

Uģis Senkāns

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

Promocijas darbs



**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 darbs**

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

profesors *Dr.sc.ing.*,  
VJAČESLAVS BOBROVS

Rīga 2021

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

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

*This work has been supported by the European Social Fund within the project «Strengthening the academic staff of Riga Technical University in the fields of strategic specialization».*

*No. 8.2.2.0/18/A/017*

## **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.

# ANOTĀCIJA

## **Darba nosaukums:**

“Hibrīdo *FBG* sensoru un *WDM-PON* šķiedru optisko sistēmu izstrāde un novērtējums”;

## **Darba autors:**

Uģis Senkāns;

## **Darba saturs:**

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, galvenokārt, to priekšrocību dēļ. Mazs izmērs, viegls svars, multipleksēšanas iespējas un imunitāte pret elektromagnētisko interferenci ir tikai dažas no plašajām šķiedru optisko sensoru priekšrocībām, salīdzinot ar elektroniskajiem vai mehāniskajiem sensoriem. 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.

**Promocijas darba galvenais mērķis** ir 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. Promocijas darbā veikta šķiedru optisko sensoru izpēte, īpašu uzsvaru 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.

## **Darba apjoms:**

Darbā ir 127 lappuses, 6 tabulas, 55 attēli, 176 literatūras avoti un 1 pielikums.

## ANNOTATION

### **Title of the thesis:**

“Development and evaluation of hybrid FBG sensors and WDM-PON fiber optical systems”;

### **Author of the thesis:**

Uģis Senkāns;

### **Content of the thesis:**

Currently, the world is rapidly developing telecommunications technologies and converging in converged data transmission and sensor systems. With the development of fiber optical data transmission technologies and infrastructure on a global scale, the use of fiber optical sensors to perform sensing functions is becoming increasingly important, mainly due to their advantages. Small size, light weight, multiplexing capabilities and immunity to electromagnetic interference are just some of the broad advantages of fiber optical sensors over electronic or mechanical sensors. Therefore, in order to ensure more efficient use of optical sensor technologies, it is necessary to research and search for new solutions for the use and integration of fiber optical sensors in the existing and future architecture of optical metro-access communication systems.

**The main goal of the dissertation is** to study and and evaluate the interaction of FBG fiber optic sensor networks and WDM-PON metro-access transmission systems implemented in a single system with theoretical and experimental research. The research of fiber optical sensors has been carried out in this doctoral thesis, with special emphasis on FBG temperature and strain optical sensors as well as the integration of fiber optical sensor network in WDM passive optical network (PON) optical access systems has been studied. In order to evaluate the performance of such system, a study of the interaction between the FBG optical sensor network and the fiber optical data transmission system has been performed. The FBG sensor network has also been integrated into a spectrum sliced WDM-PON transmission system, which is operating with a single shared non-coherent broadband light source for all the network’s terminals.

### **Thesis contains:**

127 pages, 6 tables, 55 figures, 176 literature sources and 1 supplement.

# SATURS

<b>SAĪSINĀJUMU SARAKSTS</b> .....	9
<b>1. IEVADS. ŠĶIEDRU OPTISKO SENSORU DARBĪBAS TIPU UN KLASIFIKĀCIJAS NOVĒRTĒJUMS</b> .....	12
1.1. Šķiedru optisko sensoru klasifikācijas novērtējums .....	15
1.1.1. Viļņa garuma modulēto (spektrometrisko) sensoru analīze .....	17
1.1.2. Fāzes modulēto (interferometrisko) sensoru novērtējums .....	17
1.1.3. Intensitātes modulēto šķiedru optisko sensoru analīze .....	19
1.1.4. Polarizācijas modulēto (polarimetrisko) sensoru novērtējums .....	20
1.2. Šķiedru optisko sensoru klasifikācijas pēc lietojuma izpēte .....	21
1.2.1. Relatīvās deformācijas mērījumu šķiedru optiskie sensori .....	22
1.2.2. Šķiedru optiskie sensori objektu un vides temperatūras mērījumiem .....	25
1.3. Šķiedras Brega režģa lietojums šķiedru optisko sensoru realizācijā .....	27
1.3.1. Šķiedru optisko sakaru sistēmu pārraidāmā datu apjoma patērēšanas tendences ...	29
1.3.2. Pasīvo optisko tīklu attīstības izpēte .....	32
1.3.3. Šķiedras Brega režģa optisko sensoru lietojums optiskajās <i>WDM</i> sakaru sistēmās	33
1.3.4. Viļņgarumdales multipleksēšanas tehnoloģijas priekšrocību un trūkumu novērtējums šķiedru optisko sensoru tīklos .....	38
1.3.5. <i>WDM</i> šķiedru optiskās pārraides sistēmas un <i>FBG</i> sensoru tīkla savietojamības izvērtējums .....	40
1.3.6. <i>FBG</i> optisko šķiedru sensoru datu saturošo signālu nolasīšanas veidu analīze .....	42
1.3.7. Slēptu datu pārraides un optisko šķiedru sensoru aktualitātes novērtējums <i>WDM</i> sakaru sistēmās .....	44
1.4. Promocijas darbā paveiktā apkopojums .....	46
<b>2. ŠĶIEDRU OPTISKO FBG TEMPERATŪRAS SENSORU TĪKLA IZVEIDE</b> .....	52
2.1. Apvienotas <i>FBG</i> temperatūras sensoru sistēmas un blīvas <i>WDM-PON</i> pārraides sistēmas modeļa izstrāde .....	52
2.2. Mērāmās temperatūras ietekmes uz <i>FBG</i> optisko sensoru atstarotā viļņu garuma izmaiņām izpēte .....	54
2.3. Secinājumi .....	57
<b>3. FBG OPTISKO SENSORU TĪKLA UN ŠĶIEDRU OPTISKĀS DATU PĀRRAIDES SISTĒMAS KOPDARBĪBAS IZPĒTE</b> .....	59
3.1. Apvienota <i>FBG</i> optisko sensoru un blīvas <i>WDM-PON</i> datu pārraides sistēmas tīkla novērtējums .....	59
3.1.1. Minimāli pieļaujamā optisko sensoru starpkanālu intervālu izpēte .....	62



3.1.2.	Uzlabotas precizitātes <i>FBG</i> optisko sensoru signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritma izstrāde .....	66
3.1.3.	Secinājumi .....	70
3.2.	Hibrīdas <i>WDM</i> sakaru sistēmas ar slēptiem datu kanāliem un šķiedru optisko sensoru tīklu izstrāde .....	70
3.2.1.	Izstrādātā hibrīdā <i>WDM-PON</i> modeļa veiktspējas novērtējums .....	73
3.2.2.	Izstrādātā modeļa veiktspējas analīze .....	79
3.2.3.	Optisko sensoru tīkla iestrāde un novērtējums hibrīda <i>WDM</i> sakaru sistēmā ...	83
3.2.4.	Secinājumi .....	87
<b>4.</b>	<b>FBG SENSORU TĪKLA INTEGRĀCIJA SPEKTRĀLI SAGRIEZTĀ <i>WDM-PON</i> PĀRRAIDES SISTĒMĀ</b> .....	<b>89</b>
4.1.	Daudzkanālu spektrāli sagrieztas blīvas <i>WDM-PON</i> sistēmas un optisko sensoru tīklu apvienošanas simulācijas modeļa izstrāde dažādu scenāriju realizēšanā .....	89
4.2.	Abu simulācijas modeļu lietoto shēmas elementu analīze un arhitektūras novērtējums .....	91
4.3.	Izstrādātā apvienotā simulācijas modeļa atstarotā optiskā signāla spektra analīze ...	93
4.3.1.	32 kanālu 2,5 Gbit/s spektrāli sagrieztas <i>WDM-PON</i> sistēmas veiktspējas analīze ar un bez integrēta <i>FBG</i> šķiedru optiskā tīkla .....	94
4.3.2.	32 kanālu 10 Gbit/s spektrāli sagrieztas <i>WDM-PON</i> sistēmas veiktspējas analīze ar un bez integrēta <i>FBG</i> šķiedru optiskā tīkla .....	95
4.3.3.	Secinājumi .....	96
4.5.	Uz vienota platjoslas gaismas avota balstītas šķiedru optiskās datu pārraides sistēmas ar integrētu <i>FBG</i> sensoru tīklu eksperimentālas arhitektūras izstrāde .....	96
4.5.1.	Spektrāli sagrieztas pārraides sistēmas ar integrētu <i>FBG</i> optisko sensoru tīklu simulācijas modeļa izstrāde eksperimentālā modeļa vajadzībām .....	97
4.5.2.	Spektrāli sagrieztas <i>WDM</i> pārraides sistēmas ar integrētu <i>FBG</i> optisko sensoru sistēmu eksperimentāla modeļa izstrāde .....	100
4.5.3.	Spektrāli sagrieztas <i>WDM</i> pārraides sistēmas ar integrētu <i>FBG</i> optisko sensoru sistēmu eksperimentāla modeļa veiktspējas analīze .....	104
4.6.	Secinājumi .....	107
	<b>NOBEIGUMS</b> .....	<b>108</b>
	<b>LITERATŪRA</b> .....	<b>111</b>
	<b>PIELIKUMU SARAKSTS</b> .....	<b>128</b>

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

### A

*APD* – Avalanche photodiode – Lavīnfotodiode

*ASE* – Amplified Spontaneous Emission – pastiprināta spontānā emisija

*AWG* – Arrayed Waveguide Grating – sakārtots viļņvadu režģis

### B

*BER* – Bit Error Ratio – bitu kļūdu attiecība

*BLS* – Broadband Light Source – platjoslas gaismas avots

*BOTDR* – Brillouin optical time domain reflectometer – Briljuēna optiskā laika apgabala reflektometrs

### C

*CO* – Central Office – centrālais ofiss

*CW* – Continuous Wave – nepārtraukts starojums

### D

*DCF* – Dispersion Compensating Fiber – dispersiju kompensējošā šķiedra

*DSO* – Digital storage oscilloscope – ciparu signālu osciloskops ar atmiņu

*DWDM* – Dense Wavelength Division Multiplexing – blīva viļņgarumdales blīvēšana

### E

*EAM* – Electro-Absorption Modulator – elektro-absorbcijas modulators

*EDFA* – Erbium Doped Fiber Amplifier – pastiprinātājs ar erbija leģēto šķiedru

*EMI* – Electromagnetic interference – elektromagnētiskie traucējumi

*ER* – Extinction Ratio – augstā un zemā jaudas līmeņa attiecība

### F

*FBG* – Fiber Bragg Grating – šķiedras Brega režģis

*FEC* – Forward Error Correction – turpvērstā kļūdu labošana

*FTTH* – Fiber to the Home – šķiedra līdz mājai

*FWHM* – Full Width Half Maximum – pilns platums līmenī viena puse

*FWM* – Four-Wave Mixing – četru viļņu mijiedarbība

## **I**

*IEEE* – Institute of Electrical and Electronics Engineers – Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts

*IoT* – Internet of Things – lietu internets

*ITU* – International Telecommunications Union – Starptautiskā Telekomunikāciju apvienība

## **L**

*LED* – Light-Emitting Diode – gaismu izstarojoša diode

## **M**

*MI* – Michelson Interferometer – Maihelsona interferometrs

*MZI* – Mach-Zehnder Interferometer – Maha-Cendera interferometrs

*MZM* – Mach-Zehnder Modulator – Maha-Cendera optiskais modulators

## **N**

*NRZ* – Non Return to Zero – bez atgriešanās pie nulles

## **O**

*OC* – Optical Circulator – Optiskais cirkulators

*ODN* – Optical Distribution Network – optiskais sadales tīkls

*OLT* – Optical Line Terminal – optiskās līnijas terminālis

*ONT* – Optical Network Terminal – optiskā tīkla galiekārta

*ONU* – Optical Network Unit – optiskā tīkla iekārta

*OSA* – Optical Spectrum Analyser – optiskā spektra analizators

*OTDR* – Optical time domain reflectometer – optiskais laika apgabala reflektometrs

## **P**

*PIN* – PIN foto diode

*PON* – Passive Optical Network – pasīvais optiskais tīkls

*PPG* – Pulse pattern generator – impulsa secības ģenerators

*PRBS* – Pseudo-random bit sequence – pseidogadījuma bitu secība

## **R**

*Rx* – Receiver – uztvērējs

## **S**

*SHM* – Structural Health Monitoring – tehniskā stāvokļa uzraudzība

*SLED* – Superluminescent diode - Superluminiscences diode

*SMF* – Single Mode Fiber – vienmodas optiskā šķiedra

*SOA* – Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

*SPM* – Self-Phase Modulation – fāzes pašmodulācija

*SS-WDM* – Spectrum Sliced *WDM* – spektrāli sagriezts *WDM*

## **Š**

ŠOPS – Šķiedru optikas pārraides sistēma

## **T**

*Tx* – Transmitter – raidītājs

## **V**

*VOA* – Variable Optical Attenuator – pārskāņojams optiskais vājinātājs

## **W**

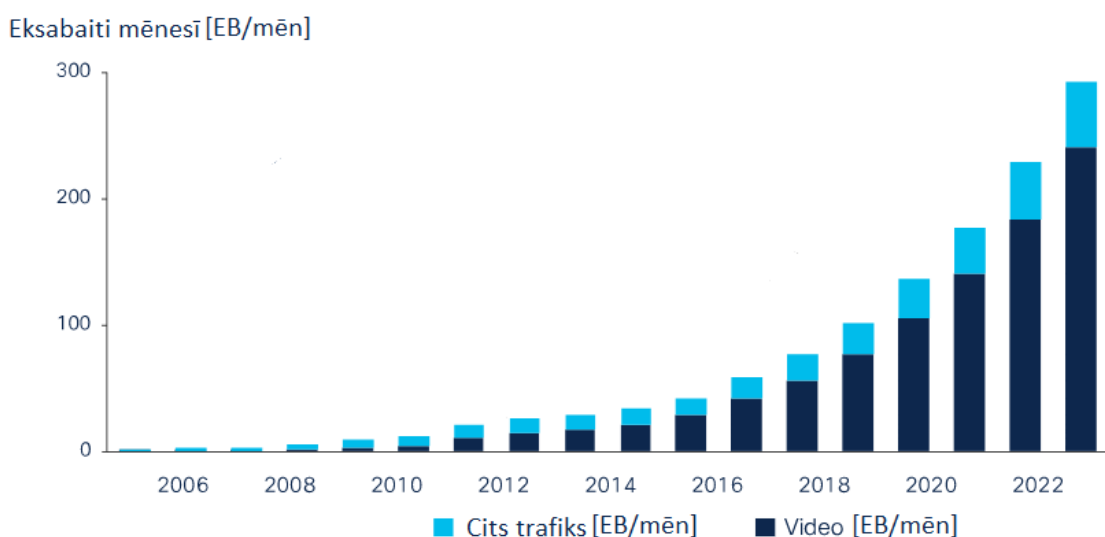
*WDM* – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana

## **X**

*XPM* – Cross-Phase Modulation – fāzes šķērs-modulācija

# 1. IEVADS. ŠĶIEDRU OPTISKO SENSORU DARBĪBAS TIPU UN KLASIFIKĀCIJAS NOVĒRTĒJUMS

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. 1.1. attēlā redzams globālais patērētais eksabaitu apjoms mēnesī vairāku gadu griezumā, kā arī prognoze tuvākajiem diviem gadiem [158].



1.1. att. Mēnesī patērētais optisko tīklu datu apjoms pasaules mērogā [158].

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 [159].

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 ir publicējušas izpētes institūcijas, piemēram, *Grand View Research* [166] 2019. gada decembrī un *Global market Insights* [165] 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 svars, 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 būtiski ietekmēt kopējās infrastruktūras izmaksas un kopējās nozares efektivitāti [39, 88, 146].

Šķiedru optisko sensoru pirmsākumi ir vērojami līdz ar praktisko optisko šķiedru izveidi 1970. gados, pateicoties Amerikas Savienoto Valstu uzņēmumam “*Corning Glass Works*”, kas kopš 1989. gada ir veicis nosaukuma maiņu uz “*Corning Incorporated*”. Uzņēmums bija pirmais, kas izgatavoja silīcija oksīda bāzētu optisko šķiedru, kuru zudumi ir mazāki par 20 dB/km pie viļņa garuma 632,8 nm [86]. Ņemot vērā šī laika posma ekonomisko situāciju pasaules mērogā, dažādas optiskās ierīces, tajā skaitā lāzери, foto uztvērēji un optiskās šķiedras bija izteikti dārgi produkti. Tas, savukārt, nodrošināja to, ka šādu tehnoloģiju izmantošanu varēja atļauties telekomunikāciju kompānijas, lai veicinātu datu pārraides tehnoloģisko attīstību un pakāpeniski aizstātu vara kabeļu izmantošanu telekomunikāciju tīklos. Ņemot vērā šķiedru optikas attīstību 1980. gados, kā arī nesenākā pagātnē, elektro-optiskās ierīces kļuva lētākas, tādējādi sniedzot iespēju izmantot šīs tehnoloģijas arī šķiedru optisko sensoru tīklos [29, 139].

Strādājot ar dažāda veida modernajām tehnoloģijām un tehnoloģisko procesu izpildi, visai bieži ir nepieciešams nodrošināt, ka sakaru sistēmas darbības modelis veic noteiktu funkciju, kā pamatā ir stāvokļa kvalificēšana vai kvantificēšana vienam vai vairākiem parametriem. Līdz ar to, šos parametrus ir jānomēra un jāapstrādā, kā arī jābūt drošiem par datu pareizību un precizitāti tā, lai sistēma varētu veikt sev paredzētos uzdevumus. Tātad, lai realizētu šādu procesu, var izmantot sensorus, kas pēc būtības ir mehānismi jeb ierīces, kas nodrošina informācijas iegūšanu, nomērot ķīmiskus, fiziskus vai bioloģiski mērāmus lielumus pēc atbilstošas nepieciešamības. Kā daži no parametru piemēriem ir spiediens, *pH* līmenis, temperatūra, relatīvā deformācija un citi lielumi. Pēc tam, šo informāciju var pārveidot citā,

alternatīvā enerģijas formā – elektriskā vai optiskā signālā, ko apstrādājot, pārsūtot var salīdzināt ar sagaidāmiem rezultātiem [104, 105].

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, stacionāru un kustīgu komponentu attālums, elektriskā strāva, augstspriegums, spiediens un citi [14, 15, 117, 139].

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 [139, 162].

Analizējot sensoru darbību saistībā ar elektroenerģijas nozari, konceptuāli pastāv divi galvenie faktori, kas var ietekmēt tradicionālu – mehānisku vai elektronisku sensoru darbības traucējumus. Viens no šādiem faktoriem ir tuvumā esoša augstsprieguma klātbūtne, savukārt otrs – augsts risks saskarties ar elektromagnētisko interferenci. Šāda problemātika ir atkarīga no tā, kādā vidē un vietā ir nepieciešamība mērīt konkrētus parametrus. Līdz ar to, var pastāvēt varbūtība, ka izmantot mehāniskos vai elektroniskos sensorus ir ļoti apgrūtināši, neiespējami vai nerentabli, ja ir vajadzība sasniegt uzticamu un regulāru rezultātu datus. Apzinoties šāda veida sarežģījumus, eksistē potenciāls risinājums lietot šķiedru optiskos sensorus, jo šķiedra ir veidota no dielektriska materiāla, kas sniedz iespēju šādu tehnoloģiju izvietot iekārtās vai ļoti tuvu iekārtām, kuru ciešā tuvumā ir stiprs elektriskais lauks. Papildu tam, šķiedru optiskajiem sensoriem nav jānodrošina elektrisko barošanu, lai spētu nodrošināt darbību to atrašanās vietās [139].

Šī prasība pēc elektriskās enerģijas barošanas mehāniskajiem un elektriskajiem sensoriem arī ir būtiska starpība, salīdzinājumā ar šķiedru optiskajiem sensoriem. Tāda nepieciešamība var būt kā izaicinājums, piemēram, vidē un situācijās, kur ierīce ir tālu prom no jebkāda atbilstoša aktīvā enerģijas barošanas avota. Šādi gadījumi var būt garās augstsprieguma

pārvades līnijā, jūrās, okeānos, kā arī gar dažāda veida telekomunikāciju un sakaru cauruļu, kā arī kabeļu līnijām. Papildu tam ir vairāki būtiski faktori jeb specifiski optisko šķiedru sensoru raksturlielumi un priekšrocības, kas praksē ir izteikti noderīgas gan telekomunikāciju, gan elektroenerģijas nozarē. Šķiedru optiskie sensorus var izmantot garās pārraides sistēmās, piemēram, pētījumi [30, 79] uzrāda 56 km un 61 km garu pārraides līniju izmantošanu kopā ar šķiedru optisko sistēmu. Tiem ir viegla uzturēšana, ķīmiskā aizsardzība, tajā skaitā pret koroziju. Tie ir viegla svara un konceptuāli kompakta tehnoloģija, kam nav nepieciešama lokāla elektriskās strāvas barošana. Tiek nodrošināta elektriskā izolācija, augsta imunitāte pret elektromagnētiskiem traucējumiem (*EMI*) jeb elektromagnētisko interferenci. Šķiedru optiskajiem sensoriem nav nepieciešamas metāliskās komponentes, kā arī daudzus optiskos sensorus var multipleksēt uz vienas un tās pašas šķiedras [139].

Lai varētu padziļinātāk izpētīt šķiedru optisko sensoru vajadzību informācijas un sakaru sistēmās, to perspektīvu, kā arī nākotnes attīstības iespējas, ir nepieciešams veikt uzskatāmu klasifikāciju pēc to darbības principa, lai varētu iedalīt optiskos sensorus konkrētās grupās, atsaucoties uz to lietojumu un veiktspēju. Līdzīgi šāda veida klasificēšanai ir nepieciešams arī grupēt un analizēt šādu sensoru darbību atkarībā no lietojuma, ņemot vērā tos parametrus, kas tiek mērīti un izmantoti sensoru sistēmās, lai iegūtu nepieciešamos rezultātus.

### **1.1. Šķiedru optisko sensoru klasifikācijas novērtējums**

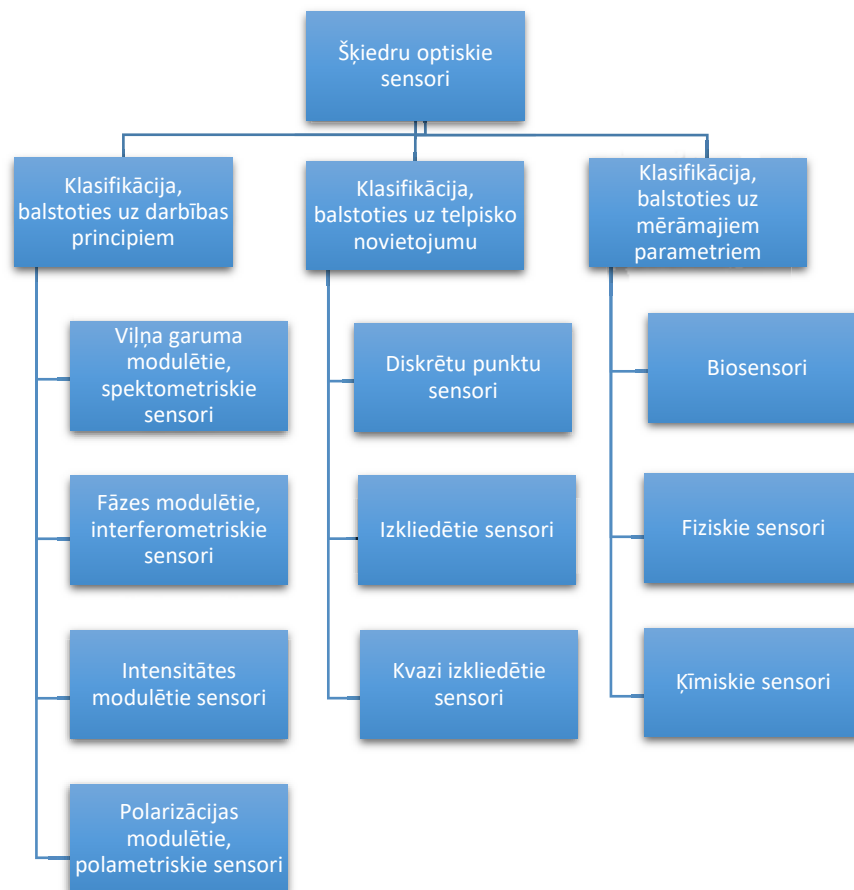
Detalizētāk analizējot šķiedru optisko sensoru darbību, ir redzams, ka eksistē daudz un dažādi šķiedru optiskie sensoru tipi, līdz ar to ir jāveic to klasifikācija. Pirmkārt, ir iespējams tos iedalīt divās galvenajās pamatgrupās – ārējie sensori (angļu val. *extrinsic*) un iekšējie sensori (angļu val. *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 izvēlas, izmanto un izpēta 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 [104]:

- 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 var papildus iedalīt arī pēc to mērījumu veidiem, kā arī telpiskā izvietojuma (1.2. att.).



1.2. att. Šķiedru optisko sensoru klasifikācija [104].

1.2. attēlā ir redzams šķiedru optisko sensoru klasifikācijas sadalījums. Promocijas darbā īpaši ir pētīti viļņa garuma modulētie sensori, veikta to izpēte, simulācijas modeļu un eksperimentāla realizācija viļņgarumdales blīvētā pasīvā optiskā tīkla (*WDM-PON*) un spektrāli sagriezta viļņgarumdales blīvētā pasīvā optiskā tīkla (*SS-WDM PON*) šķiedru optiskajās sakaru sistēmās. Šie sensori ir ērti realizējami, ar drošiem darbības un funkcionalitātes principiem, kā arī multipleksēšanas iespējām un citām priekšrocībām.

### 1.1.1. Viļņa garuma modulēto (spektrometrisko) sensoru analīze

Izpētot viļņa garuma modulētos šķiedru optiskos sensorus, ir redzams, ka to darbības pamatā ir izstarotā optiskā signāla gaismas viļņa garuma uztveršana, to izmaiņu noteikšana laikā, kas ir tiešā veidā atkarīga no apzinātām vai neapzinātām ārējām vides izmaiņām vai traucējumiem. Tradicionālākie un plašāk lietotie viļņa garuma tipa sensori ir fluorescences sensori un FBG optiskie sensori, no kuriem *FBG* plašāk ir pētīti šā darba turpmākajā gaitā [70, 84].

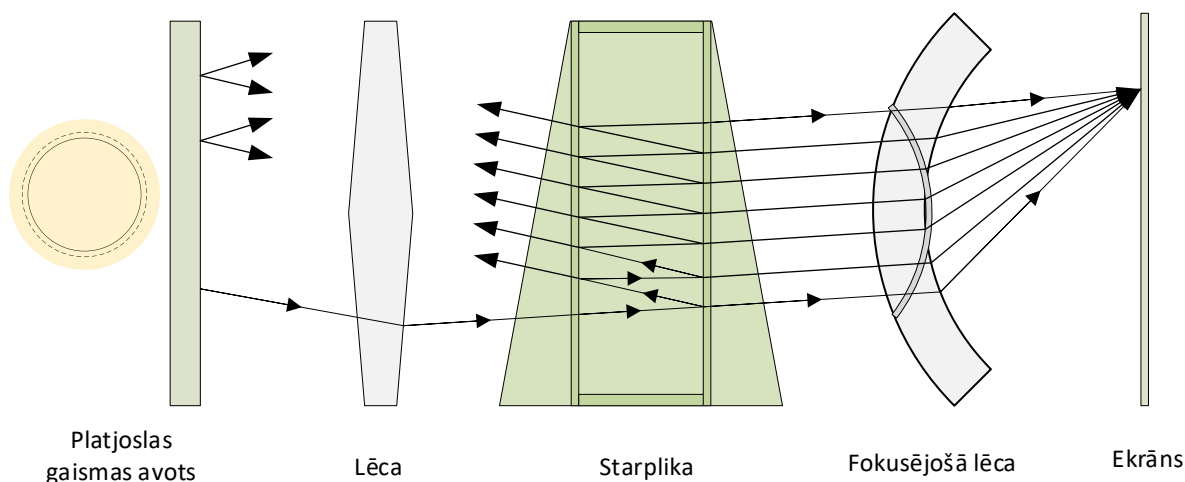
Fluorescences bāzētie šķiedru optiskie sensori tiek iekļauti un klasificēti kā spektrometriskie šķiedras sensori, kas ir plaši lietoti ķīmisku un fizisku parametru mērīšanas procesā, piemēram, situācijās, kad tiek mērīti tādi lielumi kā temperatūra, mitrums un viskozitāte [70, 84]. Šāda veida optiskos sensorus var pielāgot dažādām vajadzībām, bet divi visplašāk izmantotie veidi ir dobuma (angļu val. *cavity*) un gala sensoru (angļu val. *end tip sensor*) veidi. Dobuma tipa sensoru realizēšanas pamatā optiskās šķiedras galā novieto esošo “dobumu”, kuru lieto apzīmējot optiskos rezonatorus. Pat niecīgas optiskā rezonatora konfigurācijas izmaiņas izsauc rezonanses frekvences izmaiņas, ko var novērot, kā rezonējošās gaismas viļņa garuma izmaiņas pašā dobumā - rezonatorā. Izmantojot attiecīgus šaurjoslas filtrus un uztvērējus, ir iespējams noteikt optiskā sensora līknes profilu, kas sniedz nepieciešamo informāciju [104, 162].

### 1.1.2. Fāzes modulēto (interferometrisko) sensoru novērtējums

Interferometriskie sensori, kas ir arī zināmi kā fāzes modulētie sensori ir optiskie sensori, kuru darbības procesā tiek vērota fāzes starpība koherentai gaismai plūstot cauri dažādiem informācijas pārraides ceļiem vienā vai arī atšķirīgās optiskajās šķiedrās. Faktiski tas nozīmē, ka tiek lietotas vienādas frekvences, bet ar konstanti pretējām fāžu atšķirībām. Visbiežāk izmantotie fāzes modulētie, jeb interferometriskie sensori ir Maha-Cendera, Sagnaka un Fabrī-Pero interferometri. Šiem optiskajiem sensoriem ir augsts jutīguma līmenis, ņemot vērā nepieciešamību nodrošināt mērījumu veikšanu, kas balstās uz minimālu izmaiņu noteikšanu [104, 160].

Analizējot šāda tipa optiskos sensorus, par uzskatāmu piemēru var būt Fabrī-Pero interferometrs, kas kopumā no iekārtas uzbūves principa, sastāv no spoguļiem un lēcām (1.3. att.). Tā realizācijas pamatā tiek izmantots gaismas avots, kas izstaro redzamo gaismu visā interferometrā. Pirmais objekts no kreisās puses kopējā shēmā, uzreiz aiz gaismas avota, ir

izliekta lēca, kas veic gaismas stara novirzīšanas funkciju uz etalonu. Etalons, jeb starplika faktiski ir vieta interferometrā, kas sastāv no divām paralēlām plāksnēm un ir veidota no caurspīdīga materiāla. Šis materiāls ir veidots no stikla struktūras un pārklāts ar augsta atstarojuma vielas (ierasti alumīnija) slāni tā iekšpusē, attiecībā vienam pret otru [27, 63, 171].



1.3. att. Fabri-Pero interferometra shematiskā diagramma [63, 171].

Rezultātā, gaismas avota izstarotā gaisma, kas ir sasniegusi pirmo plāksni, šajā brīdī tiek pārraidīta tālāk vai arī atstarota. Pie nosacījuma, ja gaismas stars virzās tālāk uz otro plāksni, tad šajā brīdī tas plūst cauri starplikai, kas var būt platumā no dažiem nanometriem līdz pat centimetram, virzienā uz nākošo plāksni. Šajā brīdī, kad gaismas stars sasniedz otro plāksni, tas līdzīgi kā pirms tam, tiks atkal atstarots vai pārraidīts cauri. Pie nosacījuma, ka gaismas stars tiek atstarots, tas sasniegs pirmo plāksni, kur attiecīgi atkal gaismas stars tiks atstarots vai arī pārraidīts cauri. Būtisks aspekts ir tas, ka attālums no vienas plāksnes līdz otrai ir specifiski noteikts, lai varētu sasniegt definēto mērķi ar specifiski raksturojošu frekvenci jeb viļņa garumu. Šādā veidā var panākt efektu, ka visi citi viļņa garumi tiek atstaroti un tikai nepieciešamais jeb plānotais viļņa garums tiks pārraidīts. Šajā brīdī, pārraidītie viļņi, kas paralēli plūst cauri starplikai un sasniedz otro lēcu, kas tos fokusē konkrētā grupēšanās punktā, faktiski izveidojot redzamu attēlu, nodrošina notiekošo procesu informācijas atspoguļošanu [27, 63, 171].

### 1.1.3. Intensitātes modulēto šķiedru optisko sensoru analīze

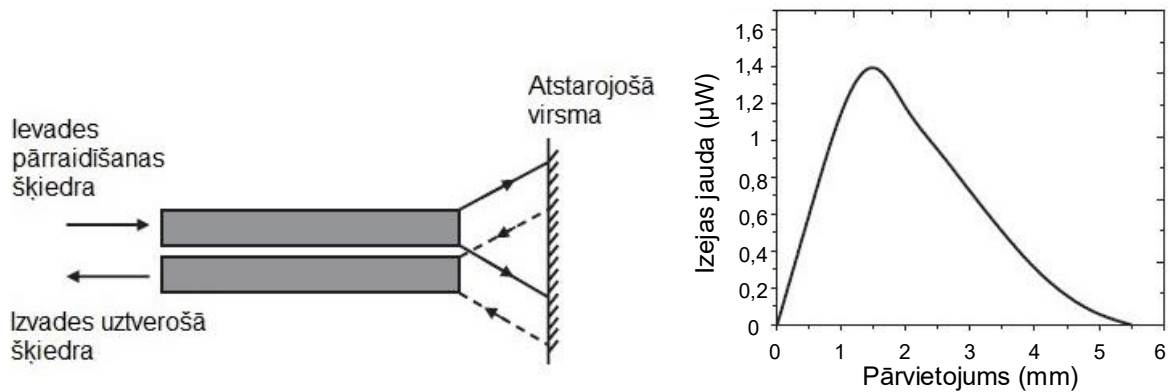
Analizējot intensitātes modulētus optiskos sensorus, svarīgi ir uzsvērt, ka tieši šie optiskie sensori ir vieni no pirmajiem šķiedru optiskajiem sensoriem, kas arī ir vieni no vienkāršākajiem pēc to darbības principa, ja salīdzina dažāda veida šķiedru optisko sensoru klasifikācijas. Intensitātes modulētu optisko sensoru darbības shēmā, optisko signālu pārraida cauri optiskajai šķiedrai, kā laikā tiek veikta intensitātes modulēšana, ņemot vērā vairākus būtiskus faktorus, kā, piemēram, gaismas atstarošanu vai šķiedras locīšanu. Šīs tehnoloģijas galvenā priekšrocība ir to relatīvi vienkāršā izgatavošana, kā arī relatīvi vienkārša, signālu apstrādei nepieciešama, darbību veikšana un uztvērēju sistēma. Tālāk tekstā esošajā, 1.4. attēlā ir redzama vienkāršota intensitātes modulēta šķiedru optiskā sensora tipa uzbūve. Šajā piemērā, izmantojot vienu optisko šķiedru, var veikt attāluma, spiediena vai cita raksturlieluma mērīšanu. Shēma  $P_{in}$  apzīmē ienākošo optisko signālu, savukārt  $P_{out}$  – izejošo optisko signālu [104].



1.4. att. Vienkārša ārēja (angļu val. *extrinsic*) intensitātes modulēta sensora uzbūve [104].

Līdzīgi kā vienas šķiedras intensitātes modulētam optiskajam sensoram, divu šķiedru optiskais intensitātes sensors tiek izmantots attālumu noteikšanai, dažādos lietojumos. Šāda veida risinājumā, viena optiskā šķiedra tiek izmantota kā ievades šķiedra, savukārt otra, lai uztvertu un uzkrātu atstaroto gaismu no atstarojošās virsmas. Tālāk tekstā, 1.5. attēlā ir atspoguļota divu optisko šķiedru sensora shēma un tā ierastā intensitātes atbildes reakcijas raksturliķne [104].

Salīdzinājumā ar citiem optiskajiem sensoriem, intensitātes modulāciju var nodrošināt izmantojot relatīvi vienkāršas darbības, tomēr savienojumu deformācijas, gaismas avota jaudas svārstības, optiskās šķiedra locīšana un citi faktori var veicināt optiskā signāla vājināšanu, līdz ar to, izraisot optiskā signāla intensitātes nestabilitāti. Tas, savukārt, tālāk veido mazāk uzticamu kopējo optisko sensoru sistēmu un mērījumu precizitāti.



1.5. att. Divu šķiedru atstarojuma tipa sensors un tā ierastā atbildes raksturlīkne [104].

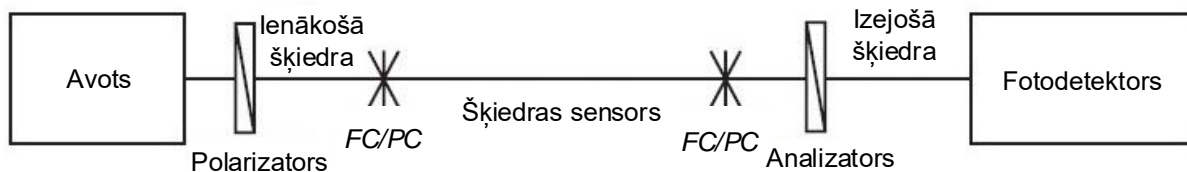
Lai izvairītos no šāda veida problemātikas, kā viens no risinājumiem var būt intensitātes atskaites līmeņa noteikšanas procesa realizēšana. Šādā gadījumā daļa no ienākošas gaismas ar optiskā signāla jaudas sadalītāju tiek atdalīta un izmantota ienākošo jaudas svārstību novērošanai [104].

Papildu iepriekš minētajiem, pie intensitātes modulēto tipu šķiedru optiskajiem sensoriem var minēt gaistošo viļņu (angļu val. *evanescent wave*) optiskos sensorus, kā arī mikro-locījuma un makro-locījuma optiskos sensorus (angļu val. *microbend*, *macrobend*). Gaistošo viļņu tipa optiskie sensori ir vieni no nepieciešamākajiem un lietotākajiem intensitātes modulētajiem optiskajiem sensoriem. Šo optisko sensoru darbības procesā, kad optiskā gaisma izplatās caur šķiedru, tā netiek pilnībā koncentrēta optiskās šķiedras serdenī, bet paplašinās arī apkārtējā apvalka reģionā, kuru dēvē par gaistoši viļņa lauku [104].

#### 1.1.4. Polarizācijas modulēto (polarimetrisko) sensoru novērtējums

Situācijās, kad gaismas vilnis izplatās optiskajā šķiedrā, tā stāvoklis tiek izmainīts atšķirīgo fāžu ātruma dēļ. Spiediena izmaiņas, mehāniska iedarbība, kā arī temperatūras izmaiņas vidē vai telpā, kur atrodas optiskā šķiedra ar tās sensoru var ietekmēt gaismas izplatīšanās polarizācijas īpašības. Šādā veidā, izmaiņas saistībā ar polarizācijas stāvokli tiek lietotas, lai polarizācijas modulēts sensors varētu veikt parametru nomērīšanu – datu iegūšanu [96, 104].

Tālāk tekstā, 1.6. attēlā ir atspoguļots optiskās šķiedras polarizācijas modulēts sensors, kā realizācijā tiek izmantotas optiskā signāla polarizācijas izmaiņas [104].



1.6. att. Tradicionāla polarizācijas modulēta šķiedras optiskā sensora shēma [104].

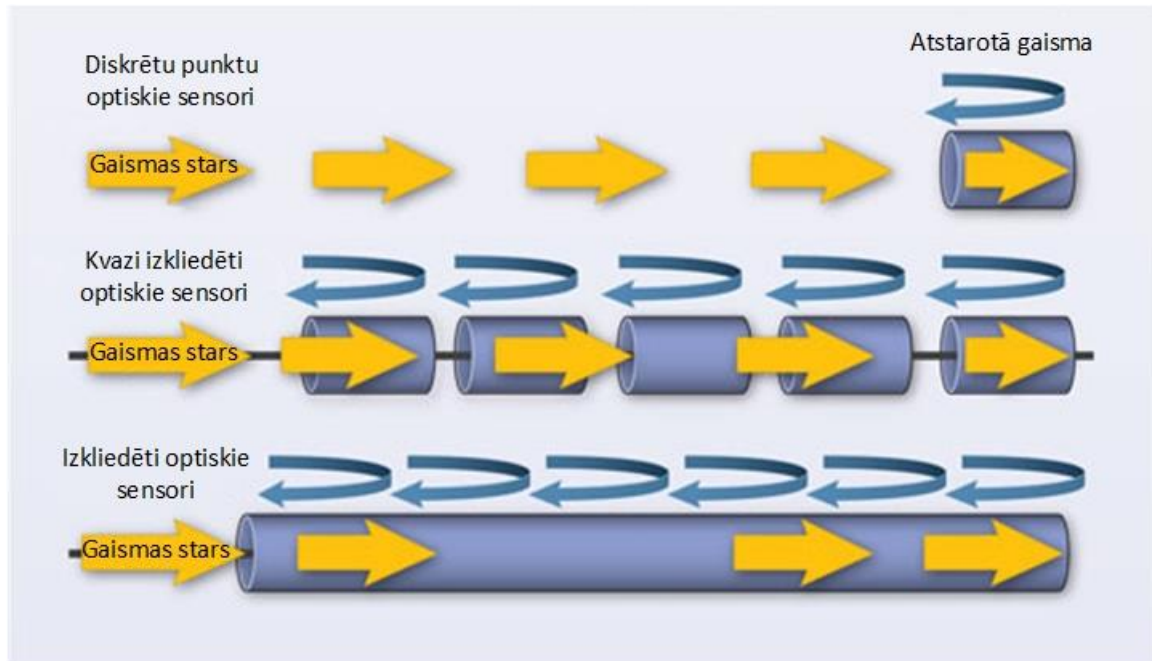
Galvenokārt, polarizācijas modulētā optiskajā sensorā, lineāri polarizēta gaisma tiek pārraidīta 45 grādu leņķī attiecībā uz galvenajām asīm. Lietotā gaismas stara polarizācijas stāvoklis tā izvadē tiek konvertēts izmantojot polarizatoru-analizatoru, kas ir orientēts  $90^\circ$  salīdzinājumā ar ienākošo gaisma stara stāvokli [171].

Līdz ar to, izmaiņas polarizācijas stāvoklī var novērot kā izmaiņas intensitātē, un, korelējot datus ar izmaiņām signāla izejā un izmaiņām saistībā ar mērāmo intensitāti, polarizācijas modulēts šķiedras optiskais sensors var būt atbilstoši lietots kā sensors, kas nodrošina dažādus lietojumus – dažādu fizikālu parametru mērīšanu. Divu ortogonālu polarizāciju fāžu atšķirību var panākt veicot pārskaņojama lāzera avota, polarimetra vai polarizācijas kontroles sistēmas eksperimentālu uzstādījumu konfigurēšanu. Detalizētāk analizējot polarizācijas modulētu optisko sensoru lietošanu, var secināt, ka visbiežāk tiek izmantoti eliptiska serdeņa vai polarizācijas stāvokli saglabājošas, fotoniskās kristāla šķiedras. Šāda tipa optiskos sensorus var izmantot ne tikai, spiediena, deformācijas un temperatūras mērījumiem, bet arī sprieguma un strāvas mērījumiem, gadījumos, kad tiek izmantoti tādi polarizācijas tipa efekti kā elektro-optiskais un Faradeja efekts [104].

