

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte  
Telekomunikāciju institūts

**Andis SUPE**

Doktora studiju programmas „Telekomunikācijas” doktorants

**OPTISKAIS KERRA EFEKTS TELEKOMUNIKĀCIJU ŠĶIEDRU  
MĒRĪJUMOS UN SIGNĀLU ATJAUNOŠANĀ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr.sc.ing., Asociētais profesors  
**J. PORIŅŠ**

**RTU izdevniecība**  
**Rīga 2014**

UDK 621.391.6(043.2)  
Su 602-o

Supe A. Optiskais Kerra efekts telekomunikāciju  
šķiedru mērījumos un signālu atjaunošanā.  
Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU,  
2014.-30 lpp.

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

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes  
„RTU P-08” 2014. gada 6. februāra lēmumu,  
protokols Nr.19.



**Eiropas sociālais fonds**



**Eiropas savienība**

**ISBN 978-9934-10-565-4**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gada 29. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 16/20.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Ernests Pētersons  
Rīgas Tehniskā universitāte, Transporta elektronikas un telemātikas katedra

Asociētais profesors, Dr.phys. Arnis Gulbis  
Rīgas Tehniskā universitāte, Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

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

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Andis Supe .....(Paraksts)

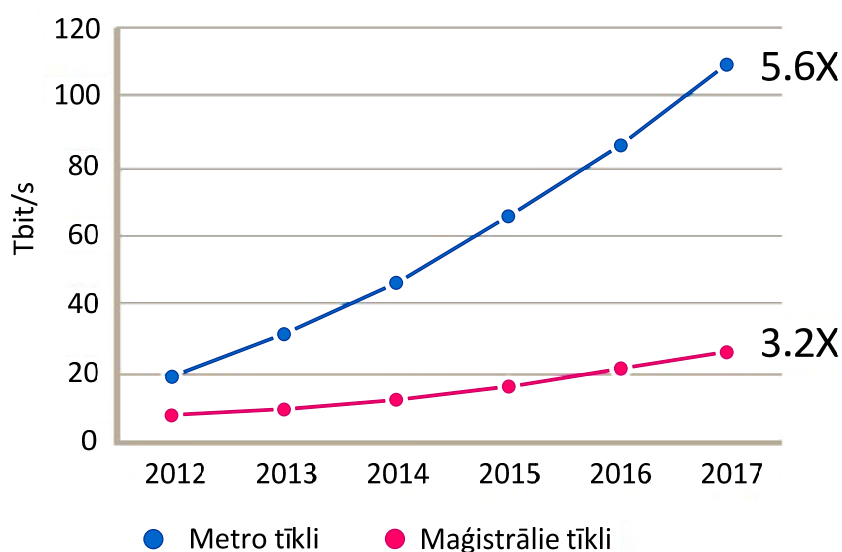
Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 49 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 120 lappuses. Literatūras sarakstā ir 105 nosaukumi.

## VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Informācijas tehnoloģiju nozare nepārtraukti attīstās. Tiek uzlabota gan esošo pakalpojumu kvalitāte, gan ieviesti pilnīgi jauni. Arvien aktuālāki kļūst pakalpojumi, kas saistīti ar attālinātu piekļuvi dažādiem resursiem kā mākoņskaitļošana vai augstas izšķirtspējas video pārraide pa sakaru tīkliem. Šādu pakalpojumu ieviešanai ir nepieciešama stabila platjoslas datu plūsma. Līdz ar to, strauji palielinās pieprasījums pēc arvien lielāka datu pārraides ātruma gan maģistrālajos, gan lokālajos datu tīklos. Arī turpmākās prognozes parāda, ka pieprasījums pēc liela informācijas pārraides ātruma sakaru tīklos tikai palielināsies. Pēc Bell Labs prognozes datu pārraides ātrums maģistrālajos tīklos, laika posmā līdz 2017. gadam varētu palielināties 3.2 reizes, bet metro tīklos līdz pat 5.6 reizēm [6].



Att. 1. Datu pārraides ātruma pieaugums metro un maģistrālajos tīklos [6].

Lai nodrošinātu lielus datu pārraides ātrumus, ļoti piemērotas ir tieši šķiedru optiskās sakaru sistēmas. Galvenās priekšrocības, salīdzinot ar citām tehnoloģijām, ir ļoti plašs spektrālais diapazons, kā arī mazi signālu zudumi. Līdz ar to optiskās šķiedras tiek plaši pielietotas sakaru tīklu izbūvē, it sevišķi, lielos attālumos.

Lai izveidotu šķiedru optiskās pārraides sistēmas (ŠOPS) ar lielu datu pārraides ātrumi, ļoti svarīgi ir zināt izmantojamās šķiedras parametrus. Pirmkārt tas ir šķiedras vājinājums un dispersija. Bet ŠOPS, kur tiek pielietota viļņgarumdales blīvēšana, būtiskas kļūst arī šķiedru nelineārās īpašības, jo katrs sistēmas kanāls palielina kopējā, pa šķiedru pārraidāmā, signāla jaudu. Nelineāro optisko efektu (NOE) izpausmes signālu pārraidē nav vēlamas, jo ienes papildus signāla kropļojumus.

Tomēr neskatoties uz NOE nevēlamo ietekmi uz signālu pārraidi, šiem efektiem ir atrasti arī dažādi pielietojumi optisko signālu apstrādē. Daži no tiem ir optisko signālu viļņa garuma pārveidošana, komutācija, blīvēšana un atblīvēšana, pastiprināšana kā arī signālu atjaunošana. Pēdējais no minētajiem, ir ļoti aktuāls pētījumu virziens, jo ātrdarbīgās sakaru sistēmās ir ļoti svarīgi nodrošināt nepieciešamo bitu kļūdu attiecību (no ang. val. bit error ratio - BER), kas ir atkarīga no signāls/troksnis attiecības. Līdz ar to NOE ne tikai ienes papildus trokšņus, bet var tikt pielietoti pārraidāmo signālu trokšņu samazināšanai.

### Darba mērķis un uzdevumi

Apkopojot augstāk minētos faktus, tika izvirzīts promocijas **darba mērķis**: novērtēt optiskā Kerra efekta pielietojuma iespējas telekomunikāciju šķiedru nelineārā koeficienta noteikšanā, kā arī signālu formas atjaunošanā optiskajā apgabalā.

Lai sasniegtu uzstādīto mērķi, bija nepieciešams veikt šādus **pamatuzdevumus**:

1. Izanalizēt un novērtēt optiskā Kerra efekta izraisīto nelineāro parādību cēloņus telekomunikāciju šķiedrās un to ietekmi uz signālu pārraidi viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās;
2. Veikt optiskās šķiedras efektīvā laukuma novērtējumu, pielietojot plaknes viļņu superpozīcijas metodi;
3. Eksperimentāli ar divu šķiedru šķērsnobīdes metodi nomērīt vienmodas šķiedras un erbija leģētās šķiedras efektīvo laukumu pie dažādiem viļņa garumiem 3. optiskās caurlaidības diapazonā;
4. Eksperimentāli un ar datorsimulācijas programmu OptSim 5.2 realizēt optiskās šķiedras nelineārā koeficienta mērījumus, izmantojot signāla fāzes pašmodulācijas un četru viļņu mijiedarbības efektus gan nepārtraukta, gan impulsveida optiskā signāla gadījumā;
5. Izpētīt optisko signālu reģenerēšanas principu pielietojot signāla fāzes pašmodulāciju jeb tā saukto Mamiševa tipa reģeneratoru un faktorus, kas ietekmē tā darbību;
6. Iegūt reģenerators pārvades funkciju un atrast labāko iespējamo signāla jaudas un optiskā filtra parametru kombināciju 40 Gbit/s RZ – OOK optiskā signāla atjaunošanai.

### **Pētījumu metodika**

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiskie aprēķini, skaitliskās simulācijas un eksperimentāli mērījumi. Efektīvā laukuma aprēķinu matemātiskais apraksts balstīts uz reālā gaismas sadalījuma šķiedrā interpretāciju kā plaknes viļņu superpozīciju, kura tiek iegūta ar tiešo Furjē transformāciju. Eksperimentālos mērījumos iegūtie gaismas tālā lauka sadalījumi tiek pārrēķināti uz tuvā lauka sadalījumiem pielietojot Henkeļa transformāciju. Skaitliskās simulācijās izmantots nelineārais Šrēdingera vienādojums, tiešā un inversā diskretā ātrā Furjē transformācija, kā arī Monte Karlo metode bitu kļūdu attiecības novērtēšanai. Nelineārā koeficienta mērījumos izmantotas divas dažādas mērījumu metodes. Efektīvā nelineārā koeficienta raksturlīkne iegūta ar divu pārskatājamu lāzeru, optiskās polarizācijas griezēju un spektra analizatoru, šķiedrā realizējot četru viļņu mijiedarbības nelineāro efektu. Optiskā signāla izmaiņu novērtēšanai pēc nelineāro efektu ietekmes izmantoti optiskās jaudas, jaudas spektrālā blīvuma un acu diagrammu mērījumi.

### **Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte**

Promocijas darba **jaunieguvumi** ir:

1. Ar nelineārā koeficienta mērījumu shēmu, kas balstīta uz četru viļņu mijiedarbību, cik autoram zināms, pirmo reizi novērtēts augsti nelineārās šķiedras efektīvais nelineārais koeficients, kas parāda četru viļņu mijiedarbības procesa atkarību, gan no šķiedras nelinearitātes, gan gaismas polarizācijas stāvokļa izmaiņām.
2. Ar datorsimulācijām un eksperimentāli veikta 40 Gbit/s RZ-OOK signāla formas atjaunošana pilnībā optiskajā apgabalā ar Mamiševa tipa reģeneratoru, atrodot divu dažādu optisko joslas filtru un pastiprinātāja parametru kombinācijas, kas dod labāko signāls/troksnis un izdzišanas attiecības uzlabošanas atjaunotajam signālam.

Promocijas darba izstrādes laikā tika iegūti šādi **galvenie secinājumi**:

1. Ar eksperimentālo šķērsnobīdes metodi tika iegūts, ka EDF šķiedras  $A_{eff}$  viļņa garumu diapazonā no 1470 līdz 1575 nm palielinās par  $1.1 \mu\text{m}^2$ . Savukārt vienmodas šķiedras gadījumā tika iegūts, ka  $A_{eff}$  palielinās par  $4.4 \mu\text{m}^2$  viļņa garumu diapazonā no 1520 līdz 1580 nm, kas ir skaidrojams ar laušanas koeficienta atkarību no viļņa garuma. Līdz ar to var secināt ka optiskās šķiedras nelineārais koeficients samazinās pieaugot optiskā signāla viļņa garumam.

2. Ar izstrādāto P-SPM metodi tika iegūta daudz plašāka spektrālā paplašināšanās nekā ar CW-SPM metodi gan G.652 D, gan G.655 C tipa šķiedrai. Līdz ar to aprēķinātais koeficients  $\gamma$  abām šķiedrām ir lielāks ( $\Delta\gamma=0.07$ ) P-SPM gadījumā. Tas norāda, ka impulsveida optiskais signāls labāk ierosina SPM parādīšanos šķiedrā. Turklāt CW-SPM metodes gadījumā ir jāreķinās ar stimulētās Briljuēna izkliedes ietekmi uz mērījumu gaitu.
3. HNLF šķiedras gadījumā, tāpat kā DSF šķiedrai,  $\gamma_{eff}$  izmaiņu, atkarībā no pumpējošā un signāla lāzera viļņa garumu starpības, vislabāk apraksta hiperboliskā sekansa funkcija. Tomēr atšķiras koeficienti  $A_0$  un  $T_0$  pie funkcijas argumenta  $\Delta\lambda$ , kas HNLF gadījumā ir:  $A_0=2.0$  un  $T_0=1.56\cdot 10^{-17}$ .
4. Vislabākais optiskā signāla atjaunošanas rezultāts tika iegūts ar pārskatājamo optisko filtru pie EDFA izejas jaudas 100 mW un optiskā filtra caurlaides joslas platuma 0.625 nm, kas nobīdīta no signāla centrālā viļņa garuma par 0.7 nm. Signāla ER uzlabojums par 5.2 dB un SNR uzlabojums par 2.3 dB.

