas pētījumā sākotnēji ir veiksmīgi realizēta simulācija, kur apvienota septiņu *FBG* sensoru sistēma ar spektrāli sagrieztu 32 kanālu viļņgarumdales blīvētu pasīvu optisko tīklu (*SS-WDM PON*) datu pārraides sistēmu. Standarta vienmodas optiskās šķiedras posmu garums starp katru optisko sensoru šajā septiņu optisko sensoru sistēmā ir 4 km, kopumā parādot šīs sistēmas darbību 28 km garā pārraides līnijā. Autors piedāvā spektrāli efektīvu risinājumu izstrādātās sistēmas optiskajā daļā, apvienojot ievades gaismas avotus – izmantojot vienotu *BLS* starp abām apvienotajām sistēmām, nevis katrai no tām izmantojot atšķirīgu gaismas avotu. Lai to paveiktu un izstrādātu apvienotu sistēmas modeli, tā raksturojumu un darbības novērtējumu, tika izmantota matemātiskās modelēšanas un simulācijas programmatūra. Veiktspējas novērtējums tika veikts četros dažādos scenārijos – ar un bez sadarbības starp abām sistēmām (datu kanālu un optisko sensoru) ar bitu pārraides ātrumu 2,5 Gbit/s un 10 Gbit/s uz katru datu pārraides kanālu, apstiprinot, ka ir iespējama realizācija datu pārraides un optisko sensoru sistēmu kopdarbībā viena gaismas avota izmantošanas ietvaros. Tālāk nodaļā atspoguļota eksperimentāla modeļa izstrāde, kur spektrāli sagriežta *WDM* pārraides sistēma ar integrētu *FBG* optisko sensoru sistēmu darbojas uz vienota platjoslas gaismas avota. Lai efektīvāk analizētu eksperimentālās shēmas darbību atbilstoši eksperimentālajās shēmas konfigurācijai, tiks izstrādāta un pielāgota vēl viena papildu simulācijas shēma, lai labāk salīdzinātu iegūto datu precizitāti. Shēmu kopums ļaus analizēt sistēmu kopdarbības realizēšanu, izmantojot kopīgu platjoslas gaismas avotu.

Iepriekš minētās simulācijas ir izstrādātas, izmantojot *RSOFT* matemātiskās simulācijas *OptSim* programmatūru. Lai pierādītu abu sistēmu – optisko šķiedru sensoru un datu pārraides kanālu – veiksmīgu kopdarbību, autors ir izstrādājis divus simulācijas modeļus (20. att.).



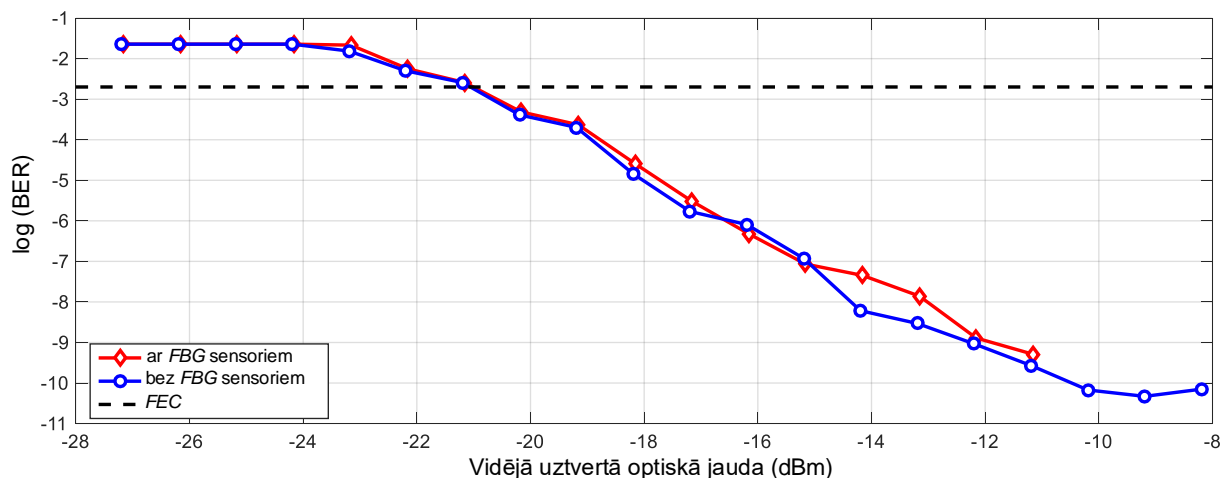
20. att. Simulācijas risinājumi abiem modeļiem, kur ir lietota viena kopīga optiskā šķiedra un optiskās gaismas avots 32 kanālu SS-DWDM PON pārraides sistēmai (darbojoties ar 2,5 Gbit/s un 10 Gbit/s bitu pārraides ātrumu) ar un bez integrētas septiņu optisko FBG sensoru sistēmas (BLS – platjoslas gaismas avots, AWG – sakārtots viļņvadu režģis, OLT – optiskās līnijas terminālis, TX – raidītājs, SOA – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs, EAM – elektroabsorbcijas modulators, DCF – dispersiju kompensējoša šķiedra, FBG – šķiedras Brega režģis, OC – optiskais cirkulators, RX – uztvērējs, SMF – vienmodas optiskā šķiedras, PD – PIN fotodiode).