## 1.2. Šķiedru optisko sensoru klasifikācijas pēc lietojuma izpēte

Šobrīd šķiedru optiskie sensori un to attīstība ir veicinājusi plašus ieviešanas pasākumus gandrīz ikvienā zinātnes, tehnoloģiju un medicīnas jomā. Kā viens no piemēriem ir minēts akustiskās šķiedras un žiroskopi, kas ir pamats kosmosa un militārās izpētes attīstībai. Balstoties un atšķirīgajām vajadzībām, šķiedru optiskos sensorus var iedalīt pēc to konfigurācijas – izkliedēti, kvazi izkliedēti vai diskrētu punktu sensori. Aplūkojot diskrētu punktu optiskos sensorus, tie tiek lietoti, lai varētu nodrošināt fizisku parametru mērījumus konkrētā pozīcijā jeb punktā. Izkliedēta tipa sensori tiek lietoti, lai nodrošinātu nepārtrauktu parametra mērīšanu cauri šķiedras garumam. Attiecīgi kvazi izkliedēti optiskie sensori ir atbilstoši mērot interesējošus parametrus noteiktos atskaites punktos cauri optiskajai šķiedrai.

Piemēram, iepriekš minētie, fāzes modulētie optiskie sensori tiek realizēti visās trīs konfigurācijas variācijās [104, 147]. Diskrētu punktu, kvazi izkliedētu un izkliedētu optisko sensoru shematisks attēlojums ir redzams 1.7. attēlā.



1.7. att. Diskrētu punktu, kvazi izkliedētu un izkliedētu optisko sensoru shematisks attēlojums [161].

Analizējot kvazi izkliedētos šķiedru optiskos sensorus, var secināt, ka, lai nodrošinātu izejas datu pārraidīšanu no optiskajiem sensoriem uz optiskās šķiedras pārraides līniju, tiek lietotas tādas multipleksēšanas metodes, kā frekvences blīvēšana (*FDM*), koddales blīvēšana (*CDM*), laika dales blīvēšana (*TDM*) un viļņgarumdales blīvēšana (*WDM*). Multipleksēšanas metode tiek izvēlēta balstoties uz vairākiem faktoriem, piemēram, optisko sensoru skaitu, izmaksu efektivitāti, dinamisko diapazonu un optisko sensoru izmantoto frekvenču joslu (viļņa garuma reģionu) jeb darbības frekvenci (viļņa garumu) [104].

### 1.2.1. Relatīvās deformācijas mērījumu šķiedru optiskie sensori

Šķiedru optiskos sensorus lieto dažāda veida kompozītmateriālu struktūrās, nodrošinot daudzpusīgu datu – vibrācijas mērījumu, temperatūras novērošanas, 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. Piemēram, pārbaudot relatīvās deformācijas jutības salīdzinājumu silīcija un polimēra *FBG* relatīvās deformācijas sensoriem, var novērot ciešu korelāciju. Polimēra *FBG* optiskajam sensoram ir nedaudz augstāka relatīvās deformācijas jutība ( $1,340 \pm 0,015 \text{ pm}/\mu\epsilon$  ( $\mu\epsilon = \text{microstrain}$ )) salīdzinājumā ar silīcija *FBG* ( $1,2 \pm 0,01 \text{ pm}/\mu\epsilon$  [105]).

Detalizētāk analizējot relatīvās deformācijas parametru, var secināt, ka šis lielums ir tas, kas veido krasas izmaiņas optiskajā šķiedrā, kas tālāk izraisa izteiktas optiskās šķiedras serdeņa gaismas laušanas rādītāja jeb refrakcijas koeficienta izmaiņas. Šis gaismas laušanas rādītājs norāda to, kāda saistība pastāv gaismas stara virziena ceļam mainoties, kad tas tiek pārraidīts no vienas vides citā [156]. Trūkums šāda veida mērījumu veikšanā ir tas, ka šķiedru optiskie relatīvās deformācijas sensori ir jutīgi pret temperatūras un relatīvās deformācijas izmaiņām. Pētījums [9] 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 šos parametrus veiksmīgi nodalītu, ir izmantot šķiedras vairogu (angļu val. *fiber shield*). Tas savukārt sniedz iespēju realizēt optiskos sensorus, kas ir temperatūras nejutīgi ( $0,01 \text{ nm}$  precizitāte, novērojot temperatūras šķērsotās jutības ietekmi temperatūras diapazonā  $5\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$  [148]) vai relatīvās deformācijas nejutīgi (sasniežot 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 –  $0,00675 \text{ }^\circ\text{C}/\mu\epsilon$  [22]), tādējādi krietni uzlabojot vēlamā un mērāmā parametra datu precizitāti. Tas sniedz iespēju lietot, piemēram, temperatūras nejutīgus optiskos sensorus relatīvās deformācijas mērījumiem un otrādi. Relatīvās deformācijas optiskos sensorus var izmantot daudzpusīgiem, ar informācijas un sakaru pārraidi saistītiem, lietojumiem, kā, piemēram, hidrofoniem, ģeofoniem (angļu val. *geophones*), seismogrāfiem un iebrucēju uztveršanas sistēmām drošības risinājumos [39, 104].

Relatīvās deformācijas optiskos sensorus ir iespējams iedalīt divās kategorijās – atspoguļojuma tipa (angļu val. *reflection*) un pārraides tipa (angļu val. *transmission*). Maha-Cendera interferometrus (*MZI*) var lietot, lai nodrošinātu un izstrādātu pārraides tipa optisko sensoru bloku. Šāda veida metodika ir bijusi aktuāla pirmatnējo optisko hidfonu sistēmu izstrādes arhitektūrā. Otru kategorijas pusi – veidojot atspoguļojuma tipa hidfonu bloku, var nodrošināt ar Maihelsona interferometra (*MI*) konfigurāciju. Šāda risinājuma modelī cirkulējošā gaisma izstarojas cauri optiskā sensora uztverošajai daļai divas reizes, līdz ar to, *MI*



tipa optiskie sensori šāda veida konfigurācijā ir divas reizes jutīgāki salīdzinājumā ar *MZI* tipa [104].

*FBG* optiskie sensorus var lietot relatīvās deformācijas mērījumu vajadzībām un izmantot pārraides blokā, piemēram, jau iepriekš pieminētajiem hidrofoniem. Šāda tipa optiskajiem sensoriem ir vairākas priekšrocības ieviešanā, salīdzinājumā ar cita veida risinājumiem, ja tiek aplūkoti, piemēram, tādi faktori kā izmaksas, tieša veida mērījumu nodrošināšana, kā arī unikālas lietojamā viļņa garuma multipleksēšanas iespējas [11, 49, 104].

Viens no būtiskākajiem veidiem un relatīvās deformācijas tipa optisko sensoru lietojumiem sakaru un informācijas sistēmās ir konstrukciju tehniskā stāvokļa uzraudzībā (angļu val. *Structural health monitoring - SHM*). Kā viens no piemēriem minēts ir kvalitātes kontroles risinājums, piemēram, būvobjektu veikšanā, kas ir tieši saistīts ar dažāda veida objektu – tiltu [3], ēku [131], ceļu [18] un citu objektu būvniecības stāvokļa drošību gan izveides, gan uzturēšanas posmos [128]. Šāda veida iespējamība, kas nodrošina relatīvās deformācijas un, piemēram, temperatūras vienlaicīgu mērījumu veikšanu, multipleksējot interferometra optisko šķiedru sensorus, sniedz risinājumu efektīvai dažādu būvniecības objektu monitorēšanai. Līdzīgi arī interferometriskie optiskie šķiedru sensori tiek izmantoti elektroenerģijas ražošanas nozarē, nodrošinot attālinātās jaudas pārraides līniju noslodzes novērošanu un kontroli [104].

Papildu, detalizētāk ir iespējams analizēt plašāk izplatīto šķiedru optisko ielaušanās sistēmu sensorus, kurus veido, lai nodrošinātu plaša perimetra novērošanu un monitoringu, ar mērķi reālā laikā uztvert un noteikt, piemēram, potenciālā iebrucēja jeb pārkāpēja atrašanās vietas datus un koordinātas. Mehānisms un veids kā tiek noteikta iebrucēja precīza atrašanās vieta un tālāk novirzīta informācijas saņēmējam ir relatīvi vienkārša. Brīdī, kad šāda veida iebrucējs ir iekļuvis noteiktā teritorijā vai vidē, tad šī persona, vai arī rīks ar kuru šī persona pārvietojas veido spiedienu uz konkrētu zemes vienības punktu, zem kā ir izvietota optiskā šķiedra – optiskais sensors. Šāda darbība automātiski inducē izmaiņas uz gaismas izplatīšanās parametru esošajā optiskajā šķiedrā. Izmaiņas ir atkarīgas no lietotās optiskās šķiedras, piemēram, vienmodas optiskās šķiedras gadījumā, spiediens rezultēsies ar optiskās gaismas izplatīšanās fāžu izmaiņām. Atkarībā no tā, kāds gaismas parametrs – fāze, amplitūda, polarizācija vai frekvence tiek modulēts, balstoties uz relatīvās deformācijas ietekmi, pastāv iespēja, šāda veida šķiedru optisko iebrucēju uztveršanas sensorus klasificēt dažādās kategorijās [39, 104].

Viens no šāda veida sensoriem – optiskais laika apgabala reflektometrs, zināms kā *OTDR*, kas ir lietots optiskās šķiedras izpētē un principiāli nodrošina amplitūdas šķiedru optiskā sensora funkciju veikšanu [52, 89]. Tā funkcionalitāte ir balstīta uz Releja izkliedes darbības principu, kas pārsvarā ir “elastīga” elektromagnētiskā starojuma izkliede daļiņām, kas ir daudz mazākas par starojuma viļņa garumu [85].

Kā otra šāda veida sistēma ir nodrošināma ar Briljuēna optiskā laika apgabala reflektometru (*BOTDR*), kas balstās uz Briljuēna izkliedi – situācijās, kad apkārtējās vides parametri ietekmē izkliedētās gaismas frekvenci. Šāda risinājuma apstākļos, aplūkojot uztverto gaismas staru, ir iespējams noteikt pielikto spēku vai spiedienu, kas šajā gadījumā būtu iebrucēja radītā relatīvā deformācija uz optisko šķiedras sensoru [88, 104].

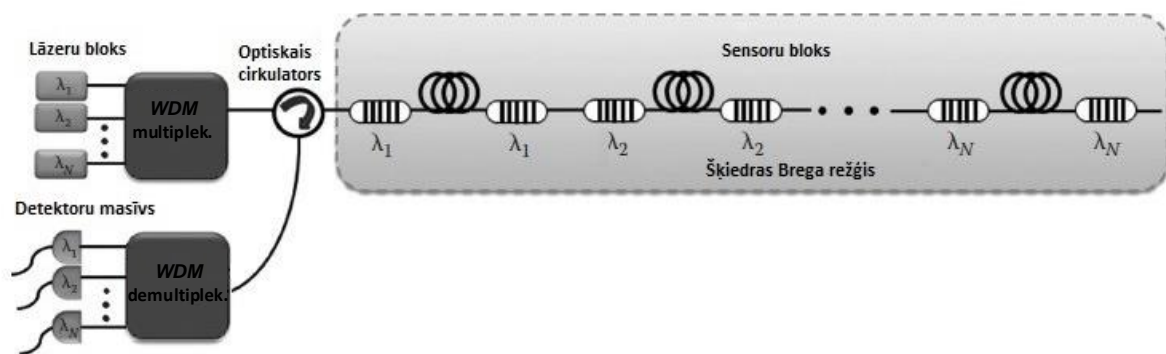
Būtiski ir arī pieminēt fāzes jutīgus *OTDR* optiskos sensorus, kuru darbības procesā nosaka pārraidāmā signāla fāžu izmaiņas, kas ir realizējušās relatīvās deformācijas izmaiņu dēļ. Tas savukārt nodrošina iespēju noteikt, piemēram, iebrucēja atrašanās lokācijas punktu atkarībā no laika, kurā tiek izmainītas signāla fāzes. Kopumā, šķiedru optiskie sensori, kas tiek lietoti jebkuru nesankcionētu darbību veikšanā jeb iebrucēju darbību noteikšanā un, ko lieto interferometriskas metodes, lai noteiktu relatīvās deformācijas fāžu izmaiņas, visbiežāk ir jutīgāki saistībā ar šo procesu noteikšanu reālā laikā. Pastāv plašas iespējas realizēt šāda veida optisko sensoru risinājumus, lietojot jau iepriekš minētos, Maha-Cendera, *MI* un Sagnaka interferometrus [104].

### 1.2.2. Šķiedru optiskie sensori objektu un vides temperatūras mērījumiem

Temperatūras mērījumos bāzētos optiskos sensorus var izmantot dažāda veida industrijās, piemēram, aviācijas nozarē [60], medicīnā [97], jūrniecībā [13] un citās. Tos var lietot augstu temperatūras mērījumu veikšanā (virs 1000°C) [140]. Šķiedru optisko temperatūras sensoru risinājumus var pielāgot, nodrošināt ļoti augstu jutību (21,86 pm/°C [103], 24,68 pm/°C [143] un pat 2,16 nm/°C [68], kā arī 21,2 nm/°C [43]). Kā vienu no piemēriem var aplūkot garu līniju (>100 km) optisko šķiedru sensoru risinājums, piemēram, naftas cauruļu noplūdes uztveršanas sistēmās. Šādām vajadzībām lieto Briljuēna vai Ramana izkliedes tipa metodes, lai nodrošinātu objekta vai vides temperatūras mērījumu veikšanu. Par piemēru analizējot Maihelsona vai Maha Cendera optisko šķiedru interferometru atskaites daļu (angļu val. *reference arm*), kur tiek novirzīta uztverošās daļas informācija. Šāda veida risinājumā tiek uzturēta konkrētā objekta vai vides temperatūras datu uzraudzīšana, sniedzot

iespēju optiskā sensora uztvērēju novietot nepieciešamajā punktā. Līdz ar to, piemēram, *FBG* bāzēto interferometru lietošanā, temperatūras izmaiņu ietekmē mainās arī šķiedras Brega režģa atstarotā viļņa frekvence jeb viļņa garums [69, 104].

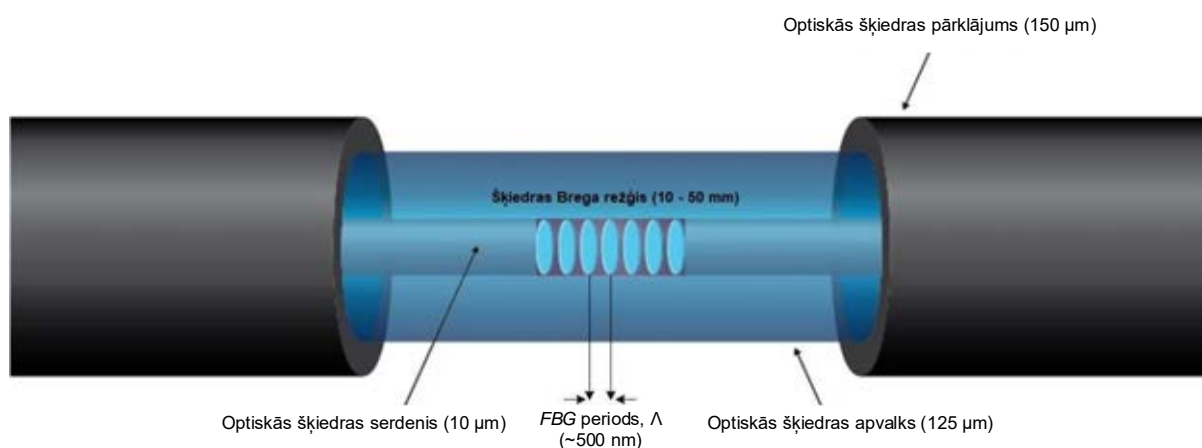
Tālāk tekstā, 1.8. attēlā ir redzams *WDM* sistēmas Maihelsona interferometrs, izmantojot vairākus *FBG* optiskos sensorus. Šādā sistēmas modelī tiek lietots optiskais cirkulators, kas ir speciāli izstrādāta optiskā komponente, kas tiek izmantota, lai nodrošinātu dažādu optisko signālu frekvenču vai viļņa garuma atdalīšanu dažādos virzienos. Piemēram, optiskā sensora atstarotā gaisma nenonāk cirkulatora ieejas portā, bet gan tiek pārraidīta uz citu portu, tādējādi nodrošinot optiskā signāla plūsmas atdalīšanu. Optiskie cirkulatori ir nepieciešami, lai efektīvi realizētu divvirziena signālu pārraidi vienā optiskajā šķiedrā, nodrošinot tādas pakalpojumus, kā šķiedru optisko sensoru darbību. Tāpat arī ir nepieciešams sensoru signālu apstrādes bloks, kas sastāv, piemēram, šajā gadījumā no  $N$  daudzuma optiskajiem *FBG* sensoriem. Pie esošā cirkulatora ir pieslēgta *WDM* demultipleksēšanas sistēma ar fotouztvērēju masīviem, kā rezultātā šāds risinājums sniedz iespēju veikt signālu frekvenču vai viļņa garumu atdalīšanu, efektīvi nodrošinot optisko sensoru un datu pārraides sistēmu darbību [39, 82].



1.8. att. Shematisks  $N$  kanālu *WDM* sistēmas bāzēts Maihelsona interferometrs, lietojot virknes slēguma *FBG* optisko sensoru pārus [104].

*FBG* optiskie sensorus var lietot kā daudzu fizikālu parametru mērīšanas spējīgas optiskās komponentes. Norobežojot *FBG* optiskā sensora aizsargājamo daļu, ir iespējams iegūt relatīvās deformācijas izolētu mehānismu, kas arī tika aplūkots iepriekšējā promocijas darba apakšnodaļā. Aizsarga daļas ārējais diametrs nodrošina atbalstu pret šķērsgriezuma spiedienu, neietekmējot pašu *FBG*. Savukārt, aizsargājamās daļas iekšējais diametrs ir pāris reizes lielāks

nekā *FBG* diametrs, kas nozīmē, ka maksimāla šķērsgriezuma spiediena gadījumā, *FBG* būs kontaktā ar aizsargājamās daļas sienu [104]. 1.9. attēlā ir redzama ierasta *FBG* optiskā sensora uzbūve šķiedrā. Atbilstoši pētījumiem [94, 98, 101], *FBG* garums ierasti ir robežās no 10 – 50 mm, savukārt režģa periods ierasti ir ap 500 nm. Attiecīgi optiskās šķiedras serdenis – 10  $\mu\text{m}$ , optiskās šķiedras apvalks 125  $\mu\text{m}$  un optiskās šķiedras pārklājums 150 - 250  $\mu\text{m}$  [141].



1.9. att. Ierasta *FBG* optiskā sensora uzbūve šķiedrā [94, 98, 101, 141, 163].

Temperatūras parametra mērīšanai, izmantojot, piemēram, *FBG* optiskos sensorus, tos var realizēt kvazi-izkliedētās optisko sensoru sistēmās. Šie kvazi-izkliedētie *FBG* sensorus var lietot, piemēram, naftas rūpniecībā kā mērinstrumentus saistībā ar aku temperatūras sadalījumu, lai spētu optimizēt naftas resursu apstrādi [64].

### 1.3. Šķiedras Brega režģa lietojums šķiedru optisko sensoru realizācijā

Līdz mūsdienām ir izstrādāti dažādi šķiedru optiskā tipa sensori, ko var klasificēt atbilstoši tam, kā minēts iepriekšējās nodaļās. 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 [174]). No terminoloģijas viedokļa, šķiedras Brega režģa definīcija ir atvasināta no Brega likuma, to izmanto periodiskās struktūrās telekomunikāciju optisko šķiedru nozarē [139]. Fizikas zinātnē definētais Brega likums nosaka sakarību atomu plakņu atstarpei kristālos un krituma leņķiem, pie kādiem šīs plaknes rada

visintensīvākās elektromagnētiskā starojuma, piemēram, rentgena un gamma staru, atstarojumu. Matemātiskajā Brega likuma vienādojumā:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1.1)$$

$n$  ir novēroto gaismas staru skaits,  $\lambda$  – viļņa garums,  $d$  – attālums starp secīgiem atomu slāņiem jeb plaknēm, savukārt  $\theta$  – krītošā vai atstarotā gaismas stara leņķis [155].

*FBG* pirmatnējie lietošanas izpētes aizsākumi ir datēti ar 1989. gadu. Līdz ar to, līdz šim brīdim ir aplūkotas daudz un dažādas nozares, kurās būtu iespējams un nepieciešams realizēt šķiedru optisko sensoru *FBG* tehnoloģijas lietojumu. Tāpat arī, līdz šim ir izstrādātas vairākas demodulācijas tehnikas (piemēram, amplitūdas, frekvenču un fāžu) vairākiem mērīšanas veidiem un lietojumiem, raisot aizvien lielāku *FBG* izpētes nepieciešamību, lai sniegtu risinājumus mūsdienu vajadzībām [104].

*FBG* izstrādei ir bijusi nozīmīga loma telekomunikāciju saistībā ar šķiedru optisko sensoru izpēti un attīstību. Šķiedras Brega režģis sniedz iespēju kontrolēt optiskā signāla plūsmu. Telekomunikāciju nozarē, *FBG* pamatā tiek lietots kā optiskais filtrs, dispersijas kompensējoša komponente vai cita veida risinājums, piemēram, *WDM* sistēmās. *FBG* īpašība - izteikts jutīgums režģa zonā pret jebkādu iejaukšanos, veicināja turpmāku pētījumu izpēti, lai spētu nodrošināt *FBG* tehnoloģijas izmantošanu optisko sensoru vajadzībām [139].

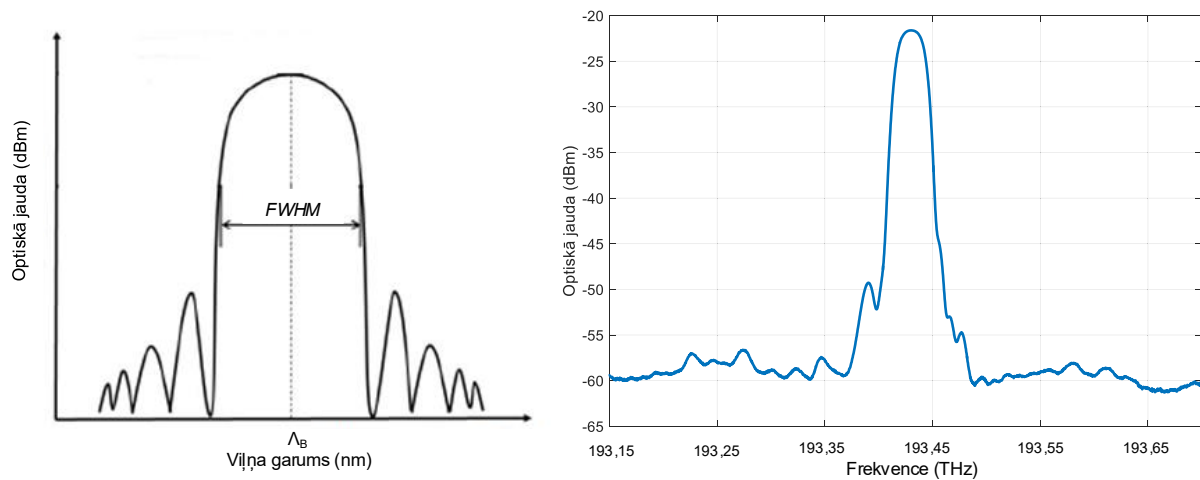
Veids kā tika izstrādāts un atklāts *FBG* tehnoloģiskais risinājums bija nejaušība. Kennets Hils izveidoja pirmo Brega režģi, ievadot augstas jaudas zilo gaismu šķiedrā. Līdz ar to, pēc dažām minūtēm novērojot to, ka pārraidītais gaismas signāls ir izmainījies. Lietojot mikroskopu kā gaismas stara sadalītāju, bija iespējams novērot to, kur bija pazudusi jeb precīzāk, atstarojusies daļa no optiskā signāla. Faktiski veids kā tiek izstrādāts *FBG*, ir to iestrādājot optiskajā šķiedrā kā režģi ar ultravioletās gaismas palīdzību [139].

Tālāk tekstā norādīts ir Brega viļņa garuma vienādojums, kur  $\lambda_B$  apzīmē Brega viļņa garumu, kas faktiski norāda uz  $\eta_{eff}$  – efektīvā gaismas laušanas koeficienta un režģa periodu jeb  $\Lambda$  reizinājumu [139].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.2)$$

Tāpat ir iespējams aplūkot arī tipisku šķiedras Brega režģa raksturlielni (1.10. a att.), kur  $\lambda_B$  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.



1.10. att. Tradicionāls 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) [139].

Šo parametru ietekmē vairāki parametri, it īpaši režģa platums jeb atstarotā signāla joslas platums. 1.10. b attēlā redzams Rīgas Tehniskās universitātes 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.

Ierasti, komerciāli pieejamajiem *FGB* sensoriem, šis atstarotā signāla joslas platums ir no 0.05 līdz 0.3 nm vairumā optisko sensoru lietojuma gadījumos [139].  $n_{eff}$  efektīvais gaismas laušanas rādītājs, kā norāda vairākas zinātniskās publikācijas [55, 110], atkarībā no sistēmas konfigurācijas ierasti ir robežās no 1,4 – 4, savukārt režģa periods  $\Lambda$ , ierasti ir 500 nm [98, 139].

### 1.3.1. Šķiedru optisko sakaru sistēmu pārraidāmā datu apjoma patērēšanas tendences

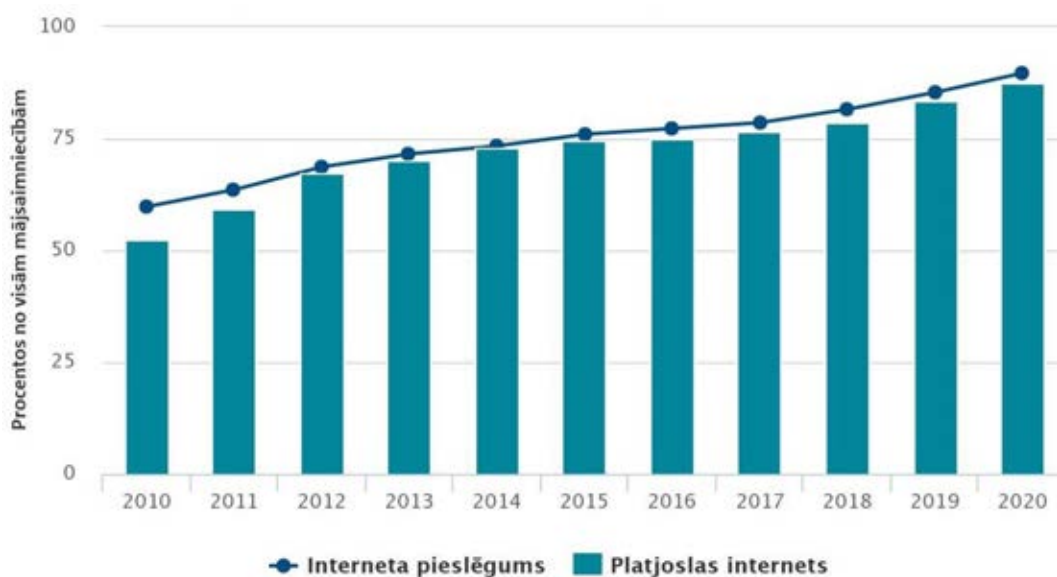
Mūsdienās, katru gadu, telekomunikāciju nozarē pilnveido un paplašina šķiedru optiskās tehnoloģijas realizēšanu, ne tikai uzņēmējdarbībā un publiskajā telpā, bet arī privātajā sektorā. No pieejamās “Šķiedra-līdz-mājai” (angļu val. *Fiber-to-the-home*) *FTTH* izvietojuma statistikas, piemēram, ASV ir sasniegusi līdz šim augstāko rādītāju. Līdz 2017. gadam ASV to mājāsaimniecību 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 [40].

*AT&T*, kas ir viens no vadošajiem telekomunikāciju uzņēmumiem ASV, tuvākajā laikā plāno palielināt kopējo mājsaimniecību skaitu vēl par 14 miljoniem, nodrošinot šķiedru optisko sakaru tīkla pieslēgumu mazās lauku pilsētās. Lai sasniegtu savus izvirzītos mērķus – nodrošinot piekļuves funkciju virtualizāciju pēdējās jūdzes tīklā, 10 Gbit/s *XGS-PON* virtualizētie tīkli tiek testēti Dalasas un Atlantas pilsētās. Atbilstoši ITU-T G.9807.1 rekomendācijām [59], *XGS-PON* ir pasīvs optiskais tīkls, kur X nozīmē skaitli 10, G - gigabiti sekundē, savukārt S nozīmē simetrisks. Šāda veida tīkla arhitektūru realizē dažādos punktu-punkta (angļu val. *point to point*) vai punkta-daudzpunktu (angļu val. *point-to-multipoint*) savienojumu izveidē, nodrošinot 10 Gbit/s lielu pārraides ātrumu gan lejupielādē, gan augšupielādē vismaz 40 km garā pārraides līnijā [7, 100]. Reizē ar lietotāju, to mājsaimniecību tehnoloģisko vajadzību palielināšanos, arī šķiedru optikas nozare paplašinās un mainās atbilstoši pieprasījuma specifikai. Uzņēmumi, mēģinot atrast jaunus un uzlabotus veidus sakaru sistēmu jaudas, ātruma un kvalitātes uzlabošanā, savstarpēji konkurē, lai iegūtu vadošās pozīcijas pasaules tirgū [40].

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 % [164]. 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. Aplūkojot pieejamos datus Latvijā, atbilstoši Centrālās statistikas pārvaldes publicētajai informācijai [157], Latvijā katru gadu turpina pieaugt mājsaimniecību īpatsvars, kurās ir pieslēgts interneta savienojums. 2019. gadā šis skaitlis sasniedz 85,4 % no visām Latvijas mājsaimniecībām, savukārt jau 2020. gadā – 89,7 % (1.11 att.).

Informācija norāda, ka 2020. gadā, salīdzinājumā ar 2019. gadu, par 4,3 % ir palielinājies to mājsaimniecību īpatsvars, kas lieto platjoslas internetu. Tāpat arī 2020. gadā, salīdzinājumā ar 2019. gadu, par 3,2 % ir palielinājies regulāro (lieto internetu vismaz 1 reizi nedēļā) interneta lietotāju skaits, sasniedzot 86,9 % [157]. Ņemot vērā iepriekš minēto, var secināt, ka šķiedru optiskā infrastruktūra ir kā pamats interneta lietošanai Latvijas iedzīvotājiem.



1.11. att. Interneta savienojuma pieejamība Latvijas mājsaimniecībās [157].

No pētījumiem un ziņojumiem, kas veikti Indijas telekomunikāciju inženierijas nozarē, ir redzams, ka telekomunikāciju patēriņa apjoms Indijā sastāv no vairāk nekā 2360 petabaitu datiem katru mēnesi, ko varētu pielīdzināt datu apjomam, kas tiek glabāts 526 miljonos DVD disku. Līdzās ar Indiju ir ASV, Ķīna un Japāna, kas arī patērē lielus datu apjomu no kopēja skaita. Lielbritānija ir paziņojusi, ka mūsdienu internets ir kā rīks uzticamam un ātram civilizācijas savienojumam. Savukārt Kanāda ir paziņojusi, ka ātrgaitas interneta piekļuve ir nepieciešama, lai nodrošinātu “dzīves kvalitāti” [1].

Palielinās ne tikai pārsūtīto datu apjoms, bet arī veids un formāts šīm datu izmaiņām kļūst sarežģītāks, galvenokārt, dažādu vajadzīgo sistēmu integrācijas dēļ. Lietu internets (*IoT*) jau pārņem viedtālruņus un rīkus, lai savienotu miljardiem ierīču, uzraudzības sistēmu, mājsaimniecības risinājumos, transportlīdzekļu un sensoru sistēmas. Inteliģenta, ātra, izturīga un vieda automatizācija nodrošinās mūsdienu dzīves definēšanu šajā tehnoloģiju laikmeta savienotā pasaulē [20].

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 – lietotājiem un dažāda veida sistēmām, 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.



### 1.3.2. Pasīvo optisko tīklu attīstības izpēte

Līdz ar optisko šķiedru sistēmu attīstību un to sadarbību ar datu pārraides sistēmām, ir attīstījušies risinājumi, lai nodrošinātu ātru pārraidi caur pasīvajiem optiskajiem tīkliem (*PON*), kas nodrošina arī optisko šķiedru sensoru izvietojuma vidi. 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 [90].

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* [53, 90].

Analizējot Eiropas Komisijas dokumentus un pamatnostādnes [28], līdz 2026. gadam tiek prognozēts, ka visā pasaulē būs savienoti 50 miljardi priekšmetu, ieskaitot automašīnas, mājokļus, pulksteņus utt. Ņemot vērā to, ir nepieciešami pārveidojoši risinājumi jautājumā par interneta savienojamību, kas ietver *IoT*, milzīgu datu analīzi (angļu val. *Big data analysis*), mākoņpakalpojumus (angļu val. *cloud services*), augstas veiktspējas skaitļošanu un dažāda veida sistēmas un lietojumprogrammas. Optisko šķiedru tīkli ir rekomendēta transporta vide, lai nodrošinātu pamattīklu (angļu val. *core networks*) un gala apakštīklu (angļu val. *final subnetworks*) savienojumu. Tas parāda, ka arvien vairāk tiks iekļautas arī optisko šķiedru sensoru sistēmas un datu pārraides sistēmas, kā arī tās būs vieglāk pieejamas gala lietotājiem, lai apmierinātu to vajadzības.

Izvērtējot Eiropas Komisijas dokumentus un pamatnostādnes [28] vēl detalizētāk, ir skaidri redzamas sagaidāmas prasības uz *QoS* – pakalpojuma kvalitātes rādītāju (angļu val. *Quality-of-Service*) uzlabošanu fiksēto tīkla savienojumiem līdz 2025. gadam. Uzsvars tiek likts uz lejupielādes savienojumu – virs 1 Gbit/s (atbildes reakciju – mazāku nekā 10 milisekundes). Eiropas Savienības attīstībai – ļoti lielas veiktspējas tīkli attīstās kā nepieciešamība. Ar lielu veiktspēju ir domāti sakaru sistēmu tīkli, kas pilnībā sastāv no optiskās

šķiedras un to elementiem, vismaz līdz gala lietotāju tīkla sadales pusei, nodrošinot noslogotākajās dienas stundās (piemēram, dienas vidus daļa un vakarpuse) tāda paša līmeņa tīkla veiktspēju, kāda tiek ierasti nodrošināta diennakts stundās, kad tīkli saskarās ar relatīvi mazāku noslodzi (piemēram, nakts stundas). Stratēģiskais mērķis Eiropā ir izveidot Gigabita sabiedrību (angļu val. *Gigabit society*) līdz 2025. gadam, paļaujoties uz ātrgaitas tīkliem, kas nosaka, ka sākotnēji ir jāspēj nodrošināt pilnīgi ikviena Eiropas Savienības mājāsaimniecība ar vismaz 100 Mbit/s lielu lejupielādes savienojumu. Attiecīgi pēc tam pārslēdzoties uz 1 Gbit/s lielu lejupielādes datu pārraides savienojumu.

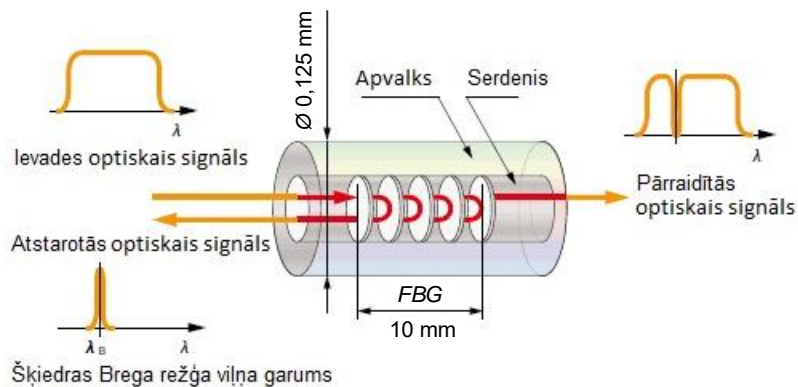
Līdz pat šim brīdim telekomunikāciju tīkli, līdz pat šim brīdim tiek iedalīti un būvēti trīs galvenajās kategorijās – maģistrālie tīkli (angļu val. *long-haul network*) ierasti 1000 km un garākās distancēs, metro jeb reģionālie tīkli (angļu val. *metropolitan network*) – nodrošina savienojumu no pakalpojumu sniedzēja līdz pilsētai, kā arī piekļuves tīkli (angļu val. *access network*) – nodrošina savienojumu no pakalpojuma sniedzēja līdz gala lietotājam. Piekļuves tīkli un metro – reģionālie tīkli mēdz būt apvienoti vienotos metro-piekļuves tīklos, nodrošinot no desmitiem līdz vairākiem simtiem kilometru garus gala lietotāju, pakalpojumu sniedzēju un reģionu (pilsētu) savienojumus, tādējādi pavērot plašākas iespējas dažādu aplikāciju (piemēram, optisko sensoru) ērtākai izmantošanai un pārvaldībai [91].

### 1.3.3. Šķiedras Brega režģa optisko sensoru lietojums optiskajās WDM sakaru sistēmās

Kā novērots [11, 16, 49], ierasts, ka šķiedru optiskos sensorus izmanto, lai izmērītu plašu fizisko parametru diapazonu, piemēram, temperatūru, deformāciju, vibrāciju, mehānisko deformāciju un spiedienu. Optiskie sensori, kuru darbības pamatā ir lietota *FBG* tehnoloģija, ir viena no perspektīvākajām un tiek plaši izmantota to priekšrocību dēļ – augsta jutība (ierasti relatīvās deformācijas jutīgums ir  $\sim 1$  pm/ $\mu\epsilon$  [34, 48, 75], bet *FBG* optisko temperatūras sensoru jutīgums ir  $\sim 10 - 13$  pm/ $^{\circ}\text{C}$  [34, 48] pie 1550 nm viļņa garuma), mazs izmērs (daži centimetri un daži grami), tāldarbība (ierasti izmantojot 40 km pārraides optisko šķiedru līnijās, bet sasniedzot arī 100 km un garākus attālumus pie specifiskām konfigurācijām [93, 126] un imunitāte pret elektromagnētiskajiem traucējumiem, kā arī citām, kas tiks aplūkotas turpmākajās darba nodaļās.

Pēc uzbūves, *FBG* ir mazs (parasti dažu centimetru garumā) optiskās šķiedras posms, kas ir izveidots nodrošinot modulācijas procesu optiskās šķiedras serdenī, kas ir saistīts ar gaismas laušanas koeficientu. *FBG* optiskā sensora ierastā darbības shēma ir redzama 1.12.

attēlā, kur optiskais signāls tiek sākotnēji pārraidīts cauri optiskajai šķiedrai. Sasniedzot šķiedras Brega režģi, noteikts optiskās gaismas viļņa garums jeb frekvence (šķiedras Brega režģa viļņa garums) tiek atstarots atpakaļ optiskās šķiedras sākuma virzienā. Tikmēr visas pārējās optiskās signāla frekvences jeb viļņa garumi tiek pārraidīti cauri visai tālākajai optiskajai šķiedrai.



1.12. att. *FBG* optisko sensoru ierastā darbības shēma [175].

Augstāk minētā veida risinājums sniedz iespēju *FBG* ievietošanai *WDM* sakaru sistēmās. Izstrādājot šādu režģi, var izmantot dažādas metodes, kā, piemēram, minēts [21] – tiešā punktu-pa-punktam (angļu val. *point-to-point*) metode, nepārtrauktā serdeņa skenēšanas metode vai interferometrijas metode. Tā rezultātā *FBG* atspoguļo signālus ar īpašu centrālo frekvenci vai viļņa garumu, ko sauc par Brega viļņa garumu. Papildus vēl viens optisko šķiedru sensoru aspekts ir to pielāgojamība, ko arī apstiprina [10], ka silīcija optiskās šķiedras ir piemērotākās datu pārraide salīdzinājumā ar polimēru optiskajām šķiedrām. Tas ir saistīts ar to mazāku vājinājumu ([2] pētījumā, pie vienādām sistēmas konfigurācijām 193 THz diapazonā, silīcija optiskās šķiedras gadījumā, uztvertā optiskā signāla jauda novērota kā 6,7 dBm, savukārt polimēra šķiedras gadījumā 6,13 dBm).

Viena no efektīvākajām metodēm Brega režģa iestrādei optiskajā šķiedrā ir lietojot fāžu masku (angļu val. *phase mask*) metodi. Šīs metodes pamatā tiek izmantots difrakcijas optiskais elements (DOE) (angļu val. *diffractive optical element*), lai veiktu telpisku, modulēta ultravioletā (UV) starojuma iekausēšanu jeb iedezināšanu (angļu val. *inscribing*). Ierasti, fāzes maskas var veidot hologrāfiski vai lietojot elektronu staru litogrāfiju. Elektronu staru litogrāfijas priekšrocība, salīdzinājumā ar hologrāfisko tehniku, ir tāda, ka fāzes maskas struktūrā var iestrādāt sarežģītākas struktūras, kā, piemēram, kvadrātveida aperiodiskas (angļu

val. *quadratic chirps*) struktūras, kas ļauj pielāgot šķiedras Brega režģi specifiskākām optisko sensoru vajadzībām [127].

Tomēr, neskatoties tikai uz svarīgajām priekšrocībām, saskaņā ar [16], *FBG* optiskajiem sensoriem ir dažas nepilnības, kas var noteiktā mērā ietekmēt arī *WDM* sakaru sistēmu veiktspēju. Šie trūkumi var realizēties no šķērsotas jutības (angļu val. *crossed sensitivity*), tādējādi veidojot neprecīzus (veidojot  $> 1$  pm lielu šķērsotās jutības kļūdu pie nosacījuma, ja temperatūras izmaiņas ir  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  lielas un šķērsvirziena spiediens ir  $90\text{ MPa}$  [149]) temperatūras vai relatīvās deformācijas mērījumus. Paralēli tam, kā tas ir apskatīts rakstā [69], *FBG* var būt arī riska faktori vietās ar augstām temperatūrām ( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) un to izmaiņām, kā arī vietās, kur tiek novērota vibrācija vai trīcēšana tiešā tuvumā optisko šķiedru sensoram.

Jau vairāku gadu garumā vajadzība pēc šķiedras optisko sensoriem pasaulē nepārtraukti palielinās. Pēc pašreizējām šķiedru optisko sensoru tirgus tendencēm, īpaši izceļot *FBG*, analīze liecina [16], ka ir trīs galvenie segmenti, kas virza uz optisko šķiedru sensoru pieprasījumu. Viens no tiem ir sensoru ierīces – optiskie sensori kā tehnoloģija dažādu parametru mērīšanai un noteikšanai. Vēl viens ir instrumentēšana, piemēram, programmatūra, iegūšanas sistēmas, apstrādes iekārtas un grafiskās saskarnes. Trešais segments ir sistēmu integrācija un instalāciju pakalpojumi, piemēram, inženiertehniskie projekti. Šāds plašais spektrs, ko sniedz optisko sensoru risinājumi, paver vēl plašākas iespējas *WDM* sakaru sistēmās un to attīstībā.

Mūsdienās daudz dažādu jomu, piemēram, objektu *SHM*, kas ir saistošs daudz dažādu optisko sensoru uzstādīšanas un izvietojšanas iespēju realizēšanā. Kā, piemēram, [19] ir veikts novērtējums lietojumam, kur *FBG* deformācijas parametra mērāmie optiskie sensori ir iestrādāti betonā, lai tādējādi nodrošinātu monitoringa funkcionalitāti un sekotu līdzī objekta *SHM* statusam. Arī aktuāla pētījuma tēma [61] ir par *SHM* lietošanu pazemes ogļu raktuvju uzraudzībā, ņemot vērā negadījumu apstākļus. Skatoties plašāk, pētījums [71] norāda, ka optiskos sensorus ievieto dažādās virsmās un materiālos, piemēram, 3D drukas struktūrās, kur 3D tehnoloģija var būt kā saite, lai savienotu *FBG* optiskos sensorus un robotizētas ierīces. Tāpat, ne mazāk svarīgi, jaunākie pētījumi [102] liecina, ka īpaša interese ir par sensoru lietojumu debesskrāpju uzraudzībā, kas var būt pakļautas dažādu veidu deformācijas riskiem, līdz ar to, arī būt kā draudi civilai drošībai. Ņemot vērā šķiedru optikas tehnoloģijas attīstību un plašo lietojumu nodrošinot datu un sakaru sistēmu darbību, ir skaidrs, ka gan optisko sensoru, gan sakaru un datu sistēmas attīstīsies un aizvien vairāk tiks savienotas ciešākā kopdarbībā, lai realizētu mūsdienu vajadzībām nepieciešamos risinājumus.