### Darba praktiskā vērtība

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti 3 starptautisko un 3 Latvijas zinātniski pētniecisko projektu realizācijai un sadarbībā ar Aveiro Universitātes Telekomunikāciju institūtu tika izmantoti COST projekta pieteikuma sagatavošanai „Digital Signal Processing for Fiber Optic Communication Networks”.
2. Darba gaitā izstrādātās mērījumu metodes paredzētas gan ekspluatācijā esošu, gan jaunu optisko šķiedru nelineārā koeficienta novērtēšanai. Sadarbības līguma ietvaros, optisko šķiedru nelineārā koeficienta mērīšanas aktualitāte ietverta VAS "Latvijas Valsts Radio un Televīzijas Centram" sagatavotajā „Maģistrālo tīklu tehnoloģiju un to projektēšanas pamattendenču novērtējumā” (ES fonda projekts Nr.3DP/3.2.2.3.0/12/IPIA/SM/001 „Nākamās paaudzes elektronisko sakaru tīklu attīstība lauku reģionos”).
3. Izstrādāta Latvijā patentēta nelineārā koeficienta mērījumu shēma, kur SPM tiek ierosināta ar NRZ-OOK optisko signālu ar bitu pārraides ātrumu 10 Gbit/s, kas atbilst sinhronās digitālās hierarhijas datu pārraides ātrumu hierarhijas līmenim STM-64 (9953,28 Mbit/s).
4. Iesniegti un apstiprināti divi Eiropas patenta pieteikumi par jauna veida skrūves-pārbīdes konstrukcijas optisko šķiedru savienotāju (patenta pieteikuma numurs EP12197706.0) un stimulētās Briljuēna izkliedes sliekšņa jaudas mērījumu shēmu (patenta pieteikuma numurs EP13198258.9).

### Darbā tika izvirzītas šādas **aizstāvamās tēzes**:

1. Ar izstrādāto mērījumu metodi, kas balstīta uz divu šķiedru šķērsnobīdi, ir iespējams noteikt optiskās šķiedras efektīvo laukumu, pat ja nav zināms precīzs šķiedras laušanas koeficienta profils. Mērījumus var veikt pie dažādiem viļņa garumiem visā 3. optiskās caurlaidības viļņa garumu diapazonā ar precizitāti līdz  $\pm 1 \mu\text{m}^2$ .
2. Ar izstrādāto impulsveida signāla fāzes pašmodulācijas mērījumu metodi ir iespējams noteikt optiskās šķiedras nelineāro koeficientu, pielietojot šķiedru optiskās pārraides sistēmās izmantotus pēc amplitūdas manipulētus, bez atgriešanās pie nulles impulsus, kas dod par 8% augstāku rezultātu nekā nepārtraukta starojuma fāzes pašmodulācijas mērījumu metode.
3. Augsti nelineārās šķiedras un nobīdītās dispersijas šķiedras efektīvo nelineāro koeficientu apraksta hiperboliskā sekansa funkcija ar atšķirīgiem koeficientiem pie funkcijas argumenta, kuri nosaka oscilāciju amplitūdu un periodu.
4. Ar uzlaboto Mamiševa tipa reģeneratoru optiskajā apgabalā ir iespējams atjaunot 40 Gbit/s RZ-OOK optisko signālu formu, palielinot izdzišanas attiecību par 5.2 dB un signāla/trokšņa attiecību par 2.3 dB, ja tiek pielietots optiskais filtrs ar caurlaides joslas platumu 0.625 nm -3 dB līmenī, kas nobīdīts par 0.7 nm no signāla centrālā viļņa garuma.

## Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti **12** starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti **5** publikācijās zinātniskajos žurnālos, **6** rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, **12** rakstos konferenču tēžu krājumos, **2** Latvijas patentos un **2** Eiropas patenta pieteikumos.

### Ziņojumi starptautiskajās konferencēs:

1. **Supe A.**, Poriņš J. "Measurements of Nonlinear Coefficient in OS2 Optical Fiber" // Electronics 2010, Lietuva, Kauņa, 18.-20. Maijs, 2010.
2. **Supe A.**, Poriņš J. "Nonlinear Coefficient Determination for Telecommunications Optical Fibre" // Optics & High Technology Material Science 2010, Ukraina, Kijeva, 21.-24. Oktobris, 2010.
3. **Supe A.**, Poriņš J. "Optical Fibre Effective Area Measurements" // Developments in Optics and Communications 2011, Latvija, Rīga, 28.-30. Aprīlis, 2011.
4. **Supe A.**, Poriņš J., Ivanovs Ģ. "Comparison of Different FWM Realization Methods in Optical Fibre" // Electronics 2011, Lietuva, Kauņa, 17.-19. Maijs, 2011.
5. **Supe A.**, Poriņš J., Bobrovs V. "Evaluation of effective area erbium doped fibers" // 7th International Conference Advanced Optical Materials and Devices, Lietuva, Viļņa, 29.-31. Augusts, 2011.
6. **Supe A.**, Poriņš J. "Optical Fibre Effective Area Measurements" // 52nd RTU Scientific Conference, Latvija, Rīga, 13.-14. Oktobris, 2011.
7. **Supe A.**, Poriņš J. "Estimation of Erbium Doped Optical Fibers Effective Area" // IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2011)", Zviedrija, Stokholma, 19.-21. Oktobris, 2011.
8. **Supe A.**, Poriņš J. "Estimation of Erbium Doped Optical Fiber Nonlinear Coefficient" // Optics & High Technology Material Science 2011", Ukraina, Kijeva, 27.-30. Oktobris, 2011.
9. **Supe A.**, Poriņš J. "Estimation of Variables Affecting Parametric Amplification in Fiber Optics" // Developments in Optics and Communications 2012, Latvija, Rīga, 12.-14. Aprīlis, 2012.
10. **Supe A.**, Poriņš J. "Research of Optical Radiation Intensity in Erbium Doped Optical Fibers" // 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012), Polija, Poznaņa, 18.-20. Jūlijs, 2012.
11. **Supe A.**, Poriņš J. "Optical Fiber Nonlinear Coefficient Measurements Using Four-Wave Mixing" // Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2012)", Zviedrija, Lunda, 24.-26. Oktobris, 2012.
12. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. "Pump and Filtering Optimization in Mamyshev Regenerator" // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications (LIAO/OPTILAS 2013), Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013.

### Publikācijas zinātniskajos žurnālos:

1. Poriņš J., Ivanovs Ģ., **Supe A.** "Measurements of Nonlinear Coefficient in OS2 Optical Fiber" // Electronics and electrical engineering, -5. (2010) 53.-56. pp., ISSN 1392-1215.
2. Poriņš J., Ivanovs Ģ., **Supe A.** "Comparison of Different FWM Realization Methods in Optical Fibre" // Electronics and electrical engineering, -5. (2011) 37.-40. pp., ISSN 1392-1215.
3. Poriņš J., Bobrovs V., **Supe A.** "Evaluation of Effective Area of Erbium Doped Fibers" // Lithuanian Journal of Physics, Vol. 52, No.1, 19.-23. pp. (2012) ISSN 1648-8504.
4. Poriņš J., **Supe A.** "Methods for Estimation of Optical Fiber Non-linearity Using Self-phase Modulation Effect" // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Vol. 48, No. 6/2011, 29.-40. pp., ISSN 0868-8257 (Print).

5. Poriņš J., **Supe A.** "Interaction Between Electromagnetic Field and Optical Signal Transmission in Fiber Optics" // Electronics and electrical engineering, No. 6(122), 2012., 83.-86. pp., ISSN 1392-1215.

Raksti pilna teksta **konferenču rakstu krājumos:**

1. Poriņš J., Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Supe A.** "Investigation of External Electromagnetic Disturbance in HDWDM System" // Progress In Electromagnetics Research (PIERS 2012): Proceedings, Malaizija, Kualalumpura, 27.-30. Marts, 2012. - 982.-986. pp., ISSN 1559-9450.
2. Poriņš J., **Supe A.** "Research of Optical Radiation Intensity in Erbium Doped Optical Fibers" // 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012): Proceedings, Polija, Poznan, 18.-20. Jūlijs, 2012. - 1.-4. pp., Print ISBN: 978-1-4577-1472-6.
3. Poriņš J., Ivanovs Ģ., **Supe A.**, Cauņa G. "Investigation of Polarization Mode Dispersion Influence to Different Optical Signal Modulation Formats" // 7th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012): Proceedings, Kanāda, Viktorija, 12.-14. Novembris, 2012. - 285.-288. pp.
4. **Supe A.**, Poriņš J., Ivanovs Ģ. "Optical Fiber Nonlinear Coefficient Measurements Using FWM" // Progress In Electromagnetics Research (PIERS 2013): Proceedings, Koreja, Taipeja, 25.-28. Marts, 2013. - 339.-341. pp.
5. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. "Pump and Filtering Optimization in Mamyshev Regenerator" // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications, Proceedings, Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013., Proc. SPIE 8785, doi:10.1117/12.2026288.
6. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. "Experimental characterization of a highly nonlinear fiber" // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications, Proceedings, Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013., 87854D, doi:10.1117/12.2026182.

Raksti **konferenču tēžu krājumos:**

1. **Supe A.**, Poriņš J. "Nonlinear Coefficient Determination for Telecommunications Optical Fibre" // Optics & High Technology Material Science SPO 2010: Scientific Works, Ukraina, Kijeva, 21.-24. Oktobris, 2010., izdevējs – Kijevas universitātes poligrāfijas centrs, 165. lpp.
2. **Supe A.**, Poriņš J. "Optical Fibre Effective Area Measurements" // Development in Optics and Communications 2011: Book of Abstracts, Latvija, Rīga, 28.-30. Aprīlis, 2011., izdevējs – Cietvielu fizikas institūts, Rīga, Latvija, 38.-39. lpp.
3. **Supe A.**, Poriņš J. "Optical Fibre Effective Area Measurements" // Riga Technical University 52nd International Scientific Conference Section Electronics, Telecommunications and eSociety Abstracts 2011, Latvija, Rīga, 13.-14. Oktobris, 2011., izdevējs – Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 23. lpp.
4. **Supe A.**, Poriņš J. "Estimation of Erbium Doped Optical Fibers Effective Area" // Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2011): Booklet of Abstracts, Zviedrija, Stokholma, 19.-21. Oktobris, 2011., izdevējs – Karaliskais Tehnoloģiju Institūts, ISBN 978-1-4577-1876-2.
5. **Supe A.**, Poriņš J. "Estimation of Erbium Doped Optical Fiber Nonlinear Coefficient" // Optics & High Technology Material Science SPO 2011: Scientific Works, Ukraina, Kijeva, 27.-30. Oktobris, 2011., izdevējs - Kijevas universitātes poligrāfijas centrs.
6. Poriņš J., Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Supe A.** "Investigation of External Electromagnetic Disturbance in HDWDM System" // Progress In Electromagnetics Research (PIERS 2012): PIERS book of abstracts, Malaizija, Kualalumpura, 27.-30. Marts, 2012.



7. **Supe A.**, Poriņš J. “Estimation of Variables Affecting Parametric Amplification in Fiber Optics” // Development in Optics and Communications 2012: Book of abstracts, Latvija, Rīga, 12.-14. Aprīlis, 2012., izdevējs – Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas Institūts, 78.-79. lpp., ISBN 978-9984-49-518-7.
8. **Supe A.**, Poriņš J. “Research of Optical Radiation Intensity in Erbium Doped Optical Fibers” // Proceedings of the 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012): Conference proceedings, Polija, Poznaņa, 18.-20. Jūlijs, 2012.
9. **Supe A.**, Poriņš J. “Optical Fiber Nonlinear Coefficient Measurements Using Four-Wave Mixing” // Swedish Communication Technologies Workshop (Swe - CTW 2012): Conference proceedings, Zviedrija, Lunda, 24.-26. Oktobris, 2012., 6. lpp.
10. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. “Pump and Filtering Optimization in Mamyshev Regenerator” // RIAO/OPTILAS 2013: Abstract's booklet, Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013.
11. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. “Experimental Characterization of a Highly Nonlinear Fiber” // RIAO/OPTILAS 2013: Abstract's booklet, Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013.
12. Ferreira M.F.S., **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N. “Effective Nonlinear Parameter Measurement Using FWM in a Highly Nonlinear Fiber” // 3rd Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications: Abstracts, Zviedrija, Stokholma, 28.-30. Augusts, 2013.

#### Latvijas **patenti**:

1. Telekomunikāciju optiskās šķiedras nelineārā koeficienta mērījumu shēma, LV-14296, 2010.
2. Skrūves tipa optisko šķiedru savienotājs, kura konstrukcija balstās uz pārbīdes un rotācijas kustībām, Nr. LV-14587, 2012;

#### Eiropas **patentu pieteikumi**:

1. Skrūves-pārbīdes konstrukcijas optisko šķiedru savienotājs, EP12197706.0, 2013;
2. Stimulētās Briljuēna izkliedes sliekšņa jaudas mērījumu shēma, EP13198258.9, 2013.

Promocijas darba rezultāti izmantoti 3 Starptautisko un 3 Latvijas zinātniski pētniecisko projektu realizācijai:

#### **Starptautiskie** zinātniski pētnieciskie projekti:

1. „OSP-HNLF - Optical Signal Processing Using Highly Nonlinear Fibers”, project ref. PTDC/EEA-TEL/105254/2008, European Union FEDER program;
2. „Steering of light in nonlinear waveguides with resonant interactions”, project ref. PTDC/FIS/112624/2009 (CONLUZ), European Union FEDER program;
3. Strategic Project UI 44 - 2011 - 2012, project ref. PEst-C/CTM/LA0025/2011;
4. Sadarbībā ar Aveiro Universitātes Telekomunikāciju institūtu iesniegts izskatīšanai COST projekta pieteikums “Digital Signal Processing for Fiber Optic Communication Networks”.

