



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Jānis Braunfelds**

# **DAUDZFUNKCIONĀLAS ŠĶIEDRU OPTISKO SENSORU SISTĒMAS IZVEIDE UN PIELIETOJUMS UZRAUDZĪBAS RISINĀJUMIEM**

Promocijas darba kopsavilkums



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

**Jānis Braunfelds**

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

**DAUDZFUNKCIONĀLAS ŠĶIEDRU OPTISKO  
SENSORU SISTĒMAS IZVEIDE UN  
PIELIETOJUMS UZRAUDZĪBAS RISINĀJUMIEM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

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

profesors *Dr. sc. ing.* JURĢIS PORIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Braunfelds J. Daudzfunkcionālas šķiedru optisko sensoru sistēmas izveide un pielietojums uzraudzības risinājumiem. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 42 lpp.

Publicēts saskaņā ar RTU promocijas padomes "RTU P-08" 2023. gada 23. februāra lēmumu, protokols Nr. 19.

**INDUSTRIĀLAIS  
DOKTORANTS**



**Imt**



Inovāciju  
granti  
studentiem



Industriālais  
doktors

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



**EIROPAS SAVIENĪBA**

Eiropas Reģionālās  
attīstības fonds

<https://doi.org/10.7250/9789934229213>

ISBN 978-9934-22-921-3 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 2. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI:

*Dr. sc. ing.* Ģirts Ivanovs,

Rīgas Tehniskā universitāte

*Dr. sc. ing.* Aleksejs Udaļcovs,

*Ericsson*, Zviedrija

*Dr. sc. ing.* Kaspars Sudars,

Elektronikas un datorzinātņu institūts, Latvija

## APSTIPRINĀJUMS

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

Jānis Braunfelds \_\_\_\_\_.

Datums: \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopa ar kopsavilkumu latviešu un angļu valodā. Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 39 attēli, piecas tabulas, 11 pielikumi, kopā 69 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 203 nosaukumi. Promocijas darbs apkopo 10 no autora 19 zinātniskajiem oriģinālrakstiem, vienu Latvijas Republikas patentu. Zinātniskās publikācijas uzrakstītas angļu valodā un indeksētas *SCOPUS*, *IEEE* vai *WoS* datubāzē, to kopējais apjoms ir 100 lpp. Patents uzrakstīts latviešu valodā, tā apjoms ir 10 lpp.

DOKUMENTS IR PARAKSTĪTS AR DROŠU ELEKTRONISKU PARAKSTU UN IETVER  
LAIKA ZĪMOGU

## **Pateicība**

Paldies promocijas darba vadītājiem profesoram Vjačeslavam Bobrovam un profesoram Jurgim Poriņam un RTU ETF Telekomunikāciju institūta Sakaru sistēmu Tehnoloģiju izpētes centra vadītājam profesoram Sandim Spolītim par sniegto atbalstu un padomiem promocijas darba izstrādes gaitā!

Strādājot RTU ETF Telekomunikāciju institūtā par pētnieku, man bija iespēja sadarboties ar daudziem talantīgiem un profesionāliem kolēģiem un studiju biedriem. Paldies visiem par atbalstu, komandas darbu un zināšanām, ar kurām viņi dalījās ar mani! Īpaši liels paldies maniem ilggadējiem kolēģiem Andim Supem, Sandim Spolītim, Uģim Seņkānam, Tomam Salgalam, Armandam Ostrovskim, Rihardam Mūrniekam un Elvim Haritonovam.

Paldies SIA “Latvijas Mobilais Telefons” un RTU Dizaina fabrikas, Doktorantu studiju nodaļas komandai par padomiem, atbalstu un produktīvu sadarbību!

Visbeidzot, vislielākais paldies manai ģimenei un draugiem par sniegto atbalstu un ticību maniem spēkiem! Jūsu atbalsts ir nenovērtējams.

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

## Saturs

<b>Promocijas darba vispārējs raksturojums.....</b>	<b>7</b>
Tēmas aktualitāte.....	7
Mērķis, uzdevumi un aizstāvamās tēzes .....	8
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti .....	8
Darba struktūra un apjoms .....	9
Darba aprobācija un publikācijas .....	9
<b>Ievads.....</b>	<b>12</b>
<b>Promocijas darba galvenie rezultāti.....</b>	<b>14</b>
<b>1. Šķiedras Brega režģa piemērotāko parametru noteikšana sensoru tīklu un liela attāluma uzraudzības risinājumos.....</b>	<b>14</b>
<b>2. Šķiedru optisko sakaru sistēmas un <i>FBG</i> sensoru kopdarbības un radītās ietekmes uz datu kanālu pārraides kvalitāti novērtējums .....</b>	<b>19</b>
2.1. Apvienotas spektrāli sagrieztas šķiedru optisko datu pārraides un sensoru sistēmas novērtējums .....	19
2.2. Spektrāli sagrieztas daudzkanālu šķiedru optisko datu pārraides sistēmas un <i>FBG</i> sensoru tīkla kopdarbības novērtējums .....	21
2.3. <i>FWM</i> optiskā frekvenču ķemmē balstītas <i>DWDM</i> optiskās sakaru sistēmas ar integrētu <i>FBG</i> sensoru tīklu.....	23
<b>3. <i>FBG</i> Optisko sensoru lietojums autoceļu tehniskā stāvokļu uzraudzībā.....</b>	<b>25</b>
3.1. Autoceļa <i>SHM</i> ar ceļa segas virskārtas slānī integrētu <i>FBG</i> sensoru.....	26
3.2. Autoceļa <i>SHM</i> ar ceļa segas stabilizētas kārtas reciklētu asfaltbetona slānī integrētu <i>FBG</i> sensoru.....	30
<b>Secinājumi.....</b>	<b>34</b>
<b>Literatūras saraksts .....</b>	<b>35</b>

## Lietoto saīsinājumu saraksts

<i>AADT</i>	gada vidējā diennakts satiksme	<i>MUX</i>	multipleksors
<i>AADTT</i>	gada ikdienas kravas automašīnu satiksme	<i>MZM</i>	Maha–Cendera optiskais modulators
<i>AC</i>	asfaltbetons	<i>NRZ</i>	bez atgriešanās pie nulles līnijas kods
<i>APD</i>	lavīnfotodiode	<i>OBLS</i>	optiskais platjoslas gaismas avots
<i>ASE</i>	pastiprināta spontānā emisija	<i>OBPF</i>	optiskais joslas filtrs
<i>AWG</i>	patvaļīgas formas signālu ģenerators	<i>OC</i>	optiskais cirkulators
<i>BER</i>	bitu kļūdu attiecība	<i>ODN</i>	optiskais sadales tīkls
<i>BOTDA</i>	Briljuēna optiskā laika apgabala analizators	<i>OFC</i>	optiskās frekvences ķemme
<i>BOTDR</i>	Briljuēna optiskā laika apgabala reflektometrs	<i>OLT</i>	optiskās līnijas terminālis (galaiekārta)
<i>BTB</i>	bez pārraides vides	<i>ONU</i>	optiskā tīkla iekārta
<i>CDM</i>	koddales multipleksēšana	<i>OPC</i>	optiskais signāla jaudas apvienotājs
<i>CW</i>	nepārtraukta starojuma gaismas avots	<i>OPS</i>	optiskais signāla jaudas sazaratājs
<i>DCM</i>	dispersiju kompensējošais modulis	<i>OS</i>	optiskais slēdzis
<i>DEMUX</i>	demultipleksors	<i>OSA</i>	optiskā spektra analizators
<i>DSO</i>	ciparu signālu osciloskops ar atmiņu	<i>OTDR</i>	optiskā laika apgabala reflektometrs
<i>DSP</i>	blīva signālu apstrāde	<i>PC</i>	jaudas apvienotājs
<i>DWDM</i>	blīva viļņgarumdales blīvēšana	<i>PD</i>	fotodiode
<i>EAM</i>	elektroabsorbcijas modulators	<i>PM</i>	jaudas mērītājs
<i>EDFA</i>	erbija leģētās šķiedras pastiprinātājs	<i>PON</i>	pasīvais optiskais tīkls
<i>EF</i>	elektriskais filtrs	<i>SBS</i>	inducētā Briljuēna izkliede
<i>FBG</i>	šķiedras Brega režģis	<i>SHM</i>	tehniskā stāvokļa uzraudzība
<i>FEC</i>	turpvērstā kļūdu labošana (kļūdu koriģējošais kods)	<i>SLED</i>	superluminiscences gaismu izstarojoša diode
<i>FWD</i>	krītoša svara deflektometrs	<i>SLS</i>	pamatsignāla un sāņjoslu jaudas attiecība
<i>FWHM</i>	pilns platums līmenī viena puse	<i>SMA</i>	šķembu mastikas asfalts
<i>FWM</i>	četru viļņu mijiedarbe	<i>SMF</i>	vienmodu optiskā šķiedra
<i>GI-FMF</i>	gradianta tipa mazmodu optiskās šķiedras	<i>SOA</i>	pusvadītāju optiskais pastiprinātājs
<i>HNLF</i>	paaugstinātas nelinearitātes (augsti nelineāra) šķiedra	<i>SS-WDM</i>	spektrāli sagriezta <i>WDM</i> sistēma
<i>IEEE</i>	Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts (asociācija)	<i>VOA</i>	pārskatāms optiskais vājinātājs
<i>ITU-T</i>	Starptautiskā Telekomunikāciju savienības Telekomunikācijas standartu sektors	<i>WDM</i>	viļņgarumdales blīvēšana

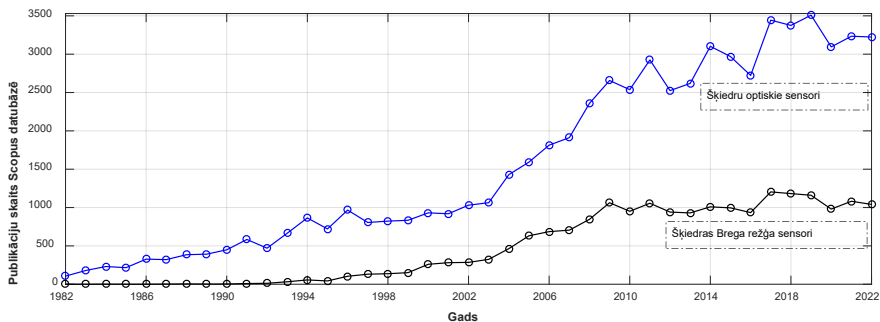
# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Ik gadu Latvijā un pasaulē pieaug objektu un teritoriju (autoceļu, aizsprostu, tiltu, pārvadu, dambju, dzelzceļu, ēku u. c. objektu) skaits, kuros nepieciešams veikt dažāda veida tehniskā stāvokļa uzraudzību reālā laikā. Turklāt pēdējās desmitgades laikā aizvien lielāka nozīme tiek piešķirta dažādu procesu un objektu uzraudzībai, publiskās infrastruktūras drošības nodrošināšanai ar dažāda tipa sensoru palīdzību [1–3]. Uzraudzība bieži jāveic lielos attālumos vairākās vietās vienlaikus korozējošā vidē ar elektromagnētisko interferenci vai vidē bez elektrobarošanas, tāpēc šādi uzraudzībai ir piemēroti optiskie *FBG* sensori [4–10].

Optiskā tīkla infrastruktūra mūsdienās netiek pilnvērtīgi izmantota un noslogota. Darba autors saskata augstu potenciālu šīs infrastruktūras izmantošanas klāsta papildināšanai ar šķiedru optisko sensoru risinājumiem. Ņemot vērā to, ka optiskā tīkla infrastruktūra izvietota pie/tuvu autoceļiem, tiltiem, tuneliem, dzelzceļiem, dambjiem u. c., to var izmantot kā pārraides vidi, lai veiktu šo infrastruktūras objektu uzraudzību. Šādiem uzraudzības risinājumiem var izmantot vai nu “tumšās” optiskās šķiedras līnijas, vai arī ekspluatēto līniju brīvos frekvenču diapazonus. Šādu risinājumu turpmākajai attīstībai svarīgi izstrādāt augstvērtīgus optiskos *FBG* sensoru tīklus liela attāluma (40+ km) uzraudzības risinājumiem, nodrošināt sakaru un sensoru risinājumu kopdarbību un kvalitatīvu sensoru integrāciju infrastruktūras objektos (piemēram, ceļu segumā) uzraudzības veikšanai.

Lai labāk novērtētu tēmas aktualitāti, tika veikta analīze *Scopus* datubāzē pieejamajiem zinātniskajiem rakstiem. Rakstu meklēšana tika veikta pēc raksta nosaukumiem, atslēgvārdiem un kopsavilkuma ar atslēgvārdiem “šķiedru optiskie sensori” un “šķiedras Brega režģa sensori”. Pēdējās desmitgades laikā ar atslēgvārdiem “šķiedru optiskie sensori” tiek vidēji publicēti 3130 zinātniski raksti, ar “šķiedras Brega režģa sensori” – 1052. Detalizēta dinamika pa gadiem redzama 1. attēlā. Augstais pieejamo zinātnisko rakstu skaits, raksturīgnes augošā dinamika un autora zinātnisko rakstu [9, 11] augstā citējamība liecina, ka pētniecības tēma pašlaik un nākotnē būs aktuāla un veicinās tehnoloģiju attīstību.



1. att. *Scopus* datubāzē pieejamo zinātnisko rakstu skaits pa gadiem.



## Mērķis, uzdevumi un aizstāvamās tēzes

**Promocijas darba mērķis** – veikt šķiedru optisko Brega režģa sensoru tīklu integrāciju šķiedru optiskajās sakaru sistēmā, un novērtēt *FBG* sensoru lietojumu autoceļa uzraudzībai reālā laikā.

Darba mērķa sasniegšanai definēti vairāki uzdevumi.

1. Novērtēt optisko sensoru tipus, galvenos parametrus, darbības principu un integrācijas iespējas eksistējošo optisko tīklu infrastruktūrā un to lietojumu.
2. Ar matemātiskās modelēšanas programmas palīdzību noteikt piemērotākos parametrus optisko *FBG* sensoru tīklu un liela attāluma uzraudzības risinājumiem.
3. Eksperimentāli un matemātiskās simulācijas vidē integrēt *FBG* sensorus šķiedru optiskajās sakaru sistēmās un novērtēt to kopdarbību.
4. Veikt optisko *FBG* deformācijas un temperatūras sensoru iestrādi (ceļa segas virskārtas, saites un stabilizētas kārtas slānī ar reciklētu asfaltbetonu) reālā autoceļa posmā.
5. Eksperimentāli novērtēt transportlīdzekļa radīto deformāciju novērtējumu reālā laikā autoceļa segumā dažādos slāņos.

### Aizstāvamās tēzes

1. Lai izveidotu *FBG* sensoru tīklu uzraudzības risinājumu darbībai vismaz 40 km attālumā, ir jānodrošina signāla atstarojamība vismaz 90 %,  $SLS > 20$  dB un  $FWHM < 0,2$  nm.
2. Ir iespējams izveidot hibrīdu uz viena platjoslas gaismas balstītu 32 kanālu 10 Gbit/s *SS-WDM PON* ar integrētu piecu *FBG* šķiedru optisko sensoru tīklu risinājumu, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla kvalitāti, ja pārraides līnijas garums ir 20 km.
3. *FBG* optiskos temperatūras un deformācijas sensorus var integrēt autoceļa stabilizētas kārtas slānī ar reciklētu asfaltbetonu, lai veiktu transportlīdzekļu radīto deformācijas novērtējumu un tehniskā stāvokļa uzraudzību reālā laikā.

### Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

1. Izstrādāts 40 *FBG* sensora tīkla matemātiskais modelis, kas nodrošina uzraudzību vismaz 40 km attālumā.
2. Izstrādāta uz viena platjoslas gaismas avota balstīta 32 kanālu 10 Gbit/s spektrāli sagrieztu šķiedru optiskā sakaru sistēma ar integrētu piecu *FBG* sensoru tīklu risinājumu.
3. Izstrādāts tehnoloģiskais risinājums optisko *FBG* sensoru integrēšanai autoceļa virskārtas, saites un stabilizētas kārtas slānī ar reciklētu asfaltbetonu, lai veiktu temperatūras un transportlīdzekļu radīto deformācijas novērtējumu reālā laikā.
4. Izstrādāta metode *FBG* deformācijas sensoru kalibrācijai, lai veiktu autotransporta radīto deformāciju novērtēšanu.