Ņemot vērā dažādu veidu ziņojumus, kuru pamatā ir optisko šķiedru tirgus izpēte [4], statistika liecina, ka tuvākajā nākotnē sensoru tirgus vidējais gada pieaugums tiek prognozēts diapazonā no 4,41 % līdz 10,5 %. Šis skaitlis tiek iegūts, ņemot vērā dažādu veidu optisko sensoru tipus [77], piemēram, punktu, izkliedētu, kvazi izkliedētu, intensitātes, fāzes, polarizācijas, frekvences, fizikālu, ķīmisku, biomedicīnisku un dažādu citu kategoriju optiskos sensorus, kuru pamatā ir atrašanās vietas noteikšanas darbības princips un lietojumi.

Saistībā ar to, ka ir novērojams ierīču skaitu pieaugums, kas izmanto pieejamo sakaru un datu pārraides spektru, kā arī notiek optisko tīklu infrastruktūras attīstība, ir redzamas iezīmes [6, 104], ka pastiprinātāka uzmanība tiek pievērsta efektīvākai spektra izmantošanai. Viens no galvenajiem elementiem sensoru tīklu izvietojumā ir to efektīva minimālā starpkanālu izvēle, saglabājot sensoru tīkla spektrālo efektivitāti pēc iespējas augstāku, tādējādi izvairoties no blakus esošo optisko kanālu pārklāšanās. Lai to realizētu, ir būtiski izstrādāt algoritmus, kas ļauj precīzi noteikti tiešu sensora atstarotā optiskā signāla spektra maksimuma centrālo frekvenci. Šāda veida pētījums ir atspoguļots arī turpmākajās darba nodaļās. Izmaiņas izmērītajā centrālajā frekvencē vai viļņa garumā optiskā sensora atstarotajam signālam reprezentē izmaiņas fizikālajos parametros kā, piemēram, temperatūra un relatīvā deformācija. Vēl viens būtisks elements, kas ir tikpat svarīgs kā iepriekšējais, ir nodrošināt resursu ziņā efektīvu datu pārraides un sensoru sistēmas, tādējādi maksimāli palielinot to savietojamības iespējas un veiktspēju. Šī iemesla dēļ, tālāk darbā būs redzama eksperimentāla optiskās šķiedras pārraides sistēma ar ievietotu *FBG* optisko sensoru tīklu, kas darbojas vienā kopējā optiskā sadales tīklā (vienmodas optiskajā šķiedrā), vienlaikus izmantojot vienotu platjoslas gaismas avotu abām sistēmām. Šāda veida eksperiments ir labs piemērs atspoguļojot abu sistēmu kopdarbības realizāciju.

Vēl būtiski ir pieminēt optisko sensoru saistību ar *IoT*. Lietu internets ir joma, kurā iespējama izaugsme un dažāda veida inovācijas, kurām piekrīt vairums pasaules valstu. Kā norādīts [133], sabiedrības drošība, vides aizsardzība un “viedās tehnoloģijas”, kā “viedās mājas” ir tikai dažas no potenciālajām *IoT* lietojuma jomām. Kā minēts pētījumos, piemēram, [1, 62], *SHM* lietošanas sfēras var būt būtisks virziens optisko sensoru lietošanā, kā arī *IoT* sfērā, ja ir plānota optisko sensoru ievietošana operacionālas drošības nodrošināšanā dažāda veida struktūrām (piemēram, ēku, tiltu, jumtu utt.).

Šajā saistībā autors arī saredz vienu no dažādajiem iespējamajiem scenārijiem, kas saista *IoT* ar *SHM*. No moderno tehnoloģiju pētījumu virzienu plašā klāsta, viens no tiem *IoT*

nozārē ir “viedās automašīnas” un satiksmes kontrole. Šajā gadījumā, *IoT* “viedās automašīnas” apvienošana ar šķiedru optisko sensoru lietojumiem, kas nodrošinātu *SHM* vajadzības. Kā piemērs var būt minēts ceļš, kurā ir integrēts *FBG* optisko sensoru tīkls, nodrošinot relatīvās deformācijas mērījumus *SHM* vajadzībām. Šāda informācija var būt nodota caur tuvumā esošu vienmodas optisko šķiedru uz pakalpojumu sniedzēja vai saņēmēja centrālo ofisu (CO) turpmākai apstrādei. Visi relatīvās deformācijas mērījumi var tik apstrādāti, lai noteiktu ielas uz kurām konkrētajā brīdī ir novērojami satiksmes sastrēgumi un, to apzinoties, satiksmes vadības optimizēšana varētu realizēt. Šāda veida informācija, piemēram, satiksmes sastrēguma dati un informāciju par satiksmes drošību var bezvadu režīmā tālāk pārraidīt uz *IoT* viedajām automašīnām – satiksmes transporta līdzekļiem, kas attiecīgi varētu veikt alternatīvus maršrutus.

Detalizētāk izpētot sensoru struktūru šāda veida risinājumos, [145] dati liecina, ka tā ir izgatavota no dažāda veida vadības moduļiem, piemēram, sensoru tīkla, kas ietver īpaša veida sensorus, kas nepieciešami konkrēti vibrācijas, temperatūras, mitruma, relatīvās deformācijas un citu parametru uzraudzībai. Kas attiecas uz galveno informāciju, tā tiek apkopota uztverošajā līmenī, kuru iegūst no sensoru līmeņa, kas iekļauj datu iegūšanu, kā arī īsu distanču pārraidi no sensoru iekārtām. Pēc tam šī informācija tiek nodota uz attiecīgu vārteju (angļu val. *gateway*), izmantojot īsa attāluma bezvadu pārraides tehnoloģijas risinājumus.

Lai nodrošinātu augstu civilās infrastruktūras, piemēram, ēkas, tiltu, ceļu un ceļu uzbērums drošību, ir jāveic nepārtrauktas konstrukcijas tehniskā stāvokļa novērtējums attiecībā pret noslodzes noturību, kas laika gaitā samazinās, ņemot vērā novecošanu, bojājumus un nolietošanos. Pētījumi [45] iepriekš ir parādījuši, ka tradicionāli šo *SHM* uzraudzību veic periodiski, vizuāli izmeklējot, vai izmantojot diskrētus elektriskos vai mehāniskos sensorus. Tomēr šāda tipa sensoru izmantošana prasa daudz laika un tos ir grūtāk uzstādīt celtniecības laikā un remontdarbu procesā. Tiem ir nepieciešams liels skaits elektrisko savienojumu un sarežģīta kabeļu infrastruktūra. Tāpat arī tiem ir augsta uzņēmība pret elektromagnētiskajiem traucējumiem, mitrumu un tie ir ar relatīvi īsu kalpošanas laiku (ierasti 2 līdz 10 gadi) [167, 173].

Kā piemērs, šobrīd Latvijā *SHM* funkciju tiltiem, ceļiem, dzelzceļiem un ceļu uzbērumiem lielākoties veic ar vizuālu pārbaužu palīdzību. Tomēr Latvija ir labs piemērs veiksmīgai optisko šķiedru tīkla ieviešanai un saglabā līderpozīcijas Eiropas *FTTH* reitingā ar šķiedru pārklājumu līdz mājai/ēkai, kas sastāda aptuveni 95,6 % 2019. gada septembrī [164].

Līdz ar to, saistībā ar optiskās šķiedras infrastruktūras pieejamību, optisko šķiedru sensori ir vilinošs risinājums tādiem Latvijas uzņēmumiem kā valsts ceļu pārvaldei – valsts akciju sabiedrībai “Latvijas valsts ceļi” [168], kurus interesē esošās optiskās šķiedras infrastruktūras izmantošana un *FBG* sensoru attālināta uzraudzība to veidotajos objektos. Piemēram, ar pasīvo *FBG* sensoru risinājumu, kurā ir iestrādāti vairāki sensori dažādos ceļa seguma slāņos, ir iespējams uzraudzīt ceļa stāvokli tā ekspluatācijas laikā. Turklāt, pētījumi kā [130], uzsver arī *FBG* tehnoloģijas aktualitāti saistībā ar optisko sensoru lietošanu *SHM* vajadzībām, īpaši akcentējot atšķirīgu algoritmu testus, kas paredzēti sīku viļņa garuma nobīžu noteikšanai un uztveršanai, tādējādi norādot uz efektīvu pieejamā frekvenču spektra izmantošanas un *FBG* lietojuma kopdarbību. *IoT* un *SHM* nozarēm attīstot aizvien ciešāku sadarbību ar šķiedru optiskajiem sensoriem [137], ir svarīgi izpētīt *FBG* sensoru kopdarbību ar ierastu šķiedras optikas pārraides tīkla infrastruktūru, sākot no kombinētas tīkla arhitektūras un beidzot ar spektrālo sadalījumu, kā arī minimālo sensoru un *WDM-PON* datu pārraides kanālu starpkāņu intervālu. Šī darba pētījumos, iegūt pareizu mērījumu datus fiziskajiem parametriem kā temperatūra un relatīvā deformācija, kā arī precīza *FBG* sensoru centrālo viļņu garumu noteikšana ir kritiski svarīga un var būt sarežģīta, ņemot vērā *FBG* atstarotā viļņa amplitūdas svārstības.

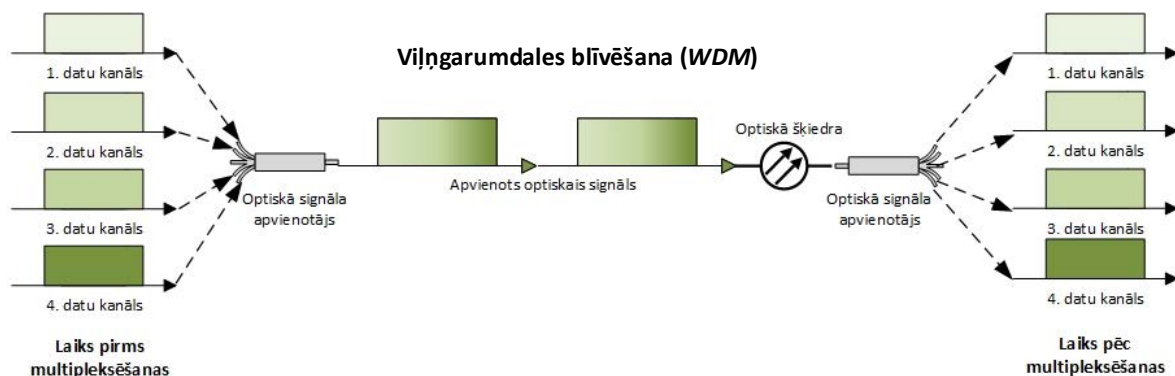
#### **1.3.4. Viļņgarumdales multipleksēšanas tehnoloģijas priekšrocību un trūkumu novērtējums šķiedru optisko sensoru tīklos**

Reizē ar optisko tīklu attīstību un sakaru, kā arī informācijas sistēmu apjoma pieaugumu, palielinās arī pieprasījums pēc pieejamā frekvenču spektra un spektrāli efektīvāka tā izmantošanas, lai nodrošinātu maksimāli daudz klientu vajadzības. Šāda prasība pēdējos gados ir strauji augusi un, pēc aplūkotajiem datiem, tas turpināsies arī vismaz tuvākajā nākotnē. Šī faktora dēļ, nodrošinot telekomunikāciju tīklu klientu augošās prasības, telekomunikāciju kompānijām ir jānodrošina risinājumi, kas spētu palielināt esošo kanālu kapacitāti, izmantojot pēc iespējas mazāku papildu finansiālu resursu piesaisti [12].

*WDM* sakaru sistēmas konceptā ir princips, kā pamatā vienu optisko šķiedru var lietot, lai sniegtu iespēju realizēt daudzu dažāda viļņa garuma signālu pārraidi vienlaicīgi. Kā pamata piemērs var būt situācija, kur tiek izmantotas divas optiskās šķiedras, kur katrā tiek pārraidīta cita viļņa garuma gaismā, kas vēlāk tiek multipleksētas jau citā, vienotā optiskajā šķiedrā. Pārraidītais viļņa garums pilda arī adreses funkciju, nosakot konkrētā signāla izcelsmi. Jāņem vērā fakts, ka katrs pārraidāmais kanāls ir ar savu unikālo viļņa garumu. Savukārt, uztverošajā

galā, atšķirīgie viļņa garuma kanāli ir savstarpēji jāatdala – jāveic demultipleksēšanas procedūra un katra interesējošā kanāla uztveršana [12], kuru *WDM* sistēmas ierasti realizē ar sakārtota viļņvadu režģa (*AWG*) palīdzību.

Tālāk tekstā esošajā 1.13. attēlā ir redzama vienkāršota *WDM* sakaru sistēmas shēmas ar diviem kanāliem, kur katrs no kanāliem pārraides sākumā ir atsevišķā optiskajā šķiedrā. Tālāk abi kanāli tiek multipleksēti vienā šķiedrā (šajā piemērā, pēc multipleksēšanas, abi kanāli ir aizņemti). Šāda veida risinājumos var dubultot optiskās šķiedras kapacitāti bez papildus izmaksu – optisko šķiedru piesaistes [12].



1.13. att. Vienkārša divu kanālu *WDM* tipa pārraides sistēmas shēma [12].

Viļņgarumdales multipleksēšanas tehnoloģijai ir vairākas būtiskas priekšrocības, ja to salīdzina ar cita veida metodēm:

- var izmantot jau esošu optisko sakaru šķiedru infrastruktūru;
- var realizēt ar augstu datu pārraides ātrumu (piemēram, vairāk kā 100 Gbit/s augstiem datu pārraides ātrumiem pie vairāku simtu un pat tūkstošu kilometru garām datu pārraides līnijām [74, 80, 81, 144]);
- lietot garās pārraides līnijās (1000 km un garākas pārraides līnijas [31, 121, 135]);
- var pielāgot atbilstoši pēc vajadzības – *WDM* tehnoloģija nav atkarīga no informācijas sistēmās izmantotā datu pārraidāmā protokola veida;
- pielāgot esošajam risinājumam, pievienojot jaunus datu pārraides kanālus (piemēram, integrējot 100 datu pārraides kanālus ar 25 GHz starpkanālu intervālu un 80 Gbit/s lielu datu pārraides ātrumu C un L optiskajās pārraides joslās [8]);
- relatīvi vienkāršots mehānisms kā tīkla infrastruktūras uzturētāji – īpašnieki var pievienot papildu datu pārraides kapacitāti, balstoties uz klienta (pakalpojuma



saņēmēja) vēlmēm. Konkrētu tīkla ātrumu var nodrošināt noteiktiem lietotājiem, kuri tādējādi iegūst pieeju pie ātra tīkla savienojuma. Tajā pašā laikā, pakalpojuma sniedzējam ir vēl joprojām neaizņemts optiskā spektra apjoms, kuru var atvēlēt citiem klientiem [12, 111];

- g) *WDM* tehnoloģijas arhitektūra ir piemērota, lai nodrošinātu dažāda veida drošības risinājumus un veicinātu sistēmas tehnoloģijas drošības paaugstināšanu [24, 32].

Savukārt runājot par *WDM* trūkumiem, tiek minēti šādi:

- a) signāli nevar būt ļoti tuvu (50 GHz, ievērojot ITU-T G.694.1 [57]);
- b) mērogojamība rada bažas, jo ierastam *OLT* (optiskās līnijas terminālim) jābūt raidītāja blokam ar vienu raidītāju katram *ONU* (optiskā tīkla iekārtai). Jaunu *ONU* pievienošana var raisīt problēmas, ja nav pieejams pietiekošs skaits raidītāju. Katram *ONU* ir jābūt ar konkrēta viļņa garuma specifisku gaismas avotu;
- c) kopējās sistēmas izmaksas palielinās, pievienojot papildus optiskos komponentus;
- d) pieejamā joslas platuma efektīva izmantošana var radīt sarežģījumus;
- e) viļņa garuma regulēšanas grūtības [151].

### 1.3.5. *WDM* šķiedru optiskās pārraides sistēmas un *FBG* sensoru tīkla savietojamības izvērtējums

Detalizētāk aplūkojot *WDM* sistēmas, ir jāizpēta, kādi ir priekšnosacījumi, lai varētu veikt šādu pārraides sistēmu un *FBG* sensoru tīkla kopdarbības izstrādi, kas šajā promocijas darbā ir uzskatīta kā hibrīda sistēma. *WDM* sistēmas realizācijai un datu kanālu nodrošināšanai, sākotnēji ir nepieciešams gaismas avots, kas vairākumā gadījumu ir pusvadītāja lāzers. Aplūkojot dažādo lāzeru plašās iespējas, kā viens no vairāk lietotajiem ir lāzers ar dalīto atgriezenisko saiti (angļu val. *distributed feedback laser*), kas arī atbilst *WDM* un *DWDM* sistēmām. Šāda veida lāzeļiem piemīt gandrīz monohromatiskas gaismas iezīmes, ir iespēja lietot ar augstiem modulācijas ātrumiem (50 Gbit/s katram datu kanālam [25, 78]), kā arī tiem ir laba signāla/trokšņa iezīmju raksturošana (nesēja (angļu val. *carrier*) un trokšņa attiecība virs 40 dB [129, 170]). Papildinot to, šiem lāzeļiem ir pieejama plaša spektra josla (modulācijas joslas platums robežās ap 20 GHz (3 dB) [170], precīzi definējot viļņa garumus diapazonā ap 1550 nm [12, 54]).

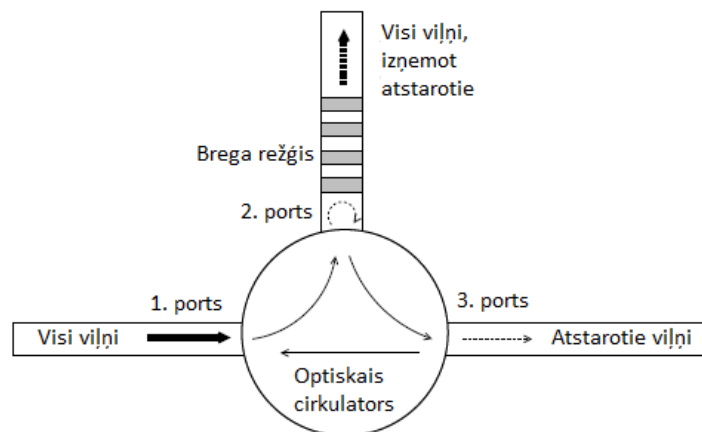
Attiecībā uz signālu pārraidi, pamatā tiek izmantotas vienmodas optiskās šķiedras un pastiprinātāji ar erbija legēto šķiedru (*EDFA*). Līnijas garums faktiski ir ierobežots atbilstoši

nelineāro optisko efektu dēļ (piemēram, fāzes pašmodulācijas (*SPM* angļu val. *self-phase modulation*) [92], četru viļņu mijiedarbības (*FWM* angļu val. *four-wave mixing*) [108] un fāzes šķērs-modulācijas (*XPM* angļu val. *Cross-phase modulation*) [138]), jo lineāros efektus (dispersija [83] un vājinājums [109]) var kompensēt. Lielākā daļa šādu efektu kļūst būtiski tad, kad signāla jauda, kuru lieto optiskajā šķiedrā, ir relatīvi liela. Pētījums [120] norāda, ka ietekmi var neņemt vērā, ja katra kanāla jauda ir zemāka par 19,6 mW). Kā viens no piemēriem ir *DWDM* sistēmas, situācijās, kad tiek izmantoti vairāki kanāli. Būtiski nelineārie efekti ir – stimulētā Briljuēna un Ramana izkliede un *FWM* [12].

Uztvērēja puse ir ne mazāk svarīga, lai precīzi un efektīvi uztvertu pārraidīto signālu un līdz ar to – datus. Gaismas uztvērēji parasti ir pusvadītāju foto uztvērēji un sākotnēji ir jānodrošina kanālu demultipleksēšana, pirms šo informāciju var apstrādāt. Optisko signālu uztvērējiem var lietot priekš pastiprinātājus un optiskos filtrus. Konceptuāli ir divi galvenie tehnoloģiskie risinājumi, kas nodrošina optiskās gaismas signālu uztveršanu – *PIN* diodes un *APD* (lavīnfotodiodes) [12].

Būtiska ir arī signālu apvienošana un atdalīšana, citiem vārdiem – multipleksēšana un demultipleksēšana. Multipleksori un demultipleksori var darboties gan kā aktīvas, gan pasīvas iekārtas. Pasīvu iekārtu konfigurācijas risinājumā ierīces izmanto režģus, prizmas vai optiskos filtrus, kamēr aktīvās konfigurācijas risinājumā tie strādā ar pārskaņojamiem (angļu val. *tunable*) filtriem. Būtiskākā problemātika jeb sarežģījumi izstrādājot multipleksorus un demultipleksorus ir tas, ka ir nepieciešamība nodrošināt augstu kanālu atdalīšanas spēju un relatīvi zemu šķērsrunu (angļu val. *cross talk*) [12]. Ņemot vērā, ka ir pieejami vairāki iespējamie varianti, šajā darbā padziļinātāk ir pētīta šķiedras Brega režģa tehnoloģijas izmantošana optisko sensoru vajadzībām vienotā *WDM* sistēmā, kur multipleksori un demultipleksori nodrošina pārraides datu kanālu atdalīšanu.

Šķiedras Brega režģa funkcionalitāte, salīdzinājumā ar šķiedru optisko sakaru sistēmās plaši lietotajiem filtriem, ir atšķirīga. *FBG* uzbūve sniedz iespēju atstarot konkrētu viļņa garumu jeb frekvenci, saglabājot pārējo gaismas viļņu jeb frekvenču pārraidi tālāk optiskajā šķiedrā. Ņemot vērā to, ka tie parasti tiek realizēti balstoties uz arhitektūru specifiski šķiedru optiskām pārraides sistēmām, tos ir viegli implementēt jau esošās optiskajās sakaru sistēmās. Būtiskākie sarežģījumi rodas saistībā ar no *FBG* režģa atstarotās gaismas izdalīšanu un pārraidi uztvērēja ieejā. Šāda veida problemātiku var risināt ar optiskajiem cirkulatoriem (1.14 att.) [12].



1.14. att. Optiskā cirkulatora un šķiedras Brega režģa darbības shēma [12].

Augstāk esošajā 1.14. attēlā ir redzams demultipleksora saturošs risinājums, kas ir balstīts uz šķiedras Brega režģi un optisko cirkulatoru. Brega režģa šķiedras laušanas koeficientam ir periodiska struktūra, atstarojot noteikta garuma gaismas viļņus no noteiktiem optiskās šķiedras punktiem, tomēr neietekmējot citu gaismas viļņu izplatību režģī. Process balstās uz to, ka sākotnēji tiek pārraidīti visi viļņa garumi, kas ir redzami attēla kreisajā pusē. Pēc tam, optiskā cirkulatora darbības rezultātā, šie gaismas viļņi tiek novirzīti uz portu, kas ir savienots ar augšējo optisko šķiedru, Brega režģa virzienā. Tālāk šie viļņi tiek pārraidīti caur Brega režģi, kur atkarībā no konfigurācijas un režģa perioda, viens viļņa garums tiek atstarots, bet pārējie viļņi tiek pārraidīt cauri un turpina informācijas pārraidi pa optisko šķiedru. Atstarotais vilnis, turpretī atkārtoti ieplūst optiskajā cirkulatorā un tiek pārraidīts uz trešo portu, attēla labajā pusē. Šāda paša veida risinājumu var pielāgot, situācijās, kad ir nepieciešama optiskā signāla pārraide pretējā virzienā.

Augstāk minēto risinājumu multipleksoru vai demultipleksoru realizācijā var lietot optisko sensoru virknes vai cita veida arhitektūrā. Šķiedras Brega režģa balstītos multipleksorus un demultipleksorus var veiksmīgi lietot *WDM* un *DWDM* sakaru sistēmās, lai atdalītu pārraides virzienus [12].

### 1.3.6. *FBG* optisko šķiedru sensoru datu saturošo signālu nolasišanas veidu analīze

Būtiskākais izaicinājums *FBG* optisko sensoru lietošanā ir situācijās, kad ir radusies nepieciešamība izvēlēties metodi, kā tiek noteiktas un demodulētas pārraidīta viļņa garuma izmaiņas. *FBG* optisko sensoru lietošana ir vienota ar tehnoloģisko izstrādi, lai spētu nodrošināt

efektīvu sensoru darbību, uztverot Brega viļņa garuma izmaiņas kā funkciju, kas ir atkarīga no konkrēti mērāmā parametra [139].

Šādā realizācijā, galvenās *FBG* sensora priekšrocības ir:

- 1) vienā optiskajā šķiedrā var multipleksēt vairākus *FBG* optiskos sensorus (piemēram, 24 *FBG* sensoru masīvu viena optiskā platjoslas gaismas avota ietvaros [106]), samazinot dārgo kontroles sistēmu izmaksas;
- 2) *FBG* optiskie sensori, pretēji elektriskajiem vai mehāniskajiem sensoriem, neizmanto elektriskos signālus un, līdz ar to, ir sprādziena droši;
- 3) *FBG* optiskos sensorus var lietot sakaru sistēmās, kurās notiek signālu pārraide vairāku desmitu kilometru attālumā;
- 4) šos sensorus neietekmē elektromagnētiskā starojuma interference un tos var izmantot daudzos, teorētiski bīstamos un grūti piekļūstamos apstākļos, kā arī vidē, kur cita tipa, piemēram, mehāniskie vai elektriskie sensori nespētu efektīvi nodrošināt darbību funkcionalitāti;
- 5) *FBG* optiskie sensori ir maza izmēra un ir pasīvās komponentes, tie nodrošina augstus darbības radītājus un ilgu darbības mūža ciklu [39, 139].

Par *FBG* optisko sensoru trūkumiem pamatā tiek minētas relatīvi augstas izmaksas un gala lietotāju zināšanu trūkumus saskarsmē ar *FBG*. Tāpat par problemātiku tiek minēti signālu demodulatoru precizitātes un skenēšanas ātruma ierobežojumi. Tas varbūt nav tiešā veidā saistīts ar pašu *FBG* tehnoloģiju, tomēr tas ietekmē funkciju izpildi, sevišķi praktiskajās jomās – datu apstrādē, piemēram, ārpus laboratorijas vai citām telpām. Lai šos ierobežojumus mazinātu, ir pētītas demodulācijas tehnikas, kas uzlabo demodulācijas veikspēju *FBG* sensoriem. Tās pamatā balstās uz filtru, interferometru, regulējamu gaismas avotu un atbilstošu šķiedru režģu izmantošanu [21, 76].

Kā viena no vieglākajām metodēm, kā veikt *FBG* sensoru datu apstrādi ir izmantot optiskā spektra analizatoru (*OSA*), kas nodrošina tiešus mērījumus *FBG* atstarotajam optiskajam signālam. Otra veida metode šādas darbības nodrošināšanai tiek balstīta uz viļņa garuma izmaiņu salīdzināšanu, kā sakarību ar pārraidītā signāla optiskās jaudas intensitātes izmaiņām [139]. *FBG* sensoru datu apstrādes metode izmantojot *OSA* ir relatīvi vienkārša. Šīs metodes lietošanas shēma sastāv no platjoslas gaismas avota, optiskā joslas filtra, optiskās šķiedras, cirkulatora, *FBG* optiskajiem sensoriem un *OSA*. Optiskais signāls tiek pārraidīts cauri cirkulatoram un, sasniedzot *FBG* optiskos sensorus, noteiktas optiskā signāla frekvences jeb

viļņa garumi tiek atstaroti atpakaļ virzienā uz cirkulatoru, kā darbības mehānisms nodrošina atstaroto signālu pārraidīšanu uz *OSA*. Visas sensoru atstarotā optiskā signāla spektra maksimumu centrālās frekvences, kas faktiski ir optiskā sensora uztvertie signāli, var pārraidīt uz *OSA* tālākai datu izpētei un uzraudzībai. Šāda veida metodi var lietot gan atstaroto, gan caurejošo signālu uzraudzībai un novērošanai [139].

Veicot pat nelielu viļņa garumu izmaiņu noteikšanu, optisko šķiedru sensoriem un to saistītajām tehnoloģijām ir jābūt spējīgām nodrošināt svarīgus parametrus, jeb iezīmes, tādas kā dinamiskie un statistiskie mērījumi, precizitāte, izšķirtspēja, zemas izmaksas, reāla laika mērījumu iespējas, kā arī ir nepieciešami risinājumi nodrošināt tehnoloģijas izmantošanu ārā vides apstākļos. Faktiski šāda veida metode un aparatūra, kas tiek uzstādīta ierastās standarta komerciāla veida konfigurācijās, apstrādājot optisko sensoru datus, ir piemērota testu veikšanai, laboratorisko eksperimentu realizācijā. Neatkarīgi no tā, pastāv iespēja realizēt *OSA* darbību veikšanu arī lauka apstākļos, ja tiek nodrošināta specifisku prasību pielāgošana [39, 139].

*OSA* aparatūra pēdējo gadu laikā ir krietni uzlabota, nodrošinot daudz plašākus viļņa garuma apstrādes diapazonus, tādējādi arī sniedzot precīzāku rezultātu iegūšanu un apstrādi optisko sensoru risinājumos. Aplūkojot četru ražotāju *OSA* iekārtu tehniskās specifikācijas [152 - 154, 176], ir redzams, ka minimālās izšķirtspējas joslas platums un iestatījumu izšķirtspēja ir diapazonā no 0,04 pm līdz 0,07 nm, savukārt kopējais mērījumu diapazons visiem četriem optiskā spektra analizatoriem ir no 600 nm līdz 1750 nm. Analizējot viļņa garuma noteikšanas precizitāti, atkarībā no konkrēta optiskā spektra analizatora, vērtība svārstās no 2 pm – 100 pm, bet dinamiskais diapazons no 50 dB līdz 87 dB, kamēr maksimālā ieejas jauda ir -90 dBm līdz +23 dBm. Svarīgi ir uzsvērt arī to, ka neskatoties uz šo relatīvi vienkāršo demodulācijas novērošanas metodi, tai pastāv arī trūkumi, kā, piemēram, komerciālie *OSA* ir relatīvi smagas un lielas iekārtas. Tās var būt grūti integrēt un transportēt, kā arī ir nepieciešams ievērot augstas prasības pret darba vides mikroklimatu. *OSA* standarta konfigurācijā nav atbilstoši piemērotas lauka apstākļiem [39, 139, 152 - 154, 176].

### **1.3.7. Slēptu datu pārraides un optisko šķiedru sensoru aktualitātes novērtējums *WDM* sakaru sistēmās**

Pieejamais elektromagnētiskais spektrs kļūst arvien pieblīvētāks [95], līdz ar to spektrā parādās aizvien vairāk informācijas, kura varētu būt interesanta, vērtīga un pat būtiska no drošības viedokļa gan kā privātām, tā komerciālām vajadzībām. Tas varētu piesaistīt arī aizvien vairāk noklausītāju (angļu val. *eavesdropper*) interesi iegūt šo privāto informāciju savā

pakļautībā un izmantot savtīgiem, vai pat nelegāliem nolūkiem. Nereti arī optiskās sakaru sistēmas (tajā skaitā optisko sensoru sistēmas) tiek lietotas vienā kopējā infrastruktūrā ar datu pārraides sistēmām. Var pastāvēt situācijas, kur individuālu optisko sensoru dati tiek apkopoti un apstrādāti, pēc tam pārraidot šo informāciju kā datus tālāk uz vienotu datu centru, to centralizētai uzglabāšanai un apstrādei. Lai novērstu vai vismaz mazinātu šādu risku, ne tikai datu šifrēšana, bet arī to slēpšana (slēptu datu kanālu izveidošana) ir nepieciešama. Efektīvai slēptu signālu integrācijai ir nepieciešama starpkanālu intervālu salāgošana un jaudas līmeņa pielāgošana. Šāda veida, hibrīda tipa optisko sakaru sistēma var uzlabot sensitīvu datu aizsardzību.

Datu pārraide, izmantojot optisko šķiedru infrastruktūru, pēdējos gados ir krietni attīstījies un pieprasa jaunas metodes un risinājums, lai nodrošinātu resursu optimizāciju un informācijas drošību. Jaunākie pētījumi [38, 50] apstiprina informācijas datu apjoma pārvaldības aktualitāti situācijās, kur ir nepieciešams nodrošināt liela apjoma (simtu līdz tūkstošu serveru) datu pārraidi optisko sakaru sistēmās un datu centros, lai realizētu augstu veiktspēju. Papildu tam, pētījumi kā [51, 136], kur tiek piedāvātas jaunas datu kodēšanas shēmas, norāda uz nepieciešamību plašāk izpētīt un uzlabot optisko komunikāciju drošības risinājumus.

Kā jau iepriekš tika minēts, *WDM* tehnoloģija ir saistoša datu pārraidei *PON* tīklos. Aktuālākie pētījumi [65, 107, 118, 119] uzrāda vairākus *WDM-PON* ieviešanas risinājums, ņemot vērā to priekšrocības, kā lielu joslas platumu, relatīvi vieglu pārvaldību, drošības nodrošināšanu un darbu ar pasīvām komponentēm. Šie pētījumi arī norāda uz vajadzību pēc padziļinātākas izpētes, lai spētu uzlabot kopējas operāciju procedūras. Attīstoties dažādām datu pārraides sistēmām un pieaugot kopējam spektra blīvumam, optiskā steganogrāfija (angļu val. *steganography*) ir viena no metodēm, kura kādā brīdī tiek arī apsvērta kopā ar datu šifrēšanas metodēm. Kamēr kriptogrāfija nodrošina informācijas un datu satura aizsardzību, steganogrāfijā fokuss tiek veltīts diviem aspektiem – gan datu aizsardzībai, gan arī informācijas datu pārraides fakta slēpšanai [37, 44, 112]. Optiskā steganogrāfijas metodika tiek lietota, lai nodrošinātu vienlaicīgu slēptu kanālu un publisku komunikācijas sakaru kanālu darbību, līdz ar to, uzlabojot drošību un samazinot trešo pušu piesaistīto uzmanību. Dažos pētījumos [41, 44] ir aplūkotas metodes, kur eksperimentāli pētījumi ar aperiodiskajiem (angļu val. *chirped*) šķiedras Brega režģiem ir veikti, realizējot steganogrāfijas risinājumus. Slēpti signāli jeb maskēti datu kanāli ir vizuāli noslēpti kopējā frekvenču spektrā un nav tieši redzami, izmantojot, piemēram, *OSA*, pie nosacījuma, ja iestatījumi ir nokonfigurēti atbilstoši.

Droši optiskie tīkli ir svarīga daļa no visas telekomunikāciju industrijas. Vairākos pētījumos [42, 47] ir norādīts, ka pastāv vairākas ievainojamības un drošības problēmas optiskajos sakaru tīklos, kurām būtu jāpievērš pastiprināta uzmanība un jāmeklē iespējamie risinājumi. Konkrēti šajos pētījumos ir īpaši uzsvērtā aktualitāte par pasīvo optisko tīklu drošību un aizsardzību no trešo pušu noklausīšanās apdraudējuma.

Informācijas sistēmu uzbrukumi vai mēģinājumi uzbrukt ir plaši apzināta problēma, ar kuru mūsdienās informācijas sistēmu drošības pārziņiem ir jāsaskaras, nodrošinot drošības mērus savās organizācijās. Situācijās, kad noklausītājs uzzina par frekvenču spektru, kurā notiek informācijas un datu pārraide sistēmai, kura tam ir interesējoša, pastāv risks, ka šī personu vai personu grupa var veikt, piemēram, fāzes traucēšanas uzbrukumu (angļu val. *phase jamming attack*), tādējādi diskreditējot informācijas sistēmu – tās drošu darbību [87].

Izpētē līdz šim, kas ir saistīta ar slēptu kanālu pārraidi, ir norādīts, ka pastāv situācijas, kurās ir iespējams piemērot optiskā koda dalīšanas multipleksēšanas (*OCDM*) tehnoloģiju [26, 37]. Tomēr, apzinoties sarežģījumus, kas saistās ar precīza laika prasībām, *WDM-PON* risinājums, salīdzinot ar citiem, ir raisījis plašāku interesi šāda veida sistēmu realizācijās. Vairāki pētījumi [67, 125] apstiprina to, ka *WDM* datu pārraides sistēmas ir saistošas slēptu datu pārraižu sistēmu integrācijai. Šādā gadījumā, būtisks elements ir pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) avots [67], kas tiek plaši lietots kā gaismas avots un primāri nodrošina nepieciešamo spektra joslu, lai slēptu plānotos datu kanālus *WDM-PON* hibrīda sistēmā. Kā tas ir redzams iepriekš veiktā pētījumā [150], gandrīz visu *ASE* spektru potenciāli var lietot slēptu datu kanālu pārraidei. Šī darba turpmākajās nodaļās tiks realizēta hibrīda *WDM* sakaru sistēma, slēptu datu kanālu un šķiedru optisko sensoru tīkla izstrāde.

#### 1.4. Promocijas darbā paveiktā apkopojums

Apkopojot iepriekš minētos faktus, tika 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 **pamatuzdevumi**.

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 starpkanālu intervālu apvienotā piecu *FBG* sensoru un astoņu kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* pārraides sistēmā.
5. Novērtēt hibrīdas, līdz 10 Gbit/s simulācijas shēmas darbību, izveidojot slēptu septiņu kanālu spektrāli sagrieztu datu pārraides sistēmu un apvienot to ar astoņu datu kanālu *WDM-PON* datu pārraides sistēmu, kurā integrēta piecu optisko sensoru sistēma.
6. Eksperimentāli un simulācijas vidē izstrādāt un novērtēt apvienota *FBG* optiskā sensora 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 tika lietoti signāla jaudas, spektra, acu diagrammu un bitu kļūdu mērījumi. Promocijas darbā iekļautie zinātniskie



eksperimenti realizēti RTU Telekomunikāciju institūta (TI) Sakaru sistēmu tehnoloģiju izpētes centra (SSTIC) Šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) zinātniskajā laboratorijā.

### 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 5 *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 rezultāti prezentēti piecās starptautiskās zinātniskās konferencēs, kā arī atspoguļoti četrās publikācijās zinātniskajos žurnālos, piecas publikācijas pilna teksta konferenču rakstu krājumos (skat. Sarakstu 1. pielikumā). Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas gan ekspluatācijā esošu optisko metro-piekļuves tīklu uzlabošanai, gan arī jaunu šķiedru optisko pārraides sistēmu un sensoru tīklu ieviešanai. Promocijas darba laikā iegūtie un pētījumā atspoguļotie rezultāti ir izmantoti divos zinātniskās pētniecības projektos (skat. Sarakstu 1.pielikumā).

Darbā tika izvirzītas šādas **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 stabilu darbību, gan arī spektrāli sagrieztu 32 datu pārraides kanālu darbību ar pārraides ātrumu 1,5 Gbit/s, nodrošinot uztvertā signāla *BER* vismaz zem  $2 \times 10^{-3}$  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  $2 \times 10^{-3}$  *FEC* sliekšņa ir realizējama ja šķiedru optiskās pārraides līnijas garums ir vismaz 20 km.

## 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 uzlabotās 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.

Promocijas darba kopējais apjoms ir 127 lappuses. 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 četrus 10 Gbit/s datu kanālu *DWDM-PON* pārraides sistēmu. Tiek analizēta raidītāja puses un optiskās līnijas terminālī ietilpstošo komponentu parametru izvēle un izveide. Tāpat arī tiek 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 iespējams noteikt minimāli pieļaujamo optisko sensoru starpkanālu intervālu (~208 GHz). Tālāk nodaļā aplūkota hibrīda 10 Gbit/s *WDM* 8 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 balstītu 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.

## 2. ŠĶIEDRU OPTISKO *FBG* TEMPERATŪRAS SENSORU TĪKLA IZVEIDE

Šis 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 5 *FBG* optisko sensoru centrālajām frekvencēm jeb viļņa garumiem. Šis izstrādātais optisko sensoru tīkls ir apvienots ar optisko 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.

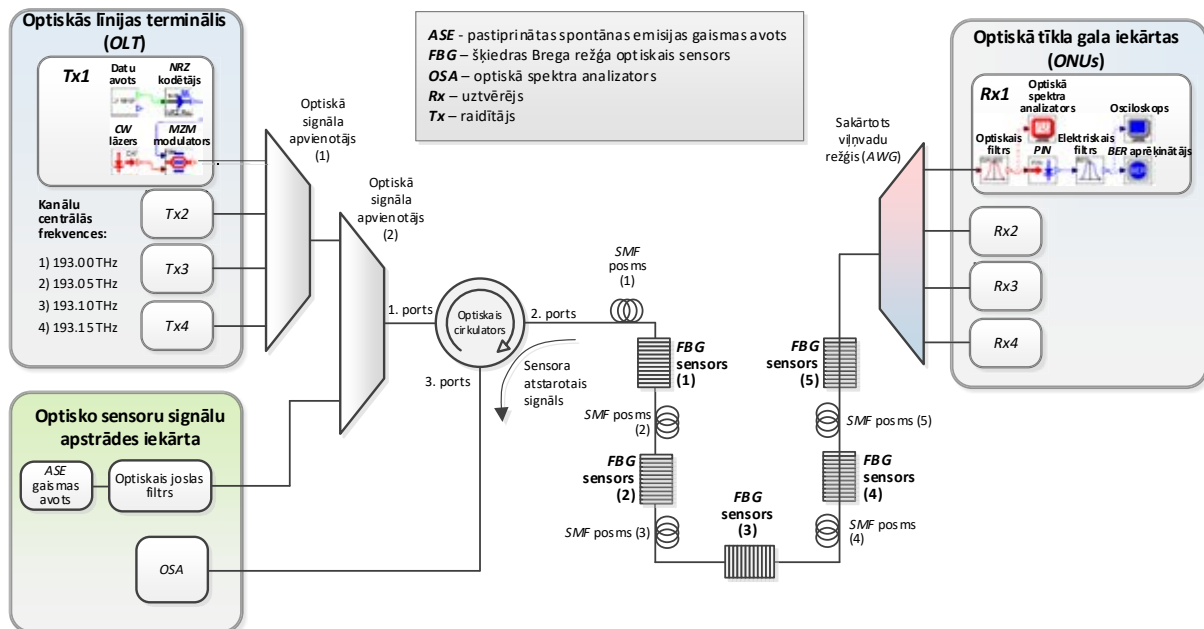
### 2.1. Apvienotas *FBG* temperatūras sensoru sistēmas un blīvas *WDM-PON* pārraides sistēmas modeļa izstrāde

Datu pārraides sistēmai tika izraudzīta bez atgriešanās pie nulles ieslēgta-izslēgta (*NRZ-OOK*) sistēma. Galvenokārt, tas ir ņemot vērā šādas sistēmas priekšrocības, piemēram, vienkārša ieviešana un spektrāla efektivitāte. *NRZ-OOK* formāts jau vēsturiski tiek izmantots daudzos optiskās pārraides sistēmu risinājumos [12]. Lai izstrādātu *FBG* sensoru tīklu, kas ir integrēts *NRZ-OOK* optiskās šķiedras datu pārraides sistēmā, kā arī novērtētu savstarpēju sadarbību šādā tīklā, ir izstrādāts simulācijas modelis, kas sastāv no trīs galvenajiem blokiem (2.1. att.).

Pirmais bloks satur pakalpojuma sniedzēja ofisu (*CO*), kas šajā gadījumā ir *OLT* ar 4 raidītājiem. Katrs raidītājs sastāv no *NRZ* kodera, datu avota un Maha Cendera optiskā modulatora (*MZM*). Katrs *MZM* ir ar 3 dB ienestajiem zudumiem (angļu val. *insertion loss*), modulācijas spriegumu  $V_{\pi}$  5 volti, kamēr augstā un zemā jaudas līmeņa attiecība (angļu val. *extinction ratio*) *ER* ir uzstādīta 20 dB. Katra nepārtrauktā viļņa (angļu val. *continuous-wave*) (*CW*) lāzera izejas jauda ir iestatīta 2 mW. No datu avota ģenerētie loģiskie biti tiek pārraidīti uz *NRZ* koderi, kur tas veido *NRZ* elektriskos impulsus. Tālāk šie elektriskie impulsi tiek pārsūtīti uz *MZM* modulatoru, kur tas veido optisko signālu, kas savukārt ir definēts atbilstoši elektriskajam signālam. Visi četru signāli ir apvienoti ar optisko signālu apvienotāju un ar vienmodas optisko šķiedru (*SMF*) pārraidīti uz otro bloku [124].