#### **Latvijas** zinātniski pētnieciskie projekti:

1. „Optiskā signāla polarizācijas stāvokļa noteikšanas metodes ŠOPS”, Nr. ZP-2009/6, RTU;
2. „Nelineārā optiskā koeficienta mērīšanas metožu izpēte ŠOPS”. Nr. ZP-2010/10, IZM-RTU;
3. „Polarizācijas izmaiņu novērtējums un PMD kompensatora izstrāde optiskajām viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmām”, Nr. ZP-2010/26, RTU.

## Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 120 lappuses. Darbs sastāv no ievada, četrām nodaļām, literatūras saraksta un pielikuma. Ievadā pamatota veikto pētījumu aktualitāte un noteikti promocijas darba pētījumu virzieni.

Darba pirmajā nodaļā apskatītas optisko šķiedru nelineāro īpašību pētījumu attīstības tendences un dots ŠOPS novērojamo NOE pārskats. Ir definēti optiskās šķiedras nelinearitāti raksturojošie parametri un to fizikālā nozīme. Nodaļas beigās formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi, zinātniskais jaunieguvums, aizstāvamās tēzes un apkopoti galvenie rezultāti.

Darba otrā nodaļa ir veltīta optisko šķiedru efektīvā laukuma  $A_{eff}$  mērījumu metožu izpētei. Šis parametrs tiek pētīts tāpēc, ka optiskā starojuma intensitāte ir atkarīga no laukuma pa kuru šķiedrā izplatās lielākā daļa no optiskā signāla. Pētījumu gaitā tika izstrādāta eksperimentāla  $A_{eff}$  mērījumu metode, kas balstīta uz optisko šķiedru savstarpēju šķērsnobīdi, pielietojot mikropozicionieri. Lai novērtētu izstrādātās metodes precizitāti, tika veikts iegūto mērījumu rezultātu salīdzinājums ar aprēķinu rezultātiem, pielietojot plaknes viļņu superpozīcijas metodi, kā arī mērījumu rezultātiem, kas iegūti ar infrasarkanu staru CCD kameru. Veikts arī  $A_{eff}$  novērtējums erbijā legētajai šķiedrai pie dažādiem viļņa garumiem 3. optiskās caurlaidības logā.

Trešajā nodaļā veikta optiskās šķiedras  $\gamma$  parametra mērījumu metožu izpētei, kas balstīta uz optiskā Kerra efekta izraisītajām nelineārajām parādībām: fāzes pašmodulācija (SPM) un četru viļņu mijiedarbība (FWM). Veicot uz SPM balstītu  $\gamma$  parametra mērījumu metožu izpēti, tika izstrādāta un Latvijā patentēta mērījumu shēma, kur tiek pielietots impulsvēda optiskais signāls (P-SPM). Iegūto rezultātu salīdzināšanai, mērījumu shēma tika realizēta arī datorsimulāciju programmā Synopsis RSoft OptSim 5.2. Lai novērtētu šķiedras  $\gamma$  parametra atkarību no optiskā starojuma polarizācijas stāvokļa, tika pētītas arī mērījumu metodes, kas balstīta uz FWM ierosināšanu pētāmajā šķiedrā. Šis pētījums tika veikts doktorantūras prakses laikā sadarbībā ar Aveiro Universitātes optisko sakaru un fotonikas zinātnieku grupu profesora Mario F.S. Ferreira un asoc. prof. Armando N. Pinto vadībā. Ierosinot šķiedrā FWM un veicot optiskā spektra mērījumus, tika iegūts augsti nelineāras šķiedras (HNLF) efektīvais nelineārais koeficients  $\gamma_{eff}$ .

Ceturtajā nodaļā tika apskatīts jauna veida optisko signālu atjaunošanas paņēmieni, pielietojot SPM nelineāro efektu jeb tā saukto Mamiševa tipa reģeneratoru. Šāda veida signālu reģenerācija pilnīgi optiskajā apgabalā komerciālās ŠOPS vēl netiek izmantota, bet tā ir ļoti perspektīva, jo neierobežo signāla maksimālo datu pārraides ātrumu, kā tas ir gadījumos, kad tiek atjaunots elektriskais signāls, pielietojot opto-elektrisko un elektro-optisku pāreju. Pētījuma eksperimentālā daļa tika veikta sadarbībā ar Aveiro universitātes Optisko sakaru un fotonikas grupu. Veicot 40 Gbit/s RZ-OOK signāla atjaunošanu, tika veikts pētījums par divu dažādu optisko filtru ietekmi uz reģeneratora darbību. Abu filtru gadījumā tika atrasta labākā iespējamā atjaunotā optiskā signāla signāls/troksnis (SNR) un izdzišanas attiecība (ER).

Nobeigumā apkopoti un pamatoti promocijas darba galvenie secinājumi. Pielikumos ir pievienoti konferenču, publikāciju un projektu saraksti, Latvijas patenta apliecība, doktorantūras prakses rekomendācija un izmantoto iekārtu tehniskās specifikācijas.

## DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

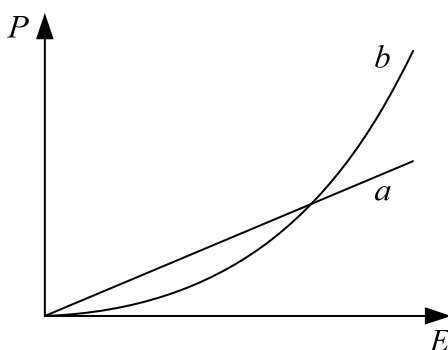
### Pirmā nodaļa

Pirmajām no SiO<sub>2</sub> izgatavotajām optiskajām šķiedrām 1960 –tajos gados bija ļoti lieli zudumi. Būtisks pavērsiens notika 1970. gadā, kad Corning kompānijas zinātniekiem izdevās būtiski samazināt kvarca stikla šķiedru zudumus [18]. Drīz pēc tam, kompānijas Bell Laboratories zinātnieki izmantoja silīcija dioksīda šķiedras, lai pētītu un demonstrētu nelineāros optiskos efektus [16, 35-38]. Tā 1972. gadā tika veikti pētījumi par stimulētās Ramana un Brilljuēna izkliedes procesiem optiskajās šķiedrās [16, 35]. Šie pētījumi veicināja

arī citu nelineāro parādību izpēti, kā optiski izraisītā dubultlaušana, parametriskā četru viļņu mijiedarbe un fāzes pašmodulācija [36, 38]. Tomēr reālās ŠOPS šķiedru nelinearitāte praktiski neietekmēja signālu pārraidi, jo optisko signālu jauda bija salīdzinoši maza (ap 0 dBm), datu pārraides ātrumi bija mērāmi megabitos un netika pielietota daudzkanālu pārraide veicot blīvēšanu pēc viļņa garuma.

Nelineārās šķiedru optikas pētījumi būtiski aktualizējās 1990 – tajos gados, kad maģistrālajās šķiedru pārraides līnijās sāka pielietot optiskos pastiprinātājus. Turklāt pārraides sistēmās arvien plašāk tika izmantotas vienmodas šķiedras (SMF), jo tās ienes daudz mazāku optisko signālu dispersiju. Bet šādām šķiedrām serdeņa izmērs ir mazāks nekā iepriekš pielietotajām daudzmodu šķiedrām, tādēļ optiskā signāla intensitāte šķiedrā ir lielāka. Līdz ar to optiskās pārraides sistēmās daudz izteiktāk sāka parādīties optisko šķiedru nelineārie efekti un to nevēlamā ietekme uz signālu pārraidi. Tas izraisīja strauju nelineārās šķiedru optikas pētniecības virziena attīstību, kas turpinās arī 21. gadsimtā. Tiek pētīti gan veidi kā samazināt nelineāro efektu ietekmi, gan arī jauni optisko nelinearitāšu pielietošanas paņēmieni [2].

Optiskajām šķiedrām nelinearitāte izpaužas sakarībā starp vides polarizāciju un elektrisko lauku,  $P = \epsilon_0 \chi E$ , kur  $\epsilon_0$  ir vakuuma dielektriskā caurlaidība,  $\chi$  ir vides dielektriskā uzņēmība un  $E$  ir elektriskā lauka intensitāte [26]. Nelineāru dielektrisku vidi raksturo nelineāra sakarība starp  $P$  un  $E$ , kā parādīts Att. 2. Vides polarizācija  $P = Np$  ir atkarīga no katra individuāla dipola momenta  $p$ , ko izraisa elektriskais lauks  $E$ , un dipolu momentu blīvuma  $N$ . Attiecīgi vides nelinearitāte ir atkarīga gan no  $p$ , gan  $N$  [9].



Att. 2. Saistība starp  $P$  un  $E$  lineāras (a) un nelineāras (b) dielektriskas vides gadījumā [9].

Jebkura dielektriska materiāla reakcija uz gaismu intensīva elektromagnētiskā lauka ietekmē kļūst nelineāra un optiskās šķiedras nav izņēmums. Silīcija dioksīds kā materiāls būtībā nav izteikti nelineārs līdz ar to nelineārās optikas parādības ir novērojamas tikai pie relatīvi lielās gaismas intensitātes, un tās kvalitatīvi izmaina pārraidāmo signālu.

Nemot vērā, ka optisko šķiedru vājinājums ir ļoti mazs (tipiski vienmodas šķiedrām viļņa garumu diapazonos ap 1310nm un 1550nm attiecīgi ir 0.5dB/km un 0.2dB/km), pārraides sistēmās izmanto mazas jaudas raidītājus (optiskā signāla jauda pārraidei līdz 100 km attālumam tipiski ir līdz 1mW) [1]. Tomēr optiskās šķiedras kā viļņvada ģeometrija izveidota tā, ka gaisma izplatās tikai pa tās centrālo daļu, jeb šķiedras serdeni. Serdeņa izmērs vienmodas šķiedrām tipiski ir 8 – 10  $\mu\text{m}$ . Ja šādā šķiedrā vienlaikus pārraida vairākas informācijas plūsmas jeb tā sauktos kanālus pielietojot viļņgarumdales blīvēšanu (no angļu val. wavelength division multiplexing - WDM), tad kopējā jauda šķiedras serdenī ir atkarīga no kopējā kanālu skaita. Līdz ar to daudzkanālu WDM sistēmu gadījumā optiskā signāla intensitāte šķiedrā ir augsta. Turklāt gaisma šķiedrā izplatās bez defokusēšanās (bez šķērsriezuma laukuma būtiskas izmaiņas) patvaļīgi lielos attālumos. Nelineārie efekti savukārt lineāri palielinās atkarībā no šķiedras garuma. Tomēr vājinājuma dēļ optiskā starojuma jauda samazinās, tāpēc aprakstot NOE tiek lietots tā sauktais efektīvais šķiedras garums, jeb apgabals kurā visintensīvāk notiek nelineārā mijiedarbība [3]

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-0.23\alpha L}}{0.23\alpha}, \quad (1)$$

kur  $L$  – šķiedras kopējais garums,  $\alpha$  – vājinājuma koeficients, dB/km. Reizinātājs 0.23 tiek lietots, lai pārietu uz lineāro vājinājuma koeficientu (cik reizes samazinās optiskā signāla jauda).

Iepriekš minētie aspekti (šķiedras serdeņa izmērs un pārraides līnijas garums) ir galvenie cēloņi kāpēc kvarca stikla šķiedrās novērojama dažādu nelineāro efektu parādīšanās, kas ir jāņem vērā veidojot ātrdarbīgas optisko signālu pārraides līnijas, jo NOE ienes nevēlamus signālu kropļojumus [2].

Nelineārās optikas parādību apraksts tipiski tiek veidots izsakot polarizācijas  $P(t)$  atkarību no pieliktās elektriskā lauka intensitātes  $E(t)$ . Iemesls kāpēc aprakstot NOEs tiek izmantota polarizācija ir tāds, ka laikā mainīga polarizācija var izsaukt jaunu elektromagnētiskā lauka komponentu rašanos, kas ir galvenā nelineāro efektu izpausme [10]. Būtiski ir atzīmēt, ka  $\text{SiO}_2$  ir simetriska molekula, tādēļ otrās kārtas dielektriskās uzņēmības tenzors  $\chi^{(2)}$  ir ļoti tuvs nullei. Līdz ar to kvarca stikla šķiedrām galvenais nelinearitātes cēlonis ir  $\chi^{(3)}$ . Optiskajām šķiedrām trešās kārtas dielektriskā uzņēmība ir praktiski bez aiztures, līdz ar to NOE izpaužas tūlītēji un ir novērojami arī ļoti īsu impulsu gadījumā.