Pirmkārt, SS-WDM PON sistēmas modelis ir veiksmīgi realizēts, un tas iekļauj apvienotu sistēmu, kur viena no tām ir 32 datu pārraides kanālu sistēma un otra – septiņu FBG optisko sensoru sistēma (ar iestatītām centrālām signālu maksimumu frekvencēm – 193,6 THz, 193,8 THz, 194,0 THz, 194,2 THz, 194,4 THz, 194,6 THz un 194,8 THz). Abas sistēmas kopīgi izmanto vienu vienotu pārraides vidi – optisko līniju un vienu BLS gaismas avotu. Otrkārt, ir iespējams skaitliski un vizuāli noteikt ietekmi uz datu pārraides sistēmu simulācijā, kad kopējā shēmā ir ievietota optisko sensoru sistēma. Šis novērtējums ir veikts ar diviem atšķirīgiem bitu pārraides ātrumiem, lai redzētu, kāda ir ietekme uz datu pārraides sistēmu. Atstarotais optiskā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ar 32 kanālu SS-WDM PON pārraides sistēmu (ar 2,5 Gbit/s bitu pārraides ātrumu) un iebūvētu septiņu FBG optisko sensoru tīklu redzams 21. attēlā.



21. att. Atstarotais 32 kanālu *SS-WDM PON* pārraides sistēmas optiskā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (ar 2,5 Gbit/s bitu pārraides ātrumu) ar iebūvētu septiņu *FBG* optisko sensoru tīklu.

22. attēlā redzams *BER* attiecībā pret uztverto optisko jaudu 32 kanālu 2,5 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmai ar un bez integrēta *FBG* optisko sensoru tīkla. Kā redzams, pirmkārt, pastāv cieša korelācija starp abu simulācijas arhitektūru un to optisko komponentu parametriem. Tas nozīmē, ka *FBG* optisko sensoru sistēmas ievietošana šādā konfigurācijā negatīvi neietekmē *SS-WDM PON* datu pārraides sistēmu pie 2,5 Gbit/s bitu pārraides ātruma.

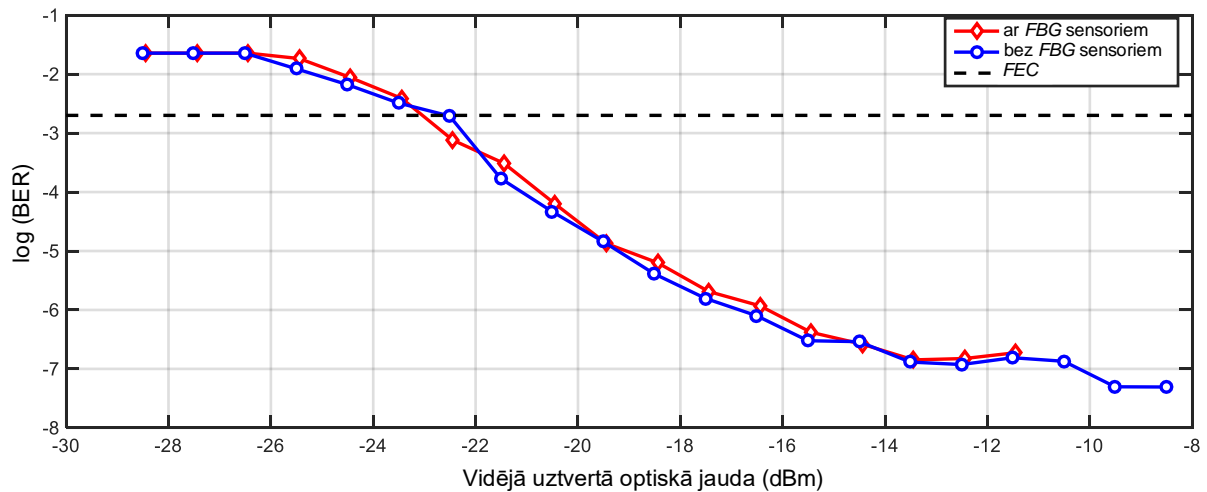


22. att. *BER* pret vidējo uztverto optisko jaudu 32 kanālu 2,5 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmai ar un bez integrēta *FBG* optisko sensoru tīkla.

Ja tiek veikti mērījumi abiem simulācijas iestatījumiem pie vienas un tās pašas vidējās uztvertās optiskās jaudas, kanālam var novērot tikai nelielu *BER* starpību. Otrkārt, aprēķini rāda, ka jaudas sods otrajai simulācijas versijai (ar optisko sensoru sistēmas integrāciju) ir 0,1 dB vērtībā pie pirms *FEC BER* līmeņa 2×10^{-3} , ja salīdzinājums tiek veikts ar pirmā simulācijas modeļa rezultāta datiem (20. att.).

23. attēlā redzams *BER* un uztvertās optiskās jaudas 32 kanālu 10 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmas ar un bez integrētas *FBG* optiskās sensoru sistēmas viena no datu pārraides kanāliem, salīdzinājums. Lai gan ir redzamas nelielas sistēmu ar un bez integrēta *FBG* optisko sensoru tīkla atšķirības dažos no uztvertajiem optiskajiem jaudas punktiem, tomēr tas var būt saistīts ar

dažām vērā neņemamām kļūdām mērījumos, un arī šeit var novērot spēcīgu korelāciju starp abiem simulācijas modeļiem un to rezultātiem.