Ir izveidoti četři datu kanāli, katrs ar centrālo frekvenci 193 THz, 193,05 THz, 193,1 THz un 193,15 THz. Kā redzams, frekvences plāns ir piesaistīts centrālajai frekvencei 193,1

THz un starpkanālu intervāls ir izvēlēts kā 50 GHz, ievērojot *ITU-T G.694.1* [57] rekomendācijas.



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

Pēc tam, pirmā bloka intensitātes modulēti 10 Gbit/s *NRZ* kodēti 4 kanāli ir apvienoti ar optisko apvienotāju, kas ir savienots ar sistēmas otro bloku. Sensoru tīkls, kas ir otrajā blokā, ietver platjoslas *ASE* avotu ar plakānu izejas spektru frekvenču apgabalā, kas nepieciešams sensoru tīkla darbībai [122].

*ASE* spektra reģions, kas ir izmantots arī turpmāk optisko sensora tīkla simulācijas izstrādē ir robežās no 192 THz līdz 195,9 THz. Tam ir salīdzinoši mazas spektra intensitātēs svārstības – mazāk kā 0,42 dB. *ASE* avota izejas jauda ir iestatīta +23 dBm, ņemot vērā, ka *ASE* avots var palielināt nelineāros efektus [122]. Pieci *FBG* temperatūras sensori atrodas *ODN*, optisko šķiedru pārraides sistēmā. Tikmēr katrs sensors reprezentē atstaroto signālu, kas ir apstrādāts un iegūts no datu apstrādes iekārtas. Šajā gadījumā ir izmantots optiskais joslas filtrs, lai izfiltrētu *ASE* spektru, kas ir nepieciešams *FBG* darbībai, vienlaikus pārlicinoties, ka tas nepārklājas ar datu pārraides kanāliem. Šķiedras optiskā līnija ir sadalīta piecos, četrus kilometrus garos, posmos starp katru sensoru. Tas ir ierasts attālums, ko Latvijā izmanto starp kabeļu sadales tīklu skapjiem (angļu val. *cabinets*) vai sakaru akām (angļu val. *manholes*), kur

ir izvietotas optiskās uznavas (angļu val. *optical closures*). *FBG* optisko sensoru centrālās frekvences (Brega atstarojošā viļņa garums) pēc noklusējuma ir iestatītas 194,17 THz, 194,04 THz, 193,91 THz, 193,79 THz un 193,66 THz secībā no 1. sensora līdz 5. sensoram. Šīs centrālās frekvences ir izraudzītas pie 22 °C. Centrālās frekvences šiem sensoriem ir izraudzītas, lai nodrošinātu to, ka pārraides datu kanālu un sensoru frekvenču darbības joslas spektrāli nepārklājas. Katram optiskajam sensoram tika integrēta ierasta šķiedras Brega režģa raksturlīkne. Otrkārt, ņemot vērā, ka temperatūras izmaiņas ietekmē optisko sensoru centrālo atstaroto signālu frekvences (Brega atstaroto vilni), tas nozīmē, ka ir nepieciešams uzstādīt atbilstošu katra sensora starpkanālu intervālu. Visbeidzot, trešajā blokā ir optiskās tīkla gala iekārtas, kur ar *AWG* četri datu pārraides kanāli tiek iegūti no saņemtā optiskā signāla. Šajā simulācijas modelī *AWG* satur optisko jaudas dalītāju un četrus ar Gausa amplitūdas-frekvenču pārvades raksturlīkni joslas optiskos filtrus, ar 3-dB joslas platumu 12 GHz. Datu kanālu blokā visi četri kanāli sākotnēji ir atdalīti un katrs no tiem ir izfiltrēts caur optisko Gausa amplitūdas-frekvenču pārvades raksturlīknes joslas filtru, lai atdalītu konkrētu datu kanālu no kopējās optiskā signāla plūsmas. Attiecīgi, katrā Gausa filtrā ir iestatīta centrālā frekvence 193,0 THz, 193,05 THz, 193,1 THz un 193,15 THz.

## **2.2. Mērāmās temperatūras ietekmes uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņu garuma izmaiņām izpēte**

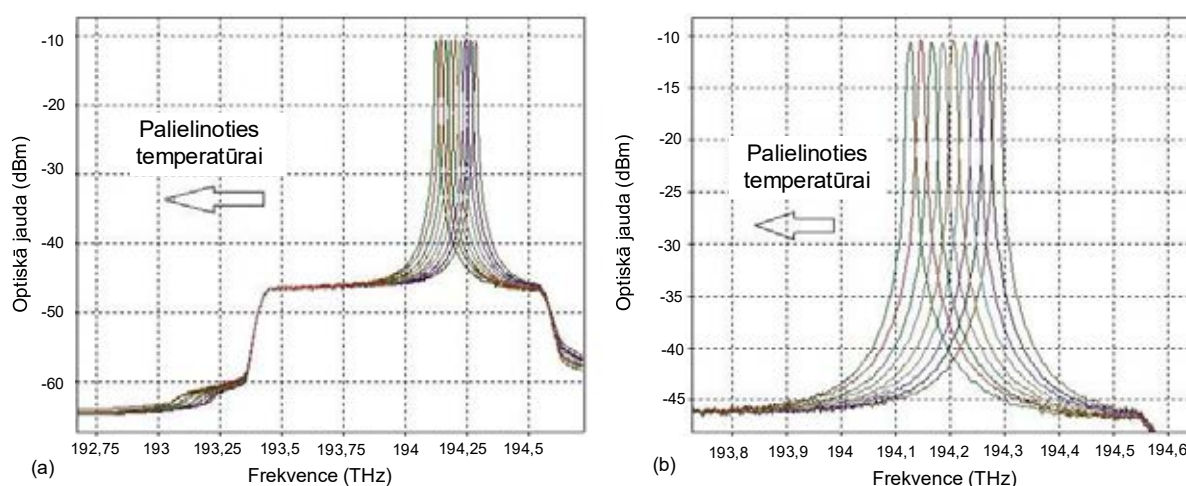
Vissvarīgākais uzdevums šī pētījumā ir elastīga sensoru un sakaru simulācijas modeļa izstrāde, kas vienlaikus nodrošina *FBG* optisko sensora tīkla un datu kanālu pārraidi. Ir svarīgi izpētīt temperatūras izmaiņu ietekmi un saprast, cik lielā mērā temperatūra ietekmē optisko sensoru atstaroto signālu viļņu garumus jeb frekvences. Tas ļauj noteikt šo sensoru precizitāti un praktisko lietojumu. Simulācijas laikā 5 *FBG* šķiedras optiskie sensori ir pakļauti temperatūras izmaiņām no -40 °C līdz +120 °C ar soli 20 °C (2.1. tab.).

Izstrādātajā modelī ir iespējams nomērīt viļņa garumu un frekvenču izmaiņas abiem – gan pārraidītajiem, gan atstarotajiem sensoru signāliem. Tika veiktas 9 simulācijas, kuru laikā tika novērotas temperatūras izmaiņas un ietekme uz visiem *FBG* optiskajiem sensoriem. Šajā gadījumā ir svarīgāk aplūkot *FBG* sensoru atstarotos signālus un efektu, kādu atstāj temperatūras izmaiņas uz centrālajām frekvencēm, jo tieši atstarotie signāli nonāk *FBG* sensoru apstrādes iekārtā (angļu val. *interrogator*).

Temperatūras ietekme uz *FBG* sensoru atstarotā signāla centrālo frekvenci

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

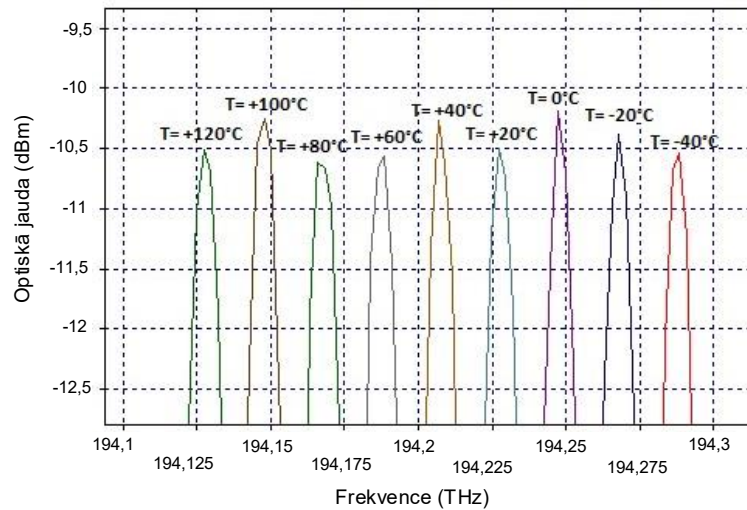
Līdz ar temperatūras pieaugumu, katra sensora atstarotā optiskā signāla frekvence samazinājās, savukārt viļņa garums apgriezti proporcionāli pieauga (2.2. att.).



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

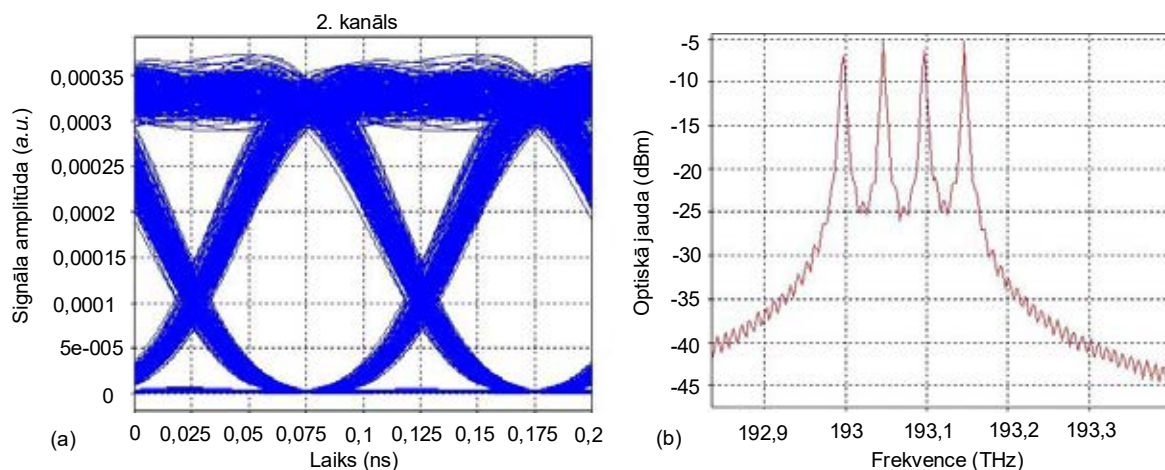


Attēlos 2.2. un 2.3. ir parādīta pirmā *FBG* optiskās šķiedras sensora atstarotā signāla centrālās frekvences izmaiņas atkarībā no temperatūras izmaiņu ietekmes. Attiecīgi katri 20 °C radīja 0,02 THz jeb 20 GHz frekvenču izmaiņas ar vidējo vērtību 0,001 THz jeb 1 GHz uz 1 °C grādu.



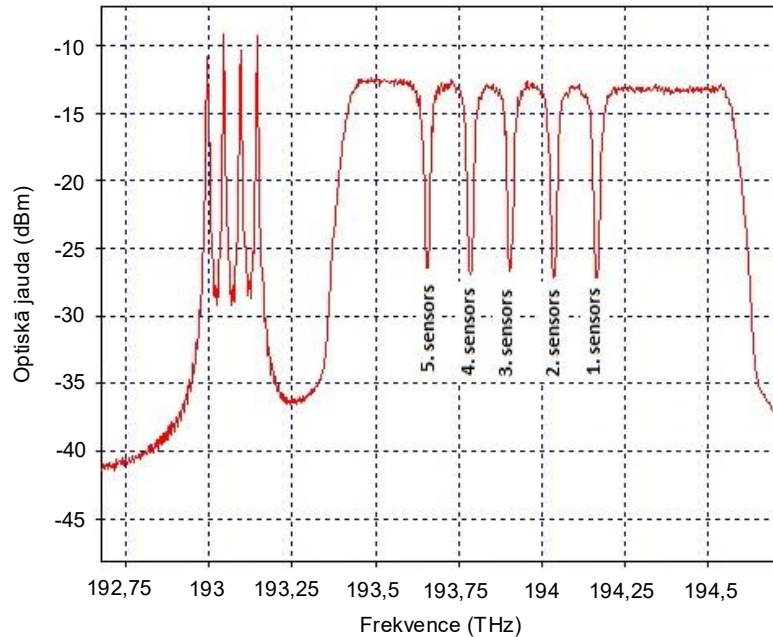
2.3. att. Detalizētāka informācija par pirmā *FBG* optiskās šķiedras sensora atstarotā signāla centrālās frekvences izmaiņām atkarībā no vides temperatūras pieauguma.

2.4. attēlā ir redzams, ka šādu optisko sensoru sistēmu var integrēt optiskajā datu pārraides sistēmā. Savukārt, 2.5. attēlā var redzēt, ka, izmantojot *AWG* iekārtu, visi četrus datu kanālus var relatīvi vienkārši izņemt no kopējā signāla, kas arī ietver *FBG* filtrētu *ASE* avota spektru.



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

Autora pētījumā ir aplūkota līdzaspastāvēšana ar *FBG* sensoru tīklu un *DWDM-PON* 4 kanālu sistēmu, kuras pārraides ātrums ir 10 Gbit/s ar 50 GHz starpkanālu intervālu 20 km garā pārraides līnijā, nodrošinot bezkļūdu signāla pārraidi (angļu val. *error-free*, pieņemts  $BER < 10^{-9}$  [35, 72, 132]). Statistiski aprēķinātais  $BER$  uztvertajam signālam ir aprēķināts kā  $1 \times 10^{-40}$ .



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

Kopumā, balstoties uz autora rekomendācijām, šādu *OptSim* modeli var izmantot, lai to varētu pielāgot turpmākiem darbiem, kas saistīti ar objektu *SHM* vajadzībām.

### 2.3. Secinājumi

Šajā nodaļā tika izpētīts viens no optiskās sensoru tehnoloģijas veidiem, kas ir balstīts uz šķiedras Brega režģi, kā arī ir testēta vairāku *FBG* sensoru darbība, ko var nodrošināt vienas optiskās šķiedras ietvaros, samazinot signālu apstrādes iekārtu nepieciešamo daudzumu kopējās sistēmas vajadzībām. Tika konstatēts, ka optisko piecu sensoru tīklu var pilnībā integrēt jau esošā vai arī jaunā optiskā pārraides sistēmā, nodrošinot bezkļūdu datu pārraidi ( $BER < 10^{-9}$ ) pie 10 Gbit/s bitu pārraides ātruma 20 km garā, standarta vienmodas optiskās šķiedras līnijā, ar 4 datu kanāliem, kuru starpkanālu intervāls ir 50 GHz, atbilstoši *ITU-T* G.694.1

rekomendācijām [57]. 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  $1\text{ GHz}$  ( $8\text{ pm}$ ) uz  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pieejamā frekvenču josla šajā gadījumā bija no  $192\text{ THz}$  līdz  $195,9\text{ THz}$ , ko ierobežoja izmantotā platjoslas *ASE* gaismas avota spektra platums. Ņemot vērā to, 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  $0,16\text{ THz}$  jeb  $160\text{ GHz}$ . 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.

### 3. *FBG* OPTISKO SENSORU TĪKLA UN ŠĶIEDRU OPTISKĀS DATU PĀRRAIDES SISTĒMAS KOPDARBĪBAS IZPĒTE

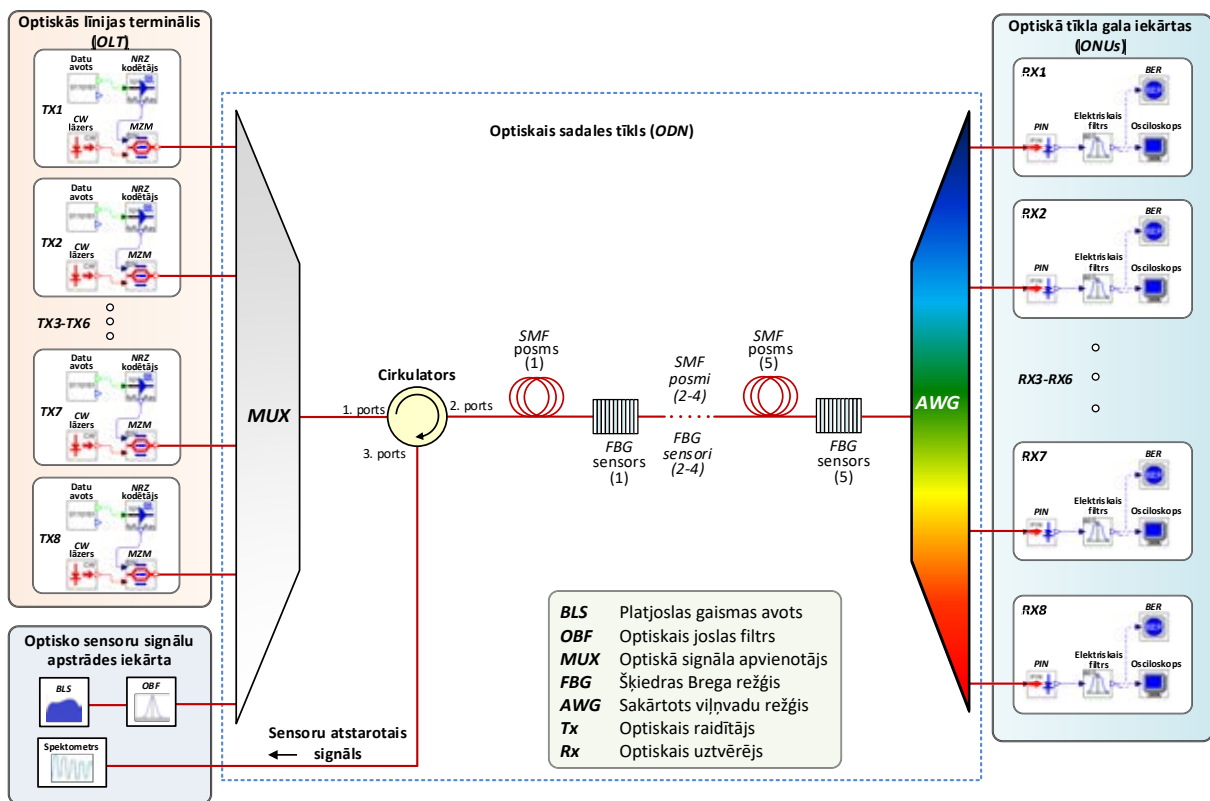
Kā tika minēts iepriekšējās nodaļās, ir svarīgi aplūkot un izpētīt *FBG* optisko sensoru tīkla infrastruktūras kopdarbību ar šķiedru optiskajām datu pārraides sistēmām. Izpētot šādas sistēmas darbības kvalitātes rādītājus, kopējo un katras atsevišķas sistēmas veiktspēju, kā arī iespējamus risinājumus, 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.

#### 3.1. Apvienota *FBG* optisko sensoru un blīvas *WDM-PON* datu pārraides sistēmas tīkla novērtējums

Šajā nodaļā simulācijas veidošanai ir izmantota *RSoft OptSim* programmatūra, kurā tika izmantoti nomērītie amplitūdas frekvence reakcijas dati, kas bija iegūti no komerciāli pieejama optiskā temperatūras sensora. Esošais optiskais sensors ir jutīgs, izturīgs temperatūras sensors, kas ir balstīts uz *FBG* tehnoloģiju. Šis modelēšanas mērķis ir izstrādāt simulācijas darbības modeli, kas nodrošina veiksmīgu *FBG* optisko temperatūras sensora tīkla sadarbību ar 8 kanālu blīvu viļņgarumdales blīvētu pasīvo optisko tīklu (*DWDM-PON*) (3.1. att.).

Izstrādātais modelis tālāk tika izmantots temperatūras ietekmes novērošanai attiecībā uz sensoru signāliem (optiski atstarotajiem signāliem no *FBG*), kā arī, lai novērotu un aprēķinātu minimālo starpkanālu intervālu, kas bija būtiski tālāk analizējamam 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 izslēgtu režīma modulācijas shēmu *NRZ-OOK*. *OLT* ar 10 Gbit/s raidītājiem atrodas pakalpojuma sniedzēja pusē.

No strukturālā viedokļa, dažu elementu konfigurācijas tika veikta balstoties uz iepriekšēju pētījumu [123], kur katrs raidītājs ietver 10 Gbit/s pseidogadījuma bitu secības (*PRBS*) datu avotu, *NRZ* koderi, *MZM* ar 20 dB *ER* un 3 dB ienestajiem zudumus, kā arī *CW* lāzeru ar izejas jaudu +3 dBm.



3.1. att. Izstrādātais sistēmas modelis, kas ietver 5 *FBG* temperatūras sensoru tīklu un ir apvienots ar 8 kanālu 10 Gbit/s *NRZ-OOK DWDM-PON* pārraides sistēmu.

Šiem astoņiem *DWDM-PON* datu kanāliem centrālās frekvences tika noteiktas šādi: 192,90 THz, 192,85 THz, 193 THz, 193,05 THz, 193,1 THz, 193,15 THz, 193,2 THz, 193,25 THz. Saskaņā ar *ITU-T G694.1* rekomendācijām [57], datu kanālu atstatums ir iestatīts uz 50 GHz. Pēc tam, visi astoņi datu pārraides kanāli ir savienoti ar optisko savienotāju (*MUX*) tālākai pārraidei optiskā sadales tīklā.

Kas attiecas uz gaismas avotu, sensoru tīklam kā platjoslas gaismas avots (*BLS*) ir izraudzīts superluminiscences diode (*SLED*). *BLS* gaismas avota optiskā josla no 193,7 THz līdz 195,3 THz ir izraudzīta *FBG* optisko sensoru izvietojšanai. *SLED* avota amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs bija eksperimentāli izmērīts RTU ŠOPS laboratorijā, pēc kā vēlāk, tā amplitūdas raksturlīkne – frekvenču atbildes reakcijas dati, tika ievietoti simulācijas modelī. Ja aplūko spektrālās intensitātes svārstības šajā noteiktajā frekvenču reģionā, var novērot, ka tās ir relatīvi niecīgas – mazākas par 0,37 dB, un izejas jauda ir iestatīta -9 dBm. *SLED* gaismas avots, kas turpmāk tiks izmantots kā barošanas avots optiskajiem *FBG* sensoriem, pēc tam ir filtrēts ar optisko joslas filtru un nosūtīts uz optisko signālu savienotāju (*MUX*), kur tas ir savienots jau ar 8 datu kanāliem no *OLT* (3.1. att.). Šajos uzstādījumos,

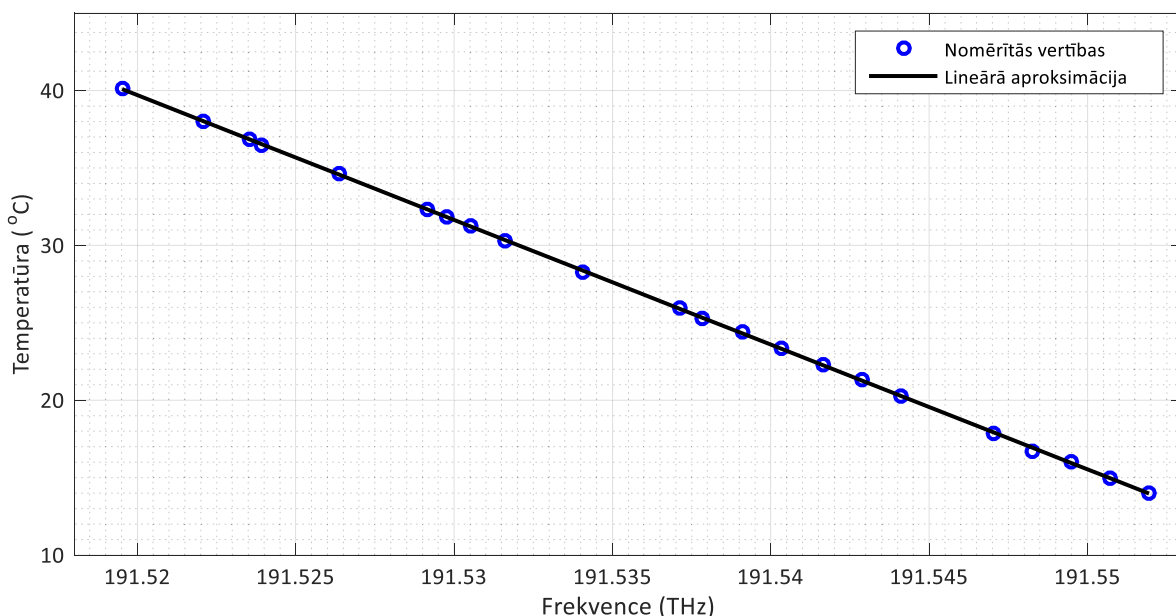
optiskais cirkulators ir izmantots signālu pārraides virzienu atdalīšanai, lai atdalītu *FBG* sensoru atstarotos signālus no pārraidāmajiem, caurejošajiem signāliem un gaismas avota. Ietekme uz pārraides spektru no cirkulatora puses ir niecīga, jo cirkulatora darbības joslas platums ir pietiekoši plašs (1525 – 1510 nm viļņa garumā vai 186,206 – 196,585 THz frekvencē), savukārt virziena spēja ir > 50 dB un izolācija > 40 dB. Pārraides shēmas vidus daļā ir optiskais sadales tīkls, kas satur 5 *FBG* temperatūras optiskos sensorus un 5 *SMF* posmus, veidojot piecas sekcijas ar četrus km gariem vienmodas šķiedru optiskās līnijas garumiem starp katru sensoru. Līdz ar to, kopējais optiskās līnijas garums ir 20 km. Posmu garums tika izraudzīts četri kilometri, pamatojoties uz datiem, ka parasti šāds attālums tiek izmantots Latvijā starp optisko šķiedru kabeļu skapjiem jeb sakaru akām, kur ir izvietota optisko šķiedru noslēgumi vai savienošanas punkti. Turklāt, fakts, ka katrs sensors atrodas dažādos attālumos no optiskā signāla apstrādes iekārtas sniedz iespēju novērtēt apvienoto sistēmu dažādu scenāriju gadījumā.

Kā redzams 3.1. attēlā, pēc pēdējā *FBG* sensora atrodas demultiplexors datu pārraides kanālu atdalīšanai, un šeit ir izraudzīts *AWG*, kā arī *ONU*. Optiskā sensora signāla uztvertā kvalitāte tiek mērīta ar spektrometru, kas ir arī vienots pie optiskā cirkulatora. Kā optiskos uztvērējus šajā gadījumā lieto *PIN* fotodiodes ar -17 dBm jutību attiecībā pret *BER* līmeni  $10^{-10}$ . *PIN* izeja ir savienota ar elektrisko Beseļa zemfrekvenču filtru, kuram ir 7,5 GHz 3 dB nogriešanas (angļu val. *cut-off*) frekvence. Pēc tam pievienots ir elektriskais osciloskops un *BER* aprēķinātājs. Šī apvienotā shēma nodrošina divu, iepriekš minēto, sistēmu līdzās pastāvēšanu. Kā var novērot šajā pētāmajā optisko sensoru tīkla modelī, tad *DWDM* datu pārraides kanālu ietekme uz optiskajiem sensoriem bija niecīga, izraisot vienīgi nelielu, optiskā signāla attiecības pret troksni, samazināšanos uztvertajiem datu signāliem. Citiem vārdiem sakot, veidojot sarežģītāku kopējo sistēmu (apvienojot abas sistēmas, iekļaujot vairāk ierīču un elementus kopumā), tas izraisa jaudas zudumu optiskajā sensoru tīklā. Ir būtiski arī atcerēties, ka līdz ar abu sistēmu apvienošanu, šķērsruna (angļu val. *crosstalk*) jeb signālu mijiedarbība ir neizbēgama un tādējādi abu sistēmu savstarpēju iejaukšanos var novērot. Papildu tam, signāla trokšņi šajā gadījumā ir sagaidāmi, pamatā jau katra simulācijas shēmas elementa dēļ. Tomēr, lai padarītu šo apvienoto shēmu resursu un izmantotā spektra ziņā efektīvāku, ir svarīgi novērtēt un aprēķināt minimālo *FBG* sensoru centrālo frekvenču (kanālu) starpkanālu intervālu vai frekvenču joslu, kā arī izstrādāt algoritmu, kas nodrošinātu precīzu optisko sensoru atstaroto signālu centrālo frekvenču maksimumu noteikšanu. Šādi aspekti ir izpētīti turpmākajās apakšnodaļās.

### 3.1.1. Minimāli pieļaujamā optisko sensoru starpkanālu intervālu izpēte

Šī 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, bet frekvences atbildes reakcija uz temperatūras izmaiņām ir 1,279 GHz pret 1 °C. Šī FBG temperatūras optiskā sensora atstarošanas spēja ir lielāka par 15 %.

Pētījumā salīdzināta ir arī temperatūras sensora mērāmās temperatūras un frekvences korelācija, kas iegūta no tehniskās specifikācijas, salīdzinājumā ar reāli izmērīto. Lai to īstenotu, pirmkārt, FBG optiskais sensors ir uzsildīts, tādējādi nodrošinot iespēju nomērīt plaša klāsta FBG atstarotā signāla optisko spektru temperatūras diapazonā no +14 °C līdz +40 °C. Šajā diapazonā, temperatūras atbildes reakcijas frekvence šim FBG atstarotajam signālam eksperimentāli ir nomērīta, un tās rezultāts norāda uz 1,231 GHz izmaiņām attiecībā pret 1 °C izmaiņu. No šī ir iegūts lineārs vienādojums ( $Y = -805,433538 \times X + 154296,331452$ ), kas raksturo temperatūras un frekvences korelāciju FBG optiskajam sensoram (3.2. att.).

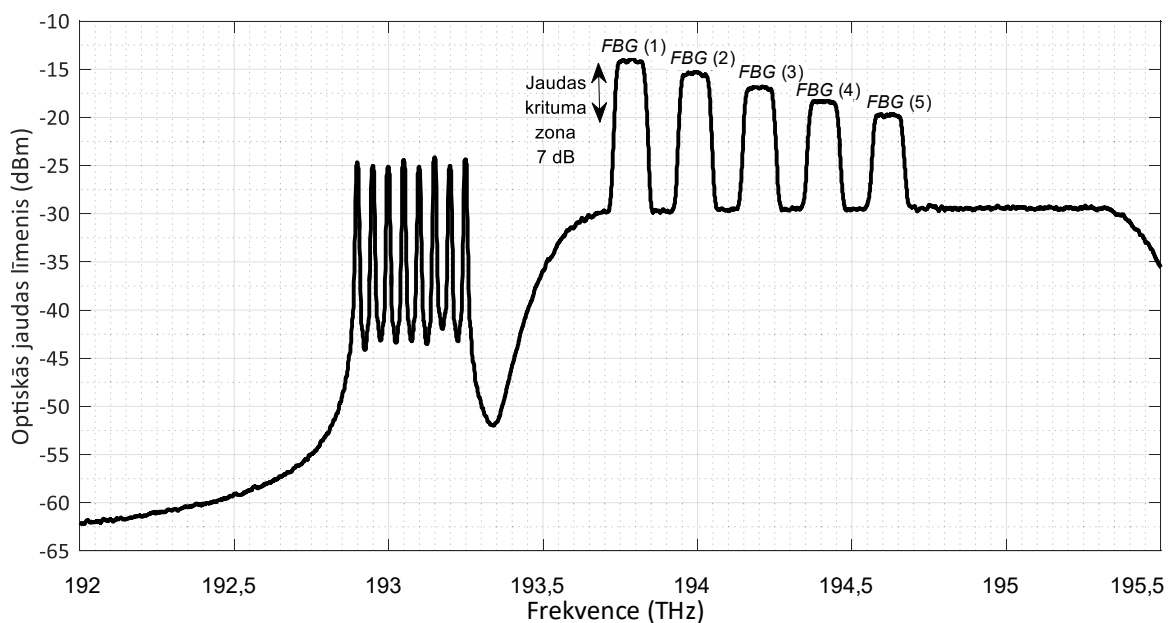


3.2. att. Eksperimentāli nomērītie dati un to lineārā aproksimācija, kas attēlo temperatūras un frekvences korelāciju komerciālām FBG optiskajam temperatūras sensoram.

Kā redzams, eksperimentāli nomērītās FBG atbildes reakcijas un ražotāja norādītās teorētiskās vērtības starpība ir tikai 3,9 %. Līdz ar to, tālākā pētījuma gaitā ir izmantota vērtība,

kura tika iegūta veicot eksperimentālus mērījumus. Šī atbildes reakcijas datu vērtība ir izšķirošs faktors optisko sensoru minimālo starpkānālu atstatuma novērtēšanai un analīzei.

3.3. attēlā var redzēt kombinētās sistēmas simulēto spektru pie 0 °C vides temperatūras, kas ietver 5 optiskos *FBG* sensoru kanālus (*FBG* atstarotos signālus), kā arī 8 datu kanālus, kas ir nomērīti ar simulācijas modelī iestrādāto spektrometru (joslas platumu izšķirtspēja uzstādīta 0,07 nm un tas ir 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, 8 datu kanāli šeit ir redzami kā ievērojami pavājināti.



3.3. att. Apvienotās sistēmas amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ar 5 *FBG* optisko sensoru atstarotajiem signālu centrālo frekvenču maksimumiem un 8 datu kanāliem (spektrs iegūts izmantojot spektrometru, kas ir iekļauts optisko sensoru apstrādes iekārtā) pie 0 °C vides temperatūras.

Tālāk ir novērtēts nākamais būtiskais *FBG* parametrs, kas šajā gadījumā ir 5 *FBG* optisko sensoru vidējais spektrālais platums optiskā sensoru signālu optiskās jaudas krituma zonā 7 dB (3.3. att.). Šeit, 7 dB optiskās jaudas krituma zona, neattiecas tikai uz pirmā optiskā sensora kanālu, bet gan arī uz katras no pārējiem 4 atstarotā sensora signāla maksimālajām amplitūdām.

Jaudas krituma zonas (angļu val. *power drop zone*) vērtība tika aprēķināta, izmantojot vienādojumu, kas ir balstīts uz iepriekšēju pētījumu [124]:



$$P_{\text{jaudas kritums}} = 10 \cdot \log(n) = 10 \cdot \log(5) = 7 \text{ dB}, \quad (3.1)$$

kur  $P_{\text{jaudas kritums}}$  (dB) ir optiskās jaudas krituma zona un  $n$  ir sensoru skaits.

Vienādojums ir veidots, analizējot optiskā sensora atstaroto signālu pārklāšanos, gadījumos, kad ir vērojamas dažādas temperatūras izmaiņas optisko sensoru tiešā tuvumā, kā arī sensoriem esot tuvu viens otram. Tāpat arī šī iegūtā vērtība ir balstīta novērtējot [124] piedāvāto minimālo jaudas krituma zonas diapazona vērtību, kas tad arī būtu jāsauglabā, saistībā ar sensoru atstaroto signālu vērtībām pie šāda veida konfigurācijām. Izmantojot šo informāciju, ir iespējams piedāvāt vienādojumu, kas apraksta šāda veida aprēķinus. Šis vienādojums ir lietots izvēloties un aprēķinot sliktāko scenāriju – izveidojot signālu pārklāšanos uz vienu no *FBG* optiskajiem sensoriem no visiem citiem *FBG* optiskajiem sensoriem. Balstoties uz mērījuma rezultātiem, vidējais spektrālais platums optisko sensoru atstaroto signālu centrālo frekvenču maksimumiem, optiskajā jaudas krituma zonā 7 dB ir 109,8278 GHz. Šī vērtība ir tālāk izmantota, lai noteiktu blakus esošo *FBG* optisko sensoru minimālo frekvences joslas starpkanālu intervālu.

Sagaidāms, ka *FBG* sensora darba temperatūra, atbilstoši konfigurācijai, būs 80 °C diapazonā (no -20°C līdz +60°C), ierasti 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 iespējams izstrādāt vienādojumu, lai noteiktu katra optiskā sensora teorētiski minimālo starpkanālu intervālu (*CS*), kas tika integrēts esošajā sistēmā.

$$CS = bw_{avg} + (T_{tot} \times f_{var}), \quad (3.2)$$

kurā *CS* (GHz) ir sensoru starpkanālu intervāls,  $bw_{avg}$  (GHz) ir *FBG* sensoru atstaroto signālu vidējais spektrālais platums optiskajā jaudas krituma zonā 7 dB,  $T_{tot}$  (°C), savukārt, ir kopsummā paredzētais jeb sagaidāmais temperatūras svārstību diapazons, un  $f_{var}$  (GHz) ir *FBG* temperatūras sensoru atbildes reakcija uz atstarotā signāla centrālā maksimuma frekvences izmaiņām, citiem vārdiem sakot, frekvences izmaiņa uz 1 °C. Šīs vērtības eksperimentālais mērījums tika atspoguļots iepriekš šajā nodaļā. Ievietojot vienādojumā visus zināmos mainīgos, minimālais sensoru starpkanālu intervāla aprēķins ir:

$$\begin{aligned} CS &= bw_{avg} + (T_{tot} \times f_{var}) \\ &= 109.8278 + (80 \times 1.231) = 208.285 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Kanālu frekvenču sadalījuma plāns, pamatojoties uz iepriekš minētajiem *FBG* sensoru aprēķiniem, ir redzams 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Aprēķinātais frekvenču sadalījuma plāns izmantotajiem *FBG* optiskajiem temperatūras sensoriem

<b><i>FBG</i> sensora kārtas numurs</b>	<b>Frekvence (THz)</b>
1	193,800
2	194,008
3	194,217
4	194,425
5	194,633

Attiecīgi simulācijas modelī tika iestatītas šādas optisko *FBG* temperatūras sensoru signālu centrālās maksimumu frekvences, kā tas ir norādīts augstāk esošajā 3.1. tabulā, sākot no pirmā līdz piektajam sensoram, kas arī ir redzams 3.3. attēlā. Šāds frekvenču sadalījums tika izraudzīts ņemot vērā 10 Gbit/s pārraidāmo datu pārraides kanālu spektru, lai nodrošinātu stabilu, apvienotās *FBG* sensoru un *WDM-PON* datu pārraides sistēmu, darbību. Ar stabilu darbību ir domāta situācija, kur nav novērojama optisko sensoru kanālu un datu pārraides kanālu savstarpēja spektrāla pārklāšanās, kā arī tos ir iespējams nomērīt un izpētīt (gan optisko sensoru kanālu, gan pārraides datu kanālu) bitu kļūdu attiecību, kas ir ne augstāka, kā, piemēram,  $10^{-9}$ . Šīs frekvences (3.1. tab.) nosaka *FBG* optisko sensoru signālu maksimumu frekvences, kur maksimumam ir novērojama maksimālā frekvenču amplitūdas vērtība. Tomēr, ņemot vērā *FBG* sensoru atstaroto signālu spektra neregulāro dabu, ne vienmēr punkts, kas ir augstākā amplitūdas vērtība ir precīzs vidus punkts jeb centrālā frekvence pašam optiskā sensora signāla maksimumam. Līdz ar to, ir svarīgi izstrādāt algoritmu, kas ļauj precīzi noteikt *FBG* centrālās frekvences, tādējādi samazinot sensoru mērījumu kļūdu.

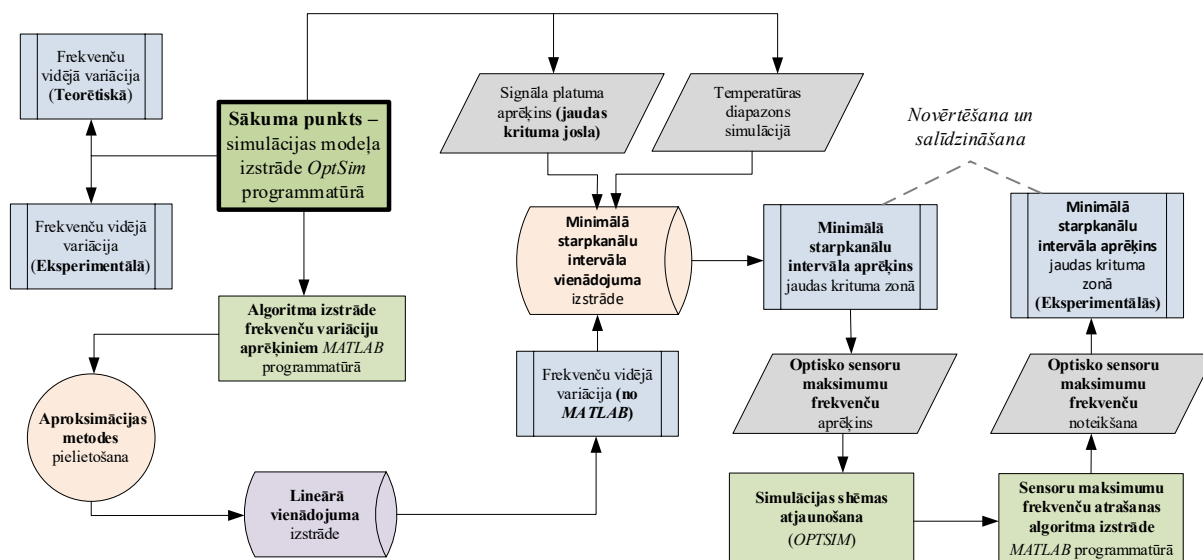
### 3.1.2. Uzlabotas precizitātes *FBG* optisko sensoru signālu spektrālo maksimumu apstrādes algoritma izstrāde

Ja visi *FBG* signāli ir vienādi vājināti (piemēram, fiziski izvietoti vienā un tajā pašā vietā), bet spektrāli izvietoti salīdzinoši atsevišķi viens no otra, kā arī *FBG* sensoriem ir vienmērīga frekvenču amplitūdas raksturlīkne, tad *FBG* signālu apstrāde nav sarežģīts uzdevums. Neskatoties uz to, pastāv dažas grūtības reālos lietojumos, situācijas, kad *FBG* optiskie sensori atrodas dažādās fiziskās lokācijās, tāpēc katrs *FBG* optiskā sensora signāla maksimums var saskarties ar atšķirīgiem vājinājumiem un to apjomu. Piemēram, situācijās, kad uz vienas optiskās šķiedras ir virknē savienoti vairāki *FBG* optiskie sensori, un tie atrodas dažādos attālumos viens no otra, var novērot atšķirīgu vājinājuma apjomu (optiskās jaudas samazināšanos) uz katru optiskā sensora atstarotā signāla maksimuma [115]. Tas parasti izraisa gadījumus, kad daži no optiskā sensora atstarotā signāla frekvences maksimumiem var būt ļoti novājināti, salīdzinājumā ar tiem optisko sensoru atstarotajiem signālu maksimumiem, kas ir fiziski tuvāk novietoti pie signālu apstrādes iekārtas. Neaizmirstot, ka gaisma caur optisko šķiedru pārraidās divas reizes – pirmo reizi cauri optiskajiem sensoriem un pēc tam, atstarojoties atpakaļ uz optisko cirkulatoru. Šajā gadījumā ir būtiski noteikt precīzu centru sensora signāla atstarotajam maksimumam, lai veiktu sistēmas optimizāciju, kā arī efektīvu pieejamā frekvenču spektra izmantošanu un saglabāšanu. Attiecīgi, ja sensors atrodas tālāk prom no signāla apstrādes iekārtām, tad tā signāls ir vājāks, kā tas redzams 3.3. attēlā.

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 (3.4. attēlā). Šis attēls atspoguļo izpētes procesu sākot no simulācijas modeļa un beidzot ar algoritma izstrādi (*MATLAB* algoritms), lai noteiktu precīzas sensoru atstarotā optiskā signāla spektra maksimumu centrālās frekvences.