Visus trešās kārtas NOE iedala divās grupās: elastīgie un neelastīgie. Nelineārie procesi, kuru cēlonis ir  $\chi^{(3)}$  ir elastīgi un šādus NOE sauc arī par parametriskajām mijiedarbēm. Šādas terminoloģijas izcelsme nav viennozīmīga, bet vārds parametriskais tiek lietots, lai apzīmētu procesu kurā sistēmas sākuma un beigu kvantu-mehāniskie stāvokļi ir identiski. Tātad parametriskā procesā fotonu populāciju no pamatstāvokļa var pārvietot tikai uz īsu laika intervālu, kad tā pārvietojas uz virtuālu līmeni. Savukārt procesi, kuros iesaistīta fotonu populācijas pārvietošanās no viena reāla līmeņa uz citu, tiek saukti par neparametriskiem procesiem. Viena no atšķirībām starp parametriskiem un neparametriskiem procesiem ir tāda, ka parametriskos procesus vienmēr var aprakstīt ar reālu dielektrisko uzņēmību, bet neparametriskos procesus apraksta kompleksā dielektriskā uzņēmība [11].

Parametriskā procesā fotona enerģija vienmēr tiek saglabāta, tādēļ starp viļņiem ar dažādām frekvencēm var notikt savstarpēja enerģijas pāreja, ko izraisa vides nelineārās īpašības, bet kopējais enerģijas daudzums paliek nemainīgs. Tā kā parametriskie procesi vispārīgi ir koherenti, tie ir atkarīgi no fāzu saskaņotības [11, 21]. Saskaņā ar amerikāņu fiziķa Roberta Boida (Robert W. Boyd) izstrādāto klasifikāciju, pie parametriskajiem procesiem pieder no intensitātes atkarīgais laušanas koeficients (t. sk. optiskais Kerra efekts) un jaunu harmoniku ģenerācija [11]. Optiskajās pārraides sistēmās pārsvarā ir novērojams tieši optiskais Kerra efekts, kas izraisa no intensitātes atkarīgu šķiedras laušanas koeficienta izmaiņu. Jāpiebilst, ka iepriekš aprakstītā nav vienīgā NOE klasifikācija. Piemēram, krievu literatūrā (Fains, Haņins) par parametriskiem NOE sauc efektus, kuros nozīmīga loma ir fāžu sakarībām starp gaismas viļņiem. Šajā klasifikācijā optiskais Kerra efekts nav parametriskais.

Otra grupa ir nelineārie efekti, kas rodas no stimulētās neelastīgās izkliedes, kas ir neparametriski nelineārie procesi. Atšķirībā no parametriskajiem procesiem šajā gadījumā visi fizikālās sistēmas kvantu stāvokļi izmainās. Šādā procesā optiskais vilnis pārnes daļu no sākotnējās enerģijas uz nelineāro vidi. Neparametrisko procesu grupā ietilpst nelineārās izkliedes, kas ir saistītas ar vibrāciju ierosināšanu kvarca stiklā, kā arī nelineārā absorpcija [2, 11]. No šīs grupas nelineārajām parādībām optiskajās šķiedrās visbiežāk ir novērojama stimulētā Briljuēna un stimulētā Ramana izkliede. Savukārt nelineārā absorpcija sāk izpausties pie ļoti lielas gaismas intensitātes (telekomunikāciju šķiedrām nelineārie zudumi strauji pieaug pie intensitātēm, sākot no  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> [22]), kas nav raksturīga optisko sakaru sistēmām.

Iepriekš aprakstītā NOE klasifikācija ir parādīta Att. 3. Tipiskākie  $\chi^{(3)}$  izraisītie NOE optiskajās pārraides sistēmās ir fāzes pašmodulāciju, fāzes šķērsmodulācija un četru viļņu mijiedarbe, kā arī stimulētās Briljuēna un Ramana izkliedes [14].

Tā kā optiskais Kerra efekts izraisa šķiedras laušanas koeficienta atkarību no elektriskā lauka intensitātes, tad optiskās šķiedras laušanas koeficientu attiecīgi var izteikt kā

$$n(\omega, |E|^2) = n_0(\omega) + n_2|E|^2, \quad (2)$$

kur  $n_0 = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}$  ir laušanas koeficienta lineārā daļa, kas ir atkarīga no frekvences,  $n_2$  ir nelineārais laušanas koeficients, dažreiz saukts par otrās kārtas laušanas koeficientu, jeb Kerra koeficientu, kas parāda cik strauji pieaug laušanas koeficienta nelineārā daļa atkarībā no optiskā viļņa elektriskā lauka intensitātes kvadrāta  $|E|^2$  optiskajā šķiedrā [3]. Laušanas koeficienta nelineāro daļu var izteikt arī caur dielektriskās uzņēmības tenzoru (SI mērvienību sistēmā)

$$n_2 = \frac{3}{4} \frac{\chi^{(3)}}{c \varepsilon_0 n_0^2}, \quad (3)$$

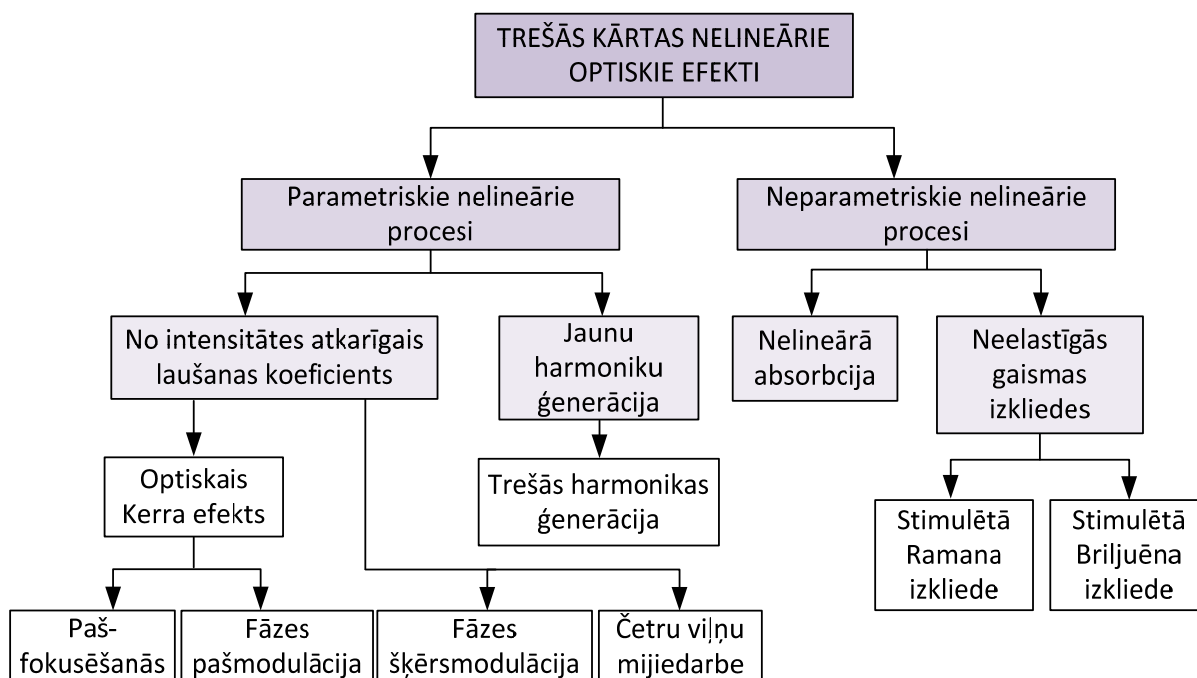
kur  $\varepsilon_0$  ir vakuuma dielektriskā caurlaidība un optiskais lauks ir pieņemts kā lineāri polarizēts tā, ka tikai viena komponente no trešās kārtas tenzora  $\chi^{(3)}$  atbild par laušanas koeficientu. Tenzora  $\chi^{(3)}$  parametri ietekmē arī gaismas polarizācijas īpašības, jo izraisa nelineāro dubultlaušanu [3, 14].

Optiskajai šķiedrai kā viļņvadam tiek definēts arī tāds parametrs kā nelineārais koeficients  $\gamma$

$$\gamma = \frac{\omega n_2}{c_g A_{eff}}, \quad (4)$$

kur  $\omega$  ir leņķiskā frekvence,  $c_g$  ir gaismas ātrums šķiedrā un  $A_{eff}$  ir šķiedras efektīvais serdeņa laukums, kas tipiski ir nedaudz lielāks nekā šķiedras serdeņa laukums. Tas nozīmē, ka daļa no gaismas izplatās arī pa optiskās šķiedras apvalka iekšējo daļu.  $A_{eff}$  ir atkarīgs no šķiedras parametriem, kā serdeņa laukums, serdeņa/apvalka laušanas koeficientu starpības un šķiedras profila [3, 14]. Nelineārais koeficients raksturo šķiedras nelinearitāti, kas ir atkarīga gan no materiāla īpašībām ( $n_2$ ), gan no šķiedras konstrukcijas ( $A_{eff}$ ).

Optiskās šķiedras parametru  $\gamma$  var novērtēt tikai netiešā ceļā, ierosinot kādu no NOE un novērtējot optiskā signāla izmaiņas šķiedras izejā. Būtiski ir piebilst, ka nelineārā koeficienta mērījumi vēl nav standartizēti, līdz ar to aktuāls ir jautājums, kura no mērījumu metodēm ir vispiemērotākā. Tradicionāli  $\gamma$  mērījumos pielieto uz SPM balstītu metodi [38]. Tomēr šādus mērījumus ir iespējams veikt dažādās konfigurācijās kā arī pielietojot citus NOE, piemēram, četru viļņu mijiedarbību (FWM). Tā kā vēl joprojām notiek darbs pie noteikta standarta izstrādes, pētījumi par  $n_2$  un  $\gamma$  mērījumiem ir aktuāli.



Att. 3. Optiskajās šķiedrās novērojamo trešās kārtas NOE klasifikācija.

Kā iepriekš tika minēts, NOE ir viens no ierobežojošajiem faktoriem ātrdarbīgās ( $\geq 40\text{Gb/s}$ ) optiskās pārraides sistēmās, tomēr nelineārie efekti nav vērtējami tikai kā nevēlama parādība. Pielietojot NOE ir iespējams realizēt signālu apstrādi pilnīgi optiskā ceļā. Līdz ar to pārraides sistēmas ātrdarbība vairs nav ierobežota ar elektrisko komponentu iespējām (galvenokārt ierobežojošais faktors ir opto-elektriskā un elektro-optiskā pārveidojuma veikšana reālā laikā). Savukārt NOE optiskajā šķiedrā notiek gandrīz bez aiztures.

Tipiskākie optisko signālu apstrādes paņēmieni, kas realizēti uz NOE ir: ļoti ātra optisko signālu komutācija ( $R \geq 1\text{ Tb/s}$ ) [7], viļņa garuma pārveidošana, blīvēšana un atblīvēšana, optisko signālu pastiprināšana un atjaunošana [14]. Pēdējais no minētajiem ir ļoti aktuāls pētījumu virziens, jo ātrdarbīgajās sakaru sistēmās ļoti svarīgi ir nodrošināt nepieciešamo bitu kļūdu attiecību (no ang. val. bit error ratio - BER), kas ir atkarīga no signāls troksnis attiecības (no ang. val. signal noise ratio - SNR) [30]. Līdz ar to NOE ne tikai ienes signālu kropļojumus, bet potenciāli var tikt pielietoti signālu atjaunošanā. Lai izveidotu signālu reģeneratoru pilnībā optiskajā apgabalā, ir jāpanāk NOE efektīva ierosināšana. Šādā gadījumā jāpielieto šķiedras, kurām ir palielināta nelinearitāte jeb tā sauktās augsti nelineārās šķiedras (HNLF) [14].

Optisko šķiedru nelinearitāte kļūst arvien aktuālāka, it sevišķi, ātrdarbīgās ŠOPS. Līdz ar to, izvēloties šķiedru, būtiski ir novērtēt tās parametru  $\gamma$ . Ja šķiedra ir paredzēta optisko signālu pārraidei, piemērotākas ir šķiedras ar iespējami mazāku  $\gamma$  [28]. Savukārt, pielietojot NOE optisko signālu apstrādē, aktuālas ir šķiedras ar palielinātu nelinearitāti.