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

1. ERAF, “RTU inovāciju granti studentiem” RTU un LMT Industriālais doktorants, 1.1.1.3/18/A/001, 01.07.2019.–31.07.2022.
2. RTU zinātniskās pētniecības projekts, “Šķiedru optiskie *FBG* sensori autoceļu tehniskā stāvokļa uzraudzībai”, B4223, 02.01.2020.–31.12.2020 (projekta zinātniskais vadītājs).
3. ERAF PIP “Pasīvi šķiedru optiskie sensori energoefektīvai transporta infrastruktūras tehniskā stāvokļa uzraudzībai” 1.1.1.1/16/A/072, 01.03.2017.–01.03.2020.
4. RTU zinātniskās pētniecības projekts “Kombinētas energoefektīvas šķiedru optiskās datu pārraides un sensoru sistēmas izstrāde”, B4000, 07.01.2019.–06.01.2020.
5. RTU zinātniskās pētniecības projekts, “Eksperimentāla daudzfunkcionāla šķiedru optisko sensoru sistēmas risinājuma izveide”, B3472, 15.01.2018.–31.12.2018.

### **Darba struktūra un apjoms**

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, kas veltīta pētījumiem par šķiedru optisko *FBG* sensoru matemātiskā modelēšanā, integrācijā šķiedru optiskajās sakaru sistēmās un lietojumu autoceļa uzraudzībai reālā laikā. Promocijas darbs apkopo piecas oriģinālpublikācijas žurnālos, četras zinātniskās konferences (indeksētas *Scopus*, *IEEE* vai *Web of Science*), vienā monogrāfijā un vienā Latvijas Republikas patentā.

### **Darba aprobācija un publikācijas**

Promocijas darba galvenie rezultāti publicēti piecos zinātniskajos oriģinālrakstos, vienā monogrāfijā, vienā Latvijas Republikas patentā. Darba rezultāti prezentēti četrās zinātniskās konferencēs (indeksētas *Scopus*, *IEEE* vai *Web of Science*).

Zinātniskās publikācijas žurnālos

1. **J. Braunfelds**, U. Senkans, P. Skels, R. Janeliukstis, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Road Pavement Structural Health Monitoring by Embedded Fiber Bragg Grating Based Optical Sensors, *Sensors*, 2022, pp. 1–13. DOI: 10.3390/s22124581.
2. **J. Braunfelds**, E. Haritonovs, U. Senkans, I. Murans, J. Porins, S. Spolitis, Designing of Fiber Bragg Gratings for Long-distance Optical Fiber Sensing Networks. Modelling and Simulation in Engineering, 2022, pp. 1–13, DOI: 10.1155/2022/8331485.
3. **J. Braunfelds**, U. Senkans, P. Skels, R. Janeliukstis, T. Salgals, D. Redka, I. Lyashuk, J. Porins, S. Spolitis, V. Haritonovs, V. Bobrovs, FBG-Based Sensing for Structural Health Monitoring of Road Infrastructure (2021) *Journal of Sensors*, 2021, art. no. 8850368. DOI: 10.1155/2021/8850368.

4. **J. Braunfelds**, K. Zvirbule, U. Senkans, R. Murnieks, I. Lyashuk, S. Spolitis and V. Bobrovs, Application of FWM-based OFC for DWDM Optical Communication System with Embedded FBG Sensor Network, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021, pp. 14 (apstiprināta publicēšanai).
5. U. Senkans, **J. Braunfelds**, I. Lyashuk, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Research on FBG-Based Sensor Networks and Their Coexistence with Fiber Optical Transmission Systems (2019) *Journal of Sensors*, 2019, art. no. 6459387. DOI: 10.1155/2019/6459387.

Zinātniskā monogrāfija

1. **J. Braunfelds**, S. Spolitis, J. Porins, V. Bobrovs, Fiber Bragg Grating Sensors Integration in Fiber Optical Systems, *IntechOpen*, 2020, DOI: 10.5772/intechopen.94289.

Darba rezultāti prezentēti zinātniskajās konferencēs (indeksēti *Scopus*, *IEEE*, *Web of Science*).

1. **J. Braunfelds**, U. Senkans, P. Skels, I. Murans, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Fiber Bragg Grating Optical Sensors for Road Infrastructure Monitoring Applications, (2022) *Optics InfoBase Conference Papers, Applied Industrial Optics*, pp. 1–2, DOI:10.1364/AIO.2022.W1A.2.
2. **J. Braunfelds**, U. Senkans, I. Lyashuk, J. Porins, S. Spolitis and V. Bobrovs, Unified Multi-channel Spectrum-sliced WDM-PON Transmission System with Embedded FBG Sensors Network, 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring), 2019, pp. 3327–3333, doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017809.
3. U. Senkans, **J. Braunfelds**, I. Lyashuk, J. Porins, S. Spolitis, V. Haritonovs, V. Bobrovs, FBG sensors network embedded in spectrum-sliced WDM-PON transmission system operating on single shared broadband light source, (2019) 2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS Fall 2019 - Proceedings, art. no. 9021628, pp. 1632–1639. DOI: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021628.
4. U. Senkans, **J. Braunfelds**, S. Spolitis, V. Bobrovs, Research of FBG Optical Sensors Network and Precise Peak Detection (2018) *Proceedings – 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2018*, art. no. 8587859, pp. 139–143. DOI: 10.1109/RTUWO.2018.8587859.

**Darba rezultāti prezentēti arī citās zinātniskajās konferencēs.**

1. U. Senkans, **J. Braunfelds**, P. Skels, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Fiber Bragg Grating Sensors For Hybrid WDM-PON systems and structural health monitoring of road infrastructure, First Workshop for ERI on Telecommunication and Networks, March 14–15, 2022.
2. **J. Braunfelds**, U. Senkans, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Fiber Bragg Grating Sensors for structural health monitoring of road infrastructure. First Workshop of EU+ Sustainability Lab (2021).

3. **J. Braunfelds**, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, FBG sensors for structural health monitoring of road infrastructure. Quantum Optics and Photonics (2021).
4. E. Haritonovs, S. Spolitis, **J. Braunfelds**, Evaluation of fiber Bragg grating applications in optical sensor solutions, 63rd International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 14, 2022.
5. **J. Braunfelds**, U. Senkans, I. Murans, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Application of FBG optical sensors in road pavement SHM, 63rd International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 14, 2022.
6. I. Zalitis, **J. Braunfelds**, S. Spolitis, FBG sensor networks and their integration in fiber optical communication systems, 63rd International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 14, 2022.
7. U. Senkans, **J. Braunfelds**, S. Spolitis, V. Bobrovs, Multi-channel SS-WDM-PON transmission system with embedded FBG sensors network, 60th International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 15, 2019.
8. A. Ostrovskis, **J. Braunfelds**, Research and evaluation of fiber optical sensors in FOTS solutions, 60th International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 15, 2019.
9. **J. Braunfelds**, V. Bobrovs, Development and Evaluation of Fiber Optical Sensors System, 59th International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 12, 2018.
10. U. Senkans, **J. Braunfelds**, S. Spolitis, V. Bobrovs Research of FBG Optical Sensors Network and Effective Detection of Channel Spacing, 59th International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 12, 2018.
11. E. Haritonovs, **J. Braunfelds**, S. Spolitis, FBG optisko sensoru režģa parametru novērtējums, RTU 62. studentu zinātniski tehniskā konference (2021).
12. A. Ostrovskis, **J. Braunfelds** Šķiedru optisko sensoru izpēte un novērtējums ŠOPS risinājumos, RTU 60. studentu zinātniski tehniskā konference (2019).
13. A. Ņikuļins, **J. Braunfelds** Optiskā intensitātes sensora izstrāde un novērtējums, RTU 60. studentu zinātniski tehniskā konference (2019).

## IEVADS

Mūsdienās liela daļa iedzīvotāju saprot, ko nozīmē termins “optiskais internets”. Lai lietotājam nodrošinātu šādu pakalpojumu, tiek izmantota optiskā šķiedra, pa kuru tiek veikta informācijas pārraide. Attīstoties tehnoloģijām, optisko šķiedru lietojumu klāsts pieaug, un viens no šādiem risinājumiem ir šķiedru optiskie sensori.

Optiskās šķiedras sensoru risinājumos tika izmantotas jau 1970. gadā. Tas kļuva iespējams, pateicoties lāzeru izgudrošanai 1960. gadā un zema vājinājuma optisko šķiedru attīstībai 1966. gadā [12]. 20. gs. 90. gadu sākumā sāka lietot optiskos sensorus, ar ko varēja mērīt temperatūru, deformāciju, spiedienu u. c. parametrus. Savukārt 21. gs. sākumā plašu lietojumu ieguva optiskie sensori, kas mēra temperatūru visā šķiedras garumā, un tas ļāva naftas un gāzes kompānijām novērot savus tīklus un novērst bojājumus daudz laicīgāk. Būvniecībā šķiedru optiskie sensori tika izmantoti, lai novērotu kritiskos punktus ēkās un laikus veiktu remontdarbus. Laikam ejot, arvien vairāk tiek domāts par procesu efektivitāti un automatizāciju, un šķiedru optisko sensoru izmantošana arvien paplašinās.

Kopš 21. gs. sākuma progress ir bijis ievērojams, un mūsdienās ar optisko šķiedru sensoru palīdzību ir iespējams veikt visdažādāko parametru, piemēram, deformācijas, spiediena, temperatūras, pārvietojuma, vibrācijas, paātrinājuma, rotācijas, šķidrums līmeņa, mitruma, strāvas stipruma, ķīmiskā sastāva u. c., izmaiņu mērīšanu [12]. Šo sensoru attīstībā liela nozīme bija optisko šķiedru priekšrocībām, salīdzinot ar citu veidu sensoriem, piemēram, augsta jutība, imunitāte pret elektromagnētisko interferenci, pasīvi sensori, vieglums un kompakts, noturība pret ķīmiskām vielām, multipleksēšanas iespējas, piemērotība novērot izmaiņas attālināti lielos attālumos, zems ienestais vājinājums [12], plašs mērāmo ķīmisko un fizikālo parametru spektrs [13–16].

Optiskās šķiedras sensorus iedala divās lielās grupās: iekšējie un ārējie šķiedru optiskie sensori.

**Ārējiem šķiedru optiskiem sensoriem** optiskais signāls izplūst ārpus optiskās šķiedras, un tiem ir nepieciešams sensora elements šķiedras galā. Materiāls, kas maina savus optiskos parametrus, piemēram, laušanas koeficientu, absorbēšanu, fluorescenci, atstarošanas u. c., ļauj izveidot plašu skaitu sensoru, ņemot vērā uzraugāmo parametru. Ārējie šķiedru optiskie sensori mūsdienās joprojām ieņem svarīgu vietu kopējā optiskās šķiedras sensoru klāstā. Ārējos šķiedru optiskos sensoros galvenokārt izmanto divu šķiedru savienojuma sensorus un Fabrī–Pēro interferometrus [17].

**Iekšējie šķiedru optiskie sensori** izmanto optisko šķiedru kā sensora elementu. Iekšējie šķiedru optiskie sensori tiek iedalīti makrolocījumu un mikrolocījumu sensoros, šķiedras Brega režģa sensoros (*FBG*), kā arī Releja, Ramana un Briljona izkliedē balstītos sensoros. Šķiedru optisko izkliedes (Releja, Ramana un Briljuēna) sensoru gadījumā optiskā šķiedra tiek izmantota gan kā pārraides vide, gan jutīga komponente. Šo sensoru gadījumā optiskā šķiedra visā garumā darbojas kā sensors.

Šķiedras Brega režģa atklāšana ievērojami veicināja optisko šķiedru sensoru un telekomunikāciju nozares attīstību. Šķiedras Brega režģis tiek izveidots kā laušanas koeficienta izmaiņas optiskās šķiedras serdenī (gareniskās ass virzienā). *FBG* ir plašas lietojuma iespējas, piemēram, dispersijas kompensēšanas, optisko filtru, šķiedru optisko pastiprinātāju, lāzeru, multipleksoru, demultipleksoru, sensoru risinājumos u. c. [18]. Atstarotais Brega viļņa garums ir jutīgs pret dažādiem fizikāliem parametriem, tāpēc *FBG* var izmantot kā optisko sensoru, lai uzraudzītu, noteiktu fizikālo parametru izmaiņu laikā. *FBG* ir kvazi izkliedēti sensori, kas ļauj tos vienkārši multipleksēt – izmantot sensoru tīklu risinājumos (tipiski ap 100 sensoriem, bet, izmantojot *CDM-WDM*, var sasniegt pat 1000 sensorus) [19]. *FBG* sensoru telpiskā izšķirtspēja ir vienāda ar režģa garumu (tipiski 2–10 mm, retākos gadījumos sasniedz līdz 20 mm). Nolašu frekvence standarta signāla apstrādes iekārtām ir līdz 1 kHz, retākos gadījumos sasniedz 5 kHz. *FBG* sensorus var izmantot dažādās nozarēs, lai veiktu temperatūras, deformācijas, pārvietojuma, spiediena, vibrāciju u. c. fizikālu parametru uzraudzību. *FBG* sensori ir visplašāk izmantotie (2/3 gadījumos) optiskie sensori objektu (piemēram, tiltu, dambju, ceļu, ēku, cauruļvadu u. c.) tehniskā stāvokļa uzraudzības risinājumos [20–22].

Visplašāk optiskie *FBG* sensori tiek lietoti deformācijas un temperatūras mērījumiem dažādu autoceļu [11, 23, 24], dzelzceļa [25–27], ēku [28–30], kompozītmateriālu [31–34] un medicīniskos [35–37] uzraudzības risinājumos.

*FBG* temperatūras sensori tiek izmantoti temperatūras izmaiņu kompensācijai *FBG* (deformācijas, pārvietojuma, vibrācijas, spiediena u. c.) sensoriem, kā arī temperatūras [38–39] un tehniskā stāvokļa uzraudzībā [40–42].

*FBG* vibrācijas sensori galvenokārt tiek lietoti eļļas un gāzes industrijā [43, 44], *SHM* [45, 46], kā arī divdimensiju un trīsdimensiju vibrācijas uzraudzības risinājumos [43, 47, 48].

Savukārt *FBG* spiediena sensori tiek lietoti cauruļvadu [49, 50], tvertņu [51], dziļurbumu [42] uzraudzībā. Pētījumos relatīvi bieži tiek prezentēti dažādi izstrādātie spiediena (t. sk. divdimensiju un trīsdimensiju) sensori [52–54] uzraudzības risinājumiem.

*FBG* pārvietojuma sensori pēc darbības diapazonā tiek iedalīti mikropārvietojuma ( $l = 0$  mm – 10 mm) un pārvietojuma ( $l > 10$  mm) sensoros. Mikropārvietojuma sensori ir retāk izplatīti, tie tiek izmantoti konstrukciju [55–57] un augsnes [58] pārvietojuma uzraudzībā. Savukārt pārvietojuma sensori tiek lietoti rūpniecības [59–60], dzelzceļa [61–62] un medicīnas [50] risinājumos, kā arī būvkonstrukciju [57, 63, 64] un zemes pārvietojuma [65, 66] uzraudzībā.

## PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Doktorantūras laikā veikto pētījumu mērķis bija noteikt piemērotākos šķiedras Brega režģa parametrus sensoru tīklu un liela attāluma uzraudzības risinājumos, novērtēt dažāda tipa optisko sakaru sistēmu savietojamību un kopdarbību ar *FBG* sensoru risinājumos un novērtēt šo sensoru lietojumu autoceļu infrastruktūras uzraudzībā reālā laikā.

### 1. ŠĶIEDRAS BREGA REŽĢA PIEMĒROTĀKO PARAMETRU NOTEIKŠANA SENSORU TĪKLU UN LIELA ATTĀLUMA UZRAUDZĪBAS RISINĀJUMOS

Lielākā daļa tirgū pieejamie optiskie *FBG* sensori ir ar zemu pamatsignāla un sānjoslu jaudas attiecību (*SLS*) (tipiski  $SLS < 15\text{dB}$  [67, 68]) un/vai zemu atstarojamību (tipiski 7–40 % [67, 69]), un aizņem plašu spektrālo joslu ( $FWHM > 0,3\text{ nm}$  [68]), kas neļauj šos sensorus augstvērtīgi izmantot attālinātai uzraudzībai lielos attālumos (vismaz 40 km) un lietot sensoru tīklu risinājumos.