Kā parādīts 3.4. attēlā, pamatojoties uz izmērīto temperatūras atbildes reakciju uz *FBG* sensoru atstaroto signālu maksimumu frekvencēm, kā arī minimālo starpkanālu intervāla vienādojumu, ir iespējams noteikt un novērtēt minimālo *FBG* starpkanālu intervālu, kas arī ir viens no galvenajiem mērķiem šī pētījuma laikā. Pēc tam pētīti ir sensoru signālu centrālo frekvenču maksimumu aprēķini, un, atjaunojot *OptSim* simulācijas modeli ar jaunajām korekcijām, ir iespējams izstrādāt jaunu algoritmu (izveidots kā *MATLAB* kods), lai noteiktu precīzu centra punktu sensoru atstaroto signālu centrālajiem maksimumiem, kas bija vēl viens šī pētījuma mērķis. Kad tas ir pabeigts, ir iespējams salīdzināt tradicionālo pieeju, kur par

optiskā sensora atstarotā signāla maksimuma centrālo frekvenci tiek uzskatīts tā intensitātes augstākais punkts (standarta metode automātiska maksimumu noteikšanā), attiecībā pret autora piedāvāto algoritmu, kur optiskā sensora atstarotā signāla maksimuma centrālā frekvence ir precīzs šī centra punkts.

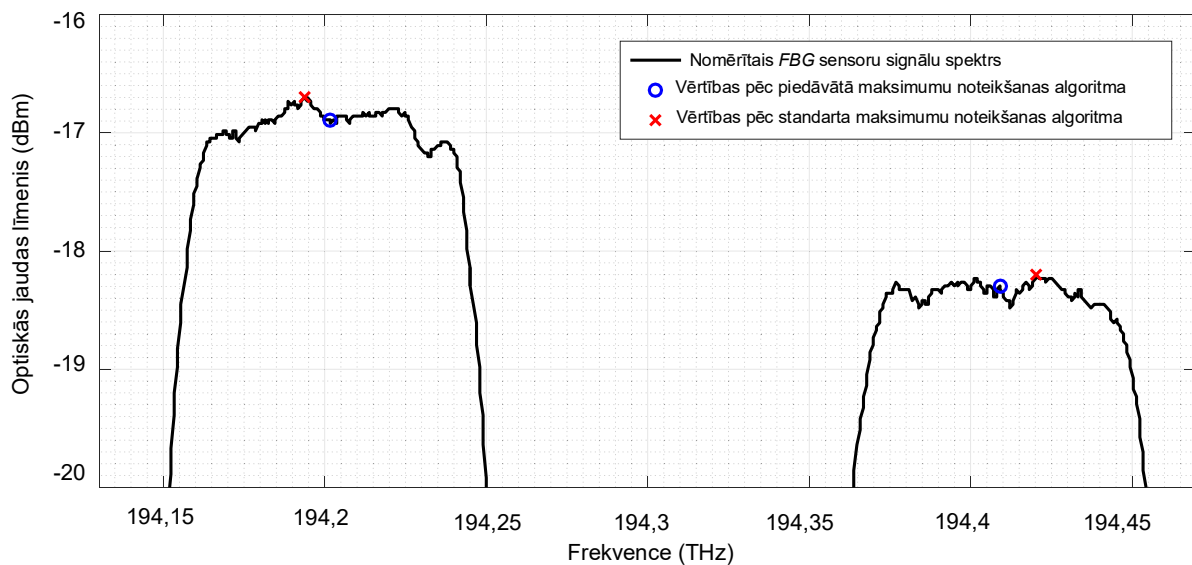


3.4. att. Optisko sensoru atstaroto signālu precīza maksimumu (centrālo frekvenču) noteikšanas algoritma izstrādes diagramma.

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 (attēloti kā “x” 3.5. attēlā), kas nodrošina automātisku optisko sensoru atstaroto signālu maksimumu meklēšanu, atšķirībā no autora piedāvātā algoritma, nesniedz nepieciešamos rezultātus, kā tas redzams 3.5. attēlā.

Kā parādīts 3.5. attēlā, *FBG* optiskā sensora atstarotās šaurās frekvenču joslas centrālās frekvences noteikšana nav viegls uzdevums, pamatā jau tā neregulārās amplitūdas dēļ. Lai atrisinātu šo problēmu, ir izveidots algoritms *MATLAB* programmatūrā, kur tika importēti dati par sensoru signāliem no *OptSim* simulācijas shēmas, kas minēts iepriekš šajā darbā. Autora pieeja un metode ir līdzīga plaši izmantotajai impulsa platuma mērīšanas metodei zināmai kā *FWHM*. Lai noteiktu precīzu centru katram *FBG* optiskajam sensora atstarotā signāla maksimumam, autora aprēķini ir balstīti uz relatīvo, šo maksimumu jaudas līmeni, kas ir vienāds ar 90 % no maksimālās amplitūdas vērtības. Kad algoritms ir noteicis 90 % jaudas

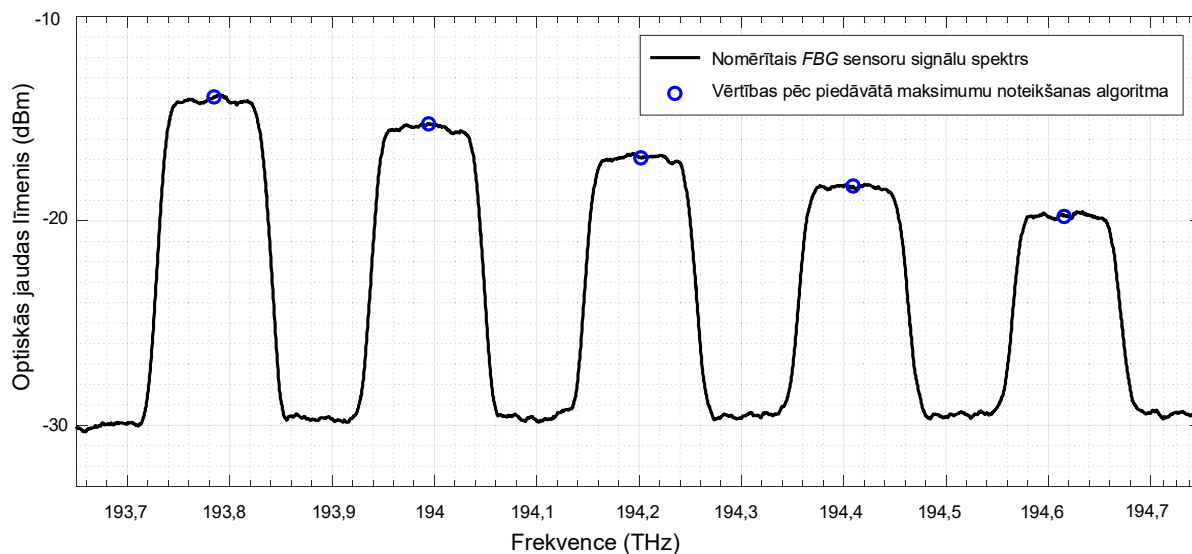
līmeni, tas uzsāk noteikt spektra vērtības abās pusēs – pa kreisi un pa labi. Brīdī, kad šīs vērtības ir iegūtas, tas matemātiski sasummē abas vērtības kopā un izdala skaitli ar divi. Pēc tam, no šī punkta 90 % jaudas līmenī, algoritms uzsāk meklēt spektrālo punktu, kas ir pozicionēts uz augšu, līdz brīdim, kad tas sasniedz precīzu punktu, kas tad arī ir vēlamais precīzais atstarotā signāla maksimuma viduspunkts. Lietojot šādu metodi, *FBG* signālu apstrādes precizitāte ir uzlabota un, iespējamība, ka tiek noteikti nepareizi optisko sensoru atstaroto signālu maksimumi frekvenču spektra neregularitātes dēļ, ir izslēgta.



3.5. 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.

Tad, kad ir sagatavots šāds algoritms, tas sniedz iespēju apstrādāt spektra datus katram sensoram un noteikt precīzas frekvences centru katram *FBG* atstarotajam signālam (3.6. att. un 3.2. tab.).

Zinot, ka *FBG* starpkanālu intervāls tiek aprēķināts kā divu blakus esošu *FBG* signālu maksimumu centru starpība un, ka aprēķinu laikā mainīsies jauniegūtās maksimālās centrālās frekvences vērtības (3.1. tab.), bija saprotams, ka mainīsies arī starpkanālu intervāls jeb atstatums. Līdz ar to, 3.2. tabulā ir apkopotas noteiktās jaunās centrālās frekvences *FBG* optisko sensoru signāla maksimumiem, kā arī veikts salīdzinājums ar iepriekš iegūtajām vērtībām, kuras tika aprēķinātas pēc sākotnējās, standarta optiskā spektra maksimumu nolašu metodes. Pēc šiem rezultātiem var noteikt un salīdzināt arī starpkanālu intervālu vērtības.



3.6. att. 5 *FBG* optisko sensoru atstaroto signālu amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ar precīzi noteiktām centrālām maksimumu frekvencēm izmantojot autora piedāvāto algoritmu.

Kā redzams 3.2. tabulā, ir novērojama aprēķināto un nomērīto frekvenču (GHz) vērtību starpība. Šī vērtība attēlo abu izmantoto algoritmu kļūdu atšķirību.

3.2. 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
<b>Starpkanālu intervāls (GHz):</b>	<b>208,285</b>	<b>207,746</b>	<b>0,539</b>

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 maksimumu noteikšanu un starpkanālu intervāla vērtības piemērošanu.

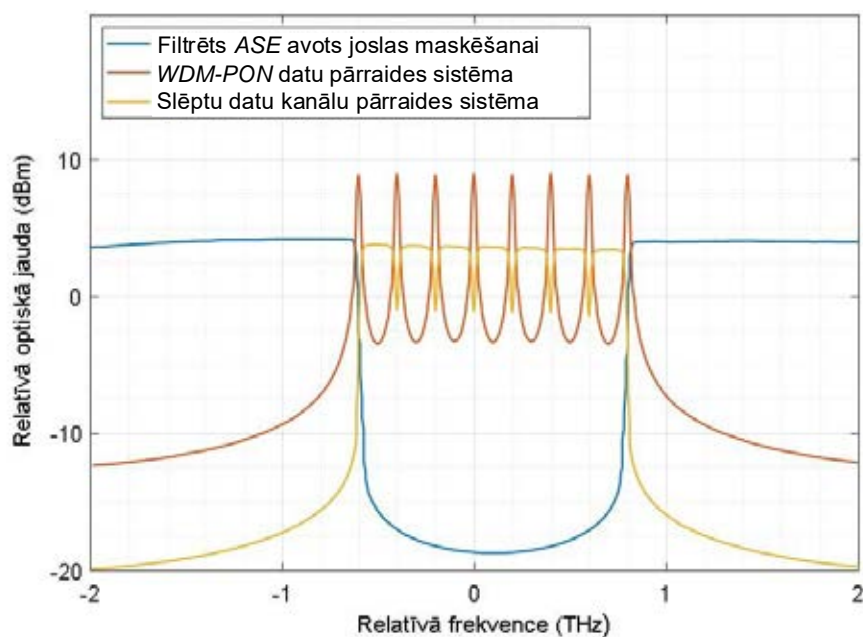
### 3.1.3. Secinājumi

Šajā nodaļā ir parādīta 5 *FBG* optisko sensoru tīkla un 8 kanālu *NRZ-OOK* modulētu 10 Gbit/s optiskās šķiedras datu pārraides sistēma. Pētījuma laikā tiek izstrādāts vienādojums, lai aprēķinātu optisko sensoru minimālo starpkanālu intervālu, kas sniedz iespēju noteikti blakus esošo optisko *FBG* sensoru minimālo frekvenču joslu, nodrošinot, ka to atstarotie signāli nepārklājas noteiktajā frekvenču apgabalā. Iegūtie rezultāti parādīja, ka šajā gadījumā, starp divu blakus esošu *FBG* temperatūras sensoru starpkanālu intervāls 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.

### 3.2. Hibrīdas *WDM* sakaru sistēmas ar slēptiem datu kanāliem un šķiedru optisko sensoru tīklu izstrāde

Iepriekš veiktajos pētījumos [67, 125], *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, kuru aizņem *ASE*, kas ir rezervēts slēptiem datiem frekvenču joslā, autora pētījums tiek veikts citādi. Viena, modulēta *ASE* šķēle, kura satur slēptus datus, tiek ievietota starp katru, uz lāzera gaismas avota balstītu, *WDM-PON* datu pārraides kanālu, kā tas ir redzams 3.7. attēlā.

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 [113], piemēram, optisko sensoru datu pārraidei, kā tas tiks realizēts šajā pētījumā. Kā minēts vairākās publikācijās [26, 99], 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.



3.7. 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).

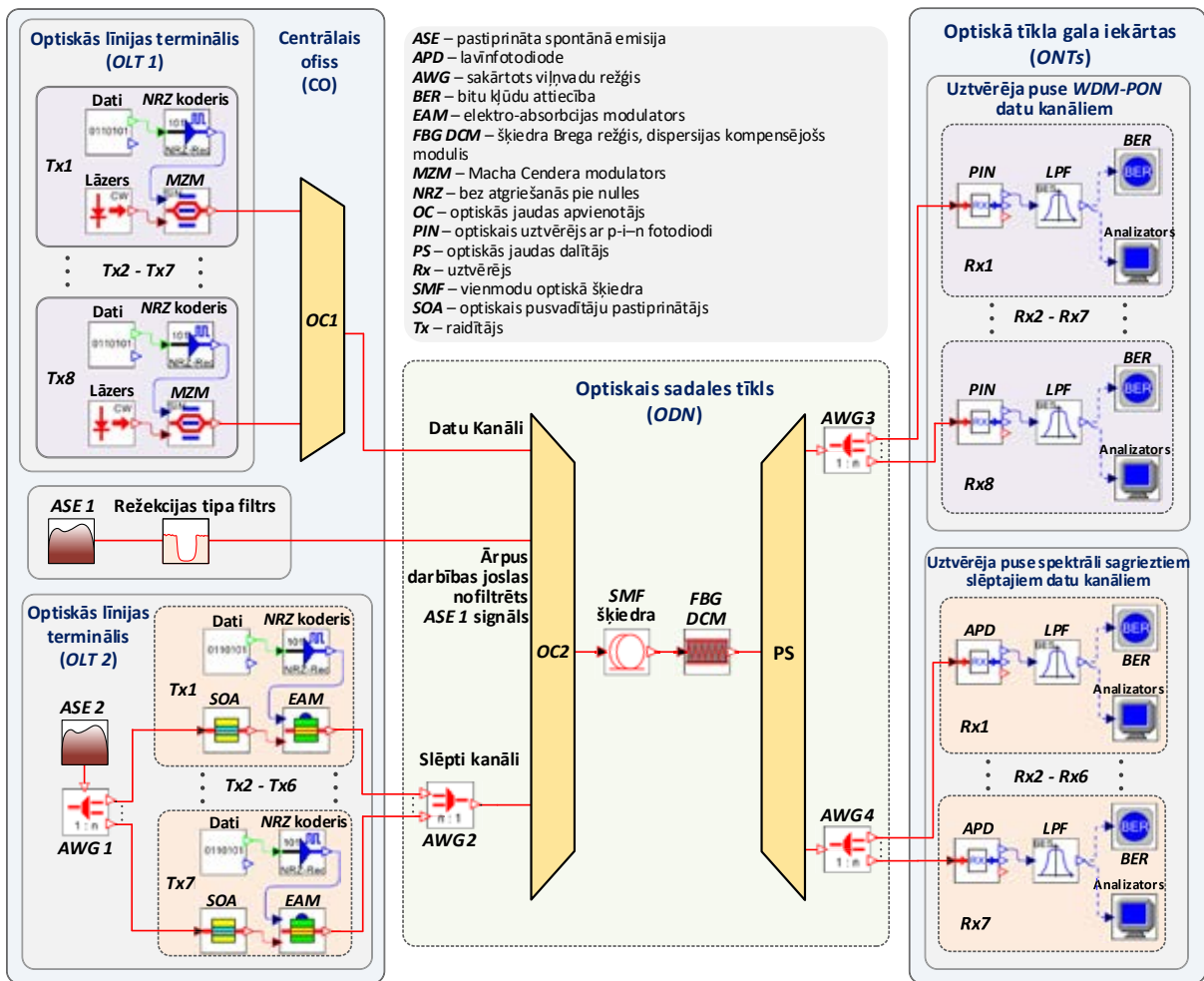
Šāda veida risinājums reprezentē reālas dzīves situācijas, kuru laikā slēpti datu kanāli būtu novietoti specifiskā spektra reģionā (piemēram, optiskajā C joslā, kura ir robežās no 1530 nm līdz 1565 nm [172]). Citādāk, balstoties uz pētījumu [26], slēptu sakaru signālu izvietošana būtu pamatā atkarīga no pieejamā spektra, visā publiskajā spektra diapazonā. Šāda veida metodoloģija, kur izvietošana notiek specifiskā reģionā, no matemātiskās statistikas puses samazina iespējamību, ka kāds spektra klausītājs un novērotājs varētu uztvert kādu slēptu datu plūsmu. Papildu tam, šajā darbā un konkrētajā pētījumā ir pētīta situācija, kur tiek veikta simulācija ar *WDM-PON* lāzera ģenerētu datu kanālu sistēmu, starp kuru ir izvietoti slēptie datu kanāli un apvienoti ar optisko sensoru sistēmu. Šādā veidā tiek izmantota priekšrocība situācijās, kad, piemēram, optiskā spektra noklausītājs būtu uzsācis savas darbības. Tā uzmanība primāri, visdrīzāk, būtu virzīta uz fiziski vizuāli redzamiem un viegli pamanāmiem signāliem tā vietā, lai meklētu, iespējams, paslēptus signālus. Lai gan mūsdienu pasaulē datu šifrēšanas mehānisms ir ierasts un vajadzīgs daudzos risinājumos, tomēr pievienot papildu datu un sistēmu drošības slāni, kas neprasa milzīgas papildu investīcijas šķiedru optiskās infrastruktūras pilnveidē, var šķist saistošs papildinājums gan kā biznesa, tā publiskā vidē.



Papildu tam, piedāvāto modeli var piemērot dažādu veidu datu pārraides drošības lietojumos kā tas ir pieminēts [99], piemēram, militāro sakaru vidē.

Šāda modeļa izstrādei tika izmantota *RSoft OptSim* simulācijas vide. Lai realizētu plānoto pētījumu, tiek izveidota hibrīda veida *WDM-PON* sistēma, kura ietver publisku datu pārraides sistēmu un slēptu datu sistēmu. Pēc sistēmas izveides, tā veikspēja tiek analizēta balstoties uz diviem scenārijiem. Pirmais scenārijs tiek izpildīts vienkāršajā savienojumā (angļu val. *back-to-back*), apstākļos bez optiskās pārraides šķiedras (bez optiskās līnijas). Savukārt otrajā scenārijā, esošajā hibrīda sistēma, starp raidītāja uztvērēja daļu tiek izmantota 20 km gara *ITU-T G.652* optiskā šķiedra. Attiecīgi vēlāk sasniegtie rezultāti tiek salīdzināti un novērtēti. Pēc tam, kad ir izveidota stabila *WDM-PON* datu kanālu un slēptu datu kanālu kopēja sistēma, kā arī veikts tās novērtējums, tad šajā sistēmas modelī tiek ievietota 5 *FBG* optisko sensoru sistēma, izmantojot jau esošu gaismas avotu.

Izveidotā simulācijas shēma (3.8. att.) ietver ierastu *WDM-PON* sistēmas arhitektūru (izņemot slēpto 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*). Papildu tam, vēl viens *ASE* avots (*ASE 1*) kopā ar caurejošo, režekcijas optisko filtru tiek izmantots centrālajā ofisā, lai nodrošinātu slēpto kanālu maskēšanu ārpus optiskās, slēptu kanālu sistēmas, darbības joslas. Šis gaismas avots ir pamats optisko sensoru darbības nodrošināšanai, tādējādi arī optimizējot 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.



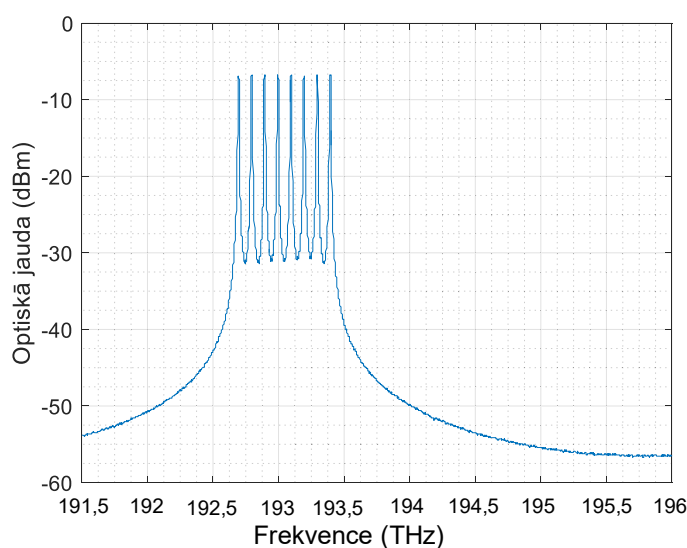
3.8. att. Hibrīda optiskās sakaru sistēmas simulācijas shēma ar 8 kanālu 10 Gbit/s (10,7 Gbit/s ieskaitot 7 % FEC OH) NRZ-OOK modulētu WDM-PON pārvades sistēmas daļu (augšējā daļa) un 7 kanālu 2,5 Gbit/s (2,675 Gbit/s ieskaitot 7 % FEC OH) NRZ-OOK slēptu maskēšanas kanālu sistēmas daļu (apakšējā daļa).

Kā redzams 3.8. attēlā, sākot no kreisās augšējās daļas, atrodas *OLT 1* ar astoņiem 10 Gbit/s NRZ-OOK modulētiem raidītājiem (3.9. attēlā ir redzams ģenerētais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs), kas attēlo spektrāli redzamus, privātus vai publiskus datu kanālus. Tur katrs raidītājs satur 10 Gbit/s  $2^{15}$ -1 garu PRBS15 datu avotu, kā arī NRZ koderi un 10 GHz MZM ar 3 dB ienestajiem zudumiem un 20 dB ER.

### 3.2.1. Izstrādātā hibrīdā WDM-PON modeļa veiktspējas novērtējums

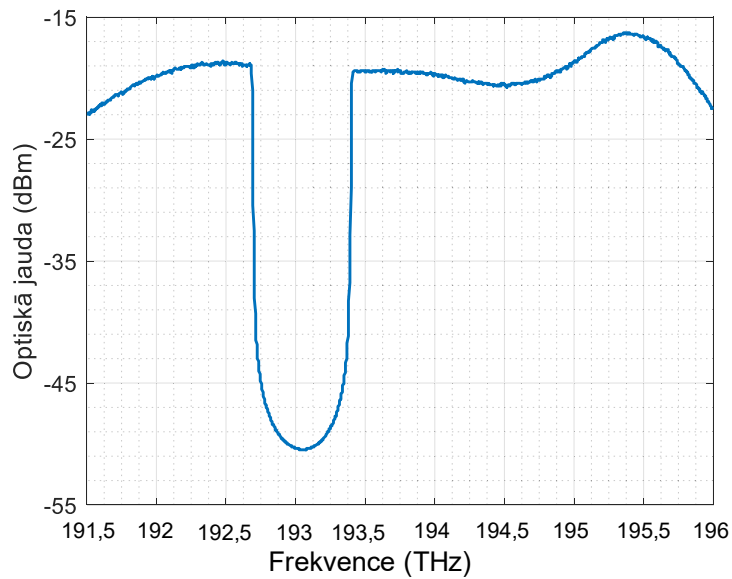
Ņemot vērā 7 % datu virstēriņu FEC OH (angļu val. *overhead*), simulētā bitu pārraide bija 10,7 Gbit/s. Kā gaismas avots priekš *OLT 1* tika ieviests CW lāzers ar izejas jaudu +3 dBm un 3-dB līnijas platumu 50 MHz. Starpkanālu intervāls WDM-PON sistēmas daļai ir iestatīts

100 GHz saskaņā ar *ITU-T* G.694.1 rekomendācijām [57], līdz ar to, centrālās frekvences visiem 8 raidītājiem ir iestatītas šādi: 192,7 THz, 192,8 THz, 192,9 THz, 193,0 THz, 193,1 THz, 193,2 THz, 193,3 THz un 193,4 THz. Katra *WDM-PON* raidītāja vidējā nomērītā izejas jauda ir -3 dBm. Tālāk, visus 8 datu kanālus apvieno ar optiskās jaudas apvienotāju (angļu val. *optical power combiner*) (*OC 1*) turpmākai sadarbībai ar abiem signāliem, kas ir ģenerēti ar *ASE* avotu – *ASE 1* un spektrāli sagrieztu un modulēto *ASE 2*. Uztvertais *OLT 1* izejas amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ir redzams 3.9. attēlā.



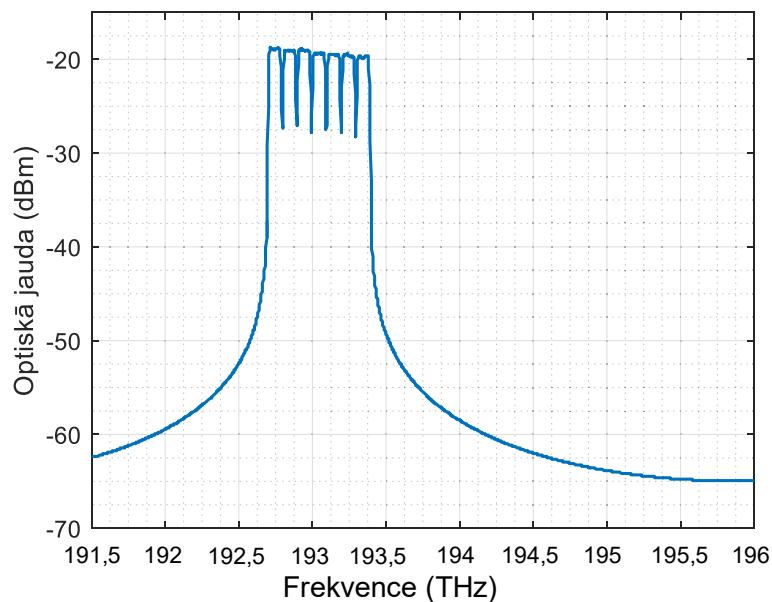
3.9. att. Simulētais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs 8 kanālu *WDM-PON* pārraides sistēmai (ar bitu pārraides ātrumu 10.7 Gbit/s).

CO kreisajā vidusdaļā atrodas pirmais *ASE 1* gaismas avots, kas bija svarīgs, lai vienmērīgi iestatītu signāla jaudas līmeni kopējā spektrā (ārpus *WDM-PON* 8 datu pārraides kanālu darbības joslas), tādējādi palīdzot veikt vienmērīgāku maskēšanu slēptajiem datu kanāliem. *ASE 1* tālāk tiek filtrēts ar režekcijas tipa optisko filtru. Paceltā-kosinusa optiskais filtrs ar paceltā-kosinusa funkcijas eksponentu 0,8 un atcelšanu (angļu val. *roll-off*) 0,01 tika izvēlēts par filtru tā stāvā rakstura dēļ, tāpēc, pirmkārt, ļaujot vienmērīgi savietot šo *ASE* signālu ar 8 datu pārraides kanāliem un 7 slēptajiem datu kanāliem. Otrkārt, šī filtra frekvences pārvades līkne neietekmē datu pārraidi *WDM-PON* sistēmas pirmajam un pēdējam kanālam. Centrālā frekvence šim filtram tika uzstādīta kā 193,05 THz ar 710 GHz 3-dB joslas platumu. Pēc tam filtrētais *ASE 1* signāls tiek pārraidīts uz optisko apvienotāju (3.10. att.).



3.10. att. Platjoslas ASE 1 avots, kas filtrēts ar platjoslas (710 GHz 3-dB joslas platumu) režekcijas tipa filtru, lai maskētu spektrāli sagrieztus ārpus spektra joslas ASE datu kanālus.

Visbeidzot, CO apakšējā kreisajā pusē atrodas OLT 2 ar 7 slēptiem signālu raidītājiem (*Tx1* līdz *Tx7*). Noteiktais OLT 2 izejas optiskais amplitūdas frekvenču raksturlīknes pārvades spektrs ir redzams 3.11. attēlā. Slēptajiem datu kanāliem tika lietots vēl viens platjoslas gaismas avots (ASE 2) ar vidējo optisko izejas jaudu +8,9 dBm.



3.11. att. Spektrāli sagriezts 7 slēptu datu pārraides kanālu sistēmas AWG2 izejas amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (ar 2,675 Gbit/s bitu pārraides ātrumu).

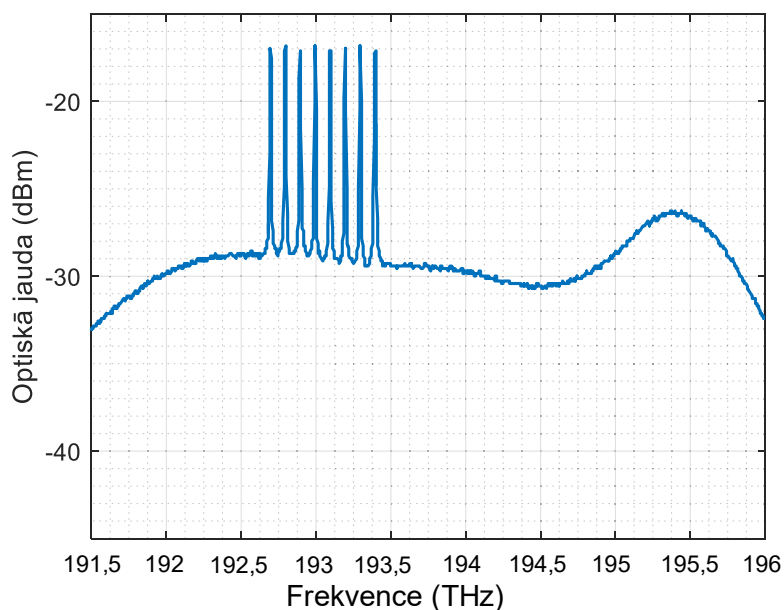
Pēc tam tika lietots *AWG* ar kanālu atstatumu 100 GHz un 3-dB joslas platumu 95 GHz, lai spektrāli sagrieztu *ASE 2* un ģenerētu 7 *ASE* šķēles (datu nesējus), kuras tālāk modulēja ar 2,675 Gbit/s *PRBS15 NRZ* signālu, lai veidotu slēptus datu kanālus un ievietotu tos starp katriem, iepriekš minētajiem, 8 datu kanāliem (attēloti 3.9 attēlā). Slēptie maskēšanās kanāli ir izvietoti 100 GHz attālumā viens no otra un to centrālās frekvences ir iestatītas šādi: 192,75 THz, 192,85 THz, 192,95 THz, 193,05 THz, 193,15 THz, 193,25 THz un 193,35 THz. Slēptu datu kanālu realizēšanai, katrs raidītājs ietver pusvadītāju optisko pastiprinātāju (*SOA*) un polarizācijas nejutīgu elektro-absorbcijas modulatoru (*EAM*).

Piedāvātajā risinājumā, *EAM* bija piemērots pateicoties tā noturībai pret signāla polarizācijas stāvokļa izmaiņām, un *SOA* bija nepieciešams, lai nodrošinātu intensitātes trokšņu nospiešanu (piesātinājuma režīma izmantošana pirms optiskā modulatora sniedz iespēju “slāpēt” jeb “nospiest” intensitātes trokšņus *EIN* (angļu val. *Excess intensity noise*), kā arī pastiprināt katru spektrāli sagrieztu šķēli [33]).

Salīdzinājumā ar polarizācijas jutīgo *MZM*, kas tiek izmantots *WDM-PON* tīkla daļā, *EAM* izmantošana spektrāli sagrieztās sistēmas daļai dod 3-dB optiskās jaudas un signāla pret trokšņa attiecības (*SNR*) (angļu val. *signal to noise ratio*) pieaugumu. *EIN* slāpēšanai izmantotā *SOA* nodrošina optisko pastiprinājumu par aptuveni 12,7 dB, kamēr ieejas jauda ir aptuveni 10,7 dBm.

*OLT 2* raidītājos ir izmantoti 2,675 Gbit/s (2,5 Gbit/s un 7 % *FEC*) *PRBS* datu avoti un *NRZ* koderi, līdzīgi kā tas tika darīts *OLT 1* gadījumā. Uzreiz pēc tam, kad visi *EAM* ir veikuši modulācijas procesu pastiprinātajām un spektrāli sagrieztajām šķēlēm, optiskie impulsi tiek izveidoti nākošajā *AWG* multipleksorā (*AWG2*). Pēc tam, pārraidīti tālāk uz otru optisko jaudas apvienotāju (*OC2*), kas apvieno visus trīs galveno signālu avotus – *OLT 1*, *ASE 1* un *OLT 2*. Vidēji nomērītā izejas jauda katram, spektrāli sagrieztajam, raidītājam ir -6,9 dBm.

Kā redzams 3.12. attēlā, tad 10,7 Gbit/s *NRZ-OOK* kanālu spektrālajiem maksimumiem ir nevienmērīga amplitūda, ko izraisa optiskā spektra analizatora ierobežotā viļņa garuma izšķirtspēja, kas attiecīgi bija uzstādīta 0,01 nm (raksturīgi reālai laboratorijas iekārtai). Otrajā optiskajā apvienotājā (*OC 2*), signāli no visiem trim avotiem ir apvienoti vienā kopējā optiskajā signālā, kura vidējā optiskā jauda ir +5,8 dBm. Pēc tam šis signāls tiek pārraidīts pa *ODN*, kas sastāv no 20 km garas optiskās šķiedras un dispersijas kompensējošā moduļa. Dalīts pēc principa 1:2 ar optiskās jaudas sadalītāju (*PS*) un demultipleksēts uztvērēja pusē izmantojot atbilstošus *AWG* (*AWG 3* priekš *WDM-PON* kanāliem un *AWG 4* priekš spektrāli sagriežtiem, slēptajiem kanāliem).



3.12. att. 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.

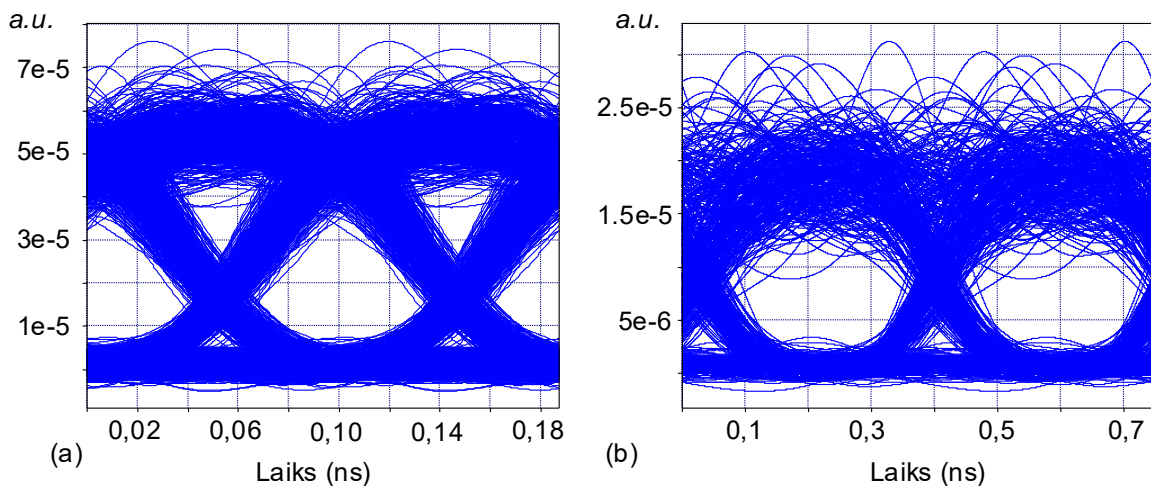
*WDM-POM* datu kanālu atdalīšanai tiek izmantots *AWG* ar Gausa amplitūdas-frekvenču pārvades raksturlīkni ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 13 GHz 3-dB joslas platumu. Tikmēr spektrāli sagrieztajiem slēptajiem datu kanāliem tiek lietots *AWG* ar Gausa amplitūdas-frekvenču pārvades raksturlīkni, 100 GHz starpkanālu intervālu un 55 GHz 3-dB joslas platumu. Šīs optiskās joslas platumā vērtības abiem *AWG* tika noteiktas par optimālām, lai nodrošinātu zemāko *BER* vērtību katrā no kopējās sistēmas apakšsistēmām.

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, kuru izmanto slēpto datu kanālu maskēšanai un ASE slēptie datu kanāli) pēc 20 km garas vienmodas optiskās šķiedras pārraides līnijas ir redzams 3.12. attēlā.

Pirms pārraidīt kombinēto optisko signālu pārraides šķiedras līnijā, ir nepieciešams izmantot šķiedras Brega režģa dispersijas kompensācijas moduli, lai veiktu hromatiskās dispersijas priekš-kompensāciju, tādējādi ierobežojot negatīvos efektus, kurus rada hromatiskā dispersija jeb izkliede (-320 ps/nm tika kompensēti pie 1550 nm atsauces (angļu val. *reference*) viļņa garuma). Tas attiecīgi var būtiski samazināt spektrāli sagrieztu kanālu *BER* vērtības,

ņemot vērā, ka platjoslas spektrāli sagriezts *ASE* avots tiek lietots kā nepieciešamās gaismas avots.

Pēc tam, kad signāls ir nosūtīts caur 20 km garu vienmodas optisko šķiedru, caur signāla sadalītāju un atbilstošu *AWG* (*AWG3* vai *AWG4*, atkarībā no uztvērēja), tas tiek pārsūtīts uz *ONT*. Kā parādīts 3.8. attēlā, uztvērēja daļa sastāv no divu veidu uztvērējiem – viena daļa ir atvēlēta 8 *WDM-PON* kanāliem (augšējā daļa) un otra – 7 slēptajiem datu kanāliem (apakšējā daļa). Katrs no 8 *WDM-PON* uztvērējiem sastāv no 10 GHz *PIN* fotodiodes ar jutību -20 dBm attiecībā pret *BER* līmeni  $10^{-10}$ , elektriskā zemfrekvenču Beseļa filtra ar 7.5 GHz 3 dB joslas platumu, kā arī elektriskā osciloskopa un optiskās jaudas mērītāja. Tikmēr katrs no 7 slēptajiem datu kanālu uztvērējiem jeb *ONT* iekļauj *APD* ar jutību -25 dBm attiecībā pret *BER* līmeni  $10^{-10}$ , elektrisko zemfrekvenču Beseļa filtru ar 2,1 GHz 3-dB joslas platumu un elektrisko osciloskopu. Šajā brīdī tika novērtēta uztvertā signāla kvalitāte, analizējot acu diagrammas (3.13. attēlā) un novērtētas *BER* vērtības katram pārraides scenārijam, proti, *B2B* un 20 km optiskās līnijas pārraides gadījumā.



3.13. att. (a) Acu diagramma nekvalitatīvākajam *WDM-PON* datu pārraides kanālam (2. kanāls) un (b) acu diagramma nekvalitatīvākajam slēptajam datu kanālam (5. kanāls) 20 km garā datu pārraides līnijā.

Kā redzams 3.13. attēlā, tad novērotas ir abu sistēmu nekvalitatīvāko datu kanālu acu diagrammas, kuras ir plaši atvērtas. Detalizētākā izstrādātā modeļa veiktspējas analīze ir veikta turpmākajā darba apakšnodaļā.

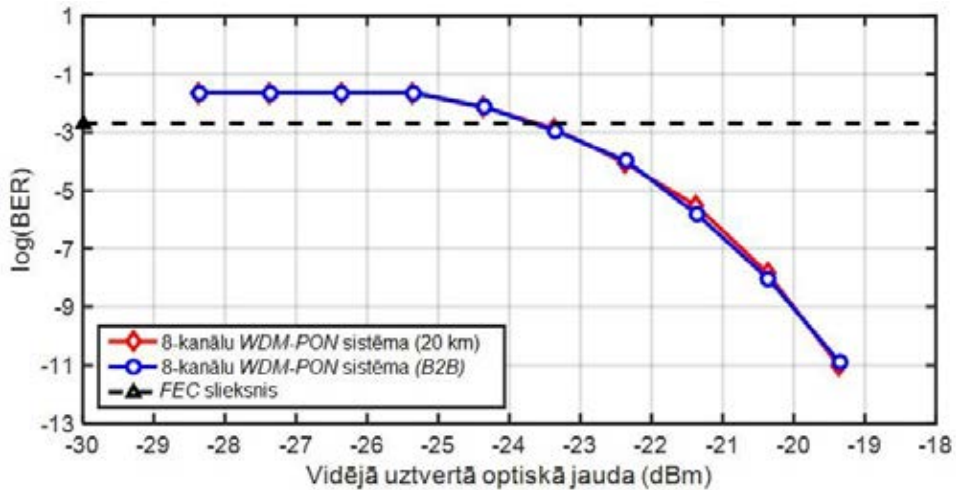
### 3.2.2. Izstrādātā modeļa veiktspējas analīze

Nodaļā izvirzītie pētniecības mērķi tika sasniegti un veiksmīgi realizēta hibrīda arhitektūras shēma kā piedāvāts 3.7. attēlā. Pirmkārt, ir izveidots kombinēts sistēmas modelis, kas vizuāli attēlo sistēmu ar *WDM-PON* datu pārraidi un integrētiem, spektrāli sagrieztiem, slēptiem datu kanāliem, kas nav redzami kopējā spektrā abu sistēmu apvienotajā realizācijā (3.12. att.). Otrkārt, ir iespējams skaitliski un vizuāli noteikt slēptās datu pārraides sistēmas ietekmi uz *WDM-PON* datu pārraides sistēmu *B2B* apstākļos, kā arī pēc 20 km garas datu pārraides līnijas. Visos *BER* rezultātos, kā arī *BER* attiecībā pret uztverto optisko jaudu raksturlīknes ir atspoguļotas gadījumos ar zemākās veiktspējas kanālu, kas *WDM-PON* sistēmas gadījumā bija otrais kanāls, savukārt slēptajai datu sistēmai – piektais kanāls. To var izskaidrot ar blakus esošo pārraides kanālu šķērsrunas efektu. Tā kā starpkanālu veiktspēju rādītājiem nebija būtiskas starpības, tika analizēti tikai sliktākās veiktspējas kanāli. Papildu tam, tā kā slēptajiem datu kanāliem ir nepieciešams savs gaismas avots un uztvērēji, tad attiecīgi šādu slēptu datu kanālu ievietošana ietekmēs kopējo jaudas budžetu visai sistēmai. Jaudas budžets šīs hibrīda *WDM-PON* datu pārraides sistēmā ir aptuveni +17 dB, attiecīgi slēptajai datu pārraides sistēmai jaudas budžets ir aptuveni +18.1 dB, tādējādi abas šīs sistēmas atbilst A klasei.

Lai novērtētu savietojamības procesu un sistēmu efektivitāti, ir nepieciešams, pirmkārt, izpētīt kā slēptās sistēmas ievietošana ietekmē *WDM-PON* datu pārraides sistēmu. Šādas darbības veikšanai, sākotnēji bija nepieciešams izmērīt vienas *WDM-PON* sistēmas *BER* vērtības (*WDM-PON* sistēma bez integrētas slēptu kanālu sistēmas) salīdzinot ar uztverto optisko jaudu 8 kanālu 10,7 Gbit/s datu plūsmai *B2B* un 20 km garas optiskās līnijas pārraidē (3.14. attēls). Kā redzams, jaudas sodu (angļu val. *power penalty*), kas radies šādu sistēmu ievietošanā *B2B* un 20 km garā pārraides līnijā, var neņemt vērā.