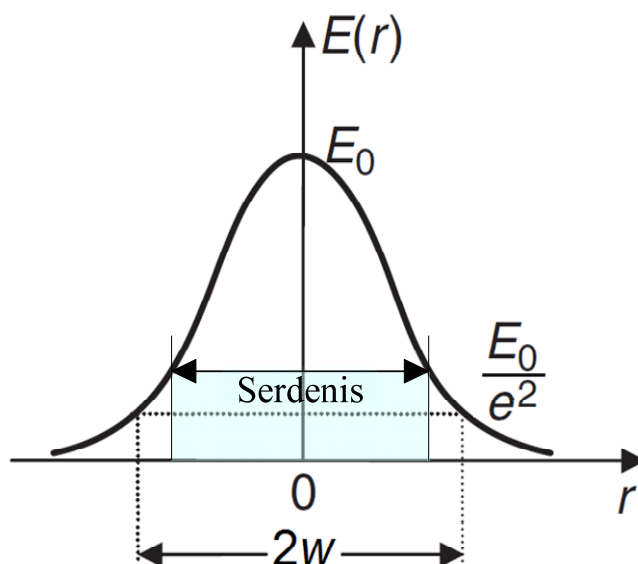
## Otrā nodaļa

Lai palielinātu optiskās šķiedras informācijas caurlaides spēju, tiek izstrādātas WDM sistēmas ar uzlabotu spektrālo efektivitāti. Tāpēc visi WDM kanāli tiek izvietoti pēc iespējas blīvāk (pie pārraides ātruma  $10\text{ Gbit/s}$  vienā kanālā starpkanālu frekvenču attālums  $\leq 50\text{ GHz}$ ). Tādā veidā ir iespējams vienlaikus pārraidīt vairākus desmitus un pat simtus optisko signālu ar dažādiem viļņa garumiem. Līdz ar to, atkarībā no kanālu skaita, palielinās vienā šķiedrā pārraidāmā optiskā signāla kopējā jauda un attiecīgi arī optiskā starojuma intensitāte. Savukārt, kā iepriekš tika minēts, visi nelineārie efekti ir atkarīgi no optiskā starojuma intensitātes, kas optisko šķiedru gadījumā ir atkarīga no jaudas un šķērsriezuma laukuma, pa kuru notiek optisko signālu izplatīšanās šķiedrā.

Vienmodas šķiedrā optiskais starojums pa šķērsriezumu nav vienmērīgi sadalīts, turklāt pilnībā neaizpilda visu šķiedras tilpumu. Tas ir lielāks pie šķiedras centrālās garenass, bet virzienā uz serdes/apvalka robežvirsmu samazinās un daļēji iespiežas arī apvalkā. Gaismas sadalījums pa šķiedras šķērsriezumu ir atkarīgs no šķiedras profila jeb konstrukcijas, tās izmēriem un serdeņa/apvalka gaismas laušanas koeficientiem. Ja šķiedrai ir ITU-T G.652 rekomendācijā definētais pakāpjveida profils, tad optiskais starojums atbilst Gausa sadalījumam (skatīt *Att. 4.*). Gaismas sadalījumu šķiedrā raksturo divi parametri: modas lauka diametrs (no ang. val. mode field diameter - MFD) un efektīvais laukums  $A_{eff}$ . Ja gaisma šķiedras šķērsriezumā ir ar Gausa sadalījumu, tad MFD ir šķiedras apgabala diametrs, kur optiskā starojuma intensitāte samazinās līdz  $1/e^2$  no maksimumintensitātes. Šādā gadījumā laukums pa kuru izplatās lielākā daļa no gaismas  $A_{eff} = \pi w^2$ . Efektīvā laukuma parametrs tika ieviests, lai nelineāro efektu aprēķinos iegūtu reālo optiskā starojuma intensitāti šķiedrā [17]. Tas ir balstīts uz modālā lauka sadalījumu un vispārīgā gadījumā ir

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left( \int_0^{\infty} |E_a(r)|^2 r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} |E_a(r)|^4 r dr} = \frac{2\pi \left( \int_0^{\infty} I(r) r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} I^2(r) r dr}, \quad (5)$$

kur  $E_a(r)$  ir elektriskā lauka intensitāte un  $I(r)$  ir pamatmodas tuvā lauka intensitāte atkarībā



Att. 4. Optiskais starojums vienmodas optiskajā šķiedrā ar Gausa sadalījumu. Modas lauka diametrs ir funkcijas platumš  $2w$  līmenī  $1/e^2$  [15]. Gaiši zilā krāsā dots šķiedras serdenša diametrs.

no rādiusa  $r$  (attāluma no šķiedras garenvirziena centrālās ass) [8]. Integrēšana tiek veikta pa visu šķiedras šķēsgriezuma laukumu.

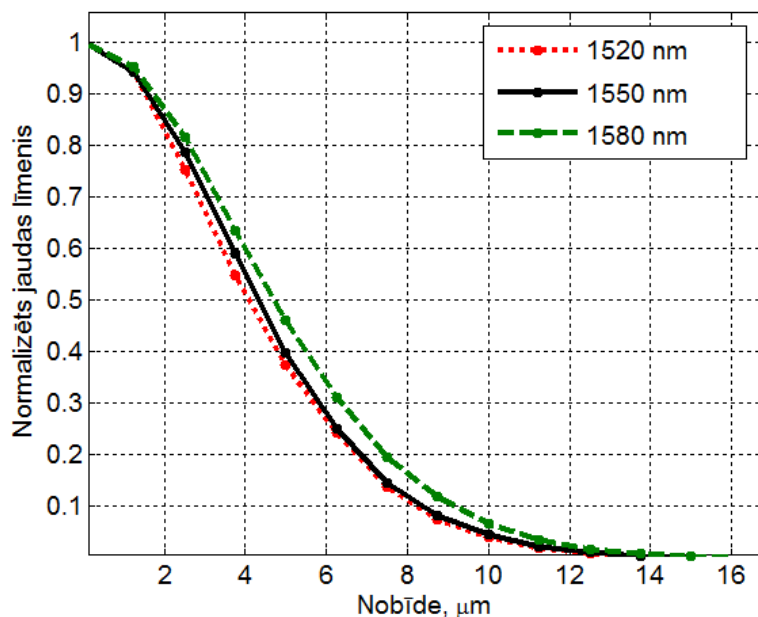
Efektīvo laukumu var aprēķināt tikai šķiedrām, kurās optiskā intensitāte ir ar Gausa sadalījumu. Pēc ITU-T rekomendācijas G.650.2 (07/2007) šādas šķiedras ir rekomendācijās G.652 un G.654 definētās soļu indeksētās jeb pakāpjveida profila šķiedras, bet G.653 nobīdītās dispersijas šķiedrām  $A_{eff}$  nevar precīzi noteikt, izmantojot vienādojumu (5). Šādos gadījumos aktuāli kļūst  $A_{eff}$  mērījumi. Turklāt ne vienmēr šķiedru ražotāji norāda izgatavoto šķiedru MFD un  $A_{eff}$  parametrus. Līdz ar to, lai novērtētu šādu šķiedru nelinearitāti, aktuāla kļūst efektīvā laukuma mērīšana. Šajā darba nodaļā tika veikta optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšana, pielietojot divu šķiedru savstarpēju šķērsnobīdi.

ITU-T rekomendācijā G.650.2(07/2007) aprakstītas tālā lauka skanēšanas un maināmās apertūras  $A_{eff}$  mērījumu metodes. Šādu mērījumu metožu realizēšanai nepieciešamas specifiskas mēriekārtas. Tādēļ šajā darba nodaļā tika izstrādāta  $A_{eff}$  mērījumu metode, pielietojot divu šķiedru savstarpēju šķērsnobīdi [27]. Šī metode ir balstīta uz tālā lauka sadalījuma noteikšanu, izmantojot lāzeri, mikropozicionieri un optiskās jaudas mērītāju. No optiskā starojuma tālā lauka sadalījuma var aprēķināt tuvā lauka sadalījumu, pielietojot inverso Henkela transformāciju. Sekojoši no tuvā lauka sadalījuma var aprēķināt  $A_{eff}$  izmantojot vienādojumu (5).

Šķērsnobīdes metode atšķiras no ITU rekomendācijā aprakstītās tālā lauka skanēšanas metodes ar to, ka tālā lauka jaudas sadalījumu uztver ar optisko šķiedru, nevis PIN fotodiode. Otrkārt, uztverošās šķiedras garenass vienmēr ir paralēla raidošās šķiedras garenasij, atšķirībā no rekomendācijā G.650.2(07/2007) minētās metodes, kur uztverošā PIN diode tiek pārvietota pa izliektu trajektoriju, noteiktā attālumā no raidošās šķiedras gala. Līdz ar to, starp raidošās šķiedras garenasi un uztvērēja centrālo asi veidojas leņķiska nobīde.

Mērījumos ar šķērsnobīdes metodi galvenā komponente ir mikropozicionieris, kas ļauj precīzi veikt divu šķiedru galu savstarpēju nobīdi. Šajā pētījumā tika izmantots mikropozicionieris *Standa 8MT173*, kura pamatsolis ir  $1.25\ \mu\text{m}$  ar iespēju veikt pārbīdi arī pa pussoli ( $0.625\ \mu\text{m}$ ). Mērījumu shēmā izmantots arī pārskatājams ECL tipa lāzers un optiskās jaudas mērītājs. Ar divu šķiedru šķērsnobīdes mērījumu metodi tiek iegūts optiskā starojuma sadalījums tālajā laukā, jo divu šķiedru galu virsmas ir novietotas  $\sim 2\ \text{mm}$  attālumā viena no otras [27].

Mērījumos iegūtais optiskā starojuma sadalījums pēc pārrēķina uz tuvā lauka sadalījumu vienmodas šķiedrai SMF-28 pie viļņa garumiem 1520, 1550 un 1580 nm dots Att. 5. Jauda uz y ass ir normēta pēc maksimālās jaudas, jo dažās mērījumu sesijās tika iegūti mazliet atšķirīgi maksimālās jaudas līmeņi.



Att. 5. Normēts optiskā starojuma tuvā lauka sadalījums pa šķiedras šķērs griezumu pie viļņu garumiem 1520, 1550 un 1580nm, atkarībā no šķiedru galu savstarpējās nobīdes.

Lai pārbaudītu ar izstrādāto mērījumu metodi iegūto rezultātu ticamību, tika veikts  $A_{eff}$  novērtējums vienmodas šķiedrai SMF-28 ar trīs dažādiem paņēmieniem: aprēķini ar plaknes viļņu superpozīcijas metodi, mērījumi ar šķērsnobīdes metodi un mērījumi ar infrasarkanā diapazona CCD kameru (mēriekārta BeamOn USB Measurement system, Version 4.01CCD S/N: 4634D). Tabulā 1 apkopoti visi iegūtie rezultāti pie viļņa garuma 1520 nm.

1. tabula

Standarta vienmodas šķiedras (SMF-28)  $A_{eff}$  mērījumu rezultāti un aprēķinātie MFD atkarībā no pielietotās metodes.

Vienmodas šķiedra SMF-28	Aprēķini ar plaknes viļņu superpozīcijas metodi	Eksperimentālie mērījumi ar šķērsnobīdes metodi	Infrasarkanā CCD kamera
Modas lauka diametrs, $\mu\text{m}$	9.60	9.53	9.55
$A_{eff}$ , $\mu\text{m}^2$	72.40	71.40	71.63

Visas trīs metodes dod ļoti līdzīgus rezultātus. Iegūto rezultātu izkliede  $\Delta A_{eff} = 1.00 \mu\text{m}^2$  un  $\Delta \text{MFD} = 0.07 \mu\text{m}$ . Mērījumu precizitāte ir atkarīga no mikropozicioniera soļa (+/-5%) un jaudas mērītāja precizitātes (+/-0.5 dB). Pieņemot sliktāko gadījumu, kad abi parametri ir ar vislielāko novirzi, mērījuma kļūda sastāda +/-  $1 \mu\text{m}^2$ . Tātad visi rezultāti iekļaujas mērījumu kļūdas intervālā. Līdz ar to var secināt, ka ar izveidoto  $A_{eff}$  mērījumu shēmu, iegūtie rezultāti ir ticami.

Izstrādātā  $A_{eff}$  mērījumu metode tika pielietota arī erbija leģētās šķiedras (no ang. val. erbium doped fiber - EDF) efektīvā laukuma mērījumos, lai novērtētu tās pielietojuma iespējas EDFA pastiprinātāja izveidē. Šajā gadījumā pētāmās EDF ražotājs nav norādījis



šķiedras  $A_{eff}$  un MFD. Mērījumu rezultātā tika iegūts, ka EDF šķiedras  $A_{eff}$  viļņa garumu diapazonā no 1470 līdz 1575 nm palielinās no  $22.6 \mu\text{m}^2$  līdz  $23.7 \mu\text{m}^2$  ( $\Delta A_{eff} = 1.1 \mu\text{m}^2$ ) [29]. Savukārt vienmodas šķiedras SMF-28 gadījumā tika iegūts, ka  $A_{eff}$  palielinās no  $71.4 \mu\text{m}^2$  līdz  $75.8 \mu\text{m}^2$  ( $\Delta A_{eff} = 4.4 \mu\text{m}^2$ ) viļņa garumu diapazonā no 1520 līdz 1580 nm [39]. Tā kā EDF nomērītais  $A_{eff}$  ir  $\sim 3$  reizes mazāks nekā vienmodas šķiedrai, tad var secināt, ka optiskā starojuma intensitāte EDF šķiedrā būs trīs reizes augstāka, nekā SMF-28 šķiedrā. No rezultātiem arī redzams, ka, palielinoties viļņa garumam, dažādām šķiedrām atšķiras  $A_{eff}$  izmaiņa.