Zinātniskajos rakstos [70, 71] ir veikti pētījumi, kur matemātiskās simulācijas programmās tiek modelēti *FBG* režģi sensoru tīklu risinājumos. Pētījumā [70] tiek sasniegti augstvērtīgi režģa parametri pēc joslas platumā (0,13 nm) un *SLS* parametra (34 dB), taču atstarojamība vien 53 %. Savukārt pētījumā [71] tiek sasniegti augstvērtīgi režģa parametri pēc atstarojamības (99,9 %) un *SLS* parametra (95,6 dB), bet augsts *FWHM* (0,434 nm).

Lai sensorus izmantotu attālinātai uzraudzībai lielos attālumos un sensoru tīklu risinājumos, tiem jānodrošina šādi parametri:

- maksimāli augsta atstarojamība ( $> 90\%$ );
- maksimāli šaura atstarotā signāla spektrālā josla ( $FWHM < 0,2\text{ nm}$ );
- maksimāli augsta *SLS* vērtība ( $SLS > 20\text{ dB}$ ).

*FBG* sensorus ar parametriem (atstarojamība  $> 90\%$  un  $FWHM < 0,2\text{ nm}$ ) var izstrādāt, izmantojot tradicionālos vienmērīga tipa režģus [71–72]. Lai *FBG* sensoram nodrošinātu *SLS* vismaz 20 dB, nepieciešams izmantot režģu apodizāciju. Visu trīs parametru prasības *FBG* sensoriem tiek nodrošinātas, pielāgojot režģa garumu, režģa laušanas koeficienta izmaiņu garenvirzienā ( $\Delta n$ ) un apodizācijas formu. Pētījuma laikā ar matemātiskās simulācijas programmas “*OptiGrating*” [73–74] palīdzību *SMF* tika modelēti režģi, nomērīti to atstarojošie spektri, *Matlab* vidē tika veikta datu apstrāde un uzzīmētas raksturīknes režģa atstarojamībai, *FWHM* un *SLS* atkarībā no režģa garuma (intervālā 1–20 mm) pie vienmērīgas, sinusa, paceltā sinusa un Gausa formas režģa apodizācijas (pie  $\Delta n = 0,5 \times 10^{-4}$ ;  $1 \times 10^{-4}$ ;  $1,5 \times 10^{-4}$ ;  $2 \times 10^{-4}$ ). Šķiedras serdenī tika iestrādāts režģis ar šādām laušanas koeficienta izmaiņām garenvirzienā:

Gausa apodizācijai 
$$\Delta n(x) = \Delta n \cdot \exp \left\{ -\ln(2) \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( x - \frac{L}{2} \right)^2}{s \cdot L} \right)^2 \right\}; \quad (1.1.)$$

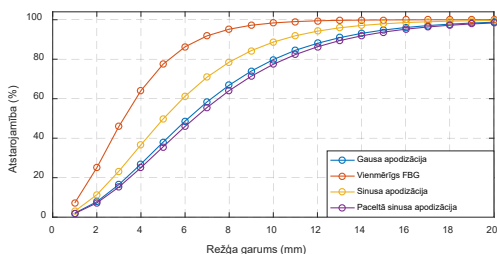
sinusa apodizācijai 
$$\Delta n(x) = \Delta n \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot x}{L} \right); \quad (1.2.)$$

paceltā sinusa apodizācijai 
$$\Delta n(x) = \Delta n \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot x}{L} \right), \quad (1.3.)$$

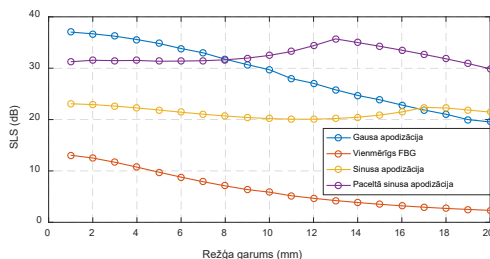
kur:  $L$  – režģa garums;  $\Delta n$  – režģa laušanas koeficienta izmaiņa;  $s$  – stiepuma garums = 0,5,  $x = (0 \leq x \leq L)$ .

Kā redzams 1.1. attēlā, palielinot režģa garumu, palielinās arī režģa atstarojamība. Augstāko atstarojamību nodrošina vienmērīgs *FBG*, pēc tam seko *FBG* ar sinusa apodizāciju.

Kā vērojams 1.2. attēlā, zemākas *SLS* vērtības uzrāda vienmērīgs *FBG*, kas nesasniedz režģa *SLS* sliekšņa vērtību (20 dB), tādēļ šādi *FBG* nav piemērotākie sensoru tīklu un liela attāluma uzraudzības risinājumiem. Augstākās *SLS* vērtības (33–38 dB) nodrošina *FBG* ar Gausa apodizāciju pie režģa garuma 1–7 mm. Ja režģa garums ir 9–20 mm intervālā, tad augstāko *SLS* nodrošina paceltā sinusa apodizācija (30–32 dB)



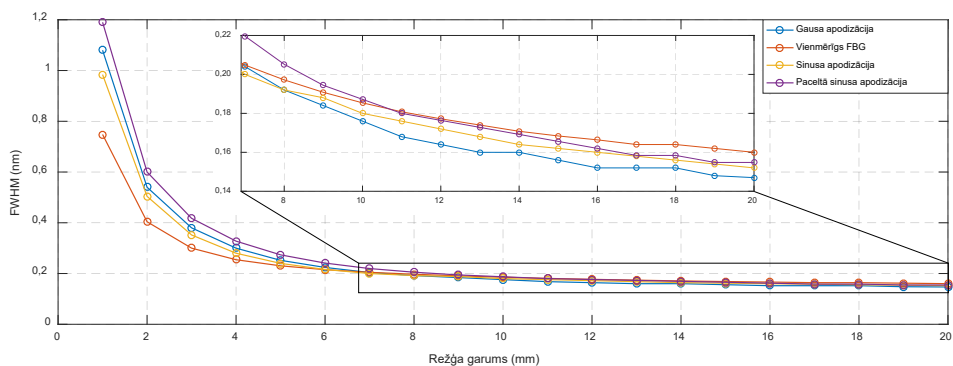
1.1. att. *FBG* atstarojamības salīdzinājums pie  $\Delta n = 1,5 \times 10^{-4}$  vienmērīgam *FBG* un *FBG* ar Gausa, sinusa, paceltā sinusa apodizāciju.



1.2. att. *FBG* *SLS* salīdzinājums pie  $\Delta n = 1,5 \times 10^{-4}$  vienmērīgam *FBG* un *FBG* ar Gausa, sinusa, paceltā sinusa apodizāciju.

Ņemot vērā rezultātus (1.3. att.), var secināt, ka *FBG* ar režģa garumu 1–6 mm nav labākais risinājums sensoru tīklu risinājumiem, jo tie aizņem plašu spektrālo joslu. Ņemot vērā to, ka jebkura sensora signāla apstrādes un analīzes iekārtai ir ierobežots raidītāja – platjoslas gaismas avota un uztvērēja – spektrometra joslas platums, tad, izmantojot *FBG* ar šaurāku spektrālo joslu, uz vienas šķiedras var izvietot lielāku sensoru skaitu. Visšaurāko joslu režģa garuma intervālā 1–7 mm izmanto vienmērīgs *FBG*, pēc tam seko sinusa un Gausa apodizācija. Režģa garuma intervālā 8–20 mm šaurāko joslu var sasniegt, izmantojot *FBG* ar Gausa apodizāciju, pēc tam seko sinusa apodizācija.





1.3. att. *FBG FWHM* salīdzinājums pie  $\Delta n = 1,5 \times 10^{-4}$  vienmērīgam *FBG* un *FBG* ar Gausa, sinusa, paceltā sinusa apodizāciju.

1. tabulā apkopoti vispiemērotākie *FBG* režģa un apodizācijas parametri *FBG* sensoru tīklu un liela attāluma uzraudzības risinājumos. Tabulā netiek apskatīts vienmērīgs *FBG*, jo tas nenodrošina minimālo *SLS* prasību. Kā redzams 1. tabulā, paceltā sinusa apodizācija nodrošina relatīvi līdzīgu atstarojamību un *FWHM* nekā Gausa apodizācija, taču *SLS* vērtības ir ievērojami labākas paceltā sinusa apodizācijai nekā Gausa apodizācijai.

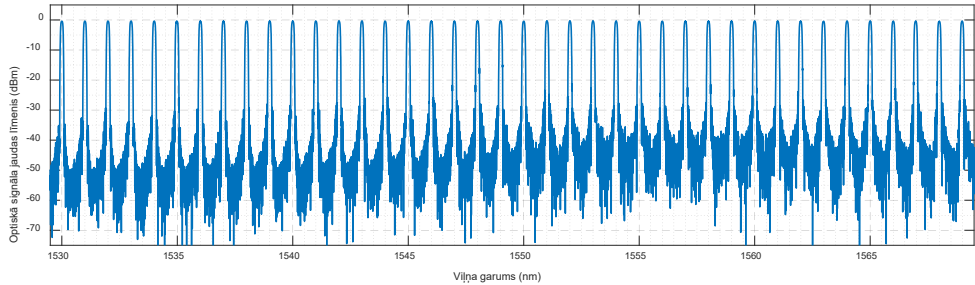
1.1. tabula

*FBG* režģa parametri *FBG* ar paceltā sinusa, Gausa un sinusa apodizāciju, ja  $\Delta n$  vērtība ir:  $1 \times 10^{-4}$ ,  $1,5 \times 10^{-4}$  un  $2 \times 10^{-4}$

Apodizācijas tips	$\Delta n (\times 10^{-4})$	Režģa garums (mm)	Atstarojamība (%)	<i>FWHM</i> (nm)	<i>SLS</i> (dB)
Paceltā sinusa	1,0	20	90,3	0,112	35,6
	1,5	13	90,0	0,173	35,7
	2,0	10	90,4	0,228	35,4
Gausa	1,0	19	90,0	0,110	26,0
	1,5	14	93,1	0,160	24,7
	2,0	10	91,7	0,216	26,9
Sinusa	1,0	16	90,9	0,118	20,1
	1,5	11	91,9	0,176	20,7
	2,0	13	99,0	0,210	22,5

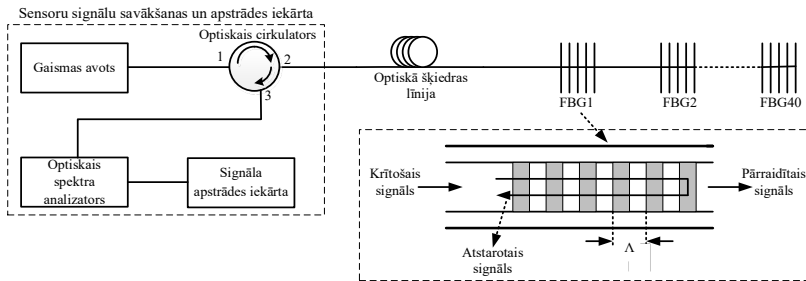
Ņemot vērā pētījuma datus, sensoru tīklu un liela attāluma uzraudzības risinājumos vislabākā ir paceltā sinusa apodizācija, jo ar šāda veida apodizāciju var sasniegt salīdzinoši augstas parametru vērtības *FBG* režģim pie izmantotām  $\Delta n$  vērtībām. *FBG* režģa garumu var saīsināt, izmantojot augstākas režģa laušanas koeficienta izmaiņas ( $\Delta n$ ). Tāču, ja  $\Delta n$  vērtības ir augstākas, palielinās spektrālās joslas platums, tādējādi arī – *FBG FWHM* vērtība.

Relatīvi vislabākos rezultātus (atstarojamība = 90,3 %,  $FWHM = 0,112$  nm,  $SLS = 35,6$  dB) uzrāda *FBG* ar paceltā sinusa apodizāciju, ja  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$  un režģa garums – 20 mm. Ņemot vērā šos parametrus, tika izstrādāts sensoru tīkls ar 40 *FBG* sensoriem viļņa garuma diapazonā 1530–1569 nm (kanāla atstatums – 1 nm). Sensora tīkla atstarotais spektrs redzams 1.4. attēlā. Sensora tīklam (1.4. att.) ar 40 sensoriem ir augsta atstarojamība (> 90 %) un  $SLS$  vērtība (~ 30 dB). Sensorus apvienojot tīklā,  $SLS$  vērtība ir pasliktinājusies (~ 5 dB), jo pārklājas sānu joslas.



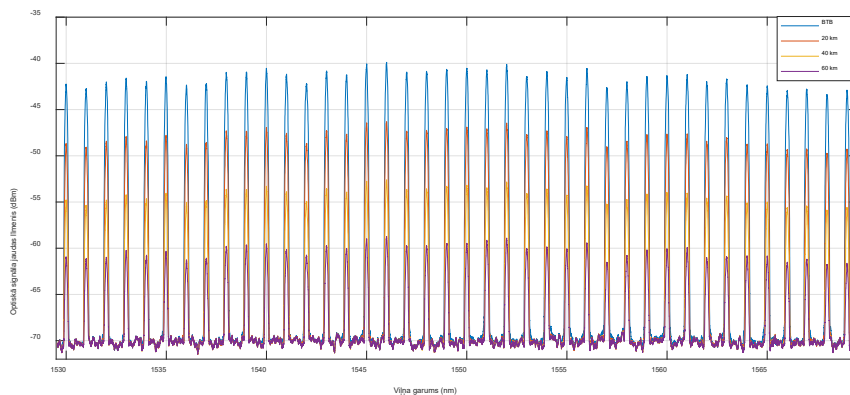
1.4. att. Atstarotais spektrs *FBG* sensora tīklam ar paceltā sinusa apodizāciju.

*VPIphotonics* matemātiskās modelēšana programmā tika izveidots modelis (1.5. att.), lai novērtētu *FBG* sensoru uzraudzības diapazonu. Izstrādātais simulācijas modelis tika validēts laboratorijas vidē pret komerciāla optiskā sensoru tīklu. Simulācijas modelī tika ieteintegrēts *FBG* sensora nomērīta pārvades raksturliktne *FBG* sensoriem. Modeļa uztverošajā daļā tika izmantots optiskais spektra analizators un signāla apstrādes iekārta, lai varētu nomērīt signāla spektrus *BTB*, 20 km, 40 km, 60 km pārraides.



1.5. att. Matemātiskā modeļa shēma *FBG* sensora darbības diapazona novērtēšanai.

1.6. attēlā redzams, ka, ja *SMF* garums ir 60 km, ir iespējams noteikt *FBG* centrālos viļņa garumus un  $SLS$  vērtība svārstās 9–11 dB. Tas nozīmē, ka *FBG* sensoru tīklu ar paceltā sinusa apodizāciju, ja  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$  un režģa garums – 20 mm, var izmantot liela attāluma (>60 km) uzraudzības risinājumos.



1.6. att. *FBG* sensora tīkla atstarotais spektrs pēc *BTB*, 20 km, 40 km un 60 km pārraides.

**Kopsavilkums.** Ņemot vērā iegūtos rezultātus, var secināt, ka noteiktās prasības (atstarojamībai  $> 90\%$ ,  $FWHM < 0,2$  nm,  $SLS > 20$  dB) *FBG* sensoru tīklu uzraudzības risinājumu darbībai vismaz 40 km attālumā var izpildīt, izmantojot paceltā sinusa, Gausa, sinusa apodizāciju. Visaugstvērtīgākos rezultātus (atstarojamība = 90,3 %,  $FWHM = 0,112$  nm,  $SLS = 35,6$  dB) uzrāda *FBG* ar paceltā sinusa apodizāciju, ja  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$  un  $L = 20$  mm, kas ļauj nodrošināt *FBG* sensoru tīklu izmantošanu liela attāluma ( $> 60$  km) uzraudzības risinājumos.

Oriģinālpublicācija par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – promācijas darba **1. pielikumā**.