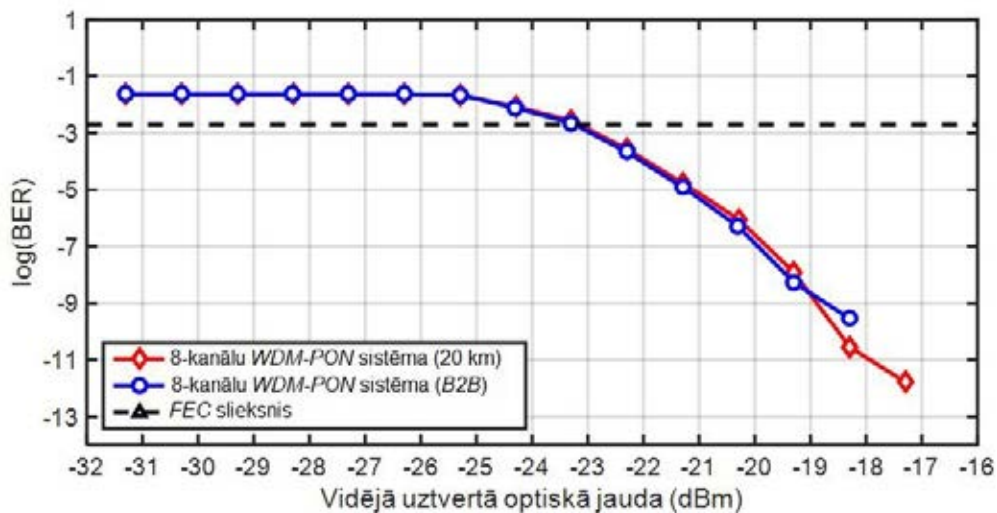
Pēc tam šī pati *WDM-PON* sistēma tiek nomērīta apstākļos, kad sistēmai klāt ir integrēta 7 slēptu kanālu sistēma, veidojot hibrīda risinājumu. 3.15. attēlā, ir redzama *B2B* un 20 km garas šķiedras pārvades līnijas iegūto datu cieša korelācija, tādējādi pierādot arī to, ka pārraides garums negatīvi neietekmē *WDM-PON* sistēmu situācijās, ja šāda veida risinājums ar slēptiem datu kanāliem ir integrēts kopējā sistēmā.



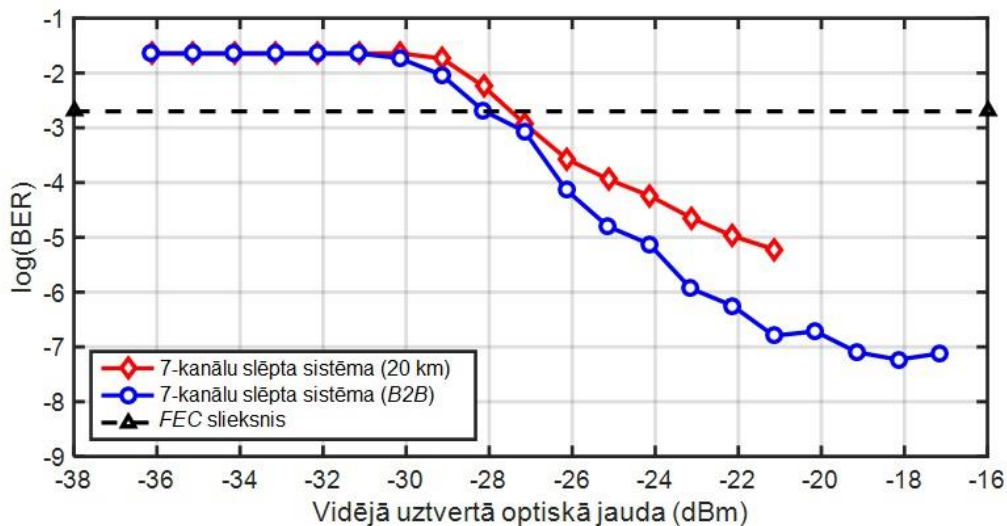


3.14. att. *BER* attiecībā pret uztverto optisko jaudu 8 kanālu *WDM-PON* datu pārraides sistēmai bez slēptu kanālu sistēmas integrācijas *B2B* apstākļos un pēc 20 km garas pārvades līnijas.

Lai saprastu, kādā veidā un cik lielā mērā pārraides līnijas garums ietekmē slēpto datu kanālu veiktspēju šajā apvienotajā sistēmu modelī, tika pārbaudīta arī *B2B* un 20 km garas pārvades līnijas rezultātu starpība, kas paredzēta specifiski šo slēpto datu kanālu risinājumā (3.16. att.).



3.15. att. *BER* attiecībā pret uztverto optisko jaudu 8 kanālu *WDM-PON* datu pārraides sistēmai ar integrētu spektrāli sagrieztu slēpto datu kanālu sistēmu *B2B* apstākļos un pēc 20 km garas pārvades līnijas.



3.16. att. BER attiecībā pret uztverto optisko jaudu 7 kanālu slēptai datu pārraides sistēmai B2B apstākļos un pēc 20 garas pārvades līnijas.

3.16. attēlā var novērot, ka, lai gan pastāv neliela B2B un 20 km konfigurācijas iegūto rezultātu starpība, tomēr joprojām ir novērojama cieša korelācija un jaudas sodu FEC līmenī var neņemt vērā. Šis jaudas sods veidojas spektrāli sagrieztu ASE kanālu šķērsrunas efekta dēļ, kā arī dispersijas un platjoslas ASE gaismas avota trokšņainā rakstura dēļ.

Lai pārliecinātos, vai abu sistēmu pārraide nodrošina pietiekami atbilstošu kvalitāti, ir nepieciešams arī skaitliski novērtēt katra kanāla vidējās BER vērtības visos scenārijos, kā arī aprēķināt jaudas sodu (3.3. tab.), kas ir nepieciešams salīdzināšanai. Var novērot, ka WDM-PON datu kanāliem vidējais uztvertais BER ir  $7.23 \times 10^{-19}$ , savukārt slēptajiem kanāliem tas ir  $1,13 \times 10^{-6}$ . Šādi rezultāti liecina, ka hibrīda sistēma var nodrošināt pietiekoši augstu datu pārraides kvalitāti. Jaudas sods B2B un 20 km garu pārvades līnijas scenāriju salīdzinājumā ir mazāks nekā 1 dB.

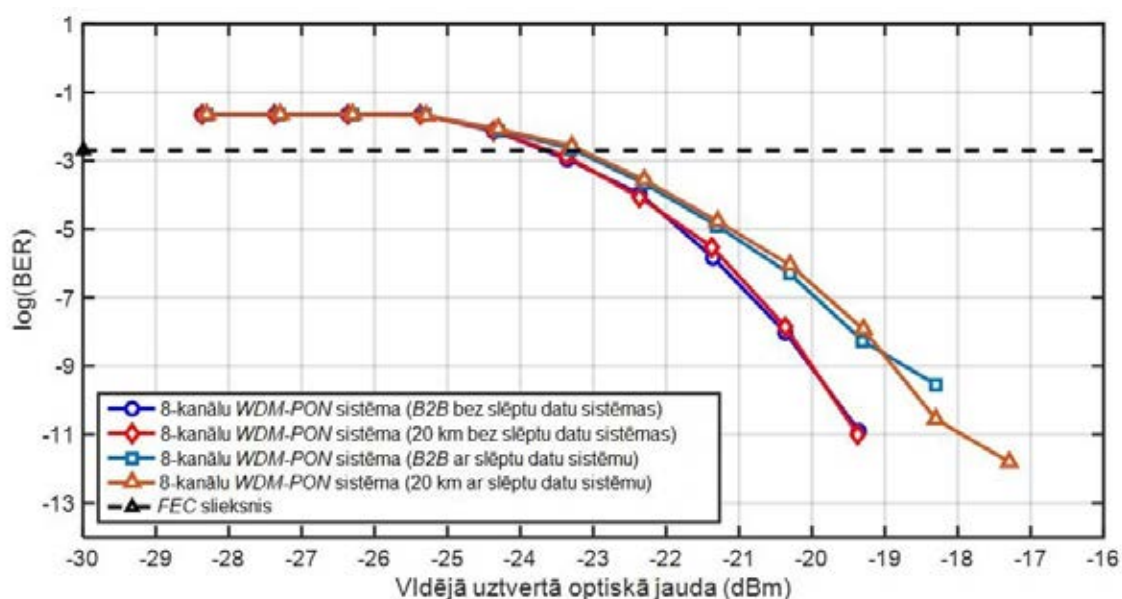
3.3. tabula

Aprēķinātais jaudas sods modelētajiem scenārijiem

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

2,675 Gbit/s slēptu datu kanālu sistēma B2B konfigurācijā	0,60 dB
2,675 Gbit/s slēptu datu kanālu sistēma 20 km garas optiskās pārvades līnijas konfigurācijā	
10,7 Gbit/s WDM datu kanālu sistēma B2B konfigurācijā (bez slēptu datu kanālu sistēmas)	0,05 dB
10,7 Gbit/s WDM datu kanālu sistēma 20 km garas optiskās pārvades līnijas konfigurācijā (bez slēptu datu kanālu sistēmas)	

Visbeidzot, it īpaši svarīgi ir salīdzināt BER attiecībā pret uztverto optisko jaudu visiem scenārijiem, lai saprastu signāla kropļojuma apjomu, kuru slēptā sistēma var ieviest WDM-PON sistēmā (3.17. att.). Attēlā ir redzama visu scenāriju tieša korelācija, līdz ar to, var droši teikt, ka slēptu datu kanālu ievietošana šādos sistēmas sadarbības modeļos ir efektīvi iespējama. Skaitliski, atsaucoties uz 3.17. attēlu, ir nepieciešams veikt jaudas soda aprēķinu WDM-PON sistēmai ar un bez slēptu kanālu sistēmas ievietošanas kopējā pārraides sistēmas arhitektūrā.



3.17. att. BER attiecībā pret uztverto optisko jaudu 8 kanālu WDM-PON datu pārraides sistēmai B2B apstākļos, salīdzinot ar 20 km garu pārvades līniju ar un bez slēptu datu kanālu sistēmas integrāciju.

3.4. tabulā ir redzams, ka B2B, kā arī 20 km garā pārvades līnijas konfigurācijas scenārijā, jaudas soda starp abām sistēmām (vienkārša WDM-PON sistēma attiecībā pret WDM-PON sistēmu ar slēptiem datu kanāliem) ir mazāks par 0,5 dB.

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

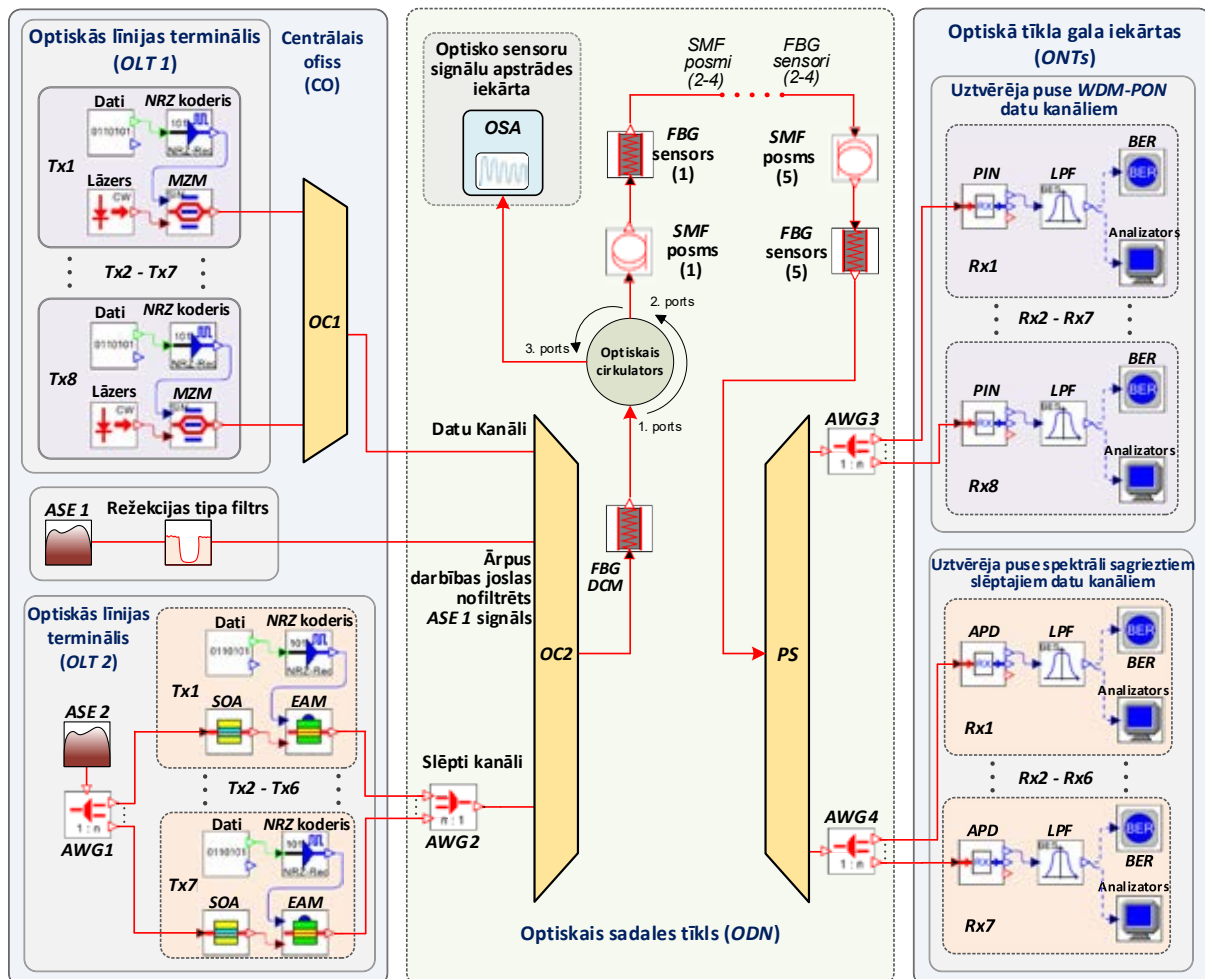
Simulācijas scenārijs	Jaudas sods pirms- <i>FEC BER</i> līmeņa $2 \times 10^{-3}$
10,7 Gbit/s <i>WDM datu kanālu sistēma B2B</i> konfigurācijā ( <i>ar</i> slēptu datu kanālu sistēmu)	0,42 dB
10,7 Gbit/s <i>WDM datu kanālu sistēma B2B</i> konfigurācijā ( <i>bez</i> slēptu datu kanālu sistēmas)	
10,7 Gbit/s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

Ņemot vērā 3.14. līdz 3.17. attēlu un 3.3. un 3.4. tabulās apkopotos datus, ir iespējams novērot svarīgus faktorus, kas ir saistīti ar maskētu signālu integrāciju *WDM-PON* datu pārraides sistēmās. Pirmkārt, ir redzama *BER* rezultātu cieša korelācija *B2B* pārraides konfigurācijā un 20 km garu pārraides konfigurācijā. 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  $2 \times 10^{-3}$  (atbilstoši *ITU-T G.975.1* standartam un pieņemtajai praksei zinātniskajās publikācijās [58, 66, 134]).

### 3.2.3. Optisko sensoru tīkla iestrāde un novērtējums hibrīda *WDM* sakaru sistēmā

Ņemot vērā iepriekšējās apakšnodaļās realizēto risinājumu un veiksmīgu slēptu datu kanālu iestrādi *WDM-PON* sistēmā, tālāk tiek integrēta un novērota 5 *FBG* optisko sensoru tīkla iestrāde kopējā sistēmā. 3.18. attēlā ir redzama jaunā shēma, kuru papildina augšējā vidus daļa. Optiskās pārraides līnijā ir izvietoti 5 *FBG* optiskie sensori. Katrs no šiem sensoriem ir atdalīts ar 4 km garu *SMF* šķiedras posmu. Atbilstoši iepriekšējās nodaļās izpētītajam, 208 GHz plats optisko sensoru starpkanālu intervāls ir uzstādīts starp katru optiskā sensora signālu. Optisko sensoru realizācijai svarīga bija arī optiskā cirkulatora izmantošana. Cirkulators nodrošina optiskā gaismas signāla plūsmas virziena maiņu, tas ir, no *FBG* atstarotā optiskā signāla

nodošanu uz optisko sensoru signālu apstrādes iekārtu, kas šajā gadījumā ir *OSA*. Tāpat būtiski ir minēt faktu, ka optisko sensoru realizācijā ir izmantots *ASE 1* gaismas avots, kura optiskie parametri ir minēti šī darba iepriekšējās nodaļās. Šis gaismas avots tika izmantots slēptu signālu maskēšanai – ārpus darbības joslas realizēšanai. Tas, savukārt, nodrošina efektīvu pieejamo komponentu izmantošanu un ciešāku sistēmu sadarbības veikšanas testēšanu.

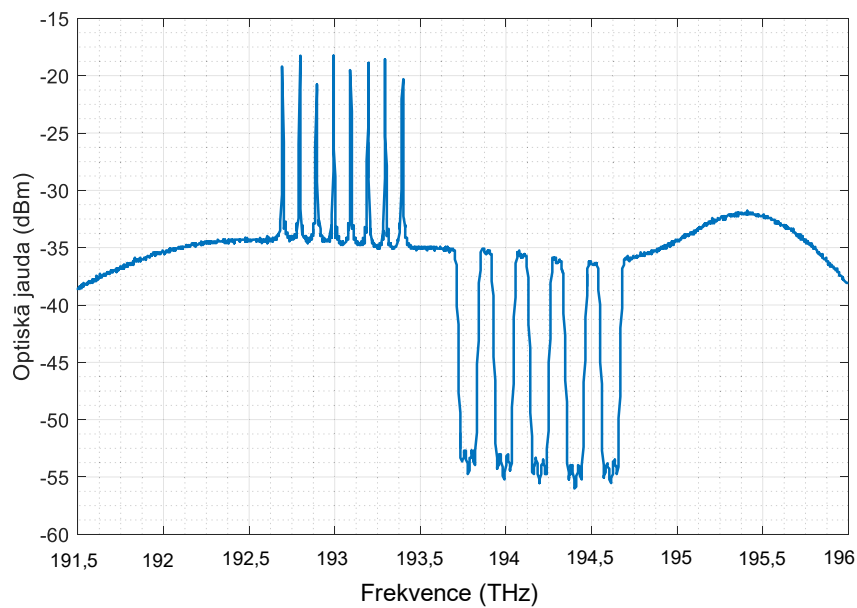


3.18. att. Hibrīda optiskās sakaru sistēmas simulācijas shēma ar 8 datu kanālu, 7 slēptu datu kanālu un 5 *FBG* optisko sensoru sistēmu.

Šādā veidā ne tikai veiksmīgi tiek realizēta *WDM-PON* datu kanālu, slēptu datu kanālu, kā arī optisko sensoru kopēja darbība, bet arī efektīva gaismas avotu izmantošana, kas nodrošina, ka *ASE 1* gaismas avots ir efektīvi izmantots gan slēptu datu kanālu realizēšanai, gan optisko sensoru sistēmas funkciju veikšanai.

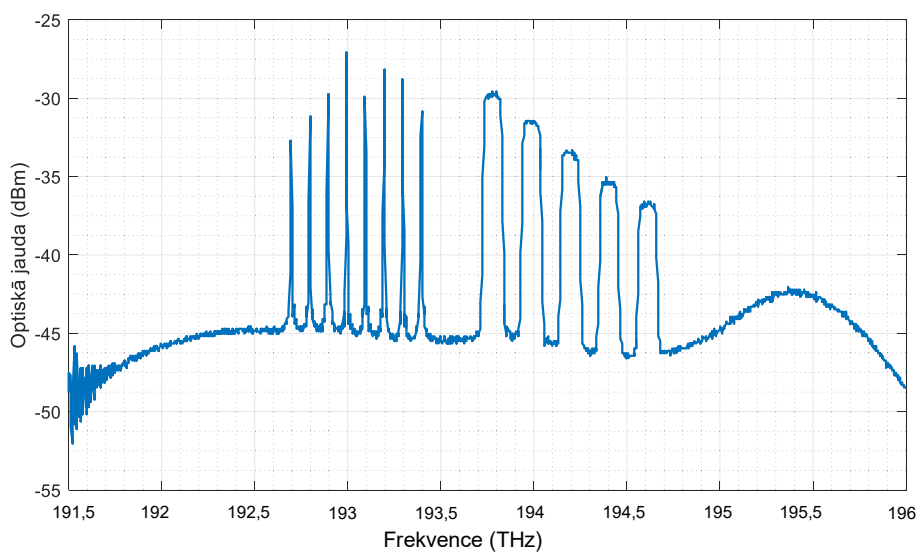
Lai vizuāli pārliecinātos par to, ka sistēmās savstarpēji nepārklājas un nav noteikto kanālu savstarpējās negatīvās interferences, 3.19. attēlā ir redzams kopējais amplitūdas

frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs – gan optisko sensoru sistēma, gan iepriekš apskatīto slēpto datu kanālu – viss kopējais hibrīda sistēmas caurejošā signāla izmantotais spektru.



3.19. att. Hibrīda optiskās sakaru sistēmas caurejošā signāla optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs.

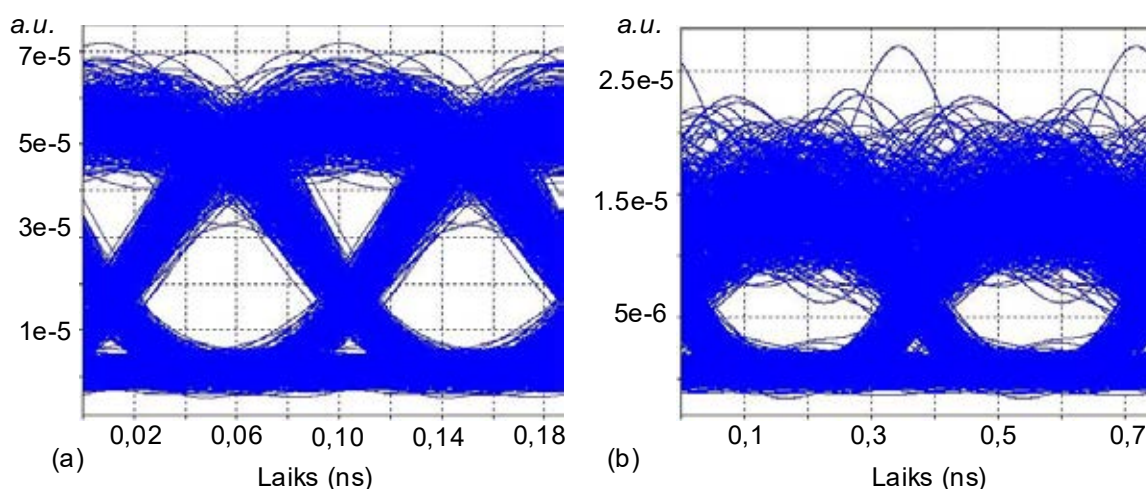
Savukārt 3.20. attēlā ir redzams atstarotā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs, kuru var novērot optisko sensoru apstrādes iekārtā, izmantojot optisko spektra analizatoru.



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

Šeit būtiski ir atzīmēt, ka atstarotais signāls kopējā sistēmā tiek pārraidīts divkārtšā 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 četru kilometru attālumā viens no otra. Tas arī ietekmē optisko sensoru atstarotā signāla maksimumu atšķirību un kopējo spektru.

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 (kā parādīts 3.21. attēlā).



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

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  $7,16 \times 10^{-17}$ . Tālāk, 3.5. 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 3.5. tabulā, tad pēc iegūtajām vidējām *BER* vērtībām ir redzams, ka 5 *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.

### 3.2.4. Secinājumi

Šis pētījums apstiprināja veiksmīgu simulācijas modeļa realizāciju, kur 10,7 Gbit/s 8 kanālu *WDM-PON* pārraides sistēma tika apvienota ar 2,675 Gbit/s 7 kanālu slēptu datu kanālu pārraides sistēmu, kas tika spektrāli paslēpta *WDM-PON* sistēmā, kā arī apvienota ar 5 *FBG* optisko sensoru sistēmu. Izmantots ir 7% *FEC*, jo *pirms-FEC BER* sliekšnis ir  $2 \times 10^{-3}$ . Ņemot vērā veikspējas rezultātus, ir iespējams secināt, ka jaudas sods, ko izraisīja šāda slēptu kanālu ievietošana *B2B* konfigurācijā un 20 km garā pārraides līnijā bija mazāks par 0,5 dB. Tāpat arī vizuāli un skaitliski ir iespējams pierādīt, ka pat ar integrētu slēpto datu pārraides sistēmu starp 8 kanālu *WDM-PON* sistēmu, joprojām var iegūt saņemtā signāla *BER* vērtību, kas ir daudz zemāka par noteikto *pirms-FEC BER* līmeņa  $2 \times 10^{-3}$ .

Realizētā modeļa ierobežojumi, galvenokārt, ir atkarīgi no izvēlētā gaismas avota spektrālā platuma privāti vai publiski pieejamajā frekvenču reģionā. Veiksmīgas realizācijas sasniegšanai būtiska ir arī precīza blakus esošo kanālu centrālo frekvenču kalibrēšana, starpkanālu intervālu noteikšana un pašu kanālu joslas platuma iestatīšana. Šos parametrus blakus esošajiem kanāliem varētu samazināt vai palielināt, bet tas potenciāli varētu novest pie diviem rezultātiem, kas negatīvi ietekmētu kopējo sistēmu. Viens no šādiem rezultātiem būtu



samazināta kanālu veiktspēja (piemēram, *BER* vērtības pieaugums abām sistēmām), gadījumā, ja blakus esošo kanālu atstatumu samazinātu. Vai arī otrā gadījumā, palielinot blakus esošo kanālu starpkanālu intervālus, slēptie datu kanāli būtu padarīti vizuāli redzamāki kopējā optiskajā spektrā un zaudētu savas priekšrocības.

Tika novērots, ka *WDM* datu kanāliem vidējais uztvertais *BER* bija  $7,23 \times 10^{-19}$ , savukārt slēptajiem datu kanāliem tas bija  $1,13 \times 10^{-6}$ . Aprēķinātais jaudas sods pie *BER*  $2 \times 10^{-3}$  ir 0,42 dB (*B2B* konfigurācijā) un 0,43 dB (20 km garas pārraides līnijas konfigurācijā). Ņemot vērā šo, var secināt, ka spektrāli sagrieztu slēptu datu kanālu sistēmu var efektīvi integrēt *WDM-PON* sistēmā un tā negatīvi neietekmē tās darbību un šādu abu tehnoloģiju sadarbību, ļaujot šādu konfigurācijas modeli ieviest optiskās steganogrāfijas lietojumos. Pēc optisko sensoru sistēmu integrācijas, *WDM* datu kanāliem vidējais uztvertais *BER* bija  $7,16 \times 10^{-17}$ , bet slēptajiem datu kanāliem  $1,11 \times 10^{-5}$ . Līdz ar to, šādu sistēmu var apvienot ar *FBG* optisko sensoru sistēmu, efektīvi izmantojot pieejamo platjoslas gaismas avota spektru un neradot būtiskus sistēmas darbības traucējumus *WDM-PON* vai slēptu datu kanālu sistēmu darbībā.

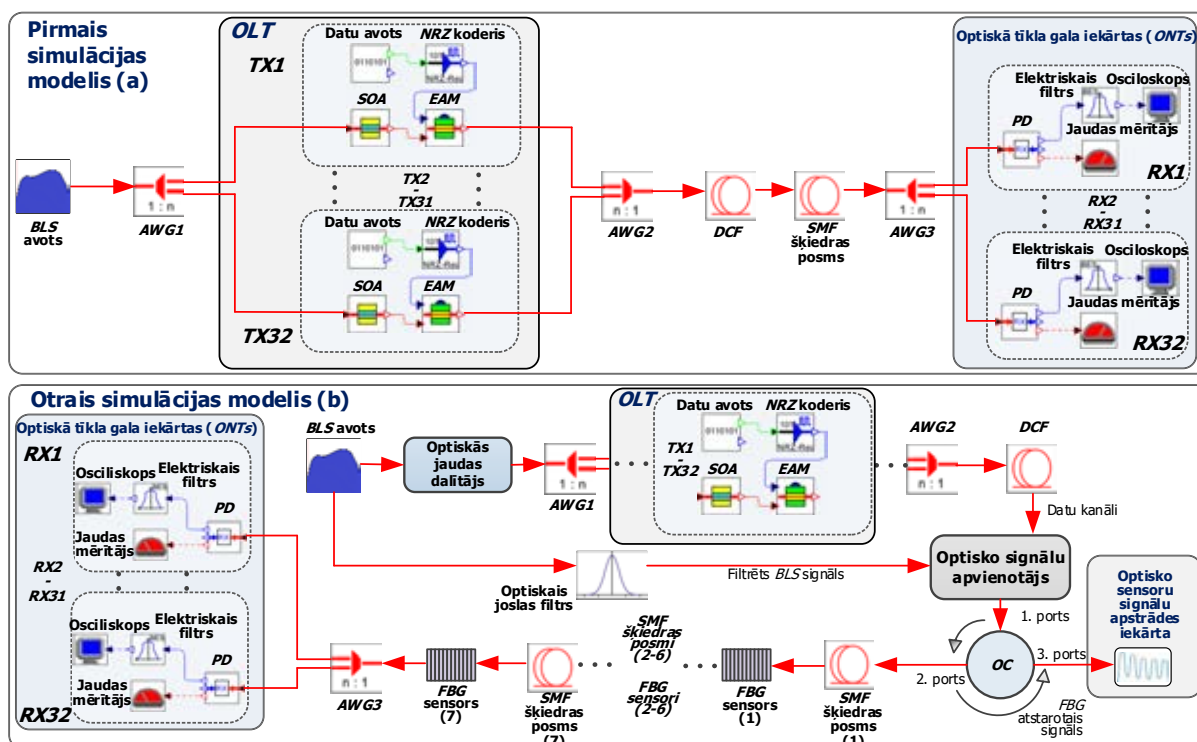
## 4. *FBG* SENSORU TĪKLA INTEGRĀCIJA SPEKTRĀLI SAGRIEZTĀ *WDM-PON* PĀRRAIDES SISTĒMĀ

Šīs nodaļas pētījumā sākotnēji ir veiksmīgi realizēta simulācija – apvienota 7 *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 7 optisko sensoru sistēmā ir 4 kilometri, 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 4 dažādos scenārijos – ar un bez sadarbības starp abām sistēmām (datu kanālu un optisko sensoru), un 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 sagriezta *WDM* pārraides sistēma ar integrētu *FBG* optisko sensoru sistēmu darbojās 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. Šāds shēmu kopums ļaus analizēt sistēmu kopdarbības realizēšanu, izmantojot kopīgu platjoslas gaismas avotu.

### 4.1. Daudzkanālu spektrāli sagrieztas blīvas *WDM-PON* sistēmas un optisko sensoru tīklu apvienošanas simulācijas modeļa izstrāde dažādu scenāriju realizēšanā

Pētījuma laikā ir realizēti daži atšķirīgi scenāriji, lai novērtētu veiksmīgu *FBG* sensoru sistēmas realizāciju 28 km garā *SMF* līnijā (saskaņā ar *ITU-T G.652* [56]), kur ir 7 optiskie sensori ar 4 km gariem šķiedru laidumiem, kopā ar datu pārraides sistēmu – 32 *SS-WDM PON* kanāliem. Konkrētais šķiedru laiduma garums ir izraudzīts pamatojoties uz autora iepriekšēju pētījumu [116], kur tika izskaidrots, ka Latvijā parasti tiek izmantoti četru kilometru gari šķiedru laidumi starp diviem optisko šķiedru kabeļu sadales tīklu skapjiem (angļu val. *cabinets*) vai sakaru akām (angļu val. *manholes*), kur ir izvietotas optiskās uznavas. Šādas 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 (4.1. att.).



4.1. 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 7 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).

Pirmajā simulācijas modelī datu pārraides veikspēja ir redzama bez ietekmes no šķiedru optisko sensoru sistēmas puses. Savukārt otrajā simulācijas modelī ir sarežģītāks risinājums, kur abas sistēmas (optisko sensoru un datu pārraides kanālu) ir apvienotas vienkopus, izmantojot vienotu platjoslas gaismas avotu un vienu kopēju šķiedru kā pārraides vidi. Abos simulācijas iestatījumos jeb modeļos ir izraudzīts *PRBS* un *ASE* platjoslas gaismas avots (*BLS*). Optiskais spektrs ir izraudzīts diapazonā no 191,5 THz līdz 195,5 THz. Datu pārraides kanāliem

atvēlot 191,65 THz līdz 193,2 THz, savukārt optiskajiem sensoriem – no 193,6 THz līdz 194,9 THz.

Lai novērtētu ietekmi uz kopējo sistēmu abiem simulācijas modeļiem, kā arī redzētu ietekmi, kuru atstāj datu kanālu bitu pārraides ātrums, ir izraudzīti divi dažādi datu pārraides ātrumi – 2,5 Gbit/s un 10 Gbit/s katram datu kanālam. Šādi lielumi ir ierasti apskatāmi, nodrošinot klientu strauji pieaugošās vajadzības, lai saglabātu datu pārraides attīstības progresu sadarbībā ar citiem sistēmu modeļiem, kā, piemēram, optisko sensoru, kurus pieprasa modernā sabiedrība. Mērķis ir iegūt rezultātus, kas pierādītu pietiekamu piedāvātā sistēmas modeļa kvalitāti, kas nozīmētu, ka datu signāli nodrošinātu *BER* pie *pirms-FEC* līmeņa ne augstāka kā  $2 \times 10^{-3}$ . Pie šīs vērtības izejas signālu varēja novērot bez būtiskām kļūdām. Šāda veida konfigurācija ir piemērojama *FEC* kodēšanas shēmu lietojumam ar 7 % datu virspatēriņu.

#### **4.2. Abu simulācijas modeļu lietoto shēmas elementu analīze un arhitektūras novērtējums**

Simulācijas otrajā modelī, *BLS* izejas optiskais signāls ir sadalīts divos identiskos optiskās plūsmas starojumos ar 1:2 optisko jaudas sadalītāju, nodrošinot, ka 50 % no visas kopējās optiskās jaudas būtu ģenerēta atbilstoši sistēmai [17, 114]. Testa laikā, šāds konkrētais sadalījums tika izvēlēts, jo tas nodrošina pieņemamu kopējās sistēmas darbību. Tas nozīmē, ka šāds modelis sniedz rezultātus, kur optisko sensoru un datu kanālu izejas datus var saņemt un novērtēt. Šāda attiecība arī nodrošināja, ka simulācijas laikā nav redzama vizuāla interference starp abu sistēmu kanāliem.

Abiem simulācijas modeļiem ir izmantoti *AWG*, lai spektrāli sagrieztu 32 kanālus. Šeit starpkanālu intervāls ir izraudzīts kā 50 GHz atbilstoši *ITU-T G.694.1* rekomendācijām [57]. Papildu tam, ir izmantoti 3 dB ienesto zudumu bloki, lai pielīdzinātu reālas *AWG* iekārtas ieviestos zudumus. Abās simulācijas iekārtās (100 % optiskā jauda pirmajā un 50 % optiskā jauda otrajā (saglabājot otru pusi – 50 % priekš šķiedras optisko sensoru sistēmas)) ir spektrāli sagriezta un pārraidīta uz datu kanālu raidītājiem (*TX*), kas ir izvietoti optiskās līnijas terminālī jeb *OLT*. Katrs no 32 datu kanālu raidītājiem abos simulāciju modeļos sastāv no datu avota, *NRZ*, *SOA* un polarizācijas nejutīga *EAM*, kas šajā gadījumā ir izmantots pamatā tā noturības pret signāla polarizāciju dēļ. Savukārt *SOA* ir izraudzīts, lai nodrošinātu intensitātes svārstību trokšņa nospiešanu, kas rodas ieviešot *BLS-ASE* avotu. Pēc tam abi simulācijas modeļi ir darbināti divas reizes. Pirmajā reizē ar 2,675 Gbit/s ģenerētu datu plūsmu, kuru reprezentē *PRBS* modelis, kas satur 7 % *FEC* virstēriņu plus 2,5 Gbit/s datu plūsmu, nosūtītu no *NRZ*

kodera pretī *RF* ievadei, *EAM* modulatoram. Otrajā reizē 10,7 Gbit/s datu plūsma ir ģenerēta un satur 7 % *FEC* datu virstēriņu, kā arī 10 Gbit/s datu plūsmu.

Kad visi *EAM* ir veikuši modulācijas procesu un izveidojuši optiskos impulsus, kā reprezentējošos datus, sākot no *TX 1* līdz *TX 32*, datu kanāli ir pēc tam atkal apvienoti kopā izmantojot otro *AWG* multipleksoru. Pēc tam, kanāli, pirms to pārraides *SMF* optiskajā šķiedrā (pirmajā simulācijas modelī) vai optiskajā apvienotājā (otrajā simulācijas modelī), iepriekš tiek kompensēti ar *DCF*, lai ierobežotu hromatiskās dispersijas negatīvo ietekmi. *DCF* garums ir iestatīts 3,73 km, savukārt dispersijas koeficients  $D$  ir -120 ps/nm/km, bet vājinājuma koeficients  $\alpha$  ir 0.55 dB/km pie 1550 nm gaismas viļņa garuma. Pēc šīs daļas tālāk ir veidota neliela arhitektūras atšķirība starp abiem simulācijas modeļiem.

Pirmajam simulācijas modelim, šajā brīdī, signāls tiek virzīts caur *SMF*, kuras parametri ir izraudzīti atbilstoši plaši lietotajiem parametriem, kas ir bāzēti pie 1550 nm viļņa garuma spektra ar dispersija koeficientu  $D = 16$  ps/nm/km, kamēr vājinājuma koeficients  $\alpha$  ir iestatīts 0,18 dB/km pie 1550 nm gaismas viļņa garuma. Pirmā simulācijas modeļa beigās, signāls ir sadalīts ar *AWG* un nosūtīts uztvērēju daļai, kur ir izvietoti *ONT*. Uztverošā daļa, tāpat kā otrajam simulācijas modelim, ir aplūkota turpmākajās rindkopās.

Iepriekš minētā starpība starp abiem simulācijas modeļiem pēc *DCF* daļas ir tā, ka otrajā simulācijas modelī (ar optisko sensoru sistēmu), pēc tam, kad signāls tiek nogādāts izmantojot *DCF*, tas tiek savienots kopā ar otru pusi *BLS* signāla spektru. Tas tika paveikts ar optisko joslas filtru ar 1,65 THz 3-dB joslas platumu, lai nodrošinātu, ka 50 % no avota iegūtās optiskās jaudas ir rezervēta datu kanāliem, bet pārējie 50 % - optisko sensoru sistēmai (izslēdzot iespēju abu signālu pārklāšanai). Pēc optiskā apvienotāja, otrajā simulācijas modeli, apvienotais signāls tiek pārraidīts cauri 7 *FBG* optiskajiem sensoriem, kas ir izvietoti *SMF* šķiedras ietvaros un pārraidīti uz optiskajiem uztvērējiem *ONT* daļā, jeb optiskā tīkla terminālu pusē.

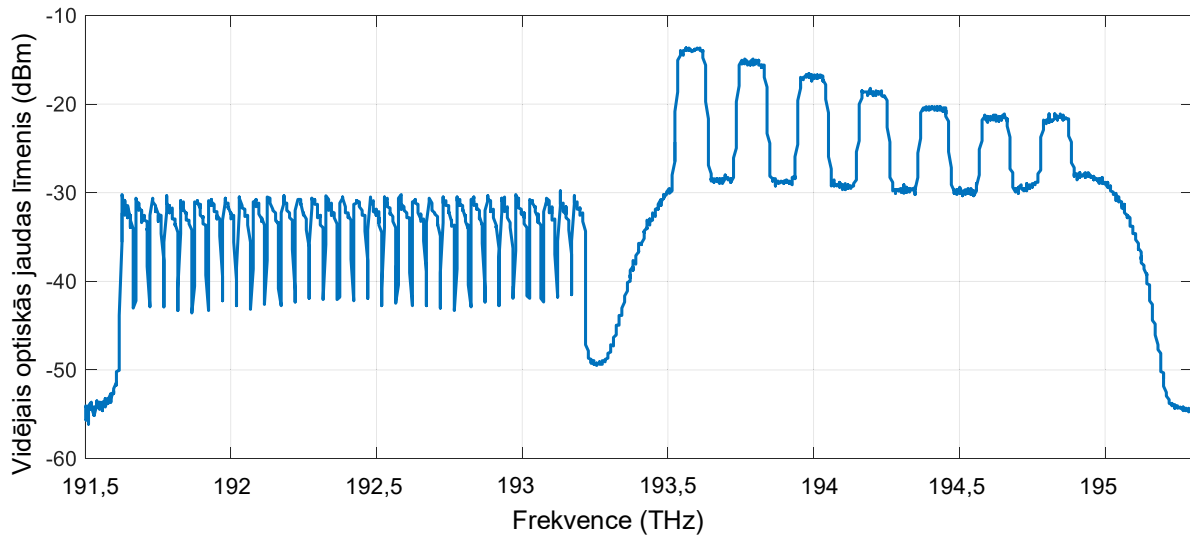
Tālāk, otrajā simulācijas modelī (ar optisko sensoru sistēmu), optiskais cirkulators ir izmantots optisko sensoru tīkla izstrādē, lai nodrošinātu optiskā signāla pārraides virziena sadalīšanu un maiņu. 4.1. attēla otrajā simulācijas modelī (b) ir attēloti septiņi *FBG* optiskie temperatūras sensori, kas ir atdalīti viens no otra ar septiņiem *SMF* četru kilometru gariem šķiedru laidieniem. Tas kopumā veido 28 km garu pārraides līniju. Šāds pats *SMF* garums tika izraudzīts arī pirmās simulācijas konfigurācijā jeb modelī, lai nodrošinātu maksimālu abu modeļu līdzību, tādējādi izslēdzot cita veida faktoros, kas var radīt atšķirību uz izejas rezultātiem, izņemot pašu optisko sensoru ievietošanas faktu.

Pēc tam, kad optiskais signāls ir pārraidīts caur optisko sensoru tīklu (kā tas ir otrās simulācijas modelī (b)) vai pa 28 km garu *SMF* posmu (kā tas ir pirmās simulācijas modelī (a)), pēc tam tas tiek pārraidīts uz uztvērēju daļu (*RX 1* līdz *RX 32*), kas atrodas optiskā tīkla terminālī (*ONT*). Katrs *ONT*, sākot no *RX 1* līdz *RX 32*, satur optisko uztvērēju ar *APD*, kura jutība ir 20 dBm pie atsauces  $BER 10^{-12}$ , elektrisko Beseļa zemfrekvenču filtru ar 6 GHz 3-dB (*FWHM* līmeņa) joslas platumu, elektrisko osciloskopu, kā arī optiskās jaudas mērītāju, lai veiktu vidējās saņemtās signāla jaudas vispārēju kvalitātes novērošanu. Šeit ir iespējams novērot optisko signālu acu diagrammas, bitu attiecību un *BER* vērtības, kā arī pārbaudīt, vai nav radušies vizuāli un skaitliski traucējumi starp datu pārraides un optisko sensoru tīkliem. No otras puses, *FBG* optiskajiem sensoriem tiek aplūkoti to atstarotie signāli optisko sensoru apstrādes iekārtā, kas ietver spektrometru un digitālu signāla apstrādes iekārtu kopējās sensoru sistēmas apstrādes veikšanai.

Kā jau iepriekš minēts, tas tika darīts divas reizes abiem simulācijas modeļiem ar dažādiem datu pārraides ātrumiem (2,5 Gbit/s un 10 Gbit/s), lai redzētu korelāciju tam, kā datu kanālu pārraides ātrums ietekmē kombinēto simulācijas shēmu, kur datu pārraides un optisko sensoru tīkls ir apvienots ar vienu kopēju platjoslas gaismas avotu un pārraides līnijas optisko šķiedru. Papildu tam, šāda veida pētījums ļauj pārbaudīt plašākas perspektīvas šādiem izveidotajiem sistēmas iestatījumiem un modeļiem.