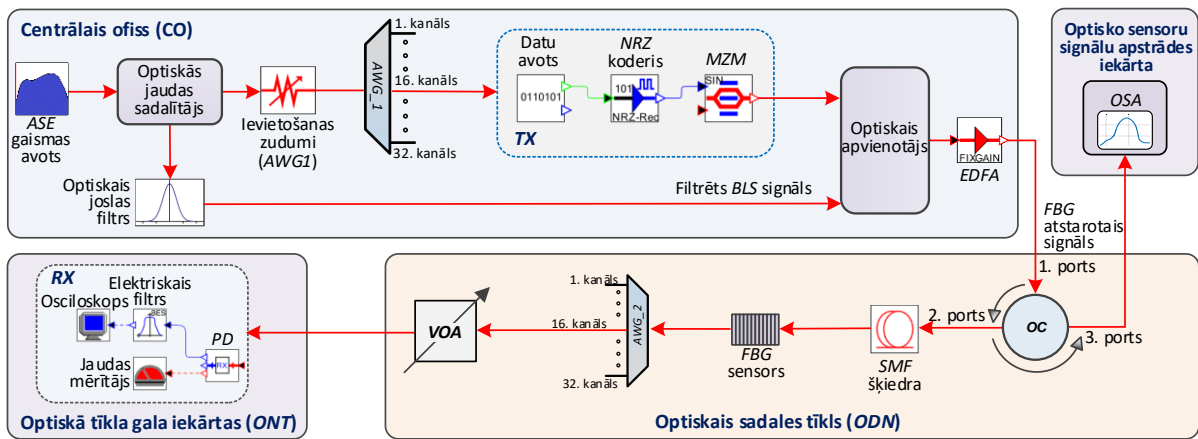


23. att. BER pret vidējo uztvertu optisko jaudu 32 kanālu 10 Gbit/s SS-WDM PON sistēmai ar un bez integrēta FBG optisko sensoru tīkla.

Šie rezultāti pierāda, ka pat bitu pārraides ātruma pieaugums (šajā scenārijā 10 Gbit/s) konkrētajai sistēmai negatīvi neietekmē uztvertā signāla BER. Vienīgais šāda modeļa trūkums ir tas, ka tas kļūst sarežģītāks – ir nepieciešamas papildu optiskās, elektrooptiskās un elektriskās komponentes un iekārtas, tādējādi ienestie zudumi kopējā sistēmā var palielināties.

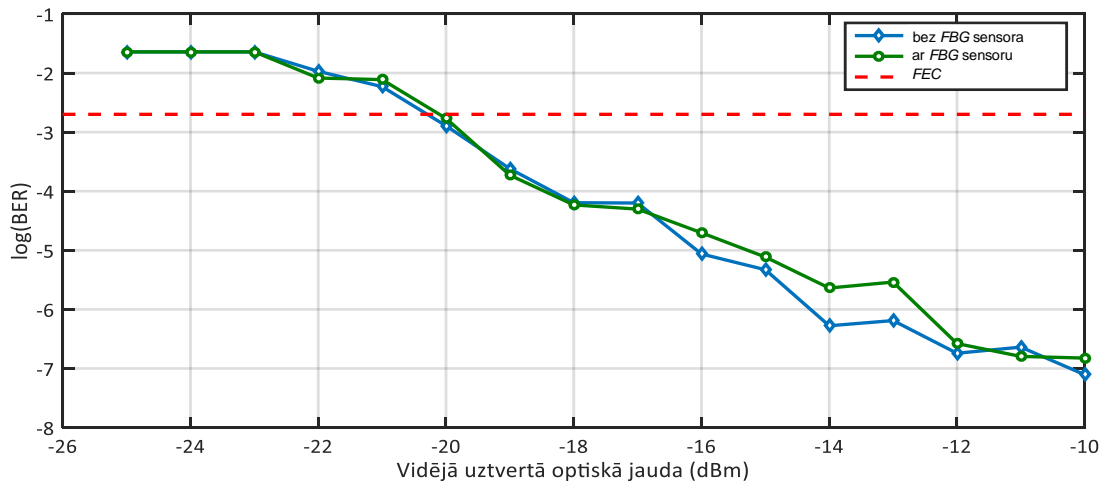
Šajā nodaļā autors piedāvā arī izstrādātu eksperimentālu SS-WDM pārraides sistēmas modeli, kur viens platjoslas ASE gaismas avots ir dalīts starp optisko pārraides sistēmu un optisko sensoru sistēmu (24. att. un 27. att.). Lai nodrošinātu precīzāku tā veiktspējas datu salīdzināšanu, tiek izstrādāts arī simulācijas modelis, kas balstās eksperimentālā maketa shēmas elementu izvēlē. Atšķirībā no citiem pētījumiem šajā jomā autora mērķis ir sasniegt bezkļūdu ($BER < 10^{-9}$) pārraides sistēmas modeli, kas nodrošina uzticamu izvadi abiem – gan pārraidāmiem datu kanāliem, gan optisko sensoru kanāliem. Turklāt sākotnējā pētījumā tiek izmantots 1,5 Gbit/s datu pārraides maksimālais ātrums katram kanālam, kas primāri bija ierobežots, ņemot vērā gaismas avota īpašības, kas aprakstītas tālākajās apakšnodaļās.

Papildus iepriekšējām apakšnodaļām vēl viena šāda veida simulācijas shēma tika realizēta *OptSim* programmatūras ietvaros, lai varētu veikt detalizētāku simulācijas un eksperimentālās shēmas veiktspējas salīdzinājumu, kur tiek lietots kopējs platjoslas gaismas avots spektrāli sagrieztai datu pārraides sistēmai un FBG optiskajam sensoram, izmantojot līdzīgu sistēmas arhitektūru, kā arī optisko elementu un to parametru lietošanu. 24. attēlā redzams izveidotais simulācijas modelis eksperimentālās shēmas vajadzībām, kurā ir trīs galvenās daļas – CO, ODN un ONT. CO daļā kā BLS avots ir izraudzīts ASE avots. FBG optiskā sensora darbībai ir izmantota ASE avota optiskā josla no 191,75 THz līdz 195,8 THz.