## Trešā nodaļa

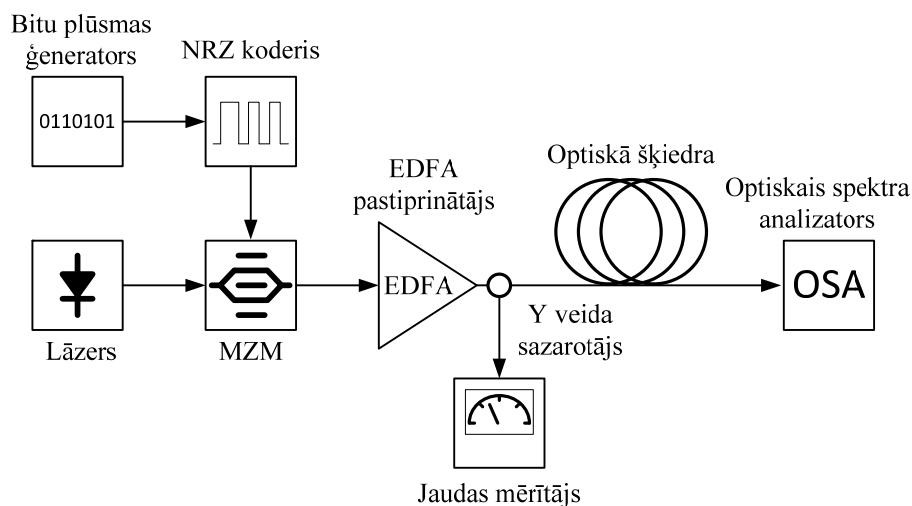
Darba 3. nodaļa veltīta optiskās šķiedras  $\gamma$  parametra mērījumu metožu izpētei, kas balstītas uz optiskā Kerra efekta izraisītajām nelineārajām parādībām: signāla fāzes pašmodulāciju (SPM) un četru viļņu mijiedarbību (FWM). Visa nodaļa ir sadalīta divās daļās, kur pirmajā ir aprakstīti mērījumi, pielietojot SPM, bet otrajā daļā – FWM.

Iepriekš jau tika minēts, ka šķiedras nelineāro koeficientu var novērtēt tikai netiešo mērījumu ceļā, ierosinot kādu no NOE. Tomēr šobrīd vēl nav izveidota standartizēta  $\gamma$  mērījumu metode. Piemēram, ITU-T rekomendācijā *G.650.2(07/2007)* ir piebilde, ka nelineārā koeficienta mērījumu metodes vēl tiek pētītas. Tāda pati piezīme ir atrodama ITU-T rekomendācijā *G.652*. Mērījumu metode, kas balstās uz impulsveida fāzes pašmodulāciju (SPM), ir ITU-T organizācijas eksperimentālā mērījumu metode. Savukārt nepārtraukta izstarojuma metode (no ang. val. continuous wave – CW), ir *Telecommunications International Association* (TIA) eksperimentālā mērījumu metodika [44], kas ir ierosināta izskatīšanai arī ITU organizācijā [43]. Aktuāls ir arī jautājums, kāda ir dažādu mērījumu metožu precizitāte un kura no tām dod vispiemērotāko nelineārā koeficienta novērtējumu tieši optiskās pārraides sistēmām [5, 13, 20].

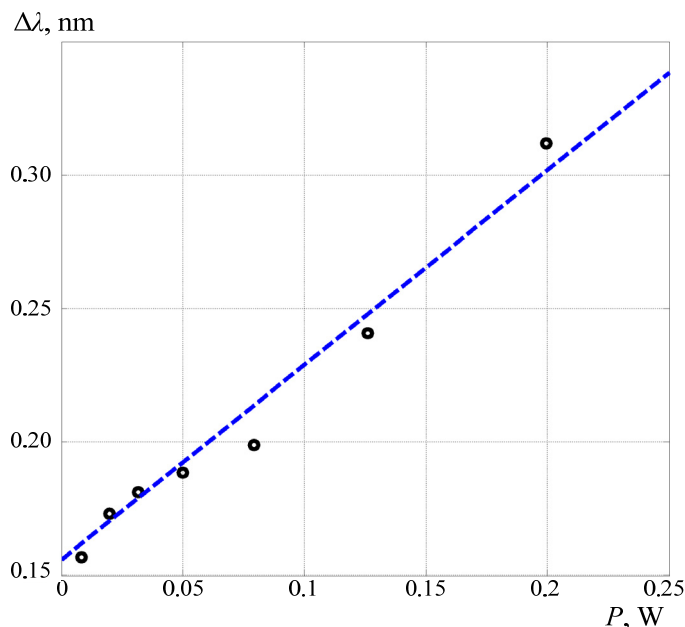
### *Mērījumi ar P-SPM metodi*

Analizējot dažādus  $\gamma$  mērīšanas paņēmienus, tika izstrādāta mērījumu shēma, kas balstīta uz SPM, pielietojot impulsveida optisko signālu (no ang. val. pulsed self phase modulation - P-SPM) [23]. Atšķirībā no citām metodēm, kurās tiek pielietota P-SPM, izstrādātajā mērījumu shēmā impulsveida optiskais signāls tiek iegūts ar pseidogadījuma impulsu secību ar impulsu sekošanas frekvenci 10 GHz, kas atbilst sinhronās digitālās hierarhijas datu pārraides ātrumu hierarhijas līmenim STM-64 (9953,28 Mbit/s) un bieži tiek izmantots daudzkanālu viļņgarumdales blīvēšanas sistēmās kā atsevišķa kanāla datu pārraides ātrums. Līdz ar to  $\gamma$  mērījumi tiek veikti reālas optisko signālu pārraides apstākļos [24]. Izstrādātajai mērījumu shēmai (skatīt *Att. 6.*) ir piešķirts Latvijas patents Nr. LV - 14296. Tā sastāv no raidītāja daļas, mērāmās šķiedras un uztvērēja daļas. Raidītāja daļa sastāv no elektriskā signāla jeb pseidogadījuma bitu plūsmas ģeneratora, NRZ koda formētāja, kas realizē bez atgriešanās pie nulles kodu, lāzera ar ārējo rezonatoru un maināmu viļņa garumu diapazonā no 1465 līdz 1575 nm un viļņa garuma izšķirtspēju 1 pm, 125 MHz pie 1550 nm un optiskā signāla ārējā modulatora, kas ir Maha Cendera (Mach–Zehnder) modulators uz  $\text{LiNbO}_3$  kristāla bāzes. Pie raidītāja daļas izejas ir pieslēgts EDFA optiskais pastiprinātājs ar maināmu izejas signāla jaudu robežās no 10.5 līdz 23.5 dBm. Pēc raidītāja daļas seko mērāmā šķiedra, kuras izeja ir pieslēgta pie optiskā spektra analizatora (OSA). Šķiedras parametrs  $\gamma$  tiek noteikts, veicot signāla spektra mērījumus un lineāri aproksimējot izejas signāla spektrālā platuma atkarību no šķiedras izejas signāla jaudas (skatīt *Att. 7.*). Parametrs  $\gamma$  attiecīgi ir ar lineāro aproksimāciju iegūtās taisnes slīpuma koeficients [24].

Nelineārā koeficienta mērījumos tika izmantotas divas dažādas šķiedras, kas atbilst ITU-T *G.652 D* un *G.655 C* rekomendācijām. *G.652 D* tipa šķiedra ir standarta vienmodas šķiedra ar samazinātu optisko vājinājumu pie OH- grupas absorbcijas viļņa garuma 1383 nm.



Att. 6. Simulāciju un eksperimentālā P-SPM nelineārā koeficienta mērījumu shēma, kas balstīta uz SPM nelineārā efekta izmantošanu.



Att. 7. Ar P-SPM metodi iegūtie mērījumu rezultāti un to lineārā aproksimācija (zila pārtrauktā līnija) G.652 D tipa šķiedrai.

Savukārt G.655 C ir nobīdītās dispersijas šķiedra (no ang. val. dispersion shifted fiber - DSF). Nulles dispersijas viļņa garums ir nobīdīts uz viļņa garumu 1550 nm.

Lai novērtētu ar izstrādāto P-SPM mērījumu metodi iegūtos rezultātus, tika veikti iepriekš minēto optisko šķiedru parametra  $\gamma$  mērījumi arī ar CW-SPM metodi, kā arī datorsimulācijas ar programmu Synopsys RSoft OptSim 5.3. Tabulā 2 ir ievietoti iegūtie rezultāti gan no eksperimentālajiem mērījumiem, gan no simulāciju datiem.

Vislabākā sakritība starp simulāciju datiem un eksperimentāli iegūtajām  $\gamma$  vērtībām tika iegūta ar P-SPM metodi. Rezultātu atšķirība G.652 D tipa šķiedrai ir  $\Delta\gamma=0.05 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  un G.655 C gadījumā  $\Delta\gamma=0.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ . Savukārt ar CW-SPM iegūtie mērījumi un simulāciju rezultāti G.652 D tipa šķiedrai atšķiras par  $\Delta\gamma=0.09 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  un G.655 C tipa šķiedrai par  $\Delta\gamma=0.11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ . No rezultātiem redzams, ka ar datorsimulācijām un eksperimentāli nomērītie  $\gamma$  parametra rezultāti P-SPM gadījumā ir ļoti tuvi (atšķirība par 5%). Lielāka rezultātu atšķirība ir novērojama gadījumā ar CW-SPM metodi (atšķirība par 10%), kas ir saistīts ar lielāku rezultātu izkliedi.

Eksperimentālie un ar datorsimulācijām iegūtie rezultāti

Eksperimentāli iegūtie rezultāti		
Šķiedras tips	CW-SPM	P-SPM
	$\gamma, (W^{-1}km^{-1})$	$\gamma, (W^{-1}km^{-1})$
G.652 D	0.88	0.95
G.655 C	0.91	0.98
Ar datorsimulācijām iegūtie rezultāti		
Šķiedras tips	CW-SPM	P-SPM
	$\gamma, (W^{-1}km^{-1})$	$\gamma, (W^{-1}km^{-1})$
G.652 D	0.97	1.00
G.655 C	1.02	1.04

Salīdzinot rezultātus, kas iegūti ar CW-SPM un P-SPM metodi, ir redzams, ka P-SPM metode visos gadījumos dod par ~8% augstāku  $\gamma$  vērtību. Tas varētu būt skaidrojams ar to, ka CW-SPM gadījumā tiek izmantota nepārtraukta izstarojuma gaisma. Šādos gadījumos šķiedrā ir novērojama stimulētā Briljuēna izkliede (SBS), kas izraisa ievadītās gaismas izkliedi. Līdz ar to daļa no optiskā starojuma nenonāk šķiedras izejā, bet izkļedes ceļā sāk izplatīties pretējā virzienā uz šķiedras sākumu. Tādēļ optiskā starojuma intensitāte šķiedrā ir mazāka, nekā impulsveida signāla gadījumā, kad SBS ietekme tiek efektīvi samazināta.

#### Mērījumi ar FWM metodi

Mērījumi ar SPM ierosināšanu šķiedrā ļauj novērtēt optiskās šķiedras parametru  $\gamma$ , bet tās nav vienīgās mērījumu metodes. Pētītas tiek arī citu NOE pielietošanas iespējas šķiedras  $\gamma$  novērtēšanā. Ļoti perspektīva ir mērījumu metode, kas balstīta uz FWM ierosināšanu, jo šāds NOE ir atkarīgs ne tikai no parametra  $\gamma$ , bet arī šķiedras dubultlaušanas īpašībām [4, 13, 20, 31, 33, 34]. Tātad FWM ir atkarīga ne tikai no ierosinošo optisko starojumu jaudas, bet arī no to savstarpējiem polarizācijas stāvokļiem [25].

Pētījums par FWM pielietojuma iespējām optiskās šķiedras  $\gamma$  mērījumos tika veikts doktorantūras prakses laikā sadarbībā ar Aveiro Universitātes Optisko Sakaru un Fotonikas zinātnieku grupu „Optisko pārraides sistēmu komponentu” laboratorijā profesora Mario F. S. Ferreras un asoc. prof. Armando N. Pinto vadībā. Mērījumu gaitā tika iegūts HNLF šķiedras parametrs  $\gamma_{eff}$ .