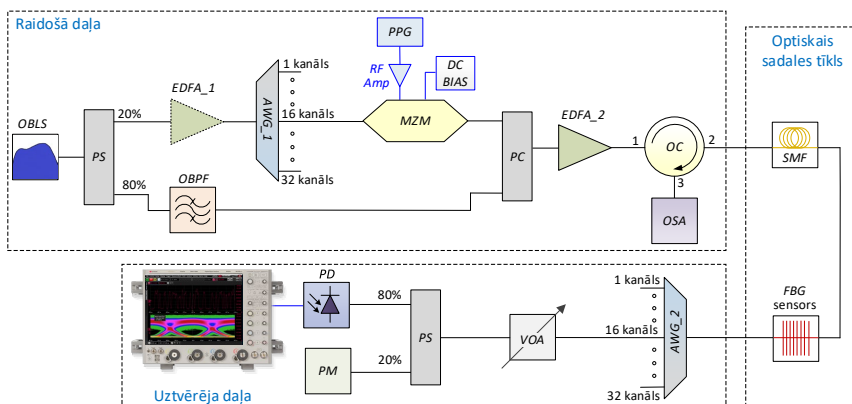
## 2. ŠĶIEDRU OPTISKO SAKARU SISTĒMAS UN *FBG* SENSORU KOPDARBĪBAS UN RADĪTĀS IETEKMES UZ DATU KANĀLU PĀRRAIDES KVALITĀTI NOVĒRTĒJUMS

Attīstoties informācijas un komunikācijas tehnoloģiju nozarei un pieaugot lietotāju vajadzībām ikdienas dzīvē, arvien vairāk tiek izstrādāti jauni un uzlaboti esošie risinājumi un sistēmas. Ņemot vērā pateicīgo optisko tīklu novietojumu un zemo noslodzi, kā arī optisko sensoru priekšrocības un plašo sensoru lietojumu klāstu, ir nepieciešams novērtēt sensoru integrācijas iespējas optiskā tīkla infrastruktūrā. Lai novērtētu nākotnes iespējas šķiedru optiskajās sakaru sistēmās integrēt *FBG* sensorus, ir nepieciešams novērtēt to kopdarbību un veikt radītās ietekmes analīzi.

Viena no pievilcīgākajām idejām optisko sensoru tīklu un datu pārraides sistēmu gadījumā ir to raidošās daļas balstīšana uz vienu platjoslas gaismas avotu. Šajā gadījumā datu pārraidei tiek izmantota spektrāli sagrieztas viļņgarumdales blīvēšanas (*SS-WDM*) tehnoloģija, tās galvenās priekšrocības aprakstītas zinātniskā rakstā [75], piemēram, izmaksu efektivitāte un raidošās daļas vienkāršošana.

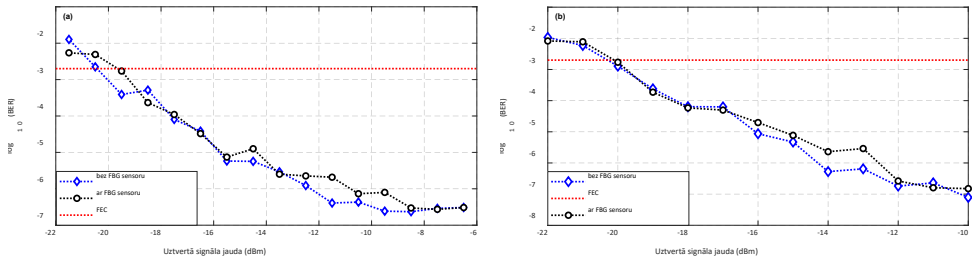
### 2.1. Apvienotas spektrāli sagrieztas šķiedru optisko datu pārraides un sensoru sistēmas novērtējums

Uz viena platjoslas avota balstīta ŠOPS ar integrētiem *FBG* sensoru tika realizēta gan matemātiskās simulācijas, gan eksperimentāli laboratorijas vidē. Sistēmas slēguma shēma redzama 2.1. attēlā, sistēma ietver raidošo daļu, optisko sadales tīklu un uztverošo daļu. Datu pārraides kvalitātes novērtējums matemātiskās simulācijas programmā tika veikts 1,5 Gbit/s spektrāli *SS-WDM* pārraides sistēmai ar integrētu *FBG* sensoru un bez tā (2.2. att.).



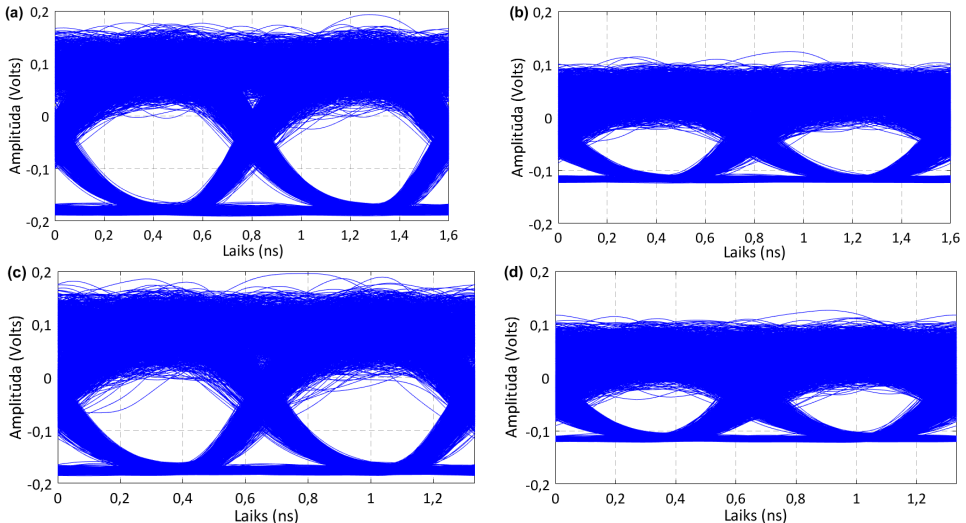
2.1. att. Uz vienu gaismas avotu balstīta ŠOPS un *FBG* sensoru sistēma.

Nemot vērā rezultātus, izriet, ka jaudas sods apvienotai optiskai datu pārraides un sensoru sistēmai (ar un bez *FBG* sensora), ja *FEC* sliekšnis  $2,3 \times 10^{-3}$  bez pārraides līnijas (*BTB*) ir 0,5 dB, ja *SMF* garums ir 20 km, 0,2 dB. Savukārt jaudas sods apvienotai datu pārraides un sensoru sistēmai (ar sensora), ja *FEC* sliekšnis  $2,3 \times 10^{-3}$  (salīdzinot *BTB* un 20 km) ir 0,7 dB.



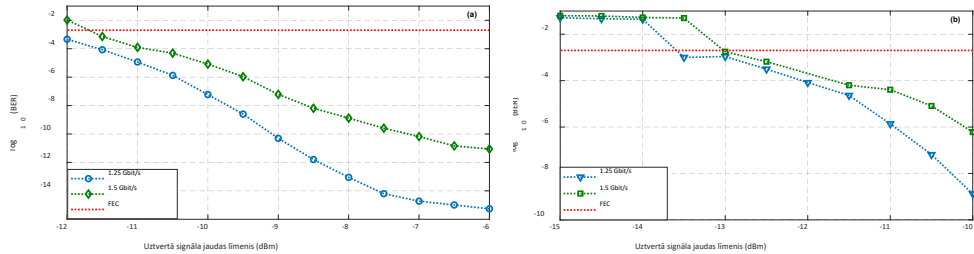
2.2. att. *BER* attiecība pret uztvertā signāla jaudas novērtējums apvienotai *SS-WDM* datu pārraides un sensoru sistēmai ar un bez integrētu *FBG* sensoru, ja *SMF* (a) 0 km, (b) 20 km.

Datu pārraides kvalitātes novērtējuma rezultāti eksperimentāli realizētai *SS-WDM* datu pārraides un sensoru sistēmai ar *FBG* redzami 2.3. attēlā acs diagrammas un 2.4. attēlā *BER* korelācijas diagrammas formā. Kā redzams 2.3. attēlā (a) un (b), ja datu pārraides ātrums ir 1,25 Gbit/s, acs diagrammas *BTB* gadījumā ir plaši atvērtas un *BER* ir vienāds ar  $4,6 \times 10^{-16}$ . Pēc 20 km pārraides *BER* vērtība samazinās un ir vienāda ar  $1,3 \times 10^{-9}$ . Savukārt, ja pārraides ātrums ir 1,5 Gbit/s, *BTB* pārraidei (2.3. att. (c))  $BER = 9,7 \times 10^{-12}$ , savukārt pēc 20 km pārraides (2.3. att. (d)) –  $6,1 \times 10^{-7}$ .



2.3. att. Acs diagrammas uztvertajam spektrāli sagrieztaī šķiedru optiskajai datu pārraides un *FBG* sensoru sistēmas signālam pie šādiem parametriem: (a) 1,25 Gbit/s *BTB*; (b) 1,25 Gbit/s pēc 20 km pārraides; (c) 1,5 Gbit/s *BTB*; (d) 1,5 Gbit/s pēc 20 km pārraides.

No 2.4. attēla izriet, ka jaudas sods spektrāli sagrieztai šķiedru optiskajai 1,5 Gbit/s datu pārraides un sensoru sistēmai ar *FBG*, salīdzinot *BTB* un pēc 20 km pārraides pie *FEC* sliekšņa ( $BER = 2,3 \times 10^{-3}$ ), ir 1,5 dB. Šis jaudas sods ir novērojams galvenokārt platjoslas *ASE* gaismas avota trokšņainības un dispersijas dēļ. Palielinot datu pārraides ātrumu no 1,25 uz 1,5 Gbit/s, pasliktinās datu pārraides kvalitāte un *BER* vērtības.



2.4. att. *BER* attiecības pret uztvertā signāla jaudas novērtējumu apvienotai *SS-WDM* šķiedru optiskajai datu pārraides un *FBG* sensoru sistēmai, ja līnijas garums ir: (a) 0 km, (b) 20 km.

Iegūtie rezultāti pierāda, ka spektrāli sagrieztai šķiedru optiskajai datu pārraides un *FBG* sensoru sistēmām var izmantot kopīgu platjoslas gaismas avotu un tās ir savstarpēji savienojamas, un iespējams veikt kļūdu brīvu datu pārraidi pa 20 km garu *SMF* pārraides līniju pie datu pārraides ātrumiem 1,25 un 1,5 Gbit/s.

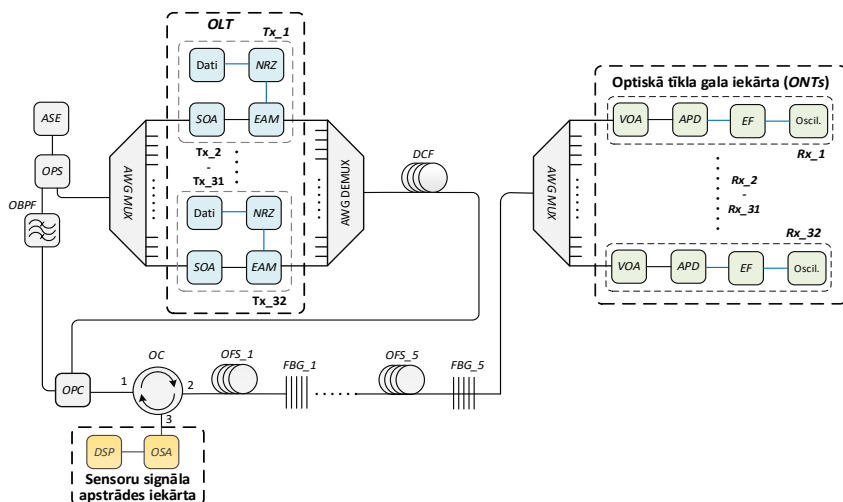
## 2.2. Spektrāli sagrieztas daudzkanālu šķiedru optisko datu pārraides sistēmas un *FBG* sensoru tīkla kopdarbības novērtējums

32 kanālu 10 Gbit/s spektrāli sagrieztam viļņgarumdales blīvētam pasīvam optiskajam tīklam (*SS-WDM PON*) un *FBG* sensoru tīkla kopdarbības novērtējums tika veikts matemātiskā simulācijas programmā *RSOFT OptSim*, tā slēguma shēma redzama 2.5. attēlā.

Shēmas izveide tiek balstīta 2.1. attēla shēmā, veicot šādus uzlabojumus:

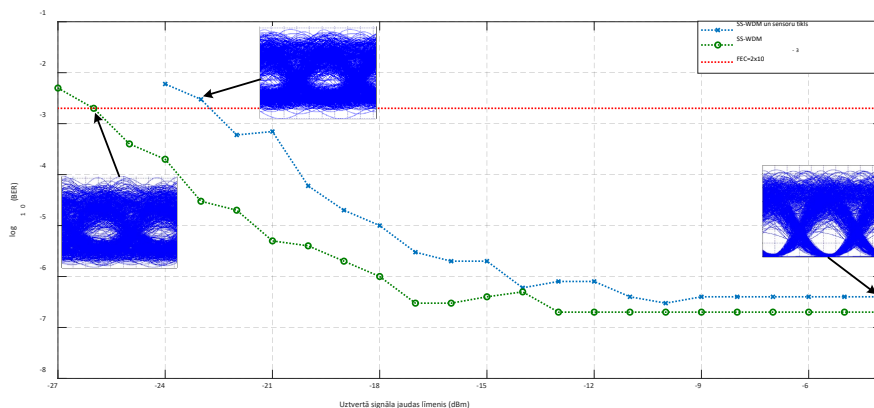
- izmantots pusvadītāja optiskā pastiprinātājs (*SOA*), lai nomāktu *ASE* intensitātes svārstības;
- *MZM* modulators aizstāts ar elektroabsorbcijas modulatoru (*EAM*) – imūni pret signāla polarizācijas stāvokli;
- *PD* aizstāta ar lavīnfotodiodes (*APD*) – spēj darboties pie zemākām signāla jaudām.

Konkrētie uzlabojumi nodrošina sistēmas darbību 20 km attālumā pie 32 kanālu 10 Gbit/s *SS-WDM PON* ar integrētu piecu *FBG* sensoru tīklu. Pilnvērtīgas savietojamības analīzei tika novērtēts, kādu ietekmi rada sensori uz pārraidāmo signālā kvalitāti. Ietekmi var novērtēt, salīdzinot signāla kvalitāti sistēmai ar datu kanāliem un sistēmu, kurā ir integrēti gan dati, gan sensora kanāli. Salīdzināšanas veikšanai tiek uzzīmēta *BER* korelācijas diagramma (2.6. att.).



2.5. att. Slēguma shēma spektrāli sagrieztu 32 kanālu ŠOPS ar integrētu *FBG* sensoru tīklu.

Simulācijas modelī tiek paredzēta 7 % datu pārraides ātruma rezerve (simulācijas veiktas pie 10,7 Gbit/s) *FEC* kļūdu labojošo kodu izmantošanai. Šādā gadījumā pieļaujamais *BER* sliekšnis ir  $2 \times 10^{-3}$ , kas nozīmē, ka pie šādas vērtības ŠOPS spēs pilnvērtīgi darboties.



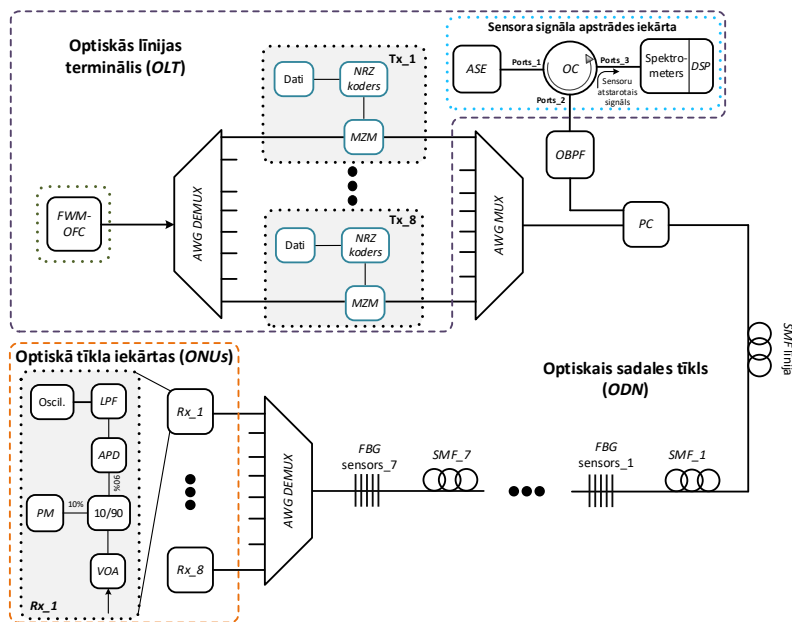
2.6. att. *BER* attiecības pret uztvertā signāla jaudas novērtējums spektrāli sagrieztai 32 kanālu šķiedru optiskajai datu pārraides sistēmai ar integrētu *FBG* sensoru tīklu, ja *SMF* garums ir 20 km.