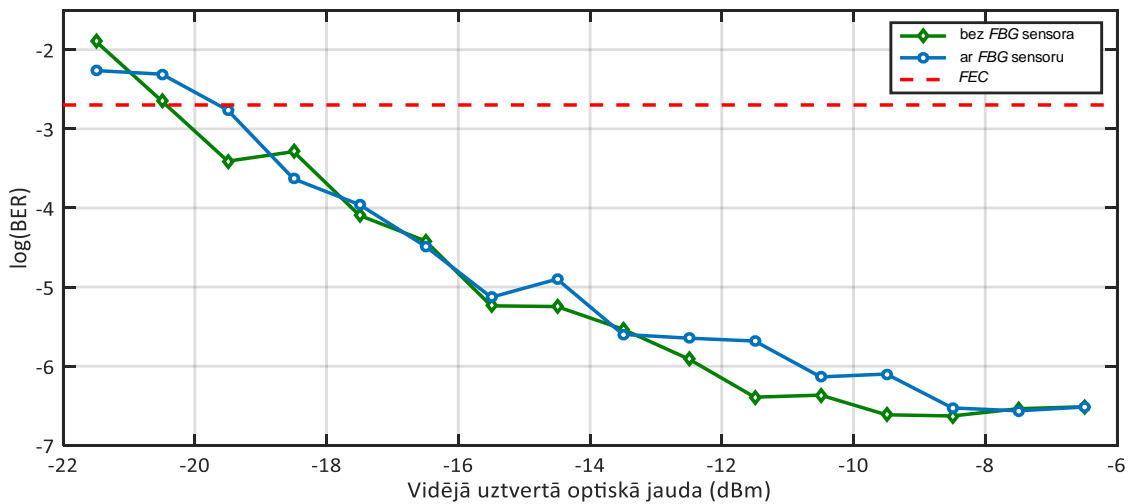
24. att. Simulācijas modelis 1,5 Gbit/s spektrāli sagrieztai datu pārraides sistēmai ar iestrādātu FBG optisko sensoru.

Šajā pētījumā tiek pārbaudīti vairāki scenāriji vienam kanālam. Iestatītais datu pārraides ātrums ir 1,5 Gbit/s. Pēc tam mēra signāla kvalitāti – BER starpību (BER korelācijas diagrammas) ar FBG optisko sensoru vai bez tā pie 20 km garas datu pārraides līnijas. 25. attēlā redzams BER salīdzinājumā ar vidējo uztverto optisko jaudu 1,5 Gbit/s signāliem pēc 20 km garas SMF šķiedras pārraides līnijas. Pēc tam tiek piemērota tāda pati konfigurācija, tomēr 20 km gara datu pārraides līnija tiek nomainīta uz bez datu pārraides līnijas režīmu – back-to-back (B2B). 26. attēlā redzamas BER korelācijas diagrammas B2B pārraidei.



25. att. BER salīdzinājumā ar vidējo uztverto optisko jaudu 1,5 Gbit/s spektrāli sagrieztiem datu signāliem pēc 20 km garas SMF pārraides līnijas.

Ņemot vērā izmērītos rezultātus (25. un 26. att.), autors aprēķinājis, ka sistēmai ar B2B un 20 km garu SMF šķiedru jaudas sods abu sistēmu sadarbības gadījumā ir aptuveni 0,2 dB un 0,5 dB pie FEC līmeņa 2×10^{-3} , ja tiek veikts salīdzinājums ar optiskās pārraides sistēmu bez iestrādāta FBG optiskā sensora. Jaudas sods (sistēmai ar FBG sensoru) starp 20 km garas optiskās pārraides līniju un B2B konfigurāciju FEC līmenī 2×10^{-3} ir aptuveni 0,7 dB, ko var raksturot kā nenozīmīgu.

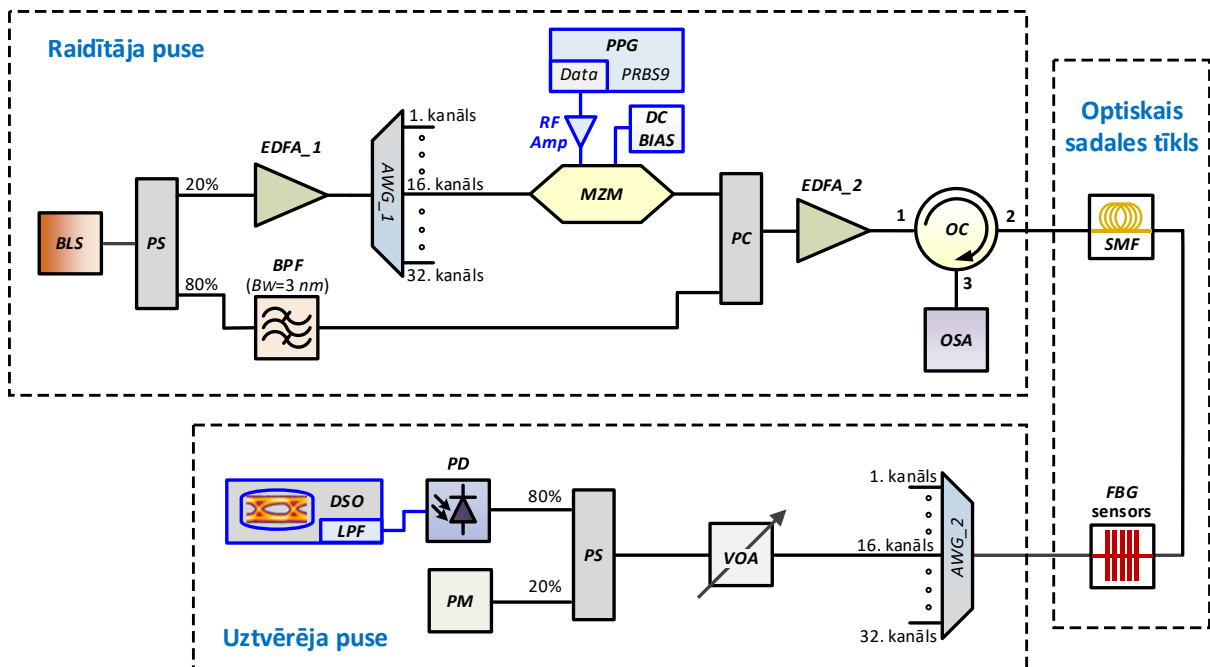


26. att. BER salīdzinājumā ar vidējo uztverto optisko jaudu 1,5 Gbit/s spektrāli sagrieztiem datu signāliem B2B pārraides konfigurācijā.