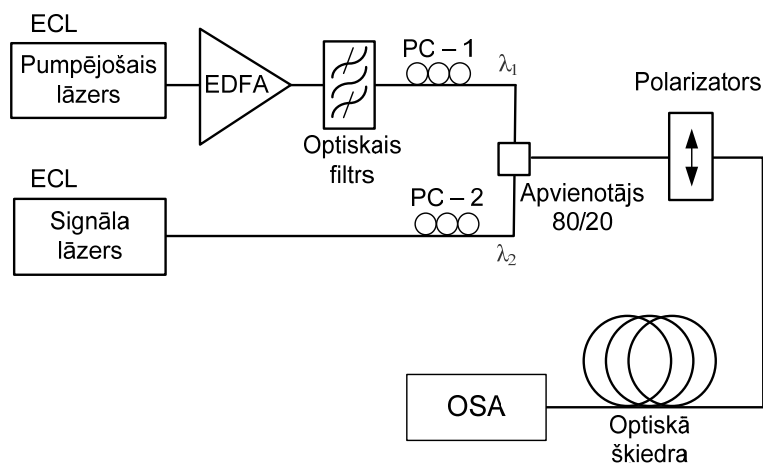
Ja šķiedrā tiek palaisti divi optiskie viļņi ar atšķirīgiem viļņa garumiem, kur viens ir izteikti jaudīgāks (pumpējošais) nekā otrs (signāls), tad no jauna radīto FWM komponenti zemas pumpējošās jaudas gadījumā apraksta vienādojums

$$P_3(L) = (\gamma P_1(0) L_{eff})^2 P_2(0) \left| \frac{\sin(kL)}{kL} \right|^2 e^{-\alpha L}, \quad (6)$$

kur  $P_3(L)$  ir FWM radītās komponentes jauda atkarībā no šķiedras garuma.  $P_1(0)$  un  $P_2(0)$  ir sākotnējā pumpējošā un signāla lāzera jauda,  $\alpha$  ir šķiedras vājinājuma koeficients,  $L$  ir šķiedras garums,  $L_{eff}$  ir šķiedras efektīvais garums, bet  $k$  ir parametriskais pastiprinājums [34]. No dotā vienādojuma (6) ir iespējams izteikt  $\gamma$  atkarībā no  $P_3(L)$ . Līdz ar to tika izstrādāta eksperimentāla mērījumu shēma, lai šķiedrā ierosinātu FWM un nomērītu nelineārās mijiedarbes radītās komponentes jaudu.

Izveidotā mērījumu shēma, kas tika izmantota HNLF šķiedras nelineārā koeficienta mērījumiem, pielietojot FWM nelineāro efektu, ir dota Att. 8. Pumpējošā un signāla

komponente tiek ģenerēta, izmantojot divus pārskatājamus lāzerus, kas darbojas nepārtraukta izstarojuma režīmā. Abu lāzeru izejas jaudas līmeņi tika izvēlēti tā, lai veidotos tikai viena



Att. 8. Eksperimentālā  $\gamma$  mērījumu shēma, pielietojot FWM.

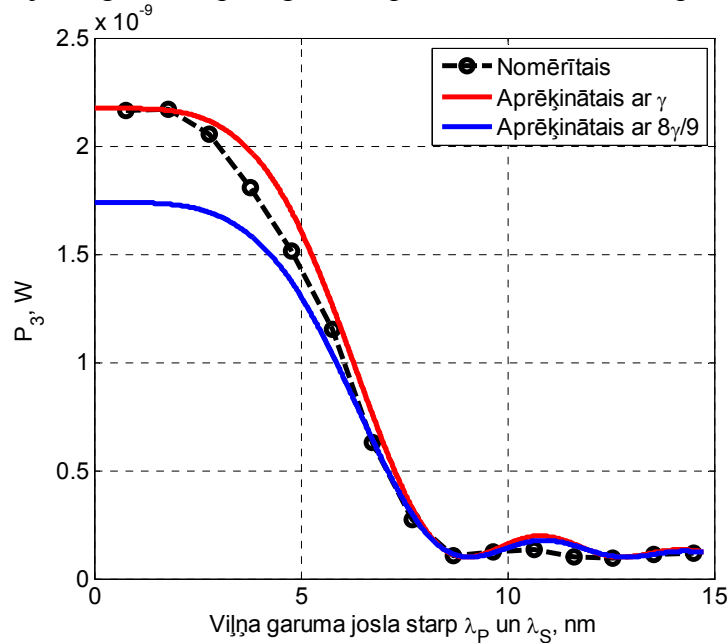
FWM izraisīta mijiedarbe un attiecīgi būtu novērojama tikai viena no jauna radīta spektrālā komponente šķiedras izejā [40].

Pumpējošā lāzera izeja ir pieslēgta pie EDFA pastiprinātāja, kura izejā pieslēgts optiskais filtrs, lai samazinātu pastiprinātāja ienesto trokšņu līmeni pumpējošā starojuma spektrā. Tālāk gan pumpējošais, gan signāla starojums tiek palaists caur polarizācijas kontrolieriem PC-1 un PC-2, lai varētu savstarpēji salāgot to polarizācijas stāvokļus. Tas tiek kontrolēts, izmantojot lineāru polarizatoru pēc optisko signālu apvienotāja. Tā kā polarizators pilnībā laiž cauri tikai signālus ar noteiktu polarizācijas stāvokli, tad ar polarizācijas kontrolieriem tiek veikta pumpējošās un signāla komponentes polarizācijas stāvokļu pagriešana līdz polarizatora izejā tiek iegūta maksimālā optiskā jauda. Pumpējošā un signāla viļņa polarizācijas kontrole ir ļoti būtiska, jo FWM ir jūtīgs pret polarizācijas stāvokļa izmaiņām. Abi optiskie signāli tiek apvienoti izmantojot asimetrisku apvienotāju, kura izejā nonāk 80% no pumpējošā starojuma jaudas un 20% no signāla jaudas. Tas samazina signāla komponentes jaudu, lai novērstu vairākkārtēju FWM mijiedarbību optiskajā šķiedrā [41]. Pēc polarizatora optiskais signāls tiek palaists HNLF šķiedrā, kuras izejā ir pieslēgts OSA, lai nomērītu FWM radītās komponentes jaudu.

Lai novērtētu, kā izmainās FWM ģenerētās komponentes maksimālā jauda atkarībā no viļņa garuma starpības starp pumpējošo un signāla komponenti, visas no spektriem noteiktās maksimumjaudas tika attēlotas vienā grafikā, kas dots Att. 9. Aplī, kas savienoti ar pārtraukto melno līniju ir eksperimentālo mērījumu rezultāti, bet ar nepārtraukto sarkano un zilo līniju attēloti aprēķinu rezultāti, izmantojot vienādojumu (6). Ar sarkano līniju attēlots gadījums, kad pumpējošais un signāla vilnis visā šķiedras garumā izplatās ar nemainīgu polarizācijas stāvokli, bet ar zilo līniju attēlots aprēķinu rezultāts, kad pumpējošā un signāla viļņa polarizācijas stāvoklis ir pilnībā gadījuma rakstura un nelineārais koeficients šādā gadījumā samazinās līdz  $8\gamma/9$ . Koeficients  $8/9$  ir vidējots aprēķins, t.i. pieņemot, ka pumpējošā un signāla viļņa polarizācijas stāvoklis mainās pēc gadījuma rakstura, tiem izplatoties pa optisko šķiedru, kas nesaglabā polarizācijas stāvokli [3]. Kā redzams Att. 9., tad ar vienādojumu (6) iegūtie rezultāti gan ar  $\gamma$  (nepārtraukta sarkanā līnija), gan  $8\gamma/9$  (nepārtraukta zilā līnija) gadījumā nepilnīgi atspoguļo reālo FWM komponentes jaudas izmaiņu atkarībā no  $\Delta\lambda$ . Tādēļ, lai matemātiskajā modelī (6) ietvertu arī polarizācijas stāvokļa izmaiņu ietekmi uz FWM komponentes optisko jaudu, tiek ieviests tāds parametrs kā efektīvais nelineārais koeficients  $\gamma_{eff}$ . Nobīdītās dispersijas šķiedrai šāda parametra izmaiņas, palielinot viļņa garuma intervālu starp pumpējošo un signāla komponenti, vislabāk apraksta hiperboliskā sekansa funkcija

$$\gamma_{eff}(\Delta\lambda) = \frac{8\gamma}{9} + \frac{\gamma}{9} \operatorname{sech}\left(\frac{\Delta\lambda A_0}{T_0}\right), \quad (7)$$

kur  $A_0$  un  $T_0$  ir funkcijas argumenta pielāgošanas parametri un  $\Delta\lambda$  ir starpība starp pumpējošās



Att. 9. Aprēķinātā un nomērītā FWM komponentes ( $\lambda_{FWM} = 2\lambda_p - \lambda_s$ ) jauda atkarībā no pumpējošās ( $\lambda_p$ ) un signāla ( $\lambda_s$ ) komponentes viļņa garumu starpības.

un signāla komponentes viļņa garumiem [34].

Lai novērtētu kāda ir HNLF šķiedras  $\gamma_{eff}$  izmaiņa atkarībā no  $\Delta\lambda$ , ar vienādojumu (6) tika aprēķināts parametrs  $\gamma$  pie dažādām pumpējošā un signāla lāzera viļņa garumu starpībām (skat. Att. 10.a). Uz ordinātu ass parametrs  $\gamma$  attēlots normalizētā formā. Nelineārā koeficienta lielums gadījumā, kad pumpējošās un signāla komponentes viļņa garumu starpība ir 0.5 nm ir  $10.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  un tas samazinās līdz  $9.4 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  ( $8\gamma/9$ ) pie viļņa garumu starpības  $\geq 8$  nm.

Veicot iegūto parametru  $\gamma(\Delta\lambda)$  aproksimāciju tika noskaidrots, ka arī HNLF gadījumā vienādojums (7) visprecīzāk apraksta  $\gamma_{eff}$  izmaiņas atkarībā no  $\Delta\lambda$ . Ar iterāciju metodi tika atrasts, ka vislabākā sakritība ir gadījumā, kad aproksimējošās funkcijas (7) koeficienti:  $A_0 = 2.0$  un  $T_0 = 1.56 \cdot 10^{-17}$  [41]. Salīdzinot ar nobīdītās dispersijas šķiedru (DSF), tika konstatēts, ka HNLF šķiedrai šie parametri atšķiras (skatīt tabulu 3).

3. tabula.

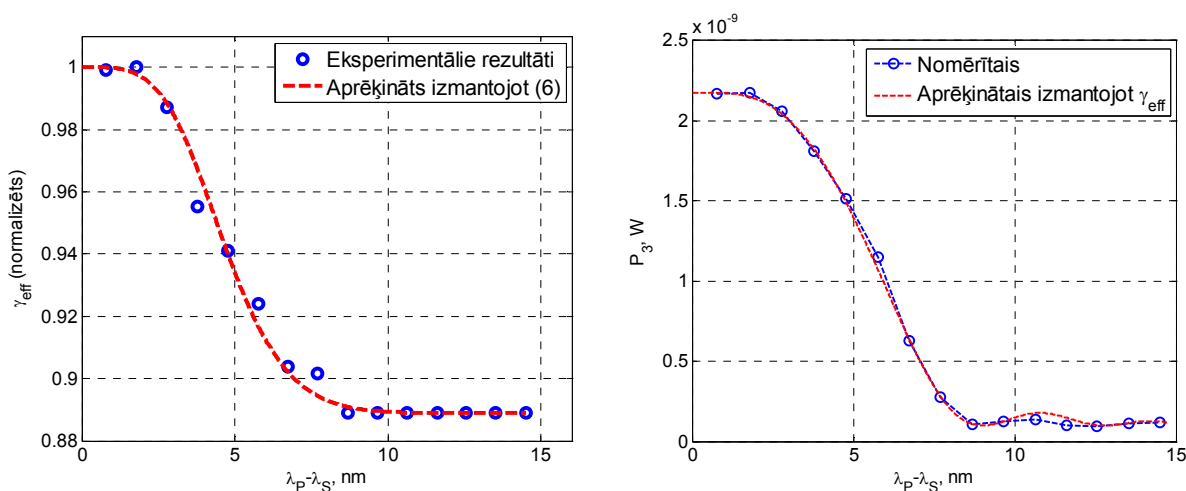
Eksperimentāli iegūtie parametri  $A_0$  un  $T_0$  DSF un HNLF šķiedrām

Šķiedra	$A_0$	$T_0$
DSF <sup>[34]</sup>	2.15	$5.48 \cdot 10^{-19}$
HNLF	2.00	$1.56 \cdot 10^{-17}$

Izmantojot vienādojumu (6) un  $\gamma$  vietā ievietojot iegūto HNLF  $\gamma_{eff}$  līkni (skat. Att. 10.a), tika aprēķināta FWM radītās harmonikas jauda atkarībā no pumpējošās un signāla komponentes viļņa garumu starpības  $\Delta\lambda$  (skat. Att. 10.b).