Nomērītā *BER* vērtība *SS-WDM-PON* datu kanāliem un *FBG* sensoru tīklam ir  $4 \times 10^{-7}$ , sistēmai ar datu kanāliem  $-2 \times 10^{-7}$ . Ņemot vērā mērījumu rezultātus, tiek aprēķināta jaudas soda vērtība, kas ir vienāda ar 3,25 dB, salīdzinot *SS-WDM-PON* sistēmas datu kanāla rezultātus ar un bez *FBG* sensoru tīkla, ja *BER* sliekšnis ir  $2 \times 10^{-3}$ .

### 2.3. *FWM* optiskā frekvenču ķemmē balstītas *DWDM* optiskās sakaru sistēmas ar integrētu *FBG* sensoru tīklu

Simulācijas mērķis ir izstrādāt un novērtēt veiktspēju uz četru viļņu mijiedarbes balstītas optiskās frekvenču ķemmes (*FWM-OFC*) astoņu kanālu *DWDM* pārraides sistēmas ar integrētu *FBG* sensoru tīklu. Simulācijas modelis (izstrādāts *RSOFT OptSim*) sastāv no optiskās līnijas termināļa (*OLT*), optiskās sadales tīkla (*ODN*) un optiskās tīkla iekārtas (*ONUs*) (2.7. att.).

*FWM-OFC* ģenerēšanai tika izmantoti divi nepārtraukta starojuma (*CW*) lāzери, jaudas apvienotājs un paaugstinātas nelinearitātes šķiedra (*HNLF*), ķemmes novērtēšanai tika izmantots *OSA*. *CW* lāzera izejas jauda (20 dBm) un *HNLF* garums (2 km) tiek iestatīts tāds, lai izejā tiktu iegūts spektrs ar maksimālu ķemmju skaitu un augstu līdzenu amplitūdu. *CW* lāzериem centrālās frekvences iestatītas 193,1 THz un 193,15 THz (starpkānālu intervāls 50 GHz atbilstoši *ITU-T G.694.1* [76]). *OFC* ģenerētās *FWM* frekvenču ķemmes toņu vidējās jaudas līmenis ir 0 dBm, fluktuācija ir zemāka par 3 dB, un 33 dB sāņjoslu nospiešana frekvenču diapazonā 192,9–193,25 THz. Matemātiskās simulācijas modeli tika integrēti eksperimentāli laboratorijā nomērīti komerciāla [77] *FBG* sensora parametri: caurejošais un atstarotais spektrs un tehniskie parametri (centrālais viļņa garums, *FWHM*, atstarojamība u. c.).

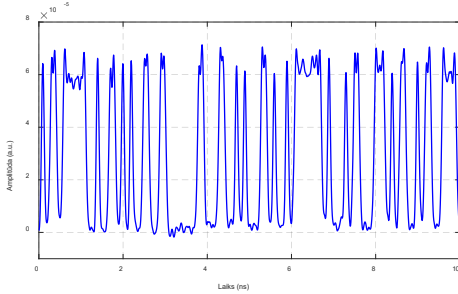


2.7. att. Matemātiskais simulācijas modelis astoņu kanālu *DWDM-PON* sistēmai, kas balstīta *FWM OFC* ar integrētu septiņu temperatūras sensoru tīklu.

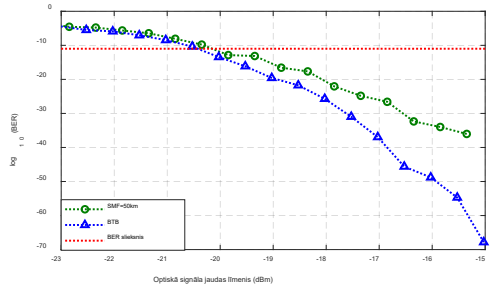
*ONUs* blokā *VOA*, 10%/90 % jaudas sazarošanas, *PM* tiek izmantots, lai uzņemtu *BER* korelācijas diagrammas un uzraudzītu pievadīto jaudu uz *APD* fotodiodes (jutība  $-20$  dBm pie  $BER \leq 10^{-12}$ ).



Elektriskais Beseļa zemfrekvenču filtrs (*LPF*) ar 7,5 GHz joslu pie  $-3\text{dB}$  līmeņa tiek izmantots, lai nofiltrētu trokšņus. Datu pārraides kvalitātes novērtēšanai tiek izmantots ceturtais kanāls, kas uzrāda zemāko veiktspēju. 2.8. attēlā redzams osciloskopā uztvertais signāls laikā apvienotajam 10 Gbit/s sistēmas *NRZ* signālam pēc 50 km pārraides pa *SMF* šķiedru. Kā redzams 2.8. un 2.10. (b) attēlā, *NRZ* signālam ir novērojama dispersijas ietekme, un tā rezultātā impulsi paplašinās.

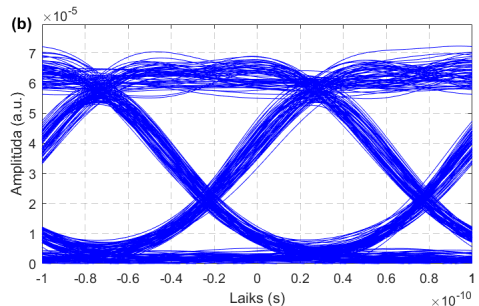
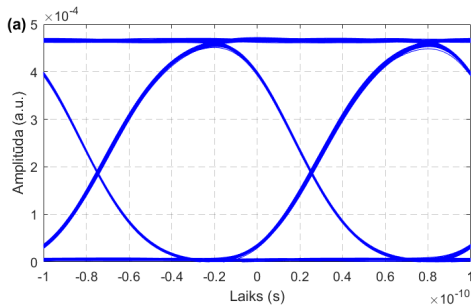


2.8. att. Uztvertais signāls 10 Gbit/s *NRZ* signālam pēc 50 km pārraides.



2.9. att. *BER* korelācijas diagramma astoņu kanālu ŠOPS ar integrētu *FBG* sensoru tīklu.

Sistēmas modelim ar apvienotu sensoru un blīvā *WDM-PON* sistēmu *BER* ir jābūt vismaz  $< 10^{-12}$  – *BER* sliekšni bezklūdu pārraidei [78–80]. ACS diagrammas apvienotai sistēmai pēc *BTB* un pēc 50 km pārraides redzamas 2.10. attēlā. ACS diagrammas ir plaši atvērtas, kas ļauj veikt bezklūdu pārraidi. *BTB* konfigurācijā *BER* ir vienāds ar  $8 \times 10^{-67}$ , pēc 50 km pārraides –  $9,4 \times 10^{-37}$ .



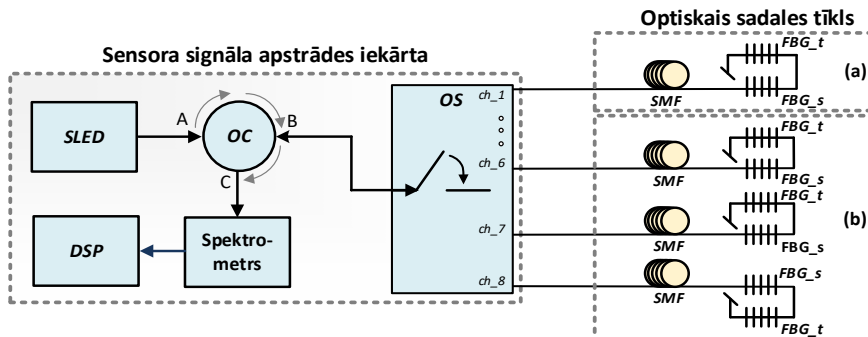
2.10. att. ACS diagramma apvienotās sistēmas slīktākam veiktspējas datu kanālam pēc: (a) *BTB*; (b) 50 km pārraides.

**Kopsavilkums.** Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka *FBG* sensori var tikt integrēti *DWDM*, *SS-WDM* šķiedru optiskajās sakaru sistēmās, neradot būtisku ietekmi uz sakaru sistēmas datu pārraides kvalitāti. Hibrīdai uz viena platjoslas gaismas balstītai sistēmai ar 32 kanālu 10 Gbit/s *SS-WDM-PON* datu kanāliem un *FBG* sensoru tīklu uztvertais *BER* ir  $4 \times 10^{-7}$ , sistēmai bez *FBG* tīkla –  $2 \times 10^{-7}$ . Oriģinālpublikācijas un Latvijas Republikas patents par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – promocijas darba **2.–8. pielikumā**.

### 3. FBG OPTISKO SENSORU LIETOJUMS AUTOCEĻU TEHNISKĀ STĀVOKĻU UZRAUDZĪBĀ

Lai nodrošinātu augstu publiskās infrastruktūras, ceļu, tiltu, pārvadu drošības līmeni, ir nepieciešams nepārtraukti novērtēt konstrukciju nestspēju, ko ietekmē novecošanās, nolietojums un bojājumi. Asfaltbetona segums pasliktinās pieaugošās satiksmes un sarežģītajos klimatiskajos apstākļos, t. i., mainoties temperatūrai un mitrumam atkarībā no sezonālītātes [81]. *FBG* sensori ir lieliski piemēroti un ļauj momentāni reālā laikā identificēt konstrukciju deformāciju, nogurumu, nestspēju, plaisas, celtniecības defektus autoceļu konstrukcijās [11, 23, 82–87]. Mērījumi bieži ir jāveic attālos reģionos, arī vidēs ar elektromagnētisko iedarbību vai vidēs, kur nav pieejama elektrobarošana, tāpēc arvien biežāk tiek un tiks izmantoti optiskās šķiedras sensori.

Autoceļu tehniskā stāvokļa uzraudzības veikšanai tika izmantota astoņu kanālu sensoru signāla apstrādes iekārta un optiskais sadales tīkls. Sensoru signāla apstrādes iekārta konkrētā risinājumā darbojas kā raiduztvērējs, tās raidošā daļā tika izmantots *SLED* platjoslas avots ( $FWHM = 55 \text{ nm}$ ), savukārt uztverošā daļā – optiskais spektrometrs un *DSP* bloks. Optiskais spektrometrs, salīdzinot ar *OSA*, nodrošina  $10^3$  reizes augstāku (*OSA*  $5 \frac{\text{molases}}{\text{s}}$  [88], spektrometrs  $5000 \frac{\text{molases}}{\text{s}}$ ) ātrdarbību, kas ir ļoti būtiski, lai precīzi novērtētu transportlīdzekļu radītas deformācijas noteikšanu kustībā. Digitālā signāla procesors (*DSP*) uztver spektrometra datus, detektē sensora/-u centrālās frekvences un matemātiski aprēķina temperatūras un deformācijas vērtības. *OS* tiek izmantots, lai nodrošinātu pārslēgšanos no porta uz portu pēc iepriekš definēta laika intervāla. *OS* ļauj veikt astoņu dažādu kanālu (sensoru, sensoru tīklu) paralēlu uzraudzību reālā laikā. Sensoru signāla apstrādes iekārta tiek savienota ar *SMF* kabeli un *FBG* temperatūras un deformācijas sensoriem, kas iestrādāti autoceļā.



3.1. att. Temperatūras un deformācijas uzraudzības sistēmas shēma.

*FBG* sensoru integrācijas vietas reāla autoceļa segumā tika izvēlētas tā, lai tās atbilstu Eiropas specifikācijai transportlīdzekļu svēršanai gaitā (*WIM*). Pētījumu veikšanai tika izvēlēti A2 (Rīga–Sigulda–Igaunijas robeža) un A8 (Rīga–Jelgava–Lietuvas robeža) autoceļi.

### 3.1. Autoceļa *SHM* ar ceļa segas virskārtas slānī integrētu *FBG* sensoru.

Komerčiāli *FBG* deformācijas [89] un temperatūras [90] sensoru iestrāde segumā tika veikta 2019.–2020. gada sezonā divās lokācijās vietās A2 autoceļa pārbūves projekta gaitā (37 km virzienā uz Rīgu) autoceļa segas virskārtas slānī.

A2 autoceļā tika integrēts komerciāls pie virsmas stiprināms *FBG* deformācijas sensors ar režģa garumu 10 mm, kas integrēts stiklšķiedras kompozītmateriālā (250 mm × 15 mm) plāksnītē [89], un keramikas caurulē (diametrs 3 mm, garums 23 mm) integrēts *FBG* temperatūras sensors [90]. Temperatūras sensors keramikas caurulē nodrošina izolāciju no deformācijas ietekmēm.

Lokācijā (a) 57°07'18,4"N 24°40'02,6"E *FBG* deformācijas un temperatūras sensori tiek integrēti ceļa segas virskārtas 30 mm akmens mastikas (*SMA11*). Sensoru integrācijas dziļumus ir 25 mm. Lokācijā (a) ceļa segai ir daudzslāņu konstrukcija (30 mm *SMA11*, 60 mm *AC11*, 150 mm šķembas, smilts), savukārt lokācijā (b) slāņu konstrukcija (70 mm *AC11* un grants). Lokācijā (b) 57°07'07,4"N 24°39'04,1"E *FBG* deformācijas un temperatūras sensori tiek integrēti pagaidu autoceļā 70 mm asfaltbetona (*AC11*) slānī 25 mm dziļumā.

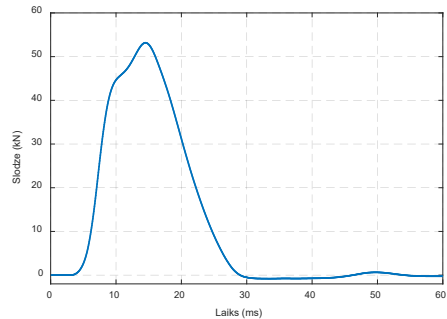


3.2. att. *FBG* sensora integrācija autoceļa seguma virskārtas slānī (a) un (b) lokācijā.

Ņemot vērā to, ka autotransporta radītā deformācija uz segumu ir atkarīga ne tikai no slodzes, bet arī no seguma temperatūras, ir būtiski izstrādāt *FBG* sensoru kalibrācijas metodi. *FBG* sensoru kalibrācijā tiek lietots krītoša svara deflektometrs (*FWD*) (3.3. att.), kas nodrošina fiksētas, kalibrētas slodzes pievadīšanu uz *FBG* sensoru. *FWD* tipiski tiek plaši izmantota kā nesagraujošu seguma testēšanas un stāvokļa novērtēšanas metode [91–93]. *FWD* slodzes atkarība laikā pie 50 kN slodzes pievadīšanas ceļa segumam redzama 3.4. attēlā.



3.3. att. *FWD* iekārta.



3.4. att. *FWD* pievadītās slodzes atkarība laikā.

Lai novērtētu *FBG* sensora darbību attālumu horizontālā virzienā, tika izmantota *FWD* iekārta. Pētījums tika veikts (a) lokācijas vietā. *FWD* iekārtas plāts centrs tika novietots četros attālos (tieši uz sensora un 300 mm, 600 mm, 900 mm attālumā), kas pieveda fiksētu  $48,9 \pm 0,5$  kN spēku sešas reizes (3.1. tab.). Visu mērījumu laikā tiek veikta temperatūras kompensācija ar *FBG* sensoru. Kā redzams 3.1. tabulā, iegūtie rezultāti parāda, ka ar *FBG* sensoru var precīzi (relatīvā izkliede 4,8–12,8 %) noteikt deformācijas vērtības, kas ļauj novērtēt seguma konstrukcijas reālo darbību zem slodzes. Kā redzams, lielākā deformācijas vērtība (vidēji  $151,8 \pm 9,9$   $\mu\text{m/m}$ ) tiek noteikta gadījumā, kad *FWD* plāts centrs atrodas tieši virs iestrādātā *FBG* deformācijas sensora.

Augstas precizitātes rezultātus var iegūt tikai no tās puses, pie kuras *FBG* deformācijas sensors ir fiksēts (sāna virsmas). Konkrētā plāksnīšu tipa sensoriem ir trūkums, kas jāņem vērā, integrējot sensorus objektā. Fiksētai vienvirziena satiksmei tas nerada uzraudzības ierobežojumus, bet maiņsatiksmes gadījumā nepieciešams integrēt *FBG* sensorus abās pusēs.