Veicot pētījumu par efektīvas kopdarbības realizēšanu optiskai pārraides sistēmai ar iestrādātu FBG sensoru vienas kopīgas optiskās šķiedras ietvaros, ir realizēta eksperimentāla optiskās šķiedras sistēma, kas redzama 27. attēlā.

Galvenais šīs sistēmas aspekts ir tas, ka datu pārraides un sensoru kanāliem ir lietots tikai viens kopīgs BLS avots. Ir svarīgi uzsvērt, ka simulācijas un eksperimentālās sistēmas realizācijā ir izmantota viena un tā pati FBG optiskā sensora spektrālā raksturlīkne.

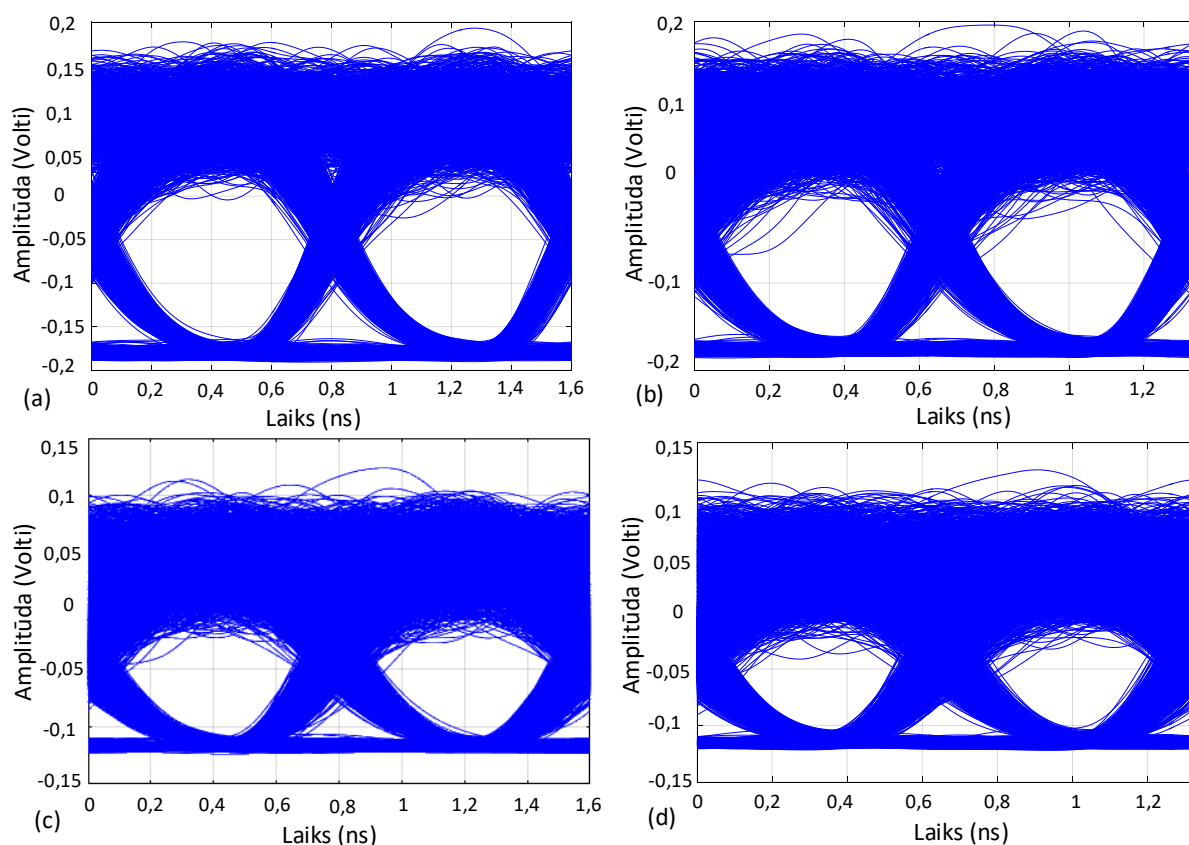
Realizētās WDM datu pārraides sistēmas pamatā ir BLS gaismas avota, proti, platjoslas ASE gaismas avota, spektrāla sagriešana. Kā ASE alternatīvu spektrāli sagrieztu vairāku kanālu pārraides sistēmu realizēšanā var izmantot LED vai SLED, kam ierasti ir augstāka izejas jauda.



27. att. Eksperimentāls modelis ar vienu kopīgu, bet sadalītu platjoslas gaismas avotu SS-WDM optiskai pārraides sistēmai un tajā iestrādātajam FBG optiskajam sensoram.

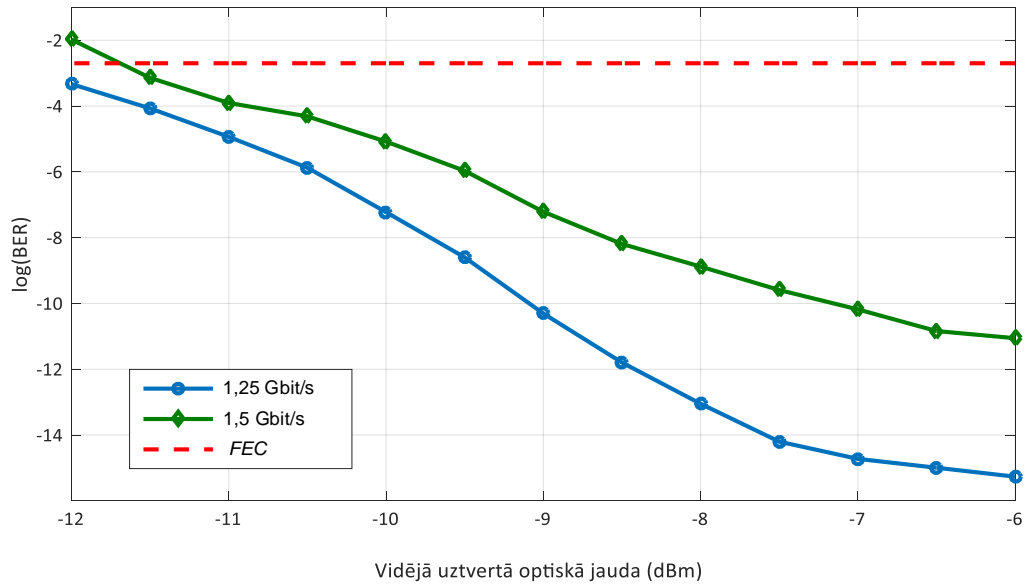
Kā redzams 28. a un c attēlā, pēc 1,25 Gbit/s B2B konfigurācijas pārraides uztvertā optiskā signāla acs diagrammas ir plaši atvērtas, un aprēķinātais $BER = 4,6 \times 10^{-16}$, bet pēc 20 km garas SMF šķiedras pārraides līnijas BER palielinās līdz $1,3 \times 10^{-9}$.