### **4.3. Izstrādātā apvienotā simulācijas modeļa atstarotā optiskā signāla spektra analīze**

Ir sasniegts nodaļas ietvaros izvirzītais mērķis simulācijas modeļu izpētei. 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 – 7 *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 7 *FBG* optisko sensoru tīklu ir redzams 4.2. attēlā.

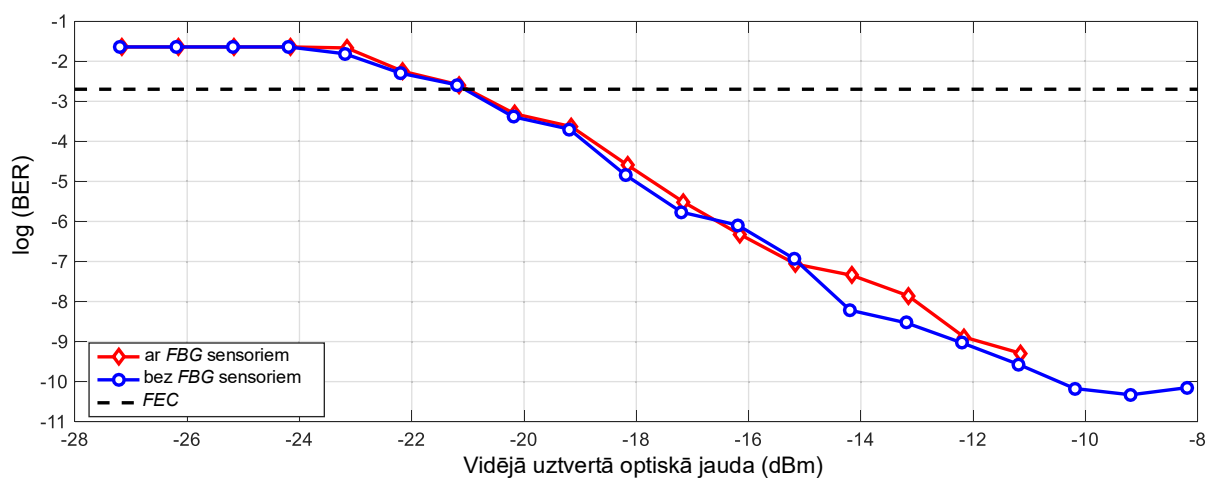


4.2. att. Atstarotais 32 kanālu *SS-WDM PON* pārraides sistēmas optiskā signāla amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs (ar 2,5 Gbit/s bitu pārraides ātrumu) ar iebūvētu 7 FBG optisko sensoru tīklu.

Lai novērtētu abu sistēmu kopdarbību, ir svarīgi izpētīt *FBG* optisko sensoru tīkla ietekmi uz *SS-WDM PON* datu pārraides sistēmu. Iegūtie rezultāti ir redzami 4.3. attēlā un 4.4. attēlā un tālāk aprakstīti darba 4.3.1 un 4.3.2 apakšnodaļās.

#### 4.3.1. 32 kanālu 2,5 Gbit/s spektrāli sagrieztas *WDM-PON* sistēmas veiktspējas analīze ar un bez integrēta *FBG* šķiedru optiskā tīkla

4.3. attēlā ir iespējams novērot *BER* attiecībā pret uztverto optisko jaudu 32 kanālu 2,5 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmai ar un bez integrēta *FBG* optisko sensoru tīkla.



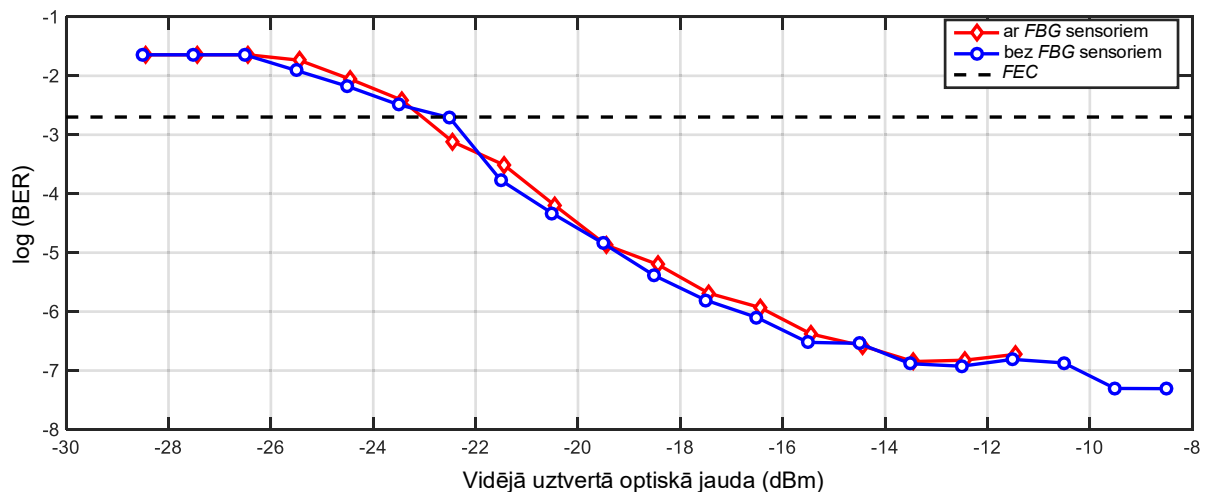
4.3. att. *BER* pret vidējo uztverto optisko jaudu 32 kanālu 2,5 Gbit/s *SS-WDM PON* sistēmai ar un bez integrēta *FBG* optisko sensoru tīkla.

Kā redzams, pirmkārt, pastāv abu simulācijas arhitektūru un to optisko komponentu parametru cieša korelācija. 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.

Ja tiek veikti mērījumi abiem simulācijas iestatījumiem pie vienas un tās pašas vidējās uztvertās optiskās jaudas, kanālam var novērot tikai nelielu *BER* atšķirību. Otrkārt, aprēķini rāda, ka jaudas sods otrajai simulācijas versijai (ar optisko sensoru sistēmas integrāciju) ir 0,1 dB vērtībā pie *pirms-FEC BER* līmeņa  $2 \times 10^{-3}$ , ja salīdzinājums tiek veikts ar pirmā simulācijas modeļa rezultāta datiem (4.1. att.).

#### 4.3.2. 32 kanālu 10 Gbit/s spektrāli sagrieztas *WDM-PON* sistēmas veiktspējas analīze ar un bez integrēta *FBG* šķiedru optiskā tīkla

4.4. attēlā ir 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 abu simulācijas modeļu un to rezultātu ciešu korelāciju.



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



Šie rezultāti arī 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, elektro-optiskās un elektriskās komponentes, un iekārtas, tādējādi ienestie zudumi kopējā sistēmā var palielināties.

### 4.3.3. Secinājumi

Šīs nodaļas pētījums par viena kopīga *BLS* gaismas avota izmantošanu apstiprināja veiksmīgu simulācijas modeļa realizāciju, kur 32 kanālu *SS-WDM PON* pārraides sistēma tiek apvienota ar 7 *FBG* optisko sensoru sistēmu, kas darbojas ar vienu kopīgu *BLS* gaismas avotu, izmantojot vienu optisko pārraides šķiedru. Autors varēja apstiprināt, ka ir iespējams apvienot optisko sensoru sistēmu gan ar 2,5 Gbit/s, gan 10 Gbit/s datu pārraides sistēmu, ņemot vērā abu simulācijas izejas datu rezultātus. Lai gan ir novērojamas nelielas atšķirības rezultātu atšķirības abās simulācijas versijās, kas tika apspriests iepriekšējās apakšnodaļās, tomēr izejas datu rezultāti (4.3. attēls un 4.4. attēls) liecina, ka pat palielinot datu pārraides ātrumu četras reizes, joprojām var nodrošināt 32 kanālu sistēmas optiskā signāla pārraidi ar vidējo uztverto *BER* līmenī ne augstāku par  $2,6 \times 10^{-7}$ . Pēdējais, bet ne mazāka svarīgais faktors – jaudas sods otrajā simulācijas versijā, kur abas sistēmas tika apvienotas, bija 0,1 dB 2,5 Gbit/s datu pārraidei un 0,5 dB 10 Gbit/s datu pārraidei pie *pirms-FEC BER* līmeņa  $2 \times 10^{-3}$ , un tāpēc to var neņemt vērā. Līdz ar to, var secināt, ka *FBG* optisko sensoru tīkls negatīvi neietekmē *SS-WDM PON* datu pārraides sistēmu un šādu, abu šķiedru optisko pārraides sistēmu tehnoloģiju sadarbību.

### 4.5. Uz vienota platjoslas gaismas avota balstītas šķiedru optiskās datu pārraides sistēmas ar integrētu *FBG* sensoru tīklu eksperimentālas arhitektūras izstrāde

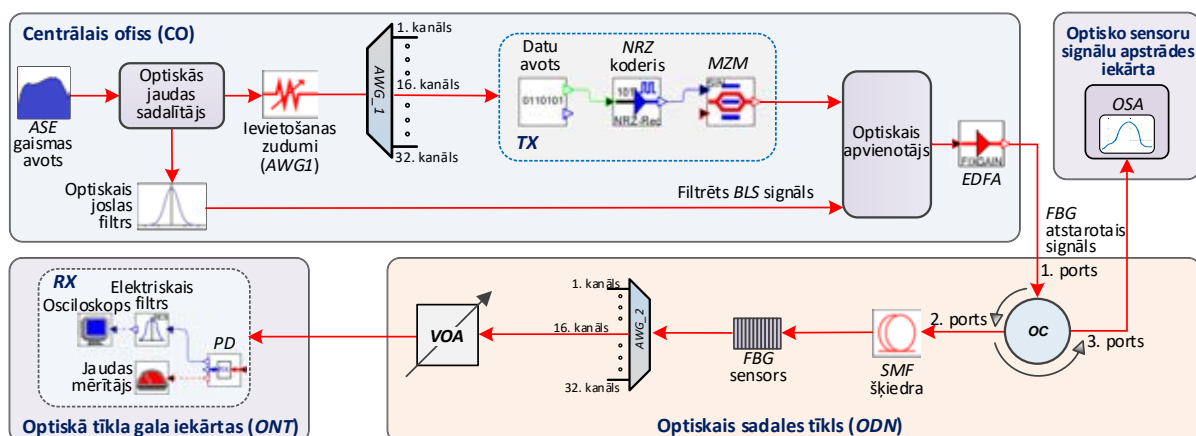
Viena no saistošām idejām optisko sensoru tīklu un datu pārraides sistēmu jomā ir to ieejas gaismas avotu apvienošana. Šajā gadījumā, lai sasniegtu izvirzīto mērķi, var īstenot *SS-WDM* tehnoloģijas lietošanu, realizācijā ar *ASE* avotu kā koplietojamu gaismas avotu. *SS-WDM* risinājums tika izvēlēts autora turpmākajam pētījumam, ņemot vērā tā priekšrocības, kas arī ir apskatītas [36] rakstā, piemēram, *SS-WDM* kā rentabls risinājums, ko var iegūt pateicoties spējai ievietot optiskos elementus un elektroniku vienā centrālajā ofisā, tādējādi atļaujot vienkāršot tīkla arhitektūru, it īpaši, optiskā raidītāja pusē.

Šajā nodaļā autors piedāvā izstrādātu eksperimentālu *SS-WDM* pārraides sistēmas modeli, kur viena platjoslas *ASE* gaismas avota veidotais optiskais spektrs ir sadalīts optiskās

pārraides sistēmas un optisko sensoru sistēmas vajadzībām (4.5. att. un 4.9. att.). Lai nodrošinātu precīzāku tā veiktspējas datu salīdzināšanu, tiek izstrādāts arī simulācijas modelis, kas balstās uz eksperimentālās maketa shēmas elementu izvēles. Atšķirībā no citiem pētījumiem šajā jomā, autora mērķis ir sasniegt bezklūdainu ( $BER < 10^{-9}$ ) pārraides sistēmas modeli, kas nodrošina uzticamu izvadi abiem – gan pārraidāmiem datu kanāliem, gan optisko sensoru kanāliem. Turklāt, sākotnējā pētījumā ir izmantots 1,5 Gbit/s datu pārraides maksimālais ātrums katram kanālam, kas primāri bija ierobežots ņemot vērā gaismas avota īpašības, kas aprakstītas tālākajās apakšnodaļās.

#### 4.5.1. Spektrāli sagrieztas pārraides sistēmas ar integrētu *FBG* optisko sensoru tīklu simulācijas modeļa izstrāde eksperimentālā modeļa vajadzībām

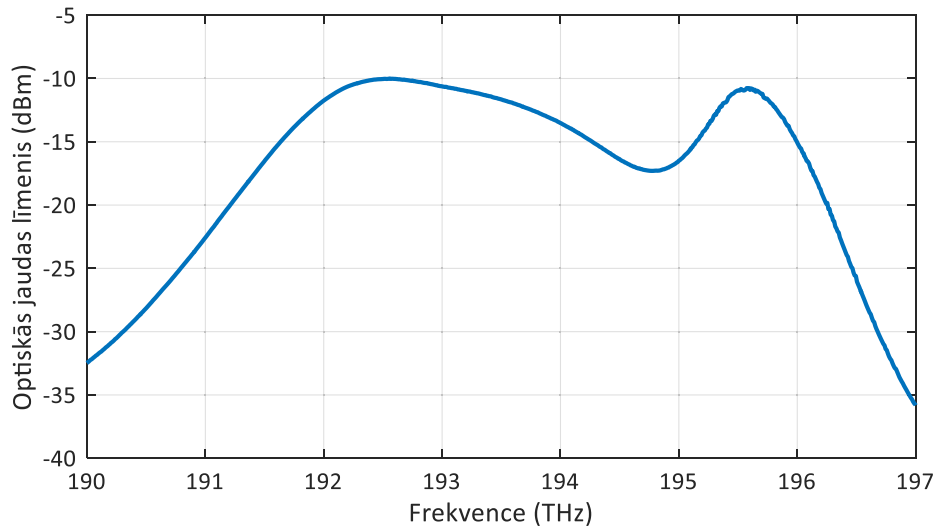
Papildu iepriekšējām apakšnodaļām, vēl viena šāda veida simulācijas shēma tika realizēta *OptSim* programmatūrā, lai varētu veikt detalizētāku simulācijas un eksperimentālās shēmas veiktspējas salīdzinājumu, kur tiek lietots kopējs platjoslas gaismas avots spektrāli sagrieztai datu pārraides sistēmai un *FBG* optiskajam sensoram, izmantojot līdzīgu sistēmas arhitektūru, kā arī optisko elementu un to parametru lietošanu. 4.5. attēlā ir redzams izveidotais simulācijas modelis eksperimentālās shēmas vajadzībām, kurā ir 3 galvenās daļas – CO, ODN un ONT.



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

Centrālajā 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. *ASE* avota amplitūdas

frekvenču pārvades raksturlīkne tika eksperimentāli uzņemta un pēc tam, tās spektrālie parametri ievietoti simulācijas modelī. ASE avota nomērītā amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīkne redzama 4.6. attēlā.



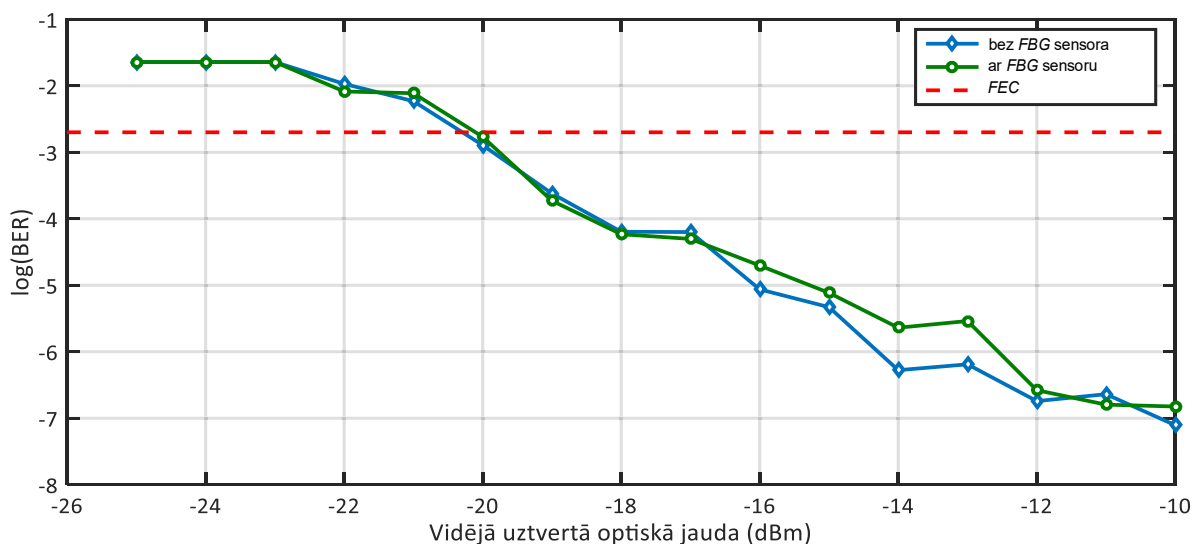
4.6. att. Platjoslas ASE gaismas avota eksperimentāli uzņemtais optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs.

Tālāk optiskās jaudas sadalītājs tika izmantots optiskā signāla sadalīšanai divās daļās (ar jaudas dalīšanas attiecību 50:50). Viena no signāla daļām ir izmantota datu pārraides kanālu vajadzībām, bet otra – *FBG* optiskā sensora izvietošana. Šim datu pārraides kanālu sadalījumam tika izvēlēts 32 kanālu *AWG*. Saskaņā ar *ITU-TG.694.1* frekvenču sadalījumu, pārraides datu kanālu centrālā frekvences ir iestatīta uz 193,1 THz jeb 1552,52 nm. 4.5. attēlā ir iespējams novērot katra *Tx* struktūru, kas sastāv no datu avota, *NRZ* un *MZM* ar *ER* 26 dB. Otra signāla daļa (50 %) tiek filtrēta caur optisko joslas filtru (*OBF*). Šeit tiek izmantots *OBF* ar 1 THz 3-dB joslas platumu, lai izvairītos no modulēto datu kanālu savstarpējas pārklāšanās un otra *BLS* avota spektra daļas, kura ir paredzēta *FBG* optiskajam sensoram. Pēc tam, abi signāli ir apvienoti izmantojot Y tipa (50 : 50) optisko signālu apvienotāju. Tad, kad tas ir paveikts, apvienotais optiskais signāls ir pastiprināts ar fiksētu 20,5 dB *EDFA* pastiprinātāju (izejas jauda ir mērāma līdz 22 dBm).

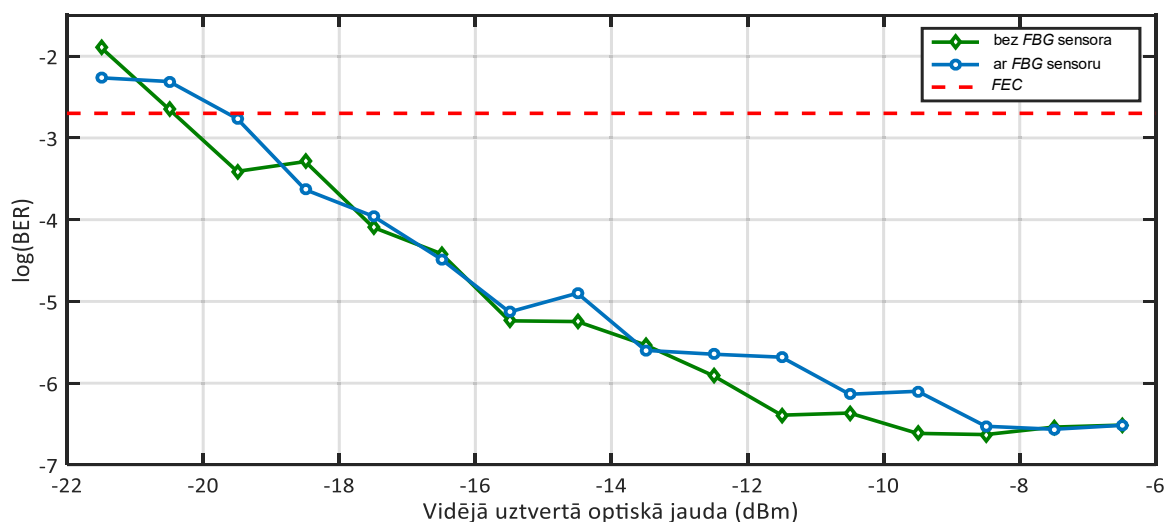
Pēc tam, optiskajā sadales tīklā (*ODN*), lai nodrošinātu *FBG* optisko sensoru novērošanu (ar *OSA*), tika izraudzīts optiskais cirkulators, kas nodala apvienoto signālu plūsmas, nodalot pārraidītos signālus no *FBG* sensora atstarotajiem signāliem. Turklāt, datu pārraides kanāli ir pārraidīti 20 km garā *SMF* šķiedras līnijā caur *FBG* optisko sensoru un 3 dB

pārskatājamo optisko vājinātāju (*VOA*) līdz *AWG* 2, kur optiskā tīkla terminālī (*ONT*) tiek novērots 16. datu pārraides kanāls.

*ONT* šeit sastāv no uztvērēja daļas – ātrgaitas *PIN* fotodiodes ar jutību -18 dBm, ( $10^{-10}$  *BER*), elektriskā Beseļa zemfrekvenču filtra ar 1,25 GHz 3-dB joslas platumu, osciloskopa un optiskās jaudas mērītāja. Šajā gadījumā tiek pārbaudīti vairāki scenāriji vienam kanālam. Iestatītais datu pārraides ātrums ir 1,5 Gbit/s. Pēc tam mēra signāla kvalitāti – *BER* atšķirību (*BER* korelācijas diagrammas) ar *FBG* optisko sensoru vai bez tā pie 20 km garas datu pārraides līnijas. 4.7. attēlā ir iespējams novērot *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*). 4.8. attēlā ir redzamas *BER* korelācijas diagrammas *B2B* pārraidei.



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



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

Ņemot vērā izmērītos rezultātus (4.7. att. un 4.8. att.), autors aprēķina, 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  $2 \times 10^{-3}$ , ja tiek veikts salīdzinājums ar optiskās pārraides sistēmu bez iestrādāta *FBG* optiskā sensora. Jaudas sods (sistēmai ar *FBG* sensoru) salīdzinot 20 km garas optiskās pārraides līniju un *B2B* konfigurāciju *FEC* līmenī  $2 \times 10^{-3}$  ir aptuveni 0,7 dB, ko var raksturot kā nenozīmīgu.

#### 4.5.2. Spektrāli sagrieztas *WDM* pārraides sistēmas ar integrētu *FBG* optisko sensoru sistēmu eksperimentāla modeļa izstrāde

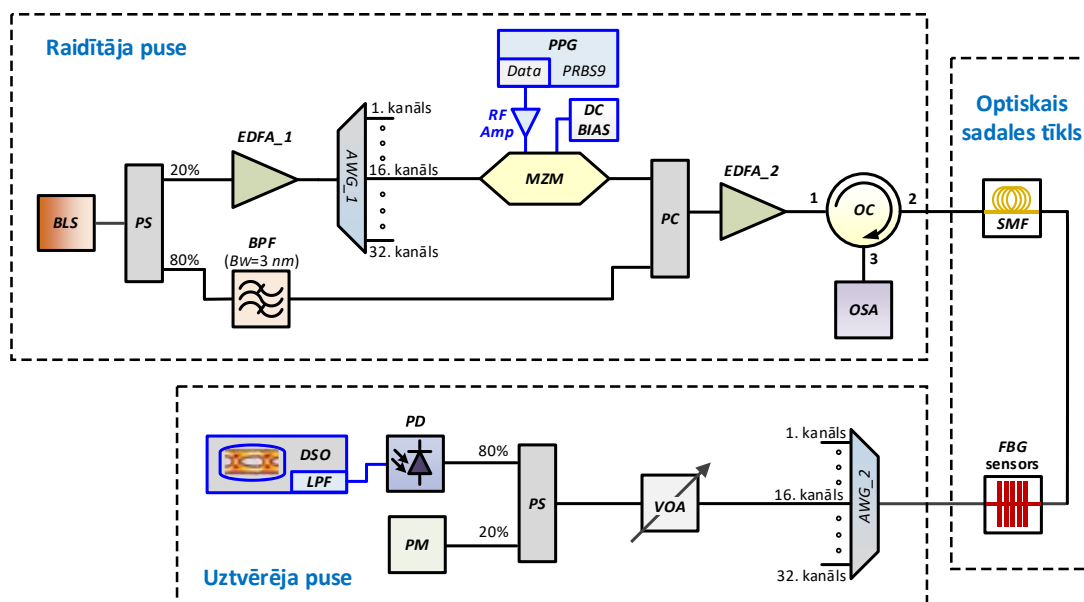
Veicot pētījumu par efektīvas kopdarbības realizēšanu optiskai pārraides sistēmai ar iestrādātu *FBG* sensoru vienas kopīgas optiskās šķiedras ietvaros, ir realizēta eksperimentāla optiskās šķiedras sistēma, kas redzama 4.9. attēlā.

Galvenais šīs sistēmas aspekts ir tas, ka datu pārraides un sensoru kanāliem ir lietots tikai viens kopīgs *BLS* avots. Ir svarīgi uzsvērt, ka simulācijas (apskatītas iepriekšējās apakšnodaļās) un eksperimentālās (šajā apakšnodaļā) 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*, kurām ierasti ir augstāka izejas jauda. Tomēr autora iestatījumos ir izraudzīts *ASE*, ņemot vērā tā augstāku vidējo optisko izejas

jaudu (+7 dBm), ja to salīdzina ar pieejamo *SLED* (+4 dBm). *ASE* avota izmērītais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ir redzams 4.6. attēlā.

Izpētītās datu pārraides sistēmas uzstādītais bitu pārraides ātrums ir 1,5 Gbit/s katram kanālam, kā arī 1,25 Gbit/s, lai pārbaudītu zemāku pārraides ātruma veiktspēju. Pārraides ātrumu šāda veida spektrāli sagrieztās sistēmās ierobežo pārmērīgs intensitātes troksnis (*EIN*), kas ir iepriekš novērtēts rakstos [46, 73], kur tiek diskutēts, ka troksni rada atšķirīgo viļņa garuma komponentu spontānā-spontānā pulsēšana, spektrāli sagrieztas gaismas ietvaros. Turklāt raksti [5, 142] ierosina, ka intensitātes troksni var mazināt *SOA*, kas palielina ienākošā nesēja spektrālo daļu, kā arī nomāc *EIN*, kas rodas no spontānas-spontānas pulsēšanas starp dažādām viļņu garuma komponentēm spektrāli sagrieztas nekoherentas platjoslas *ASE* gaisma avota lietošanā. Tomēr tas palielina optiskās pārraides sistēmas sarežģītību.



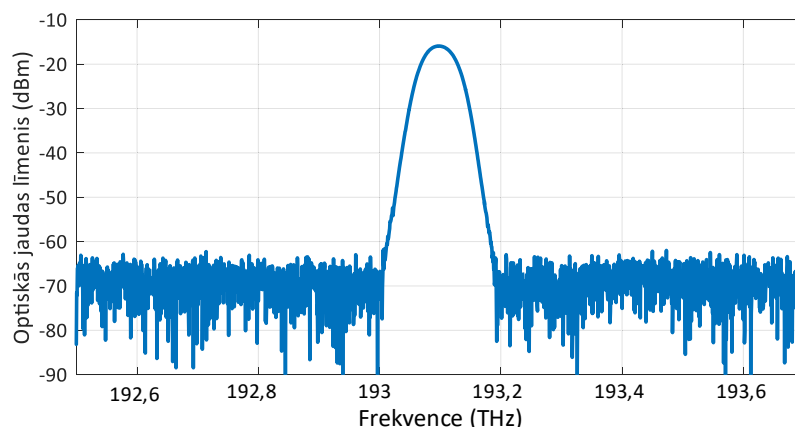
4.9. att. Eksperimentāls modelis ar vienu kopīgu, bet sadalītu platjoslas gaismas avotu *SS-WDM* optiskai pārraides sistēmai un tajā iestrādātajam *FBG* optiskajam sensoram.

Eksperimentālā sistēma satur 32 spektrāli sagrieztus datu pārraides kanālus, kurus ierobežo *BLS* gaismas avota joslas platumu, signāla optiskā jauda un *AWG* izejas kanālu skaits, ko izmanto spektrālai sagriešanai. Tomēr, lai pierādītu principu, tiek uzstādīts un izpētīts viens atsevišķs datu kanāls (tikai viena *AWG* šķēle tālākai datu pārraidei ir izmantota) un viens *FBG* sensora kanāls tajā pašā modelī, kur visu kopējo sistēmu baro viens kopīgs *BLS* gaismas avots, līdzīgi kā tas ir simulācijas shēmas konfigurācijā.

Raidītāja pusē ir optiskais signāls no *BLS* avota, kas ir sadalīts divās daļās ar 20/80 jaudas sadalītāju, kur 20 % izvades pieslēgvietā tika savienota ar *EDFA* ieeju un 80 % izvades pieslēgvietā – ar optiskās joslas (*OBP*) filtru. Šis iedalījums jaudas sadalītājā (angļu val. *power splitter*) (*PS*) tiek izvēlēts apzināti, lai nodrošinātu pietiekamu optiskā signāla jaudu *FBG* uztveršanas vajadzībām. *OBP*, savukārt, ir izmantots, lai nodrošinātu noteiktu *ASE* spektra reģionu eksperimentāli uzstādītajam *FBG* temperatūras sensoram un, lai, nodrošinātu, ka šis signāls nepārklājas ar datu kanāliem. 20 % *PS* izejas ports ar 0 dBm vidējo optisko signāla jaudu ir pārraidīts pirmajam *EDFA* (*EDFA\_1*) un pastiprināts uz 18,1 dBm. Tas tika darīts, lai kompensētu samērā lielus 10 GHz *MZM* un *AWG* ievietošanas zudumus (8.6 dB apjomā). *MZM* lielie zudumi ir izskaidroti [23], kur teikts, ka *MZM* ir jutīgs pret polarizāciju un *ASE* pēc savas būtības ir nejauši polarizēta haotiska gaisma, tādējādi ieviešot papildu zudumus.

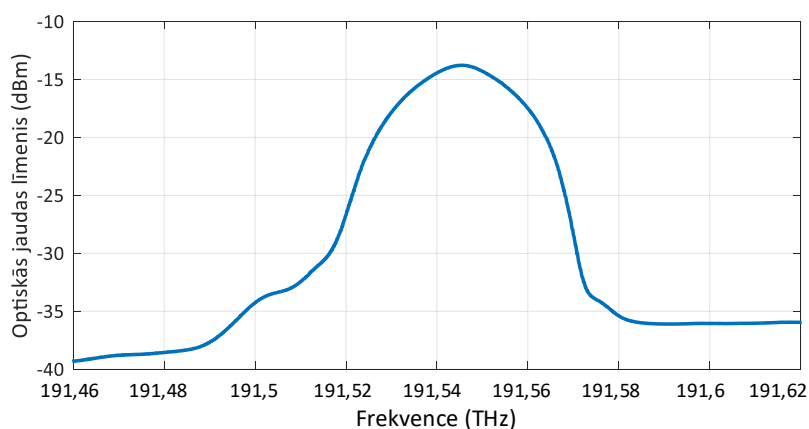
Gaismas avota – *BLS* sagriešanai un datu kanālu demultipleksēšanai izmantoti ir divi *AWG* ar 100 GHz starpkanālu intervālu. Pirmais *AWG* (konfigurācijā parādīts kā *AWG\_1*) ir plakanā tipa ar 54 GHz 3-dB un 132 GHz 20-dB joslas platumu. Otrais *AWG* (*AWG\_2*), kas ir izmantots datu kanālu demultipleksēšanai, ir ar Gausa amplitūdas-frekvenču pārvades raksturlīkni 77,5 GHz 3-dB un 145 GHz 20-dB joslas platumu. Pirmais *AWG* (*AWG\_1*) ievieša optiskā signāla zudumus 23,2 dB apjomā, kas veidojas no *AWG* iekārtas ievietošanas sistēmā (4 dB pie viļņa garuma 1552,52 nm) un zudumiem, kas veidojas spektrālās sagriešanas darbības dēļ, kur salīdzinoši šaurā nesēja spektrālā šķēle ir spektrāli izgriezta no plašā *BLS* avota spektra. Veicot turpmāku nesēja modulāciju, ir apskatīta *AWG* iekārtas 16. izejas kanāls (ar centrālo frekvenci 193,1 THz vai 1552,52 nm) atbilstoši *ITU-TG.694.1* frekvenču plānam. *AWG* 16. izejas kanāls rada optiskā spektra šķēli ar vidējo jaudu -5,1 dBm, kas ir tālāk pārraidīts 10 GHz *LiNbO<sub>3</sub>* *MZM* intensitātes modulatorā. Otra *AWG* filtrētā un 1,5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētā spektrālās šķēles amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs ir redzams 4.10. attēlā.

Shēmā ir izmantots arī 12,5 GHz impulsa secības ģenerators (*PPG*), lai ģenerētu  $2^9-1$  garu *PRBS* (*PRBS9*) ar bitu pārraides ātrumu, attiecīgi 1,25 Gbit/s un 1,5 Gbit/s. Elektriskam signālam ir realizēta tālāka *NRZ* kodēšana. *PPG* elektriskais izejas signāls ir pastiprināts ar 25 GHz platjoslas *RF* pastiprinātāju ar 17 dB pastiprinājumu, veidojot elektrisku *NRZ* signālu ar 5  $V_{pp}$  amplitūdu, lai pēc tam, izmantojot *MZM* modulatoru, iegūtu modulētā optiskā signāla maksimālo *ER*, kas arī ir aplūkots [169].



4.10. att. Optiskais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs 1,5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētai spektrālai šķēlei.

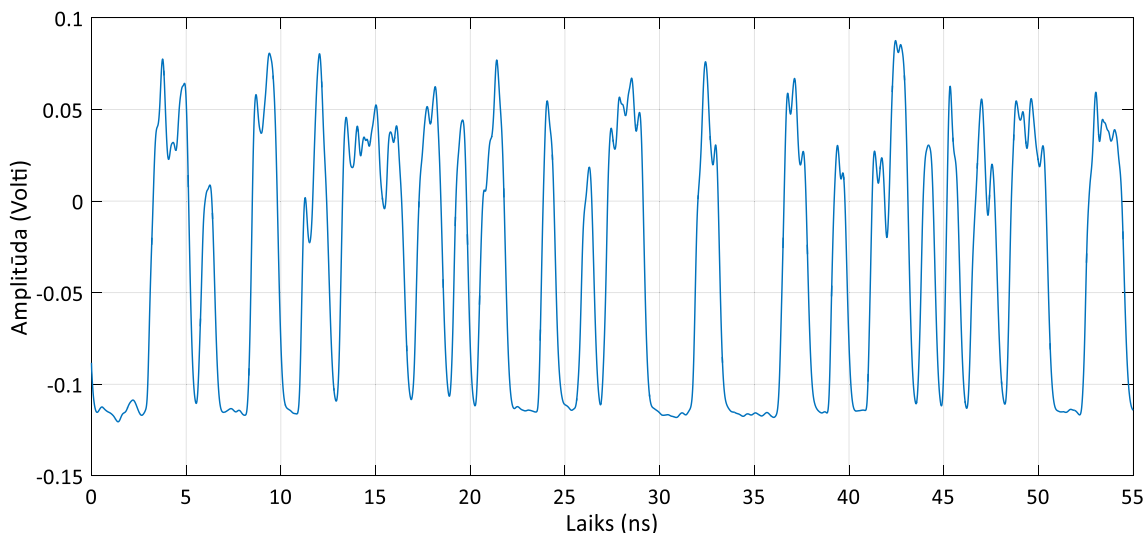
Pēc tam, *MZM* modulēts signāls un *BPF* filtrēts *ASE* signāls ir apvienots ar *Y* tipa (50/50) jaudas apvienotāju (*PC*). Tad kombinētais optiskais signāls tiek pastiprināts līdz 16 dBm ar otru *EDFA* (*EDFA\_2*). Otrā *EDFA* pastiprinātāja izeja ir pievienota optiskajam cirkulatoram (*OC*), kas ir izmantots, lai atdalītu datu pārraides signāla plūsmas (porti 1 un 2) un *FBG* atstaroto signālu (porti 2 un 3). Lai analizētu *FBG* atstarotu optisko signālu, ir izmantots augstas precizitātes (0,01 nm izšķirtspējas) optiskā spektra analizators (*OSA*). Optiskā cirkulatora izejas optiskais signāls ir pārraidīts *ODN*, kurā ietilpst *SMF* un *FBG* temperatūras sensors, kura centrālā viļņa garums  $\lambda$  ir 1565,124 nm (191,5455 THz), kas ir atbilstoši +19,44 °C. 4.11. attēlā ir attēlota *FBG* sensora nomērītā atstarotā signāla spektrālā raksturlīkne. Saskaņā ar *FBG* sensora tehnisko specifikāciju, tas tika kalibrēts pie  $\lambda = 1565,191$  nm (191,537 THz), kas atbilst +26 °C.



4.11. att. *FBG* temperatūras sensora atstarotā signāla izmērītais amplitūdas frekvenču pārvades raksturlīknes spektrs.



Uztvērēja pusē otrais *AWG* (*AWG\_2*) nodrošina demultipleksēšanas operāciju datu kanāliem. Šeit, *AWG* 16. izejas kanāls ir savienots ar lineāri mainīgo *VOA* ar 1,5 dB ievietošanas zudumiem pie izmantotā viļņa garuma. *VOA* tiek izmantots dažādu zudumu atdarināšanai *ODN* daļā, līdz ar to, ļaujot novērtēt *BER* salīdzinājumā ar uztverto vidējo optisko jaudu. *VOA* izeja ir savienota ar 20/80 jaudas sadalītāju, kur 20 % izejas ports ir pievienots monitoringa jaudas mērītājam (*PM*) un 80 % izejas ports ir pievienots foto diodei ar 10 GHz joslas platumu. *PIN* pārveido optisko signālu elektriskajā, kuru aplūko ar ciparu signālu atmiņas osciloskopu (*DSO*) ar 33 GHz elektriskās joslas platumu un 80 *GSa/s* nolašu frekvenci (angļu val. *sampling rate*). *DSO* joslas platumus ir ierobežots līdz 0,9 GHz (1,25 Gbit/s bitu pārraides ātrums) un 1,05 GHz (1,5 Gbit/s gadījumā) lietojot 4. kārtas Beseļa-Tomsona zemfrekvenču filtra atbildes reakciju trokšņu mazināšanas nolūkos. 4.12. attēlā ir atspoguļota viļņa forma uztvertajam 1,5 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētajam signālam pēc 20 km garas pārraides.



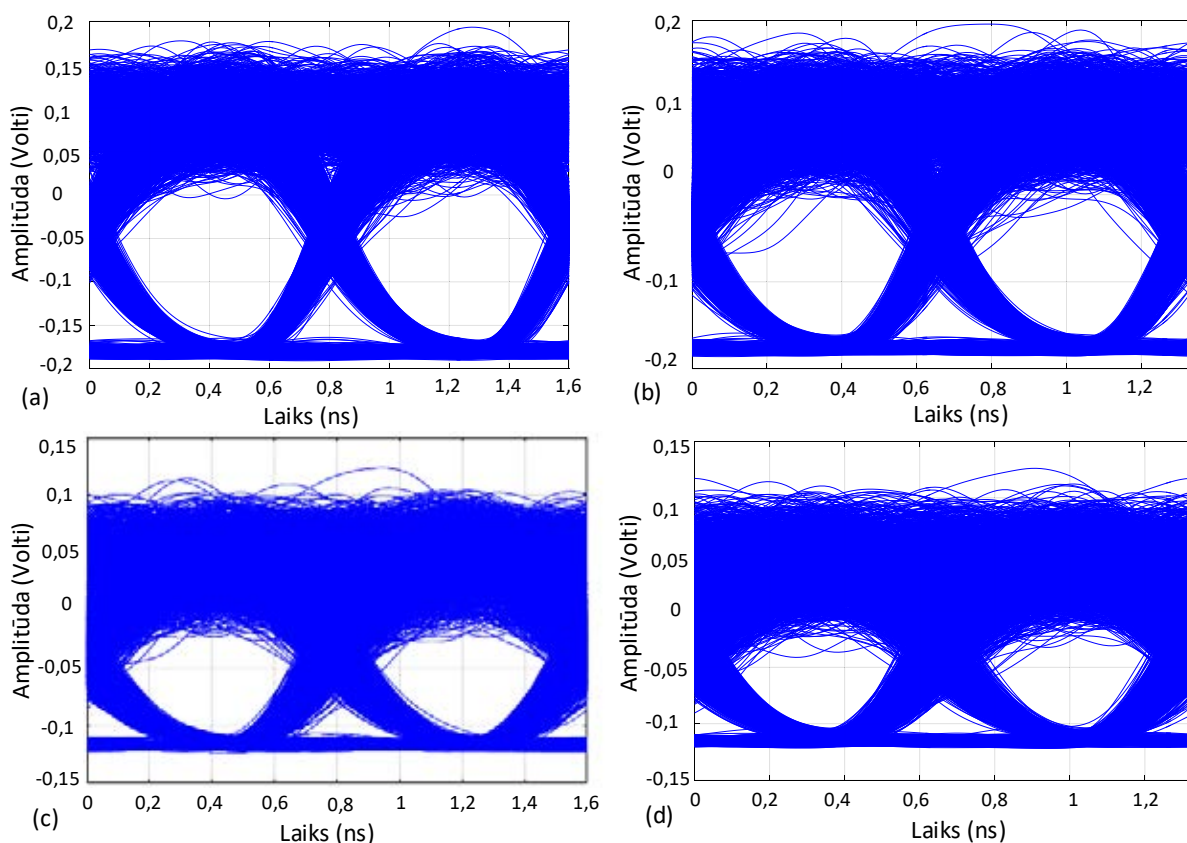
4.12. att. Uztvertā viļņa forma 1,5 Gbit/s signālam pēc 20 km garas *SMF* pārraides līnijas.

Loģiskā “1” līmeņa amplitūdas svārstības ir labi novērojamas *ASE* avota trokšņainā rakstura dēļ.

#### 4.5.3. Spektrāli sagrieztas *WDM* pārraides sistēmas ar integrētu *FBG* optisko sensoru sistēmu eksperimentāla modeļa veiktspējas analīze

Kā var redzēt attēlos 4.13. (a) un (c), 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

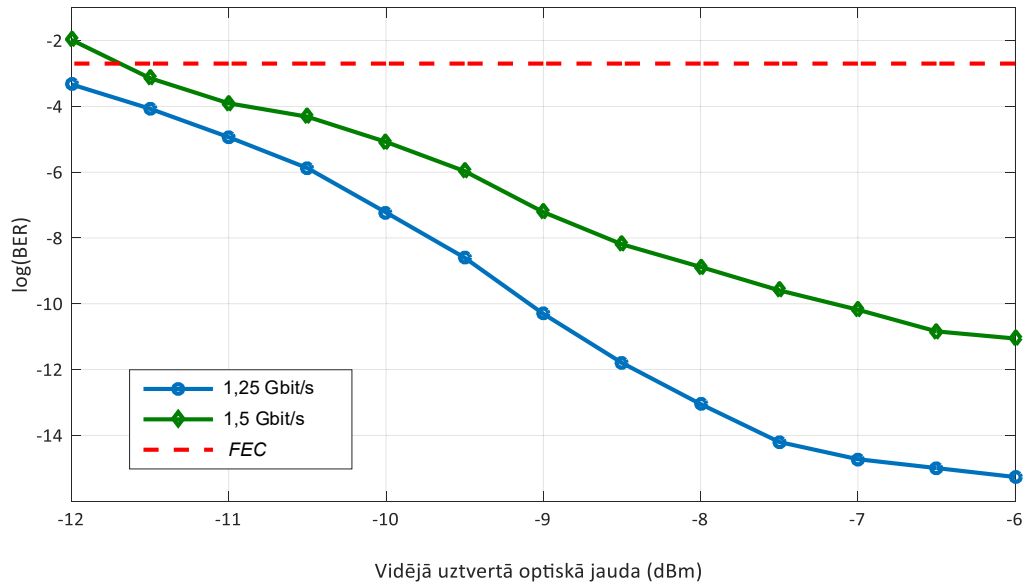
pēc 20 km garas *SMF* šķiedras pārraides līnijas, *BER* palielinās līdz  $1,3 \times 10^{-9}$ . Kā redzams 4.13. attēlā (b) un (d), pieaugums bitu pārraides ātrumam no 1,25 Gbit/s līdz 1,5 Gbit/s izraisa uztvertā signāla kvalitātes kritumu. Skaitliski, *BER* vērtība šajā gadījumā pēc optiskās šķiedras 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 bija nenozīmīga, jo *FBG* un datu kanālu spektra reģioni nepārklājās, kā arī ir nodrošināta pietiekami liela datu pārraides kanālu un optisko sensoru spektrālā atstarpe.