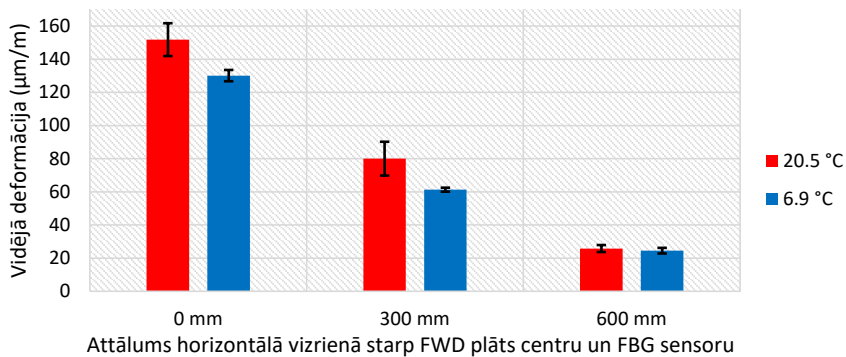
3.1. tabula

Deformācijas ( $\mu\text{m/m}$ ) vērtību atkarība no horizontālā attāluma starp *FWD* plāts centru un sensoru

<i>FWD</i> pievadītās slodzes nr.	Horizontālais attālums no <i>FWD</i> plāts centra līdz <i>FBG</i> sensoram (mm)			
	0	300	600	900
1.	162,5	91,5	24,6	12,5
2.	145,9	77,6	27,0	13,1
3.	142,7	80,5	24,2	12,2
4.	149,5	73,4	28,3	12,1
5.	161,6	85,8	25,7	13,2
6.	148,5	71,2	25,1	13,2
Vidējā deformācijas vērtība ( $\mu\text{m/m}$ )	$151,8 \pm 9,9$	$80,0 \pm 10,2$	$25,8 \pm 2,1$	$12,7 \pm 0,6$

*FWD* pēc katra spēka pievadīšanas (“sitienu izdarīšanas”) nomēra pievadīto spēku. No mērījumu datiem izriet, ka izkliede visos gadījumos ir mazāka par 1 % . Mērījumi tika veikti vasarā, seguma temperatūra 20,5 °C.

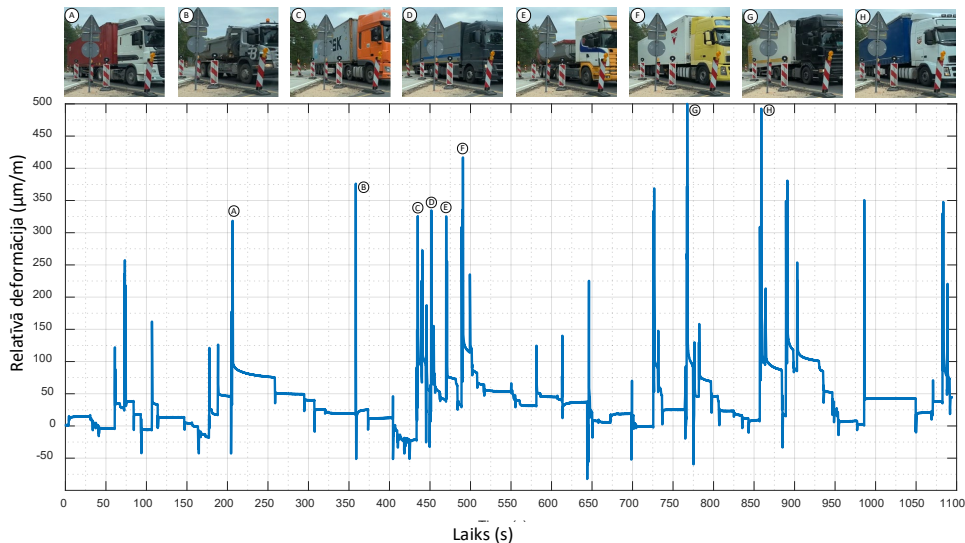
Lai novērtētu ceļa seguma temperatūras ietekmi uz izmērīto deformāciju, rudenī (seguma temperatūras 6,9 °C) tika atkārtota vēl viena mērījumu sesija. Rezultātu salīdzinājums pie 6,9 °C un 20,5 °C temperatūras redzams 3.5. attēlā. Eksperimenta laikā deflektometra slodze ir  $51,98 \pm 0,94$  kN. Kā vērojams rezultātos, visā mērījumu diapazonā *FBG* deformācijas vērtības rudenī ir zemākas nekā vasarā. Tāda pati tendence tika novērota pētījumā [84]. Siltākā laikā deformācijas vērtības bija augstākas, jo pie augstākām temperatūrām samazinās stingums, un tā rezultātā deformācijas vērtības palielinās. Balstoties iegūtajos rezultātos, analizējot transportlīdzekļu radītos deformācijas mērījumus, ir būtiski ņemt vērā ceļa seguma temperatūru.



3.5. att. Vidējās deformācijas vērtības attiecība pret attālumu horizontālā virzienā starp *FWD* plāts centru un *FBG* sensoru, ja seguma temperatūra ir 6,9 °C un 20,5 °C.

Transportlīdzekļu satiksmes reāllaika uzraudzība tika realizēta 2019. gada septembrī pagaidu ceļa posmā, (b) lokācijas vietā. Ceļa seguma vidējā temperatūra (mērot ar *FBG* temperatūras sensoru) mērījumu laikā bija +25,2 °C. Paralēli deformācijas uzraudzībai reālā laikā tika veikta video ierakstīšana, lai pārliecinātos, ka ceļu satiksmes izmaiņas korelē ar deformācijas mērījumiem, kā arī redzētu dažādu transportlīdzekļu, galvenokārt kravas automobiļu, “deformācijas raksturu”.

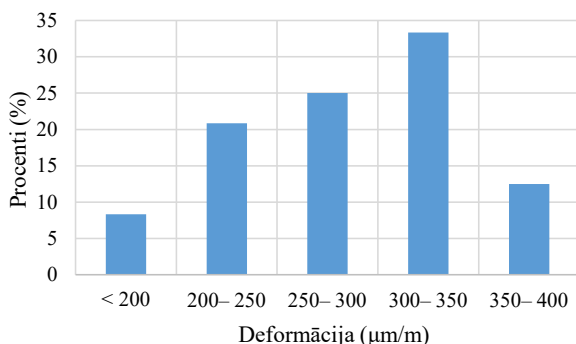
No *FBG* deformācijas sensora mērījumu datiem izriet, ka vislielākās deformācijas seguma konstrukcijā rada kravas automašīnas. Ja grafiks tiek pietuvināts, tad var noteikt transportlīdzekļa asu skaitu un katra transportlīdzekļa ass deformācijas vērtību. No mērījumu datiem izriet, ka kravas automašīnas “G” piektā ass rada vislielāko deformāciju (relatīvās deformācijas vērtība 375,6 µm/m). Otru lielāko deformācijas vērtību (356,4 µm/m) radīja “B” grants kravas auto ar trim asīm. Svarīgi atzīmēt, ka 3.6. attēlā augšējā daļā vizuāli nav redzamas visas kravas automašīnas, piemēram, laika brīžos 73 s, 728 s, 891 s, 986 s un 1084 s. Izmērītās deformācijas vērtības ir salīdzināmas un līdzīgas pētījuma [94] datiem.



3.6. att. Reālā laikā ar *FBG* sensoru nomērītās deformācijas raksturliktne laikā.

*FBG* deformācijas sensora mērījumu datu kopsavilkums, kas iegūts, veicot kravas auto satiksmes uzraudzību, redzams 3.7. attēlā. Rezultātu analīzē galvenā uzmanība tiek pievērsta kravas auto, nevis vieglo automašīnu satiksmei, jo kravas automašīnas rada vislielākās deformācijas vērtības un potenciālos ceļa seguma bojājumus. Svarīgi piebilst, ka deformācijas vērtības histogramma iekļauj visus mērījumu datus, ne tikai tos, kas redzami 3.6. attēlā.

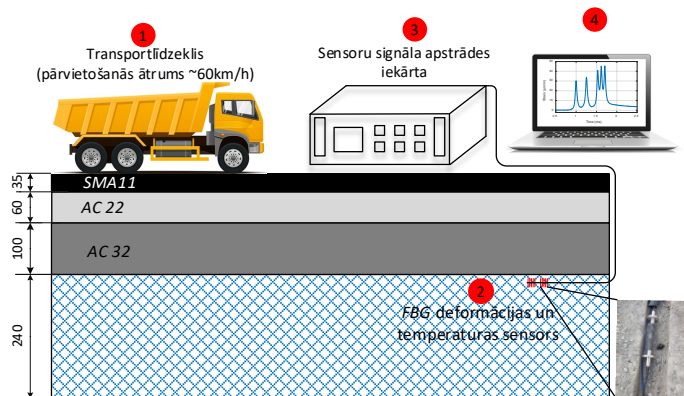
Kā redzams 3.7. attēlā, kravas auto visbiežāk (33 % gadījumos) rada 300–350 µm/m lielu deformāciju. Apkopojot un salīdzinot visus kravas auto datus, tie vidēji rada 282 µm/m deformāciju.



3.7. att. Ar *FBG* sensoru nomērītās kravas auto radīto deformācijas vērtību histogramma.

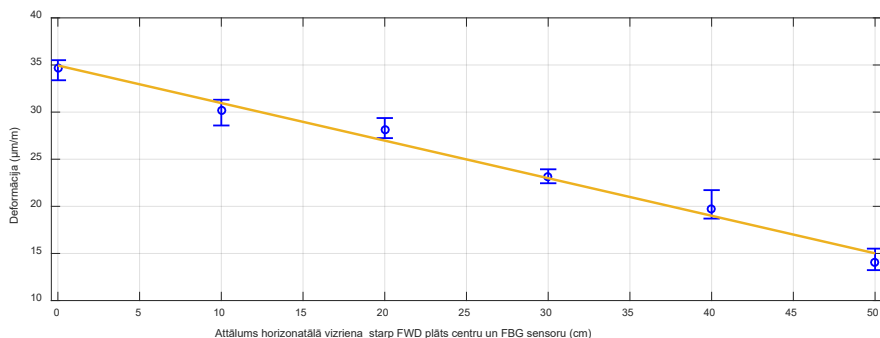
### 3.2. Autoceļa *SHM* ar ceļa segas stabilizētas kārtas reciklētu asfaltbetona slānī integrētu *FBG* sensoru.

2020.–2021. gada sezonā *FBG* sensoru iestrāde tika veikta Meitene–Jelgava–Rīga (A8) šosejas autoceļa stabilizētas kārtas reciklētu asfaltbetona slānī (turpmāk reciklētā slānī) ([ģeogrāfiskā lokācija](#)). Ceļa segā tika integrēts komerciāls enkura deformācijas sensors [95] ar darbības diapazonu  $\pm 5000 \mu\text{e}$ , precizitāti  $< 1 \mu\text{m}$ , centrālo viļņa garumu 1544,8 nm un temperatūras sensors [96] ar darbības diapazonu no  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  līdz  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , precizitāti  $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  un centrālo viļņa garumu 1554,558 nm. Sensoru integrācija veikta ceļa segas reciklētā slānī 25 mm dziļumā (kopējais integrācijas dziļums 240 mm), (3.8. att.).



3.8. att. Shēma *FBG* sensoru integrācijai ceļa segā temperatūras un deformācijas mērījumiem.

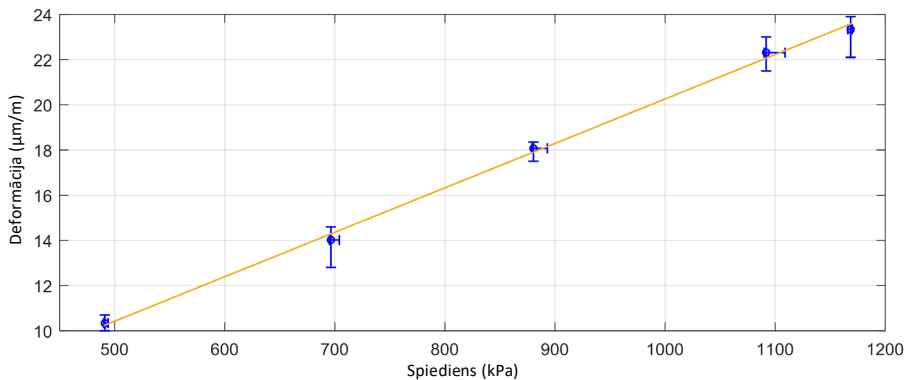
Kā redzams 3.9. attēlā, pievadot slodzi ar *FWD* deflektometru tieši virs *FBG*, sensoru vidējā deformācija  $\Delta\epsilon_{\text{avg}}$  ir  $34,63 \mu\text{m/m}$ , savukārt scenārijā, kad slodzes plāksne atrodas 50 cm attālumā no sensora, vidējā deformācija ir  $14,03 \mu\text{m/m}$ . Mērījumi veikti pie reciklētā seguma temperatūras  $1-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Apskatītā diapazonā deformācijas atkarību no attāluma var raksturot ar lineāru funkciju.



3.9. att. Nomērītās vidējās deformācijas vērtību attiecība pret attālumu horizontālā virzienā starp *FWD* plāts centru un *FBG* sensoru.

No rezultātiem izriet, ka pētījumā būtiski nodrošināt, lai transportlīdzeklis uzbrauc uz sensora vai maksimāli tuvu sensoram. Ja to nav iespējams izpildīt, autors iesaka izmantot sensoru tīklu risinājumus, lai paralēlā slēgumā ar nobīdi (piemēram, 20 cm) izvietotu sensorus.

3.10. attēlā redzama *FBG* deformācijas sensora nomērītās vidējās deformācijas atkarība no *FWD* pievadītā spiediena gadījumā, kad sensori integrēti A8 autoceļa segas reciklētā slānī. Mērījumu laikā reciklētā seguma temperatūra ir 1–1,5 °C. Palielinot *FWD* pievadīto spiedienu (diapazonā 470–1170 kPa ar soli 200 kPa), pieaug deformācijas vērtības ar lineāru raksturu. Balstoties iegūtās raksturlīknes datus, iespējams veikt sensoru kalibrāciju reālā vidē. Šāda sensoru kalibrācijas metode jāizmanto transportlīdzekļu svēršanai gaitā, nosakot deformācijas vērtības atkarībā no transportlīdzekļa masas.



3.10. att. *FBG* sensora nomērītās vidējās deformācijas atkarība no *FWD* pievadītā spiediena.

3.2. tabulā apkopota *FWD* iekārtas radītās vidējās deformācijas vērtības atkarība no ceļa segas temperatūras. Pētījumā laikā *FWD* iekārta atradās tieši virs sensora, un pievadītā slodze ir vienāda ar 50 kN (707 kPa spiediens). No mērījuma datiem izriet, ka 1–1,5 °C temperatūrā vidējā deformācija ir 2,5 reizes augstākā nekā 24,8–25,1 °C temperatūrā. Šādi rezultāti skaidrojami ar vides temperatūras ietekmi uz dažādiem ceļa konstrukcijas slāņiem. Samazinoties vides temperatūrai, samazinās arī ceļa slāņu materiālu temperatūra. Zemākā temperatūrā, piemēram, ziemā, augšējie asfalta slāņi kļūst stingāki, līdz ar to *FWD* ierīces (vai jebkura transportlīdzekļa) izraisītā slodze tiek pārnesta uz dziļākiem ceļa slāņiem – reciklēto slāni. Rezultāti parāda, ka temperatūras ietekme ir jāņem vērā mērījumu laikā un sensoru kalibrācijas procesā. Rezultātā sensoru kalibrācija jāveic ne tikai atkarībā no slodzes vai spiediena, bet arī no temperatūras.