Kā redzams 28. b un d attēlā, pieaugums bitu pārraides ātrumam no 1,25 Gbit/s līdz 1,5 Gbit/s izraisa uztvertā signāla kvalitātes kritumu. Skaitliski *BER* vērtība šajā gadījumā pēc optiskās šķiedras pārraides līnijas (*B2B*) konfigurācijā ar bitu pārraides ātrumu 1,5 Gbit/s norāda, ka uztvertā optiskā signāla *BER* ir $9,7 \times 10^{-12}$. Tomēr pēc 20 km garas *SMF* šķiedras pārraides līnijas tas palielinājās līdz *BER* $6,1 \times 10^{-7}$. Ir svarīgi saprast, ka datu pārraides laikā pārraidīto signālu ir ietekmējis paralēli pārraidītais *FBG* sensora signāls, kas ienāk no *BPF*. Autors novērtēja, ka šī sensora gaismas avota ietekme uz uztvertā signāla kvalitāti ir nenozīmīga, jo *FBG* un datu kanālu spektra reģioni nepārklājās, kā arī ir nodrošināta pietiekami liela spektrālā atstarpe starp datu pārraides kanāliem un optiskajiem sensoriem.

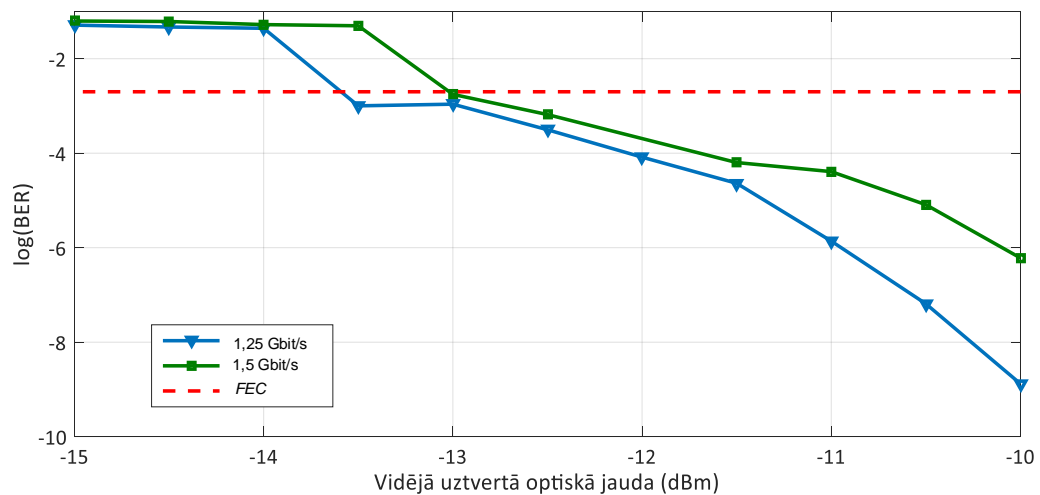


28. att. Uztvertās acs diagrammas: (a) 1,25 Gbit/s *B2B* signālam; (b) 1,5 Gbit/s *B2B* signālam; (c) 1,25 Gbit/s signālam pēc 20 km garas pārraides līnijas; (d) 1,5 Gbit/s signālam pēc 20 km garas *SMF* pārraides līnijas.

Ņemot vērā iegūtos rezultātus (29. un 30. att.), tika aprēķināts, ka 1,5 Gbit/s bitu pārraides ātruma gadījumā jaudas sods 20 km garas *SMF* datu pārraides līnijas gadījumā, salīdzinot ar *B2B* konfigurācijas mērījumiem, *FEC* līmenī 2×10^{-3} ir aptuveni 1,5 dB. Šis jaudas soda cēlonis galvenokārt ir saistīts ar izmantotā platjoslas *ASE* gaismas avota trokšņa tipa raksturu, kā arī rodas dispersijas dēļ.



29. att. *BER* salīdzinājumā ar vidējo uztvertu optisko jaudu 1,25 Gbit/s un 1,5 Gbit/s signāliem *B2B* konfigurācijas pārraidē.



30. att. *BER* salīdzinājumā ar vidējo uztvertu optisko jaudu 1,25 Gbit/s un 1,5 Gbit/s signāliem pēc 20 km garas *SMF* pārraides līnijas.