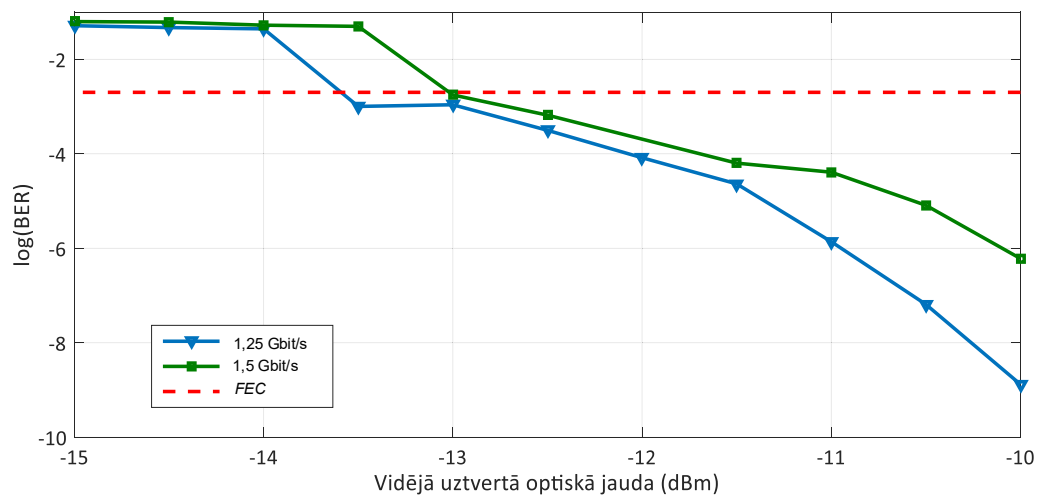
4.13. att. Uztvertās acs diagrammas (a) 1,25 Gbit/s *B2B* signālam, (b) 1,5 Gbit/s *B2B* signālam, (c) 1,25 Gbit/s signālam pēc 20 km garas pārraides līnijas un (d) 1,5 Gbit/s signālam pēc 20 km garas *SMF* pārraides līnijas

Ņemot vērā iegūtos rezultātus (4.14. att. un 4.15. att.) tika aprēķināts, ka 1,5 Gbit/s bitu pārraides ātruma gadījumā, jaudas sods 20 km garas datu pārraides līnijas gadījumā, salīdzinot

ar *B2B* konfigurācijas mērījumiem, *FEC* līmenī  $2 \times 10^{-3}$  ir aptuveni 1,5 dB. Šī jaudas soda cēlonis galvenokārt ir saistīts ar izmantotā platjoslas *ASE* gaismas avota trokšņa tipa raksturu, kā arī rodas dispersijas dēļ.



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



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

Kā redzams 4.14. attēlā un 4.15. attēlā, *BER* veiktspēja zem 7 % datu virstēriņa *FEC* limita  $2,3 \times 10^{-3}$  ir iegūta visos datu pārraides scenārijos ar 1,25 un 1,5 Gbit/s bitu pārraides

ātrumiem. Līdz ar to, ir iespējams nodrošināt pārsūtīšanu bez būtiskām kļūdām, kā arī nodrošināt datu un sensoru tīkla līdzāspastāvēšanu vienā kopējā eksperimentālā sistēmā.

#### 4.6. Secinājumi

Nodaļā ir eksperimentāli parādīta šķiedru optiskās datu pārraides sistēmas un *FBG* sensora savstarpēja sadarbība izmantojot vienu kopēju optisko šķiedru un apvienotu platjoslas gaismas avotu, kas nodrošina abu sistēmu vienlaicīgu darbību – izveidots daudzfunkcionāls šķiedru optisko datu pārraides un optiskā sensora risinājums. Ir pierādīta bezkļūdu pārraide (*BER* veikspēja zem 7 % datu virstēriņa *FEC* limita  $2,3 \times 10^{-3}$ ), izmantojot dažādus bitu pārraides ātrumus (1,25 Gbit/s un 1,5 Gbit/s) vairāk nekā 20 km garā *SMF*, vienlaikus nodrošinot veiksmīgu *FBG* temperatūras sensora darbību.

## NOBEIGUMS

Promocijas darba ietvaros tika pētīta šķiedru optisko sensoru un *WDM-PON* sistēmu kopdarbība, īpaši analizējot šķiedras Brega režģa optiskos sensorus.

Darba **pirmajā nodaļā** tika analizēta šķiedru optisko sensoru klasifikācija un tās iedalījums, apskatot polarizācijas modulētus, intensitātes modulētus, fāzes modulētus, kā arī viļņa garuma modulētus optiskos sensorus. Veikta šķiedru optisko sensoru lietojuma klasifikācijas izpēte, īpaši novērtējot *FBG* temperatūras un relatīvās deformācijas optiskos sensorus. Tāpat arī tika izpētīts optisko sensoru lietojums *SHM* vajadzībām un *IoT* risinājumos, kā arī aplūkotas šķiedru optisko sakaru sistēmu pārraidāma datu apjoma patērēšanas tendences modernajā sabiedrībā. Nodaļā ir noformulēts promocijas darba mērķis, tā uzdevumi, zinātniskie jaunieguvumi, aizstāvamās tēzes, kā arī apkopoti galvenie rezultāti.

Promocijas darba **otrās nodaļas** mērķis bija izpētīt optiskās sensoru tehnoloģijas veidu, kas balstās uz šķiedras Brega režģi, testējot *FBG* temperatūras optisko sensoru darbību, kurus var izvietoti vienas optiskās šķiedras ietvaros, tādējādi samazinot signālu apstrādes iekārtu nepieciešamo daudzumu kopējās sistēmas vajadzībām. Tika konstatēts, ka optisko piecu sensoru tīklu var pilnībā integrēt 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 4 datu kanāliem, kuru starpkanālu intervāls ir 50 GHz, atbilstoši *ITU-T G.694.1* rekomendācijām. Otrajā nodaļā ir arī noteikta mērāmās temperatūras ietekme uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām, kas šādā konfigurācijā ir vidēji 1 GHz uz 1 °C.

Promocijas darba **trešās nodaļas** mērķis bija izveidot un analizēt 5 *FBG* optisko sensoru tīkla un 10 Gbit/s *WDM-PON* šķiedru optiskās 8 datu kanālu pārraides sistēmas kopdarbības izpēti 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 iespējams noteikt minimāli pieļaujamo optisko sensoru starpkanālu intervālu, secinot, ka to ir jānodrošina vismaz 208 GHz. Tālāk šajā nodaļā ir realizēta arhitektūras izstrāde, veidojot optiskās hibrīda pārraides sistēmas konfigurāciju ar 10 Gbit/s *WDM-PON* 8 kanālu datu pārraidi un 2,5 Gbit/s 7 kanālu slēptu datu kanālu realizāciju, kā arī 5 *FBG* optisko sensoru sistēmas integrāciju, ko var nodrošināt ar pietiekami augstu datu pārraides kvalitāti ( $BER$  8 kanālu *WDM-PON* sistēmai bija  $7,16 \times 10^{-17}$ , savukārt slēptu datu kanālu sistēmas  $BER$  bija  $1,11 \times 10^{-5}$ ), vismaz 20 km (ierasti *PON* risinājumiem)

garā pārraides līnijā. Tāpat svarīga arī bija konfidencialitāte, nodrošinot ne tikai kvalitatīvu, bet arī vizuāli atbilstošu atspoguļojumu kopējā spektrā. Visi iegūtie rezultāti liecina, ka šāda veida hibrīda shēmas risinājumu var realizēt, nodrošinot pietiekošu uztverto signālu kvalitāti, kā arī efektīvu sistēmas tehnisko komponentu izmantošanu un atbilstošu salāgošanas spēju. Esošo modeļi var izmantot signālu steganogrāfijas risinājumos, piemēram, nodrošinot sistēmu darbību, kuras paredz apkopot optisko sensoru datus un jau, ar kādu citu datu apvienošanu, rediģēšanu vai jeb kāda veida cita veida darbībām, šo datu slēpšanu un nosūtīšanu kopā ar publiski, spektrāli redzamu datu palīdzību.

Savukārt, darba **ceturtajā nodaļā** ir veidota un analizēta simulācijas modeļa izstrāde - 7 *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 7 *FBG* šķiedru optiskā tīkla. Tālāk šajā nodaļā ir aplūkota simulācijas un eksperimentāla modeļa kopīga arhitektūras izstrāde - izpētot uz vienotas platjoslas gaismas avota balstītu 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. Atbilstoši tam, var teikt, ka ir izveidots daudzfunkcionāls šķiedru optisko datu pārraides un optiskā sensora risinājums.

Apkopojot visu promocijas darba saturu, var secināt, ka **promocijas galvenais darba mērķis** – ar teorētiskiem un eksperimentāliem pētījumiem veikt šķiedras Brega režģa optisko sensoru tīkla darbības izpēti un realizāciju kopdarbībā ar metro-piekļuves *WDM* šķiedru optiskajām pārraides sistēmām ir sasniegts. No iegūtajiem rezultātiem var teikt, ka promocijas darba **praktiskā vērtība** un **jaunieguvumi** ir šādi: Ir izstrādāts apvienotas *FBG* šķiedru optisko temperatūras sensoru tīkla un viļņgarumdales blīvētas šķiedru optiskās metro-piekļuves sakaru sistēmas modelis, kā arī noteikta mērāmās temperatūras ietekme uz *FBG* optisko sensoru atstarotā viļņa garuma izmaiņām. Noteikti minimāli pieļaujamie optisko sensoru starpkanālu intervāli apvienota 5 *FBG* optisko sensoru un 8 kanālu 10 Gbit/s *WDM-PON* datu pārraides sistēmas tīklā, darbībai optiskajā C-joslā (1530 – 1565 nm). Izstrādāts ir arī 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 spektrālos maksimumus. 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. Izveidots arī kopējs sistēmas modelis, kurā vienas optiskās šķiedras ietvaros ir izvietots 5 *FBG* optisko sensoru tīkls kopā ar 8 *WDM-PON* 10 Gbit/s pārraides datu kanāliem, kuru starpā ir vizuāli noslēpta 7 datu kanālu sistēma.

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 starpkānālu 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 ieviešanai. Promocijas darba laikā iegūtie un pētījumā atspoguļotie rezultāti ir izmantoti vairākās publikācijās un projektos (skat. Sarakstu 1.pielikumā).

## LITERATŪRA

- [1] Abdelgawad A. and Yelamarthi K. Internet of Things (IoT) Platform for Structure Health Monitoring// *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, Article ID 6560797, 10 pages, 2017.
- [2] Acakpovi A. and Matoumona P. L. M. V. Comparative analysis of plastic optical fiber and glass optical fiber for home networks// *2012 IEEE 4th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, Kumasi, Ghana, 2012, pp. 154-157, doi: 10.1109/ICASTech.2012.6381084.
- [3] Alamandala S., Sai Prasad R.L.N., Pancharathi R.K., Pavan V.D.R., Kishore P. Study on bridge weigh in motion (BWIM) system for measuring the vehicle parameters based on strain measurement using FBG sensors// *Optical Fiber Technology*, Volume 61, 2021, 102440, ISSN 1068-5200.
- [4] Allwood G., Wild G., Hinckley S. Fiber Bragg Grating Sensors for Mainstream Industrial Processes// *Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 1-14, 2017, <https://doi.org/10.3390/electronics6040092>.
- [5] Al-Qazwini Z., Kim H. Ultranarrow Spectrum-Sliced Incoherent Light Source for 10-Gb/s WDM PON// *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 19, pp. 3157-3163, 2012.
- [6] Alsarhan A. and Agarwal A. Optimizing Spectrum Trading in Cognitive Mesh Network Using Machine Learning// *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2012, Article ID 562615, 12 pages, 2012.
- [7] Ankouri A. E., Neto L. A., Simon G., Le Bras H., Sanhaji A. and Chanclou P. High-Speed Train Cell-Less Network Enabled by XGS-PON and Impacts on vRAN Split Interface Transmission// *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1-3.
- [8] Anurupa S., Yugnanda M. Performance evaluation and comparative study of novel high and flat gain C + L band Raman + EYDFA co-doped fibre hybrid optical amplifier with EYDFA only amplifier for 100 channels SD-WDM systems// *Optical Fiber Technology*, Volume 53, 2019, 102016.
- [9] 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>.



- [10] Becker T., Ziemann O., Engelbrecht R., Schmauss B. Optical Strain Measurement with Step-Index Polymer Optical Fiber Based on the Phase Measurement of an Intensity-Modulated Signal// *Sensors*. 2018; 18(7):2319. <https://doi.org/10.3390/s18072319>.
- [11] Bekmurzayeva A., Shaimerdenova M., Abukhanov Y., Sypabekova M., and Tosi D. Detection of tilted fiber Bragg grating fiber-optic sensors with short-term KLT: Towards low-cost biosensors// 2018 IEEE Sensors, 1–4, New Delhi, 2018, doi: 10.1109/ICSENS.2018.8630292.
- [12] Bischoff D., Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems, February 4, 2009.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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), <https://doi.org/10.1117/12.2303945>.
- [16] Bortolotti F., Morais Sousa K., Cardozo da Silva J.C. Packaging, characterization and calibration of the Bragg grating temperature sensors// *Proceedings of the MOMAG 2012-15 SBMO-Brazilian Microwaves and Optoelectronics Symposium and the 10 CBMag Brazilian Conference on Electromagnetism*, pp. 1-5., 2012.
- [17] Braunfelds J., Senkans U., Lyashuk I., Porins J., Spolitis S., Bobrovs V. Unified Multi-channel Spectrum-sliced WDM-PON Transmission System with Embedded FBG Sensors Network// 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS - SPRING): Proceedings, Italy, Rome, 17-20 June, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp.3327-3333. ISBN 978-1-7281-3404-8. e-ISBN 978-1-7281-3403-1. e-ISSN 1559-9450. Available from: doi:10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017809.
- [18] Braunfelds J., Senkans U., Skels P., Janeliukstis R., Salgals T., Redka D., Lyashuk I., Porins J., Spolitis 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.

- [19] Bremer K., L., Alwis LSM. Weigand F., et al. Evaluating the performance of functionalized carbon structures with integrated optical fiber sensors under practical conditions// *Sensors*, 2018; 18(11):3923. <https://doi.org/10.3390/s18113923>.
- [20] Broadband2022 — Unlocking a trillion dollar digital economy, Confederation of Indian Industry, Ernst & Young LLP Report, 2018.
- [21] Campanella C.E., Cuccovillo A., Campanella C., Yurt A., Passaro V.M.N. Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications// *Sensors*. 2018; 18(9):3115. <https://doi.org/10.3390/s18093115>.
- [22] Cao Z., Zhang Z., Ji X., Shui T., Wang R., Yin C., Zhen S., Lu L., Yu B. 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.
- [23] Chan C. C.K. Optical Performance Monitoring: Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks// ELSEVIER Inc.: The Chinese University of Hong Kong, pp. 512, 2010.
- [24] Chen B., Zhang L. and Lu H. High Security Differential Chaos-Based Modulation With Channel Scrambling for WDM-Aided VLC System// *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 1-13, Oct. 2016, Art no. 7804513, doi: 10.1109/JPHOT.2016.2607689.
- [25] Chen R., Chen Y., Chen C., Wei C., Lin W. and Chiu Y. High-Power Long-Waveguide 1300-nm Directly Modulated DFB Laser for 45-Gb/s NRZ and 50-Gb/s PAM4// *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 24, pp. 2091-2094, 15 Dec.15, 2018, doi: 10.1109/LPT.2018.2877676.
- [26] 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.
- [27] Cheng X. P. *et al.* Single-Longitudinal-Mode Erbium-Doped Fiber Ring Laser Based on High Finesse Fiber Bragg Grating Fabry–PÉrot Etalon// *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 976-978, June15, 2008, doi: 10.1109/LPT.2008.922974.
- [28] Communication from The Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions, Connectivity for a Competitive Digital Single Market — Towards a European Gigabit Society, (SWD(2016)300 final), European Commission, Brussels, Vol. 14, 9, 2016.
- [29] Corning Inc, FORM 10-K Annual report pursuant to section 13 and 15(d), 2013.

- [30] Dai G., Fan X. and He Z., A Long-range Fiber-optic Raman Distributed Temperature Sensor Based on Dual-source Scheme and RZ Simplex Coding// 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Hangzhou, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ACP.2018.8596150.
- [31] Deynu F.K., Akpari E.W., Akama C. Phase noise effects on the performance of joint carrier phase recovery algorithms in phase locked WDM superchannel transmission systems// *Optical Fiber Technology*, Volume 54, 2020, 102104, ISSN 1068-5200.
- [32] Dou X. *et al.* Demonstration of chaotic-laser based WDM-PON secure optical communication and real-time online fiber-fault detection and location// 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC.2015.7340182.
- [33] Dravnieks K. and Spolitis S. Demonstration of scalable spectrum-sliced optical WDM-PON access system// 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St. Petersburg, 2017, pp. 2425-2430.
- [34] Du J. and He Z. Sensitivity enhanced strain and temperature measurements based on FBG and frequency chirp magnification// *Optics express*. 21. 27111-8. 10.1364/OE.21.027111, 2013.
- [35] Elayoubi K., Rissons A., Belmonte A. Optical test bench experiments for 1-Tb/s satellite feeder uplinks// *Proc. SPIE 10770, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII*, 1077006 (18 September 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2317728>.
- [36] El-Sahn Z. A., Mathlouthi W., Fathallah H., LaRochelle S. and Rusch L. A. Dense SS-WDM Over Legacy PONs: Smooth Upgrade of Existing FTTH Networks// *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 10, pp. 1485-1495, May15, 2010.
- [37] Fei Z., Tao P., Zhihu W., Tao F. and Yuxi C. Stealth transmission of time-domain DC phase shift en/decoded OCDMA signal over WDM network// *Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*, Changchun, 2012, pp. 225-228.
- [38] Feng Z., Sun W., Zhu J., Shao J., Hu W. Resource allocation in electrical/optical hybrid switching data center networks// *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Networking* 9 (8) (2017) 648–657.
- [39] Fernandez-Valdivielso C., Matia I. R. and 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.
- [40] Fiber-To-The-Home TOP 100 Broadband Communities Magazine, Fiber-to-the-home leaders and innovators for 2018, A BBC Staff Report, Jul. 2018.
- [41] Fok M.P. and Prucnal P.R. Compact and low-latency scheme for optical steganography using chirped fibre Bragg gratings// *Electronics Letters*, vol. 45, no. 3, pp. 179-180, 29 January 2009.
- [42] Furdek M., Skorin-Kapov Nina., Zsigmond S., and Wosinska L. Vulnerabilities and security issues in optical networks// 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Austria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2014.6876451.
- [43] 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.
- [44] Gao Z., Wang X., Kataoka N. and Wada N. Stealth transmission of time domain spectral phase encoded OCDMA signal over WDM system// 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, CA, 2010, pp. 1-3.
- [45] Gebremichael Y. M., Li W., Meggitt B.T. et al. A field deployable, multiplexed Bragg grating sensor system used in an extensive highway bridge monitoring evaluation tests// *IEEE Sensors Journal*, Vol. 5, no. 3, pp. 510-519, 2005.
- [46] Ghazisaeidi A., Vacondio F. and Rusch L. A. Filter Design for SOA-Assisted SS-WDM Systems Using Parallel Multicanonical Monte Carlo// *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 79-90, Jan.1, 2010.
- [47] Gill H.S., Gill S.S., Bhatia K.S. A novel chaos-based encryption approach for future generation passive optical networks using SHA-2// *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Network*. 9 (12) (2017) 1184–1190.
- [48] Guo H., Xiao G., Mrad N. and Yao J. Simultaneous Interrogation of a Hybrid FBG/LPG Sensor Pair Using a Monolithically Integrated Echelle Diffractive Grating// *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 12, pp. 2100-2104, June15, 2009, doi: 10.1109/JLT.2008.2007426.
- [49] Guo H.-Y., Wang Z.-B., and Li H.-Y. Development and commissioning of high temperature FBG solid pressure sensors// *Journal of Sensors*, Vol. 2018, Article ID 2056452, 8 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2056452>.

- [50] Hua N., Zhong Z. and Zheng X. Enabling low latency at large-scale data center and high-performance computing interconnect networks using fine-grained all-optical switching technology// 2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Budapest, 2017, pp. 1-4.
- [51] Huang Y., Wang X., Wang K., Zhang D. and Dai B. A novel optical encoding scheme based on spectral phase encoding for secure optical communication// 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), Wuzhen, 2017, pp. 1-3.
- [52] Hui X. *et al.* A real-time detection and self-control phase-sensitive OTDR distributed sensor system// 2013 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), Chengdu, 2013, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICO CN.2013.6617198.
- [53] 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.
- [54] International telecommunication union, ITU-T Recommendation G.692, Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks, Transmission media characteristics – Characteristics of optical components and sub-systems, Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.
- [55] Isaacs S., Hajoj A., Abutoama M., Kozlovsky A., Golan E., Abdulhalim I. Resonant Grating without a Planar Waveguide Layer as a Refractive Index Sensor// Sensors (Basel). 2019;19(13):3003. Published 2019 Jul 8. doi:10.3390/s19133003.
- [56] ITU-T Recommendation G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, International Telecommunication Union, Telecommunication standardization sector of ITU, 1–17, 2016.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] ITU-T Recommendation G.9807.1, Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. Access networks – Optical line systems for local and access

- networks, 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON), International Telecommunication Union, Telecommunication standardization sector of ITU, 1–286, 2016.
- [60] 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.
- [61] Jo B.W., Khan R.M.A., Lee Y. S., Jo J. H. and Saleem N. A Fiber Bragg Grating-Based Condition Monitoring and Early Damage Detection System for the Structural Safety of Underground Coal Mines Using the Internet of Things// Journal of Sensors, vol. 2018, Article ID 9301873, 16 pages, 2018.
- [62] Jo B.W., Khan R.M.A., Lee Y.-S. Hybrid Blockchain and Internet-of-Things Network for Underground Structure Health Monitoring// Sensors, vol. 18, no. 12, 4268, 2018.
- [63] Kashyap R. Fiber Grating Band-Pass Filters, Chapter 6 (Second edition)// Academic Press, 2010., pp. 217-300, ISBN 9780123725790, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372579-0.00006-5>.
- [64] Kersey A. Optical Fiber Sensors for Permanent Downwell Monitoring Applications in the Oil and Gas Industry// IEICE Transactions on Electronics, 2000.
- [65] Kim D., B. Kim B. G., Bo T. and Kim H. Performance Improvement of RSOA-based Coherent WDM PON Using SBS Suppression and Erasing Frequency-Dithering Tone// 2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Jeju Island, Korea (South), 2018, pp. 1-2.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] Laffont G., Cotillard R., Roussel N., Desmarchelier R., Rougeault S. Temperature Resistant Fiber Bragg Gratings for On-Line and Structural Health Monitoring of the Next-

- Generation of Nuclear Reactors// Sensors, 2018; 18(6):1791.  
<https://doi.org/10.3390/s18061791>.
- [70] Leal-Junior A. G., Díaz C., Marques C., Frizera A., and Pontes M. J. 3D-printing techniques on the development of multiparameter sensors using one FBG// Sensors, Vol. 19, No. 16, 3514, 2019.
- [71] Leal-Junior A., Casas J., Marques C., Pontes M.J., Frizera A. Application of Additive Layer Manufacturing Technique on the Development of High Sensitive Fiber Bragg Grating Temperature Sensors// Sensors, 2018; 18(12):4120.  
<https://doi.org/10.3390/s18124120>.
- [72] 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).
- [73] Leeson M.S., Sun S. Spectrum slicing for low cost wavelength division multiplexing// 2nd ICTON Mediterranean Winter: Conference Proceedings 2008, Marrakech, Morocco, pp. 1–4, 2008.
- [74] Li C., Huang X., Lu H., Huang Y., Huang Q. and Tu S. A WDM PAM4 FSO–UWOC Integrated System With a Channel Capacity of 100 Gb/s// Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 7, pp. 1766-1776, 1 April, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2960525.
- [75] Li R., Chen Y., Tan Y., Zhou Z., Li T., Mao J. Sensitivity Enhancement of FBG-Based Strain Sensor// Sensors (Basel). 2018;18(5):1607. Published 2018 May 17. doi:10.3390/s18051607.
- [76] Li T., Guo J., Tan Y. and Zhou Z. Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review// IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 20, pp. 12074-12087, 15 Oct.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3000257.
- [77] Li X., Yang C., Yang S., Li G. Fiber-Optical Sensors: Basics and Applications in Multiphase Reactors// Sensors, vol. 12, no. 9, pp. 12519-12544, 2012, <https://doi.org/10.3390/s120912519>.
- [78] Liu Y., Chen D., Yu Y. Improving modulation bandwidth of tunable three sections distributed Bragg reflector lasers by using asymmetric nonlinear gain: Design and simulation// Optics Communications, Volume 479, 2021, 126439, ISSN 0030-4018.

- [79] Ma C. et al. Long-Range Distributed Fiber Vibration Sensor Using an Asymmetric Dual Mach–Zehnder Interferometers// *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 9, pp. 2235-2239, May 1, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2532877.
- [80] Maeda H. et al. Field Trial of 400-Gbps Transmission Using Advanced Digital Coherent Technologies// *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 12, pp. 2494-2499, 15 June 15, 2017, doi: 10.1109/JLT.2017.2676009.
- [81] Maeda H., Kawahara H., Saito K., Seki T. and Kani J. Performance Degradation of SD-FEC Due to XPM Phase Noise in WDM Transmission System with Low-Speed Optical Supervisory Channel// 2019 IEEE Photonics Conference (IPC), San Antonio, TX, USA, 2019, pp. 1-2, doi: 10.1109/IPCon.2019.8908288.
- [82] Makiuchi Y., Matsuura H., Development of a Low-Loss Optical Circulator, *Furukawa Review*, No.22, 2002.
- [83] Meena M.L., Gupta R.K. Design and comparative performance evaluation of chirped FBG dispersion compensation with DCF technique for DWDM optical transmission systems// *Optik*, Volume 188, 2019, 212-224, ISSN 0030-4026.
- [84] Memon S. F., Ali M. M., Pembroke J. T., Chowdhry B. S., and Lewis E. Measurement of ultralow level bioethanol concentration for production using evanescent wave based optical fiber sensor// *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 67, No. 4, 780–788, April 2018, doi: 10.1109/TIM.2017.2761618.
- [85] Miles R., Lempert W., Forkey J. *Laser Rayleigh scattering*, Institute of physics publishing, Measurement science and technology, 2001, 12. 10.1088/0957-0233/12/5/201.
- [86] Ming-Jun L., Tetsuya H., Chapter 1 - Advances in low-loss, large-area, and multicore fibers, *Optical Fiber Telecommunications VII*// Academic Press, 2020, pp. 3-50, ISBN 9780128165027, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816502-7.00001-4>.
- [87] MirhoseiniNejad S. M., Rahmanpour A. and Razavizadeh S. M. Phase Jamming Attack: A Practical Attack on Physical layer-Based Key Derivation// 2018 15th International ISC (Iranian Society of Cryptology) Conference on Information Security and Cryptology (ISCISC), Tehran, Iran, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISCISC.2018.8546920.
- [88] 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.
- [89] Muanenda Y., Oton C. J., Faralli S. and Pasquale F. D. A  $\phi$ -OTDR sensor for high-frequency distributed vibration measurements with minimal post-processing// 19th



- Italian National Conference on Photonic Technologies (Fotonica 2017), Padua, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2017.0213.
- [90] Muciaccia T., Gargano F. and 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>.
- [91] 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](https://doi.org/10.1007/0-387-29188-1_6)
- [92] Nain H., Jadon U and Mishra V. Evaluation and analysis of non-linear effect in WDM optical network// 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, 2016, pp. 36-39, doi: 10.1109/RTEICT.2016.7807777.
- [93] Noura A., Mamdoohi G., Yaacob M. H., Bakar M. H. A. and Anas S. B. A. Optimization of hybrid Raman-Brillouin-EDF amplification fiber laser in long distance FBG sensor system// 2014 IEEE 5th International Conference on Photonics (ICP), Kuala Lumpur, 2014, pp. 204-206, doi: 10.1109/ICP.2014.7002356.
- [94] Pang B., Gu Z., Ling Q., Wu W., Zhou Y. Simultaneous measurement of temperature and surrounding refractive index by superimposed coated long period fiber grating and fiber Bragg grating sensor based on mode barrier region// *Optik*, Volume 220, 2020, 165136, ISSN 0030-4026.
- [95] Paul A. R., Roy P., Mukharjee S. *Mechanical Sciences Engineering Mechanics and Strength of Materials*, Eastern Economy Edition, Prentice-Hall of India, New Delhi, 2006, 300 lpp, ISBN 81-203-2454-4.
- [96] Pendry J.B., Smith D.R. Reversing light with negative refraction// *Physics Today*, 57, 6, 37 (2004); <https://doi.org/10.1063/1.1784272>.
- [97] 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.
- [98] Porsezian K., Senthilnathan K., CHAPTER 17 - Solitons in a Fiber Bragg Grating, Editor(s): Bishnu P. Pal, *Guided Wave Optical Components and Devices*// Academic Press, 2006, pp. 251-280, ISBN 9780120884810.
- [99] 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.

- [100] Pungo A. M. M., Cerón P. J. P. and Agredo G. A. G. Performance of Raman Fiber Amplifiers (RFA) in a Next Generation Optical Network XGS-PON// 2020 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), Cali, Colombia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/COLCOM50121.2020.9219759.
- [101] Qi Y., Jia C., Tang L., Zhang X., Gong C., Liu Y., Liu X., Research on temperature and humidity sensing characteristics of cascaded LPFG-FBG// *Optik*, Volume 188, 2019, pp. 19-26, ISSN 0030-4026.
- [102] Qiu D., Wang T., Ye Q., et al. A Deformation Prediction Approach for Supertall Building Using Sensor Monitoring System// *Journal of Sensors*, vol. 2019, Article ID 9283584, 12 pages, 2019.
- [103] 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 (ICOON), Wuzhen, 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICOON.2017.8121293.
- [104] Rajan, G. (Ed.). (2015). *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications* (1st ed.)// CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18074>.
- [105] Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y Farrell G. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials// *Sensors*. 2016; 16(1):99. <https://doi.org/10.3390/s16010099>.
- [106] Ren Y. W., Yuan Q., Chai J., Liu Y.L., Zhang D.D., Liu X.W., Liu Y.X., Study on the clay weakening characteristics in deep unconsolidated layer using the multi-point monitoring system of FBG sensor arrays// *Optical Fiber Technology*, Volume 61, 2021, 102432, ISSN 1068-5200.
- [107] Róka R. Optimization of the Optical Power Budget for Various WDM-PON Network Designs with Traffic Protection Securing// 2018 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, 2018, pp. 1-6.
- [108] Sabat N. K., Rao B. S and Patnaik B. Reduction of fwm effect in fiber optic communication system by using dpddmz and circular polarization// 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Udipi, 2017, pp. 1946-1950, doi: 10.1109/ICACCI.2017.8126130.
- [109] Saktioto T., Fitriadhani S., Syahputra R., Okfalisa, Syamsudhuha S. Analysis of Attenuation Compensation Using Erbium Doped Fiber Amplifiers on Wavelength

- Division Multiplexing Networks as Optical Amplifiers in Communication Systems// Journal of Physics: Conference Series, 2019.
- [110] Schmid J. H. *et al.* Refractive Index Engineering with Subwavelength Gratings in Silicon Microphotonic Waveguides// IEEE Photonics Journal, vol. 3, no. 3, pp. 597-607, June 2011, doi: 10.1109/JPHOT.2011.2139198.
- [111] Semenova Y. Optical Communications Systems – Wavelength Division Multiplexing, Dublin Institute of Technology, 2003.
- [112] Senkans U., Bobrovs V., Ivanovs G., Spolitis S. Research of Hybrid WDM-PON Data Transmission System with Embedded ASE-Powered Stealth Channels for Steganography Applications// Optical Fiber Technology, 2020, Vol. 58, Article number 102300. ISSN 1068-5200. Available from: doi:10.1016/j.yofte.2020.102300.
- [113] 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.
- [114] Senkans U., Braunfelds J., Lyashuk I., Porins J., Spolitis S., Haritonovs V., Bobrovs V. FBG Sensors Network Embedded in Spectrum-sliced WDM-PON Transmission System Operating on Single Shared Broadband Light Source// 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL 2019): Proceedings, China, Xiamen, 17-20 December, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp.1632-1639. ISBN 978-1-7281-5305-6. e-ISBN 978-1-7281-5304-9. Available from: doi:10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021628.
- [115] Senkans U., Braunfelds J., Spolitis S., Bobrovs V. Research of FBG Optical Sensors Network and Precise Peak Detection// 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
- [116] Senkans U., Spolitis S. and Bobrovs V. Evaluation and research of FBG optical temperature sensors network// Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 79–89, Riga, 2017.
- [117] 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.

- [118] Singh A. and Tharani L. Design and Performance Evaluation of Bidirectional WDM-PON Using FTTH Architecture// 2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, 2018, pp. 0648-0652.
- [119] Singh A. and Tharani L. Design and Performance Evaluation of Bidirectional SSWDM-PON Using FTTH Architecture// 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE), Ghaziabad, India, 2018, pp. 281-285.
- [120] Singh S. P. and Singh N. Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications// Progress In Electromagnetics Research, Vol. 73, 249-275, 2007.
- [121] Singh S., Singh S., Ngo G., Mohammadi A. 340-Gb/s PolSK-DP-DQPSK optical orthogonal modulation format with coherent direct detection for high capacity WDM optical network// Optical Fiber Technology, Volume 52, 2019, 101936, ISSN 1068-5200.
- [122] Spolitis S., Bobrovs V., Berezins S., Ivanovs G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System// 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium: Conference Proceedings 2012 (IEEE Xplore), Italy, Rome, 15.-18. October, pp. 1-5, 2012.
- [123] Spolitis S., Bobrovs V., Ivanovs G. Investigation of high-speed AWG filtered spectrum-sliced WDM PON system// 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Poznan, Poland, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSNDSP.2012.6292658.
- [124] Spolitis S., Lyashuk I., Bobrovs V. Design and Performance Evaluation of FBG-based Temperature Sensors Network// 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL): Conference Proceedings 2017, Singapore, Singapore, pp. 2673-2678, 2017.
- [125] Su G. et al. WDM Optical Steganography Based on Super-Continuum Light Source// 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Huangshan, China, 2019, pp. 1-3.
- [126] Sun J. et al. A wavelength swept laser-based demodulation method for long-distance fiber Bragg grating sensing// 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka, Japan, 2019, pp. 1-3, doi: 10.23919/PS.2019.8817897.
- [127] Tahir B., Ali. J., Rahman R. Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application// Journal of Optoelectronics and Advanced Materials 8 (2006): 1604-1609.

- [128] Tang B. and Z. Zhou The design of communication network optical fiber cable condition monitoring system based on distributed optical fiber sensor// 2018 International Conference on Electronics Technology (ICET), 97–101, Chengdu, 2018, doi: 10.1109/ELTECH.2018.8401433.
- [129] Tong K., Du Z., Li J., Yuan L. Optical frequency comb based on a distributed feedback semiconductor laser with direct injection current multi-frequency modulation// Optics & Laser Technology, Volume 137, 2021, 106827, ISSN 0030-3992.
- [130] Tosi D. Improved KLT Algorithm for High-Precision Wavelength Tracking of Optical Fiber Bragg Grating Sensors// Journal of Sensors, vol. 2017, Article ID 5412825, 10 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5412825>.
- [131] Tregubov A.V., Svetukhin V.V., Novikov S.G., Berintsev A.V., Prihodko V.V. A novel fiber optic distributed temperature and strain sensor for building applications// Results in Physics, Volume 6, 2016, pp. 131-132, ISSN 2211-3797.
- [132] Tsai W. *et al.* A 20-m/40-Gb/s 1550-nm DFB LD-Based FSO Link// IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 6, pp. 1-7, Dec. 2015, Art no. 7905907, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2506172.
- [133] Vermesan O., Friess P. Internet of Things Strategic Research and Innovation Agenda// Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems; River Publishers: Aalborg, Denmark, pp. 15-26, 2013.
- [134] 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.
- [135] Wang K., Yu J., Gou P., Zhao M., Lyu K., Xin X. Transmission performance comparison of 128-SP-QAM and PM-16QAM in a WDM system// Optical Fiber Technology, Volume 43, 2018, pp. 158-162, ISSN 1068-5200.
- [136] Wang X., Gao Z., Dai B. and Buller G. 40 Gb/s Secure Optical Communication System Based on Optical Code Technology// 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, 2018, pp. 1-4.
- [137] Wang Y. Application of optical fiber sensor technology in building Internet of things// Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, vol. 6, no. 6, pp. 1151-1155, 2014.
- [138] Wang Y., Chen J., Zhang Y. and Zhou H. Cross-phase modulation in transmission systems with nonlinear dispersion compensation fibers// 2015 14th International

- Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), Nanjing, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICO CN.2015.7203647.
- [139] Werneck M. M., Allil R. C. S. B., Ribeiro B. A. and de Nazaré F. V. B. (May 15th 2013). A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors, Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings, Christian Cuadrado-Laborde// IntechOpen, DOI: 10.5772/54682.
- [140] 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// IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 20, pp. 8345-8351, 15 Oct.15, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2865910.
- [141] Wu Q., Okabe Y., Yu F. Ultrasonic Structural Health Monitoring Using Fiber Bragg Grating// Sensors. 2018; 18(10):3395. <https://doi.org/10.3390/s18103395>.
- [142] Yamatoya T., Koyama F., Noise suppression of spectrum-sliced light using semiconductor optical amplifiers// Electron. Commun. Jpn. Part 2, vol. 86, no. 2, pp. 28–35, 2003.
- [143] 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 (ICO CN), Wuzhen, 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICO CN.2017.8121290.
- [144] Zami T., Lavigne B., Weisser S. and Jauregui Ruiz I. F. How Efficient Can Routing of Individual 37.5 GHz-Spaced 100 Gb/s 33 GBaud Carriers be in WDM Mesh Core Networks?// 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Rome, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535197.
- [145] Zeng W., Gao H. Optic Fiber Sensing IOT Technology and Application Research// Sensors & Transducers Journal, vol. 180, no. 10, pp. 16-21, 2014.
- [146] 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.
- [147] Zhang Q. and Xiong Z. Crack detection of reinforced concrete structures based on BOFDA and FBG sensors// Shock and Vibration, Vol. 2018, Article ID 6563537, 1–10, 2018.
- [148] Zhang Y., Gao S. and Zhang A. P. Optically Heated Long-Period Grating as Temperature-Insensitive Fiber-Optic Refractive-Index Sensor// IEEE Photonics Journal, vol. 4, no. 6, pp. 2340-2345, Dec. 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2012.2232907.

- [149] Zhao M., Wang S., Luo B., Zhong N., Cao X. Theoretical Study on the Cross Sensitivity of Fiber Bragg Grating Sensor Affected by Temperature and Transverse Pressure// 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronic, SOPO 2010 - Proceedings. 10.1109/SOPO.2010.5504445.
- [150] Zhu H. et al. 80 km Optical Steganography Transmission Over 200 GHz-Grid WDM Network// 2016 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Wuhan, China, 2016, pp. 1-3.
- [151] Advantages and Disadvantages of WDM / Internets: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-WDM.html>
- [152] Advantest Q8384 Optical Spectrum Analyzer / Internets: [http://www.smart-inc.com.tw/uploads/root/Advantest\\_Q8384.pdf](http://www.smart-inc.com.tw/uploads/root/Advantest_Q8384.pdf)
- [153] Anritsu, Optical Spectrum Analyzer (OSA) MS9740A / Internets: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms9740a>
- [154] Apex Technologies, High Resolution Optical Spectrum Analyzer AP208X / Internets: <https://www.apex-t.com/high-resolution-optical-spectrum-analyzer-ap208x-series/>
- [155] Britannica Bragg Law / Internets: <https://www.britannica.com/biography/Lawrence-Bragg>
- [156] Britannica, Refractive index / Internets: <https://www.britannica.com/science/refractive-index>
- [157] Centrālā statistika pārvalde. Turpina pieaugt interneta izmantošana mājsaimniecībās. / Internets: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/zinatne-ikt/datori-internets/meklet-tema/2775-iedzivotaju-interneta-lietosanas-paradumi>
- [158] 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>
- [159] 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>
- [160] Coherence, RP Photonics Encyclopedia / Internets: <https://www.rp-photonics.com/coherence.html>
- [161] Distributed sensing cable in industrial environments / Internets: <https://www.cablinginstall.com/connectivity/fiber-optic/article/16467703/distributed-sensing-cable-in-industrial-environments>

- [162] Fabry-Perot Interferometers, RP Photonics Encyclopedia / Internets: [https://www.rp-photonics.com/fabry\\_perot\\_interferometers.html](https://www.rp-photonics.com/fabry_perot_interferometers.html)
- [163] FBG Technology Description / Internets: <https://www.smartfibres.com/technology>
- [164] 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>
- [165] Global Market Insights – Optical Sensor Market Size By Product / Internets: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/optical-sensor-market>
- [166] 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>
- [167] Hazardex, Understanding gas sensor lifespan / Internets: <https://www.hazardexonthenet.net/article/128977/Understanding-gas-sensor-lifespan.aspx>
- [168] Latvijas Valsts ceļi. / Internets: <https://lvceļi.lv/en/>
- [169] Measuring Extinction Ratio of Optical Transmitters Application Note 1550-8 / Internets: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5966-4316E.pdf>
- [170] Pilot Photonics – High Speed Lasers / Internets: <https://www.pilotphotonics.com/high-speed-lasers/>
- [171] RP Photonics Encyclopedia - Etalons / Internets: <https://www.rp-photonics.com/etalons.html>
- [172] RP Photonics Encyclopedia. Optical Fiber Communications / Internets: [https://www.rp-photonics.com/optical\\_fiber\\_communications.html](https://www.rp-photonics.com/optical_fiber_communications.html)
- [173] Sensor Lifespan / Internets: <http://transducersensors.com/sensor-lifespan/>
- [174] Spectrecology - Spectroscopy & Optical Sensing Solutions / Internets: <https://www.spectrecology.com/reflection/>
- [175] Tokyo Measuring Instruments Lab – FBG Fiber-optic Sensing System / Internets: [https://tml.jp/e/knowledge/special\\_ins/fiber\\_measurement.html](https://tml.jp/e/knowledge/special_ins/fiber_measurement.html)
- [176] Yokogawa AQ6370D Telecom Optical Spectrum Analyzer 600 – 1700 / Internets: <https://tmi.yokogawa.com/eu/solutions/products/optical-measuring-instruments/optical-spectrum-analyzer/aq6370d-optical-spectrum-analyzer/#Details>



## **PIELIKUMU SARAKSTS**

### **1. pielikums.**

Ziņojumu starptautiskās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos, nodaļu zinātniskā monogrāfijā, rakstu konferenču tēžu krājumos, Starptautisko un Latvijas zinātniski pētniecisko projektu saraksts.

## Ziņojumu un publikāciju saraksts

### 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
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

### **Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos**

1. Supe, A., Spolītis, S., Elsts, E., Mūrnieks, R., Doke, G., Seņkāns, 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. Seņkāns, 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., Seņkāns, 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. Seņkāns, 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
5. Seņkāns, 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, Riga, 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

### **Dalība projektos**

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