3.2. tabula

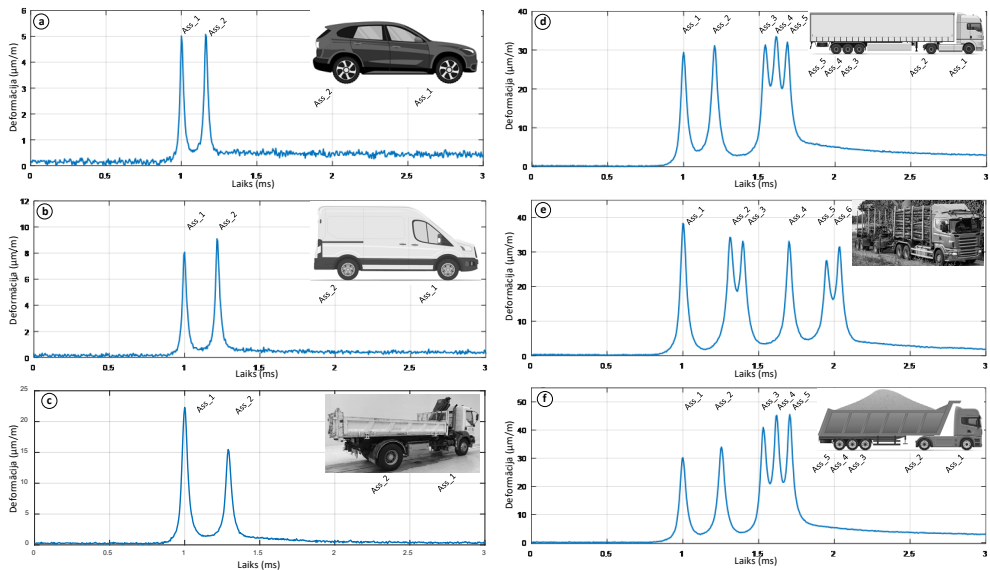
*FWD* iekārtas radītās deformācijas atkarība no ceļa segas temperatūras

Temperatūra ceļa segas reciklētā slānī	1–1,5 (°C)	24,8–25,1 (°C)
$\Delta\varepsilon_{avg}$ (μm/m)	34,63	13,70
Izkliede (%)	4,26	6,57



Ekspierimenti ar *FWD* ierīci apstiprināja stabilu un pareizu *FBG* deformācijas optisko sensoru darbību, tāpēc nākamajā pētījuma posmā tika veikti reāllaika transporta satiksmes deformācijas uzraudzības ekspirimenti pie ceļa seguma temperatūras 1–1,5 °C. Ņemot vērā to, ka pa ceļu pārvietojas dažādi transporta veidi, lai labāk izprastu deformācijas izraisītās izmaiņas un to diapazonu, visi transportlīdzekļi tika klasificēti četrās grupās: divas vieglās automašīnas (3.11. att. (a)), divas mikroautobusi (3.11. att. (b)), no divas līdz trīsasu kravas automašīnas (3.11. att. (c)), no četrasu līdz sešasu kravas automašīnas (3.11. att. (d–f)). 3.11. attēlā redzamas sešas nejausi izvēlētiem transportlīdzekļiem nomērītās deformācijas izraisītās izmaiņas laikā. Kā redzams 3.11. attēlā, *FBG* optiskais deformācijas sensors ļauj precīzi noteikt deformācijas izraisītās izmaiņas laikā katrai transportlīdzekļa asij. Iegūtos rezultātus var izmantot, lai noteiktu transportlīdzekļa pārvietošanās ātrumu, piemēram, 3.11. attēlā (a) redzamais mērījums veikts *BMW X5* automašīnai (attālums starp asīm 2,975 m), savukārt nomērītais laiks starp deformācijas maksimumiem ir 0,164 ms. Matemātiski var aprēķināt, ka transportlīdzekļa pārvietošanās ātrums ir 65,3 km/h.





Svarīgi ir norādīt, ka atkarībā no transportlīdzekļa veida, masas, asu skaita, deformācijas lieluma atslābuma laiks ir dažāds. Vieglajiem transportlīdzekļiem tipiskais atslābuma laiks ir līdz 3 s, kravu transportlīdzekļiem – līdz 5 s.



3.11. att. Reāllaika transporta satiksmes deformācijas mērījumi dati.

3.3. tabulā apkopoti deformāciju vērtību intervāli (transportlīdzekļa asij) katrai transportlīdzekļu grupai. Deformāciju vērtību intervāli tiek definēti divās daļās: 1) pilnais vērtību diapazons; 2) tipiskais vērtību diapazona intervāls, kurā iekļaujas 90 % kopējo gadījumu.

Ar *FBG* nomērītais deformāciju diapazons un noteiktais tipisko deformāciju diapazons reāla laika transportlīdzekļu trafikam

	 divas vieglās automašīnas	 divas mikroautobusi	 divas līdz trīsasu kravas automašīnas	 četras līdz sešasu kravas automašīnas
<b>Deformāciju diapazons (<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>)</b>	0,7–6	4,6–13	10–38	12–42
<b>Tipiskais (90 % gadījumos) deformāciju diapazons (<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>)</b>	0,8–4,1	5,5–8,5	11–26	14–36

No mērījumu datiem izriet, ka vieglās automašīnas ass rada tipiski 2–10 reizes mazāku deformāciju nekā divas mikroautobusu ass un 3–45 reizes mazāku deformāciju nekā četras līdz sešas kravas automašīnas ass.

**Kopsavilkums.** Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka enkura tipa *FBG* sensori ir vispiemērotākie autotransporta radīto deformāciju novērtēšanai uz ceļa seguma. Veicot autoceļu uzraudzību, *FBG* deformācijas sensori jākalibrē ne tikai atkarībā no pievadītās slodzes, bet arī no seguma slāņa temperatūras. *FBG* sensoru augstā jutība ļauj noteikt katras transportlīdzekļa ass radīto deformāciju. Eksperimentu mērījumu rezultāti ir ļoti aktuāli vietējiem un starptautiskajiem ceļu seguma projektētājiem un ceļu apsaimniekošanas dienestiem, lai prognozētu iespējamo ceļa kalpošanas laiku, palielot deformācijas, transportlīdzekļu svaru un to asu skaitu, kā arī satiksmes un ceļu seguma temperatūras uzraudzību. Eksperimentu mērījumu datus var izmantot arī viedo ceļu risinājumos [97], piemēram, satiksmes plūsmas analīzei, transportlīdzekļu uzskaitēi un brīvo autostāvvietu analīzei.

Oriģinālpublikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – promocijas darba **9.–11. pielikumā**.

## SECINĀJUMI

1. Visaugstvērtīgākos rezultātus (atstarojamība = 90,3 %,  $FWHM = 0,112$  nm,  $SLS = 35,6$  dB) *FBG* sensoru tīklu liela attāluma uzraudzības risinājumiem uzrāda *FBG* ar paceltā sinusa apodizāciju, ja  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$  un  $L = 20$  mm.
2. Sensoru tīklu, kas sastāv no 40 *FBG* sensoriem ar paceltā sinusa apodizāciju, ja  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$  un režģa garums – 20 mm, var izmantot vismaz 60 km un lielāka attāluma uzraudzības risinājumos.
3. Hibrīdai uz viena platjoslas gaismas avota balstītai sistēmai ar 32 kanālu 10 Gbit/s *SS-WDM-PON* datu kanāliem un piecu *FBG* sensoru tīklu uztvertais *BER* ir  $4 \times 10^{-7}$ , sistēmai bez *FBG* tīkla –  $2 \times 10^{-7}$ . *FBG* sensoru tīkls nebūtiski ietekmē sakaru sistēmu.
4. Jaudas sods apvienotai *SS-WDM* datu pārraides un sensoru sistēmai ar un bez *FBG* sensora, ja *FEC* sliksnis ir  $2,3 \times 10^{-3}$ , bez pārraides līnijas ir 0,5 dB, ja *SMF* garums ir 20 km, 0,2 dB.
5. Balstoties autoceļos veikto eksperimentālo mērījumu rezultātos, var secināt, ka enkura tipa *FBG* deformācijas sensori ir vispiemērotākie integrēšanai autoceļa segumā, lai reālā laikā novērtētu autotransporta radīto deformāciju un veiktu tehniskā stāvokļa uzraudzību.
6. Autoceļa reciklētā seguma slānī vieglās automašīnas ass tipiski rada 2–10 reizes mazāku deformāciju nekā divas mikroautobusi (attiecīgi 0,7–6  $\mu\text{m/m}$  un 4,6–13  $\mu\text{m/m}$ ) un 3–45 reizes mazāku deformāciju nekā četras līdz sešas kravas automašīnas ass (12–42  $\mu\text{m/m}$ ).

Darba gaitā izstrādātās rekomendācijas paredzētas:

- *FBG* sensoru tīklu izstrādātājiem un ražotājiem;
- ekspluatācijā esošu optisko metro iekļuves tīklu uzlabošanai, gan arī jaunu ieviešanai;
- vietējiem un starptautiskajiem ceļu seguma projektētājiem un ceļu apsaimniekošanas dienestiem, viedo ceļu risinājumos attīstītājiem un izstrādātājiem.

Promocijas darba laikā iegūtie un pētījumos attēlotie rezultāti prezentēti piecos zinātniskajos oriģinālrakstos un četrās zinātniskās konferencēs (indeksētas *Scopus*, *IEEE* vai *Web of Science*) vienā monogrāfijā, vienā Latvijas Republikas patentā. Pētījumu rezultāti prezentēti arī 13 citās zinātniskajās konferencēs.

Publikas informēšanas pasākumi: Eiropas Zinātnieku naktis, Latvijas Radio 1 “Zināmais nezināmajā”, RTU mājaslapa, žurnāls “IR”, *delfi.lv*, LMT, LETA, IZM, *labsoflatvia*, “Dienas Bizness”, *LA.lv* u. c.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. A. Abdelgawad and K. Yelamarthi, Internet of Things (IoT) platform for structure health monitoring, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, Article ID 6560797, 10 pages, 2017. DOI: doi.org/10.1155/2017/6560797.
2. Q. Jin, Z. Liu, J. Bin, and W. Ren, Predictive analytics of in-service bridge structural performance from SHM data mining perspective: a case study, *Shock and Vibration*, vol. 2019, Article ID 6847053, 11 pages, 2019. DOI: doi.org/10.1155/2019/6847053.
3. H. Xu, F. Li, W. Zhao, S. Wang, Y. Du, and C. Bian, A high precision fiber Bragg grating inclination sensor for slope monitoring, *Journal of Sensors*, vol. 2019, Article ID 1354029, 7 pages, 2019. DOI: doi.org/10.1155/2019/1354029.
4. L. Fan, Y. Bao. Review of fiber optic sensors for corrosion monitoring in reinforced concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2021, 120, 104029. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104029.
5. D. Budnicki, I. Parola, Ł. Szostkiewicz, K. Markiewicz, et al. All-Fiber Vector Bending Sensor Based on a Multicore Fiber With Asymmetric Air-Hole Structure. *J. Light. Technol.* 2020, 38, 6685–6690. DOI: doi.org/10.1109/JLT.2020.3012769.
6. G. K. Ekechukwu, J. Sharma. Well-scale demonstration of distributed pressure sensing using fiber-optic DAS and DTS. *Sci. Rep.* 2021, 11, 12505. DOI: doi.org/10.1038/s41598-021-91916-7.
7. F. Lu, R. Wright, P. Lu, P. C. Cvetic, P. R. Ohodnicki, Distributed fiber optic pH sensors using sol-gel silica based sensitive materials. *Sens. Actuators B Chem.* 2021, 340, 129853. DOI: doi.org/10.1016/j.snb.2021.129853.
8. Y. Liu, A. Zhou, L. Yuan, Multifunctional fiber-optic sensor, based on helix structure and fiber Bragg gratings, for shape sensing. *Opt. Laser Technol.* 2021, 143, 107327. DOI: doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107327.
9. U. Senkans, J. Braunfelds, I. Lyashuk, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Research on FBG-Based Sensor Networks and Their Coexistence with Fiber Optical Transmission Systems. *J. Sens.* 2019, 2019, 6459387. DOI: doi.org/10.1155/2019/6459387.
10. C. He, S. Korposh, R. Correia, L. Liu, et al., Optical fibre sensor for simultaneous temperature and relative humidity measurement: Towards absolute humidity evaluation. *Sens. Actuators B Chem.* 2021, 344, 130154. DOI: doi.org/10.1016/j.snb.2021.130154.
11. J. Braunfelds, U. Senkans, P. Skels, R. Janeliukstis, T. Salgals, D. Redka, I. Lyashuk, J. Porins, S. Spolitis, V. Haritonovs, V. Bobrovs, FBG-Based Sensing for Structural Health Monitoring of Road Infrastructure (2021) *Journal of Sensors*, 2021, art. no. 8850368. DOI: doi.org/10.1155/2021/8850368.
12. Taylor & Francis Group, *Optical Fiber Sensors – Advances Techniques and Applications*, CRC Press, 2015, pp. 545. DOI: doi.org/10.1201/b18074.

13. Advantages of optical sensor | Disadvantages of optical sensor. Internets: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Optical-Sensor.html> (skatīts 2022. gada 5. decembrī).
14. J. Braunfelds, S. Spolitis, L. Gegere, D. Pikulins, V. Stepanovs and A. Supe, Demonstration of Polarization Optical-Time-Domain Reflectometer for Monitoring of Optical Fiber Lines, 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), 2022, pp. 9–12, DOI: doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942583.
15. Li, X. Yang, C. Yang, S. Li, G. Fiber-Optical Sensors: Basics and Applications in Multiphase Reactors. *Sensors* 2012, 12, 12519–12544. DOI: doi.org/10.3390/s120912519.
16. A. D. Kersey et al., Fiber grating sensors, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997, DOI: doi.org/10.1109/50.618377.
17. G. Rajan, *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*.(2015), ISBN 9781482228250.
18. K. O. Hill and G. Meltz, Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997, DOI: doi.org/10.1109/50.618320.
19. M. Götten, S. Lochmann, A. Ahrens, E. Lindner, J. Vlekken and J. Van Roosbroeck, A CDM-WDM Interrogation Scheme for Massive Serial FBG Sensor Networks, *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 12, pp. 11290–11296, 2022, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2021.3070446.
20. A. Barrias, J. R. Casas, S. Villalba, A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors* 2016, 16, 748. DOI: doi.org/10.3390/s16050748.
21. T. Wu, G. Liu, S. Fu, F. Xing, Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Sensors* 2020, 20, 4517. DOI: doi.org/10.3390/s20164517.
22. X. W. Ye, Y. H. Su, J. P. Han, Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review, *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 652329, 11 pages, 2014. DOI: doi.org/10.1155/2014/652329.
23. J. Braunfelds, U. Senkans, P. Skels, R. Janeliukstis, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs Road Pavement Structural Health Monitoring by Embedded Fiber Bragg Grating Based Optical Sensors *Sensors*, 2022, pp. 1–13. DOI: doi.org/10.3390/s22124581.
24. P. Kara De Maeijer, G. Luyckx, C. Vuye, E. Voet, W. Van den bergh, Vanlanduit, S. Braspeninckx, J. Stevens, N. De Wolf, J. Fiber Optics Sensors in Asphalt Pavement: State-of-the-Art Review. *Infrastructures* 2019, 4, 36. DOI: doi.org/10.3390/infrastructures4020036.
25. B. Van Esbeen, C. Finet, R. Vandebrouck, D. Kinet, K. Boelen, C. Guyot, G. Kouroussis, C. Caucheteur, Smart Railway Traffic Monitoring Using Fiber Bragg Grating Strain Gauges. *Sensors* 2022, 22, 3429. DOI: doi.org/10.3390/s22093429.

26. S. Cocking, H. Alexakis, M. DeJong, (2021). Distributed dynamic fibre-optic strain monitoring of the behaviour of a skewed masonry arch railway bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11 (4), 989–1012. DOI: doi.org/10.1007/s13349-021-00493-w.
27. G. Kouroussis, D. Kinet, V. Moeyaert, J. Dupuy, C. Caucheteur, (2016). Railway structure monitoring solutions using fibre Bragg grating sensors. *International Journal of Rail Transportation*, 4 (3), 135–150. DOI: doi.org/10.1080/23248378.2016.1184598.
28. K. Čápková, L. Velebil, J. Včelák, M. Dvořák, L. Šašek, (2019). Environmental Testing of a FBG Sensor System for Structural Health Monitoring of Building and Transport Structures. *Procedia Structural Integrity*, 17, 726–733. DOI: doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.097.
29. C. Li, J. Tang, C. Cheng, L. Cai, M. Yang. FBG Arrays for Quasi-Distributed Sensing: A Review. *Photonic Sensors*, 11 (1), 91–108, 2021. DOI: doi.org/10.1007/s13320-021-0615-8.
30. S.-F. Jiang, Z.-H. Qiao, N.-L. Li, J.-B. Luo, S. Shen, M.-H. Wu, Y. Zhang. Structural Health Monitoring System Based on FBG Sensing Technique for Chinese Ancient Timber Buildings. *Sensors*, 20 (1), 2019, 110. DOI: doi.org/10.3390/s20010110.
31. A. Kefal, I. E. Tabrizi, M. Tansan, E. Kisa, M. Yildiz. An experimental implementation of inverse finite element method for real-time shape and strain sensing of composite and sandwich structures. *Composite Structures*, 258, 113431, 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.1131.
32. Y. Zhan, F. Lin, Z. Song, Z. Sun, M. Yu. Applications and research progress of optical fiber grating sensing in thermoplastic composites molding and structure health monitoring. *Optik*, 229, 166122, 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.166122.
33. R. Di Sante, (2015). Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. *Sensors*, 15 (8), 18666–18713. DOI: doi.org/10.3390/s150818666.
34. C. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella, A. Yurt, V. Passaro, (2018). Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications. *Sensors*, 18 (9), 3115. DOI: doi.org/10.3390/s18093115.
35. D. Lo Presti et al., Wearable System Based on Flexible FBG for Respiratory and Cardiac Monitoring, *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 17, pp. 7391–7398, 2019, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2019.2916320.
36. D. Lo Presti, et al., Fiber Bragg Gratings for Medical Applications and Future Challenges: A Review, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 156863–156888, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019138.
37. A. Mendez, Fiber Bragg grating sensors for biomedical applications, *Photonics and Fiber Technology 2016 (ACOFT, BGPP, NP)*, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2016), paper BM4B.1. DOI: doi.org/10.1364/BGPP.2016.BM4B.1.