Kā redzams 29. un 30. attēlā, *BER* veikspēja zem 7 % datu virstēriņa *FEC* limita $2,3 \times 10^{-3}$ ir iegūta visos datu pārraides scenārijos ar 1,25 Gbit/s un 1,5 Gbit/s bitu pārraides ātrumiem. Līdz ar to ir nodrošināta pārsūtīšana bez būtiskām kļūdām, kā arī nodrošināta datu un sensoru tīkla līdzaspastāvēšana vienā kopējā eksperimentālā sistēmā.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darba galvenie secinājumi

1. Darbā izstrādātais hibrīdās sistēmas modelis, kas ietver piecu *FBG* šķiedru optisko temperatūras sensoru tīklu un četru datu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* šķiedru optisko metro piekļuves sakaru sistēmu, var nodrošināt vismaz 20 km garas datu pārraides līnijas darbību ar pieņemtu uztvertā signāla $BER \leq 10^{-9}$, kā arī noteikt mērāmās temperatūras ietekmi uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām, kas šādā konfigurācijā vidēji ir 1 GHz (8 pm) uz 1 °C.
2. Ar darbā izstrādāto uzlabotas precizitātes *FBG* sensoru atstaroto signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritmu un matemātisku vienādojumu var aprēķināt un noteikt *FBG* optisko sensoru teorētisko starpkanālu intervālu šķiedru optisko *FBG* sensoru tīklā, kas piecu *FBG* optisko sensoru un astoņu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* datu pārraides sistēmas optiskajā C joslā frekvenču diapazonā no 192 THz līdz 195,5 THz ir vismaz 207,746 GHz.
3. Izmantojot vienu kopīgotu platjoslas gaismas avotu, var izveidot apvienotu spektrāli sagrieztu 1,5 Gbit/s 32 datu kanālu *WDM-PON* pārraides un *FBG* optiskā sensora tīkla modeli, nodrošinot uztvertā datu signāla $BER \leq 9,7 \times 10^{-12}$ B2B (bez optiskās šķiedras līnijas) konfigurācijā un $BER \leq 6,1 \times 10^{-7}$ 20 km garā pārraides līnijas konfigurācijā.
4. Vienas optiskās šķiedras ietvaros var izveidot modeli, kurā ir izvietots piecu *FBG* optisko sensoru tīkls kopā ar astoņu *WDM-PON* 10 Gbit/s pārraides datu kanāliem, kuru starpā ir vizuāli noslēpta 2,5 Gbit/s septiņu datu kanālu sistēma, nodrošinot atbilstošu uztvertā signāla kvalitāti ($BER \leq 7,16 \times 10^{-17}$ *WDM-PON* sistēmai un $BER \leq 1,11 \times 10^{-5}$ slēptai datu kanālu sistēmai) pēc 20 km garas šķiedru optiskās datu pārraides līnijas.

Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas gan ekspluatācijā esošu optisko metro piekļuves tīklu uzlabošanai, gan arī jaunu šķiedru optisko pārraides sistēmu un sensoru tīklu ieviešanai.

LITERATŪRA

- [1] Arena M., Viscardi M. Strain State Detection in Composite Structures: Review and New Challenges// *Journal of Composites Science*. 2020; 4(2):60. <https://doi.org/10.3390/jcs4020060>.
- [2] Bock W. J., Nawrocka M. S., Martynkien T., Urbanczyk W. and Demers S. A Fiber-Optic Temperature Sensor For Marine Applications// 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Ottawa, Ont., 2005, pp. 1054–1056, doi: 10.1109/IMTC.2005.1604302.
- [3] Bohnert K., Wildermuth S., Frank A., Brändle H. Fiber-optic voltage sensor using fiber gyro technology// *Procedia Engineering*, Volume 5, 2010, pp. 1091–1094, ISSN 1877-7058.
- [4] Bohnert K., Frank A., Müller G., Yang L., Lenner M., Gabus P., Gu X., and Marchese S. Fiber optic current and voltage sensors for electric power transmission systems// *Proc. SPIE 10654, Fiber Optic Sensors and Applications XV*, 1065402 (14 May 2018).
- [5] Chen Y. et al. Stealth transmission of 127-chip SSFBG EPS-TPE/D OOK-OCDM secure signal over a public 2-wavelength WDM network// *Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*, Changchun, 2012, pp. 420–423.
- [6] Elayoubi K., Rissons A., Belmonte A., Optical test bench experiments for 1-Tb/s satellite feeder uplinks// *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII*, Aug 2018, San Diego, United States. pp. 1–12.
- [7] Fernandez-Valdivielso C., Matias I. R., Arregui F. J. Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material// 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002 (Cat. No. 02EX533), Portland, OR, USA, 2002, pp. 203–206 vol. 1, doi: 10.1109/OFS.2002.1000537.
- [8] Fiber-To-The-Home TOP 100 Broadband Communities Magazine, Fiber-to-the-home leaders and innovators for 2018, A BBC Staff Report, Jul. 2018.
- [9] Gao S., Ji C., Ning Q., Chen W., Li J. High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique// *Optical Fiber Technology*, Volume 56, 2020, 102202, ISSN 1068-5200.
- [10] International Telecommunication Union (ITU), ITU-T PON standards — progress and recent activities, Q2/SG15. 1638 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium — Fall (PIERS — FALL), Xiamen, China, 17–20 December.
- [11] ITU-T Recommendation G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, International Telecommunication Union, Telecommunication standardization sector of ITU, pp. 1–7, 2002.
- [12] ITU-T Recommendation G.975.1, Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks, Digital sections and digital line systems – Optical fibre submarine cable systems, Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, International Telecommunication Union, Telecommunication standardization sector of ITU, pp. 1–58, 2004.
- [13] Jiang J. et al., Development of optical fiber temperature sensor for aviation industry// 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Hangzhou, 2016, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICOON.2016.7875863.
- [14] Kottke C., Hilt J., Habel K., Vučić J. and Langer K. 1.25 Gbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary// 2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Amsterdam, 2012, pp. 1–3, doi: 10.1364/ECEOC.2012.We.3.B.4.
- [15] Kravtsov K., Wu B., Glesk I., Prucnal P. R. and Narimanov E., Stealth Transmission over a WDM Network with Detection Based on an All-Optical Threshold// *LEOS 2007 -*

- IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings, Lake Buena Vista, FL, 2007, pp. 480–481.
- [16] Kumar R. et al. High sensitivity temperature sensor based on a polymer filled hollow core optical fibre interferometer// 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), Jeju, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1117/12.2265041.
- [17] Ledentsov Jr. N., Agustin M., Chorchos L., Kropp J.-R., Shchukin V. A., Kalosha V. P., Koepp M., Caspar C., Turkiewicz J. P., Ledentsov N. N. Energy efficient 850-nm VCSEL based optical transmitter and receiver link capable of 56 Gbit/s NRZ operation// Proc. SPIE 10938, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIII, 109380J (1 March 2019).
- [18] Marcelo M. Werneck, Regina C. S. B. Allil, Bessie A. Ribeiro and Fábio V. B. de Nazaré A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors, Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings, Christian Cuadrado-Laborde, IntechOpen, May 2013, DOI: 10.5772/54682.
- [19] Morana A., et al., Steady-state radiation-induced effects on the performances of BOTDA and BOTDR optical fiber sensors// IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 65, No. 1, 111–118, Jan. 2018, doi: 10.1109/TNS.2017.2772333.
- [20] Muciaccia T., Gargano F., Passaro V.M.N. Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution// Photonics. 2014; 1(4):323-346. <https://doi.org/10.3390/photonics1040323>.
- [21] Mukherjee B., Optical Metro Networks. In: Optical WDM Networks. Optical Networks. Springer, Boston, MA., 2006, https://doi.org/10.1007/0-387-29188-1_6.
- [22] Poeggel S., Leen G., Bremer K. and Lewis E. Miniature Optical fiber combined pressure- and temperature sensor for medical applications// SENSORS, 2012 IEEE, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICSENS.2012.6411305.
- [23] Prucnal P. R., Fok M. P., Deng Y. and Wang Z. Physical layer security in fiber optic networks using optical signal processing// 2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP), Shanghai, 2009, pp. 1–10.
- [24] Qu Y., Wang W., Peng J., Lv D., Dai J. and Yang M. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on metalized optical fiber grating for marine temperature monitoring// 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), Wuzhen, 2017, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICO CN.2017.8121293.
- [25] Rajan, G. (Ed.). (2015). Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18074>.
- [26] Senkans U., Braunfelds J., Lyashuk I, Porins J., Spolitis S., Bobrovs V. Research on FBG-Based Sensor Networks and Their Coexistence with Fiber Optical Transmission Systems// Journal of Sensors, vol. 2019, Article ID 6459387, 13 pages, 2019.
- [27] Silva R., Martins. H., Nascimento I, Baptista, J.M., Ribeiro A., Santos J., Jorge P., Frazão O. Optical Current Sensors for High Power Systems: A Review// MDPI, Applied Sciences, 2012, 2, 602–628; doi:10.3390/app2030602, ISSN 2076-3417.
- [28] Su G., et al. WDM Optical Steganography Based on Super-Continuum Light Source// 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), Huangshan, China, 2019, pp. 1–3.
- [29] Tsai W. et al. A 20-m/40-Gb/s 1550-nm DFB LD-Based FSO Link// in IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 6, pp. 1–7, Dec. 2015, Art no. 7905907, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2506172.
- [30] Vučić J., Kottke C., Habel K. and Langer K. 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary// 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, 2011, pp. 1–3.
- [31] Wilson B. A. and Blue T. E. Quasi-Distributed Temperature Sensing Using Type-II Fiber Bragg Gratings in Sapphire Optical Fiber to Temperatures up to 1300°C// in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 20, pp. 8345–8351, 15 Oct. 15, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2865910.

- [32] Yang M., Yang K., Tang J., Li C. and Shang F. High-sensitivity quasi-distributed temperature sensors based on weak FBGs Fabry-Perot structure with metal coating// 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, 2017, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICOON.2017.8121290.
- [33] Zhang L., Shi B., Zeni L., Minardo A., Zhu H., and Jia L., An fiber Bragg grating-based monitoring system for slope deformation studies in geotechnical centrifuges// *Sensors*, Vol. 19, No. 7, 1591, 2019.
- [34] Zhang Y., Gao S., and Zhang A.P. Optically Heated Long-Period Grating as Temperature-Insensitive Fiber-Optic Refractive-Index Sensor// in *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2340–2345, Dec. 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2012.2232907.
- [35] Zhigang C., Zhao Z., Xiaochun J., Tao S., Rui W., Chenchen Y., Shenglai Z., Liang L., Benli Y., Strain-insensitive and high temperature fiber sensor based on a Mach–Zehnder modal interferometer// *Optical Fiber Technology*, Volume 20, Issue 1, 2014, pp. 24–27, ISSN 1068-5200.
- [36] Britannica Bragg Law / Internets: <https://www.britannica.com/biography/Lawrence-Bragg>.
- [37] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) / Internets: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [38] Cisco – Solutions for IP Optimized Optical transport / Internets: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/optical-networking/white-paper-sp-ip-optimized-optical-transport.html>.
- [39] Fabry-Perot Interferometers, RP Photonics Encyclopedia / Internets: https://www.rp-photonics.com/fabry_perot_interferometers.html.
- [40] FTTH Council Europe – Panorama, Markets at September 2019 / Internets: <https://www.ftthcouncil.eu/documents/FTTH%20Council%20Europe%20-%20Panorama%20at%20September%202019%20-%20Webinar%20Version4.pdf>.
- [41] Global Market Insights – Optical Sensor Market Size By Product / Internets: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/optical-sensor-market>.
- [42] Grand View Research – Distributed Fiber Optic Sensor Market Size Worth \$1.87 Billion By 2025 / Internets: <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-distributed-fiber-optic-sensor-sensing-dfos-market>.
- [43] Spectrecolgy - Spectroscopy & Optical Sensing Solutions / Internets: <https://www.spectrecolgy.com/reflection/>.