38. Q. Liu, Z. L. Ran, Y. J. Rao, S. C. Luo, H. Q. Yang and Y. Huang, Highly Integrated FP/FBG Sensor for Simultaneous Measurement of High Temperature and Strain, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 17, pp. 1715–1717, 2014, DOI: doi.org/10.1109/LPT.2014.2331359.
39. S. Ma, Y. Xu, Y. Pang, X. Zhao, Y. Li, Z. Qin, Z. Liu, P. Lu, X. Bao, Optical Fiber Sensors for High-Temperature Monitoring: A Review. *Sensors* 2022, 22, 5722. DOI: doi.org/10.3390/s22155722.
40. C. Dutta, J. Kumar, T. K. Das and S. P. Sagar, Recent Advancements in the Development of Sensors for the Structural Health Monitoring (SHM) at High-Temperature Environment: A Review, *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 15904–15916, 2021, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2021.3075535.
41. J. Juraszek, P. Antonik-Popiołek. Fibre Optic FBG Sensors for Monitoring of the Temperature of the Building Envelope. *Materials (Basel)*. 2021;14 (5):1207. doi: 10.3390/ma14051207.
42. Q. Wang, L. Zhang, C. Sun and Q. Yu, Multiplexed Fiber-Optic Pressure and Temperature Sensor System for Down-Hole Measurement, *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 1879–1883, 2008, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2008.2006253.
43. T. Li, J. Guo, Y. Tan and Z. Zhou, Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review, *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 20, pp. 12074–12087, 2020, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2020.3000257.
44. Y. Zhang, Z. Yin, B. Chen, H.-L. Cui, J. Ning, A novel fiber Bragg grating based seismic geophone for oil/gas prospecting, *Proc. SPIE*, vol. 5765, pp. 1112–1121, May 2005. DOI: doi.org/10.1117/12.599797.
45. P. Munendhar, S. K. Khijwania. Two dimensional fiber Bragg grating based vibration sensor for structural health monitoring, *AIP Conference Proceedings* 1536, 1324–1326 (2013). DOI: doi.org/10.1063/1.4810731.
46. T. Li, C. Shi, Y. Tan, R. Li, Z. Zhou and H. Ren, A Diaphragm Type Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Based on Transverse Property of Optical Fiber With Temperature Compensation, *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 1021–1029, 2017, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2016.2641931.
47. T. Li, Y. Tan, Z. Zhou, (2017). String-type based two-dimensional fiber bragg grating vibration sensing principle and structure optimization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 259, 85–95. doi:10.1016/j.sna.2017.03.031.
48. L. Wei, L. Yu, J. Wang, D. Jiang, Q. Liu and Z. Liu, An FBG-Sensing Two-Dimensional Vibration Sensor Based on Multi-Axis Flexure Hinge, *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 10, pp. 3698–3710, 2019, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2019.2895232.

49. Z. M. Hafizi, E. Vorathin, A Temperature-Compensated FBG Pressure Sensor for Underwater Pipeline Monitoring, 2020 IEEE 8th International Conference on Photonics (ICP), 2020, pp. 66–67, DOI: doi.org/10.1109/ICP46580.2020.9206469.
50. J. Wang, L. Zhao, T. Liu, Z. Li, T. Sun, K. T. V. Grattan, Novel Negative Pressure Wave-Based Pipeline Leak Detection System Using Fiber Bragg Grating-Based Pressure Sensors, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 16, pp. 3366–3373, 2017, DOI: doi.org/10.1109/JLT.2016.2615468.
51. P.-L. Ko, K.-C. Chuang, C.-C. Ma, A Fiber Bragg Grating-Based Thin-Film Sensor for Measuring Dynamic Water Pressure, *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 18, pp. 7383–7391, 2018, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2018.2857561.
52. L. Xiong, Y. Guo, W. Zhou, M. Chen and X. Zhou, Fiber Bragg Grating-Based Three-Axis Vibration Sensor, *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 22, pp. 25749–25757, 2021, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2021.3118360.
53. X. Li, et al., An FBG Pressure Sensor Based on Spring-Diaphragm Elastic Structure for Ultimate Pressure Detection, *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 2213–2220, 2022, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2021.3136212.
54. M. Liu, Y. Wu, C. Du, D. Jiang, Z. Wang, FBG-Based Liquid Pressure Sensor for Distributed Measurement With a Single Channel in Liquid Environment, *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 16, pp. 9155–9161, 2020, DOI: doi.org/10.1109/JSEN.2020.2986550.
55. L. Xiong, Y. Guo, G. Jiang, L. Jiang, X. Zhou, (2019). Fiber Bragg grating displacement sensor with high measurement accuracy for crack monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. DOI: doi.org/10.1109/jsen.2019.2930761.
56. Y. Chen, J. Wu, X. Zhao, Monitoring of vertical displacement of concrete slab end at pavement joint based on FBG-dowel bar signal. *J. Transp. Eng. B Pavements* 2022, 148, 04022012. DOI: doi.org/10.1061/JPEODX.0000358.
57. M. Bonopera. Fiber-Bragg-Grating-Based Displacement Sensors: Review of Recent Advances. *Materials (Basel)*. 2022; 15 (16):5561. DOI: doi.org/10.3390/ma15165561.
58. C. Hong, Y. Zhang, Y. Yang, Y. Yuan, (2019). A FBG based displacement transducer for small soil deformation measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 286, 35–42. DOI: doi.org/10.1016/j.sna.2018.12.022.
59. J. Thomas, T. R. Rajanna, S. Asokan, Temperature compensated FBG displacement sensor for long-range applications. *IEEE Sens. Lett.* 2020, 4, 8931563. DOI: doi.org/10.1109/LSENS.2019.2959377.
60. Z. Lu, C. Hong, Y. Zhang, D. Su and Y. Fu, Development of an FBG Sensor for Measuring Large Range and Multi-Directional Settlement, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107669–107677, 2019, DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932774.



61. H. Li, G. Xu, X. Gui, L. Liang, Z. Li. An FBG Displacement Sensor in Deformation Monitoring of Subway Floating Slab. *IEEE Sensors Journal*, 21 (3), 2963–2971, 2021. DOI: doi.org/10.1109/jsen.2020.3022466.
62. G. Lyu, C. Bi, Y. Zhang, C. Wang, M. Wang, X. Jiang. Large-range bridge beam-gap displacement sensors based on cantilever beam with fiber Bragg grating. *Lect. Notes Electr. Eng.* 2020, 567, 3–11. DOI: doi.org/10.1007/978-981-13-8595-7\_1.
63. C. Li, L. Sun, Z. Xu, et al., Experimental Investigation and Error Analysis of High Precision FBG Displacement Sensor for Structural Health Monitoring. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020. DOI: doi.org/10.1142/s0219455420400118.
64. M. Bonopera, K. C. Chang, C. C. Chen, Z. K. Lee, Y. C. Sung, N. Tullini, Fiber Bragg grating–differential settlement measurement system for bridge displacement monitoring: Case study. *J. Bridge Eng.* 2019, 24, 05019011. DOI: doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001470.
65. A58 M. A. Alias, M. F. Ismail, M. S. M. Sa'ad, et al., A high-precision extensometer system for ground displacement measurement using fiber Bragg grating. *IEEE Sens. J.* 2022, 22, 8509–8521. DOI: doi.org/10.1109/jsen.2022.3159850.
66. M. Maheshwari, Y. Yang, D. Upadrashta and T. Chaturvedi, A Rotation Independent In-Place Inclinometer/Tilt Sensor Based on Fiber Bragg Grating, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 8, pp. 2943–2953, Aug. 2019, DOI: doi.org/10.1109/TIM.2018.2870246.
67. HBM, Optical Fiber Sensors, Internets: [https://www.hbm.com/en/4599/new-light-optical-fiber-sensors/?product\\_type\\_no=newLight](https://www.hbm.com/en/4599/new-light-optical-fiber-sensors/?product_type_no=newLight) (skatīts 2022. gada 11. decembrī).
68. Smart fibres, FBG sensors, Internets: <https://www.smartfibres.com/products> (skatīts 2022. gada 11. decembrī).
69. Sylex, ES-03 Embeddable strain sensor, pp. 2. 2021.
70. K. M. Dwivedi, G. Trivedi and S. K. Khijwania, Theoretical Study and Optimization of Apodized Fiber Bragg Grating for Single and Quasi-distributed Structural Health Monitoring Applications, 2020 30th International Conference Radioelektronika, 2020, pp. 1–6, DOI: doi.org/10.1109/RADIOELEKTRONIKA49387.2020.9092399.
71. A. Rumadi, D. Syahriar, Astharini et al., The effects of apodization profile on uniform fiber Bragg gratings, 2015 9th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), 2015, pp. 1–6, DOI: doi.org/10.1109/TSSA.2015.7440430.
72. I. Ashry, A. Elrashidi, A. Mahros, M. Alhaddad and K. Elleithy, Investigating the performance of apodized Fiber Bragg gratings for sensing applications, *Proceedings of the 2014 Zone 1 Conference of the American Society for Engineering Education*, 2014, pp. 1–5, DOI: doi.org/10.1109/ASEEZone1.2014.6820640.

73. Optiwave, Photonic Software, OptiGrating, Internets: <https://optiwave.com/products/component-design/optigrating/optigrating/> (skatīts 2022. gada 11. decembrī).
74. Optiwave, OptiGratingUser's Reference and Tutorials, pp. 214, 2008.
75. Z. A. El-Sahn, W. Mathlouthi, H. Fathallah, S. LaRochelle, and L. A. Rusch, Dense SS-WDM over legacy PONs: smooth upgrade of existing FTTH networks, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 10, pp. 1485–1495, 2010. DOI: doi.org/10.1109/jlt.2010.2046313.
76. ITU-T, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid (G.694.1), 2020, pp. 16.
77. Technica, T840 / Rugged In-Line Temperature Sensor, 2022, pp. 2.
78. W. Tsai et al. A 20-m/40-Gb/s 1550-nm DFB LD-Based FSO Link, *IEEE Photonics J.*, 2015, 7, 1-7, DOI: doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2506172.
79. Jr. N. Ledentsov, M. Agustin, L. Chorchos, et al., Energy efficient 850-nm VCSEL based optical transmitter and receiver link capable of 56 Gbit/s NRZ operation, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIII*, 109380J, 2019, pp. 1–8. DOI: doi.org/10.1117/12.2509916.
80. K. Elayoubi, A. Rissons, A. Belmonte, Optical test bench experiments for 1-Tb/s satellite feeder uplinks, *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII*, 1077006, 2018, pp. 1–11. DOI: doi.org/10.1117/12.2317728.
81. X. Ma, T. Wang, Z. Dong. Dynamic Response Monitoring and Analysis of In-Service Asphalt Pavement Based on FBG Measuring Technology. In: Chabot, A., Hornych, P., Harvey, J., Loria-Salazar, L. (eds) *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 96. Springer, Cham, 2020. DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7\_55.
82. J. Braunfelds, U. Senkans, P. Skels, I. Murans, J. Porins, S. Spolitis, V. Bobrovs, Fiber Bragg Grating Optical Sensors for Road Infrastructure Monitoring Applications, (2022) *Optics InfoBase Conference Papers, Applied Industrial Optics*, pp. 1–2, DOI: doi.org/10.1364/AIO.2022.W1A.2.
83. W. Liu, X. Liu, Z. Wang, Z. Zhi, High temperature deformation investigation of asphalt mixture with nanosized volcanic ash fillers using optical fiber sensor. *Measurement* 2019, 140, 171–181. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.075.
84. J. Xie, H. Li, L. Gao, M. Liu, Laboratory investigation of rutting performance for multilayer pavement with fiber Bragg gratings. *Constr. Build. Mater.* 2017, 154, 331–339. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.233.
85. S.-Z. Chen, G. Wu, D.-C. Feng, L. Zhang, Development of a bridge weigh-in-motion system based on long-gauge fiber Bragg grating sensors. *J. Bridge Eng.* 2018, 23, 04018063. DOI: doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001283.
86. M. Al-Tarawneh, Y. Huang, P. Lu and R. Bridgelall, Weigh-In-Motion System in Flexible Pavements Using Fiber Bragg Grating Sensors Part A: Concept, *IEEE Transactions on*

- Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 12, pp. 5136–5147, 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2949242.
87. K. Yuksel, D. Kinet, K. Chah, C. Caucheteur, Implementation of a Mobile Platform Based on Fiber Bragg Grating Sensors for Automotive Traffic Monitoring. *Sensors* 2020, 20, 1567. DOI: doi.org/10.3390/s20061567.
  88. Anritsu corporation, MS9740A Optical Spectrum Analyzer Operation Manual, 23rd Edition, pp. 320.
  89. Safibra: Composite sensor. Internets: <http://www.safibra.cz/en/composite-sensor> (skatīts 2022. gada 5. decembrī).
  90. Safibra: FBG temperature sensor. Internets: <http://www.safibra.cz/en/fbg-temperature-sensor> (skatīts 2022. gada 5. decembrī).
  91. P. Ullidtz, Modelling Flexible Pavement Response and Performance, Polyteknisk Forlag, Denmark, ISBN: 8750208055, 1998.
  92. L. Korkiala-Tanttu, Calculation Method for Permanent Deformation of Unbound Pavement Materials, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 2008.
  93. T. Saevarsdottir and S. Erlingsson, Deformation modelling of instrumented flexible pavement structure, *Procedia Engineering*, vol. 143, pp. 937–944, 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.076.
  94. P. Kara De Maeijer, W. Van den Bergh and C. Vuye, Fiber Bragg Grating Sensors in Three Asphalt Pavement Layers, *Infrastructures*, vol. 3, 16, 2018. DOI: doi.org/10.3390/infrastructures3020016.
  95. ES-01 Embeddable strain sensor. Available online: <https://www.sylex.sk/wp-content/uploads/2018/09/ES-01-Embeddable-strain-sensor.pdf> (24.05.2022.).
  96. Xi'an Aurora Technology, Fiber Bragg Grating Embedded FBG Temperature Sensor, 2022.
  97. Intel: Smart Roads Start with Smart Infrastructure, Internets: <https://www.intel.com/content/www/us/en/transportation/smart-road-infrastructure.html> (skatīts 2023. gada 3. janvārī).



**Jānis Braunfelds** dzimis 1994. gadā Talsos. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektrozinātnē (2016) un inženierzinātņu maģistra grādu telekomunikācijās (2018). Kopš 2016. gada strādā RTU, ieņemot zinātniskā asistenta amatu. Patlaban ir RTU pētnieks un lektors. Kopš 2019. gada 1. decembra ir Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes domes loceklis, kopš 2021. gada 4. janvāra – RTU Zinātnes padomes loceklis, kopš 2022. gada 1. marta – RTU padomes loceklis.

Stažējies Eindhovenas Tehniskās universitātes Fotonikas integrācijas institūtā Nīderlandē un Dānijas Tehniskajā universitātē. Saņēmis vairākus apbalvojumus: Latvijas Drošības un aizsardzības industriju federācijas Gada balvu zinātnē un pētniecībā (2019); RTU Studenta parlamenta balvu "Gada fakultātes studentu atbalsts 2019", Latvijas Studentu apvienības balvu "Gada jaunais zinātnieks 2020"; "RTU Studentu gada balvu valorizācijā 2020".