Kā redzams, izmantojot parametru  $\gamma_{eff}$ , tiek iegūta ļoti laba sakritība starp eksperimentālajiem datiem un aprēķinu rezultātiem. Nesakritību var novērot pie lielākām viļņa garumu starpībām starp pumpējošo un signāla viļņi. Tas varētu būt skaidrojams ar to, ka šajā apgabalā FWM komponentes jauda strauji samazinās un tuvojas OSA optiskā uztvērēja jūtības sliekšnim. Tā kā pētāmā signāla jauda ir ļoti maza (tuvojas -70 dBm), tad tas tiek

maskēts ar trokšņiem, kuru cēlonis ir gan lāzeri un optiskais pastiprinātājs, gan gaismas diodes tumsas strāva.



Att. 10. a) Normalizēts  $\gamma_{eff}$  atkarībā no  $\Delta\lambda$  starp pumpējošo un signāla komponenti.  
 Att. 10. b) Nomērītā un aprēķinātā (izmantojot  $\gamma_{eff}$ ) FWM komponentes jauda atkarībā no  $\Delta\lambda$  starp pumpējošo un signāla komponenti.

Šajā nodaļā izpētīti optisko šķiedru nelineārā koeficienta mērīšanas paņēmieni, pielietojot nelineāros efektus: SPM un FWM. Dots apraksts par izstrādāto un Latvijā patentēto P-SPM mērījumu metodi, kā arī veikts iegūto rezultātu salīdzinājums ar CW-SPM metodi divu dažādu optisko šķiedru gadījumā. Otra no pētītajām  $\gamma$  mērījumu metodēm ir balstīta uz FWM nelineāro efektu. Ar šo metodi tika novērtēts HNLF šķiedras parametrs  $\gamma$ , kā arī atrasta tā atkarība no optiskā starojuma polarizācijas, ko apraksta ar parametru  $\gamma_{eff}$ . Tāpat kā DSF šķiedrai, arī HNLF šķiedras  $\gamma_{eff}$  apraksta hiperboliskā sekansa funkcija, bet atšķiras koeficienti  $A_0$  un  $T_0$  pie funkcijas argumenta  $\Delta\lambda$ .

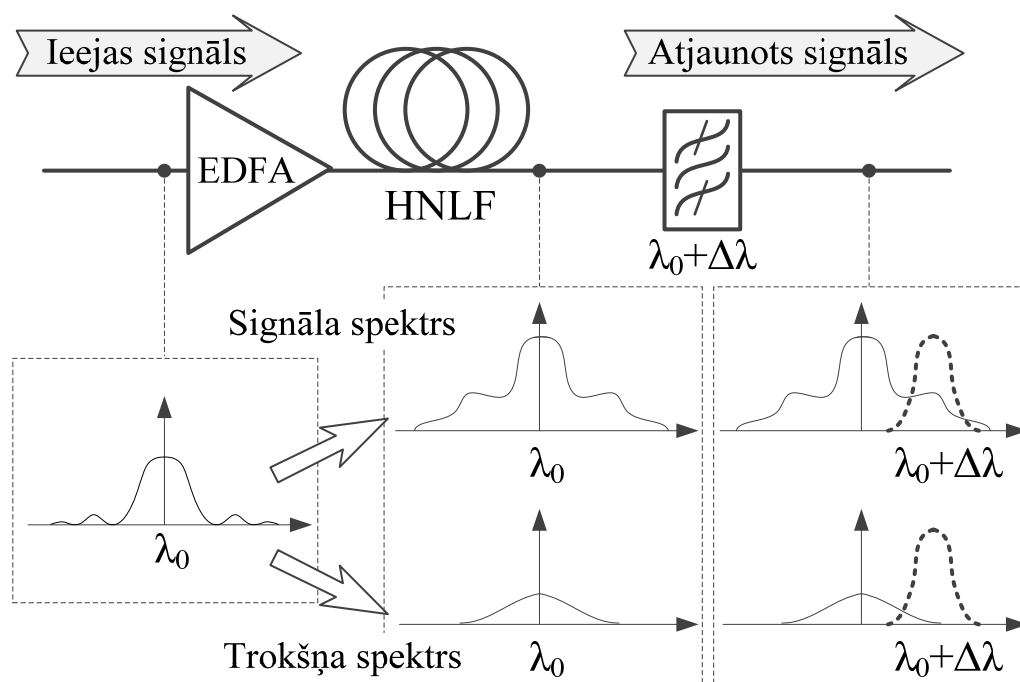
#### Ceturtnā nodaļa

Darba 4. nodaļā apskatīts viens no ļoti aktuāliem NOE pielietojumiem – optisko signālu atjaunošana. Veikta eksperimentāla 40 Gbit/s RZ-OOK optiskā signāla atjaunošana ar Mamiševa tipa reģeneratoru (MTR). Reģeneratora izveidē kā nelineārā vide tika izmantota darba 3. nodaļā pētītā HNLF šķiedra. MTR blokshēmā tika pielietoti arī divi dažādi optiskie filtri, lai novērtētu to ietekmi uz reģeneratora darbību un atrastu labāko iespējamo optiskā signāla atjaunošanu, balstoties uz reālu komponentu parametriem. Signālu kvalitātes uzlabošanās tika analizēta, salīdzinot reģeneratora ieejas un izejas signāla izdzišanas attiecību (no ang. val. extinction ratio – ER) un BER parametru. Pētījumā tika izmantotas gan simulācijas ar datorprogrammu Synopsis OptSim 5.3, gan reāli mērījumi ar izveidotu reģeneratora maketu. Pētījuma eksperimentālā daļa tika veikta sadarbībā ar Aveiro universitātes Optisko Sakaru un Fotonikas zinātnieku grupu „Optisko pārraides sistēmu komponentu” laboratorijā profesora Mario F.S. Ferreiras un asoc. prof. Armando N. Pinto vadībā.

Tradicionāli optisko signālu atjaunošana tiek veikta elektriskajā apgabalā, veicot opto/elektrisko pāreju. Tomēr šādam paņēmienam ir būtisks trūkums - elektronisko iekārtu ātrdarbība ir ierobežota. Līdz ar to, pie lieliem datu pārraides ātrumiem ( $\geq 10$  Gbit/s), tiek pētīti arī citi signālu atjaunošanas paņēmieni. Viens no tiem ir šķiedru NOE pielietošana optisko signālu atjaunošanā. Tā kā šķiedras nelinearitāte ir gandrīz momentāna, tā notiek praktiski bez aiztures, kas varētu ietekmēt īsus ( $< 0.1$  ns) optiskos impulsus [32].

MTR tipa reģeneratoru darbības pamatā ir SPM ierosinātā signāla spektrālā paplašināšanās. Reģeneratora ieejas signāla spektrs sastāv no derīgā signāla spektra un nevēlamām trokšņa spektra komponentēm. Ja atjaunojamais signāls nav pilnībā maskēts ar

troksni, tad signāla spektra komponentēm jauda ir lielāka nekā trokšņa komponentēm. Tātad SPM izraisīs izteiktāku signāla spektra paplašināšanos salīdzinot ar trokšņa spektru HNLF



Att. 11. Mamiševa tipa reģeneratora darbības princips

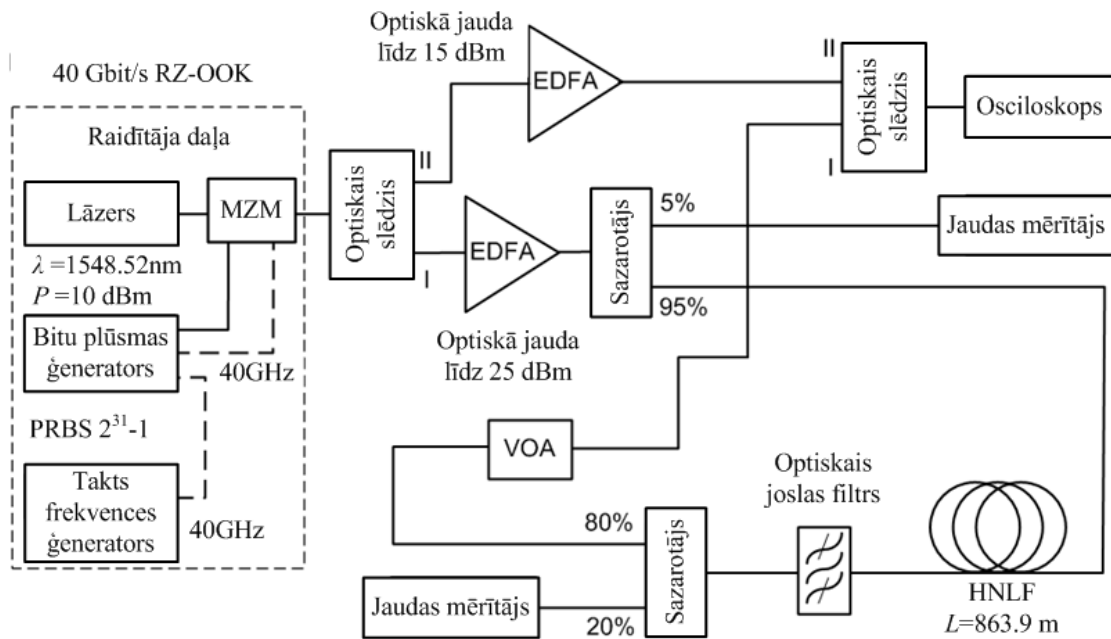
izejā. Līdz ar to, lai samazinātu trokšņu daudzumu atjaunojamajā signālā, tiek veikta filtrēšana ar šaurjoslas filtru (filtra caurlaides joslas platums ir atkarīgs no atjaunojamā signāla), kura centrālais viļņa garums nesakrīt ar sākotnējā signāla centrālo viļņa garumu, bet ir nobīdīts uz vienu pusi par noteiktu viļņa garuma joslu  $\Delta\lambda$  (skatīt Att. 11.).

Filtrēšana pie nobīdīta viļņa garuma  $\Delta\lambda$  nodrošina to, ka reģeneratora pārvades funkcija signālam un troksnim atšķiras. Ja trokšņa jauda reģeneratora ieejas signālā ir samērojama ar signāla spektrālo harmoniku jaudu, tad signāla atjaunošana nav iespējama, jo reģeneratora pārvades funkcija signālam un troksnim kļūst identiska. Tomēr maksimālais trokšņu līmenis nav strikti definēts, jo tas ir atkarīgs, gan no signāla parametriem (SPM izraisītā signāla spektrālā paplašināšanās šķiedrā ir proporcionāla impulsa formu aprakstošās funkcijas atvasinājumam pēc laika), gan reģeneratora blokshēmas un izmantoto komponentu parametriem (pastiprinātāja jauda, HNLF nelineārais koeficients un dispersija, optiskā filtra parametri).

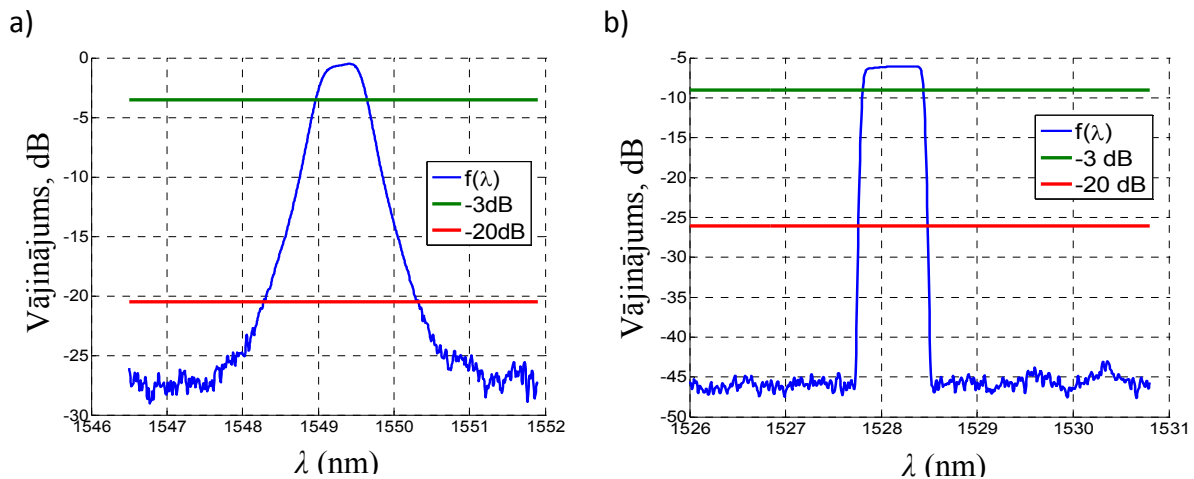
Izveidotā eksperimentālā reģeneratora shēma ir dota Att. 12. Tā sastāv no trīs pamatblokiem: raidītājs, reģenerators un uztvērējs. Raidītāja daļas izejā tiek iegūts optiskais signāls, kas tālāk tiks atjaunots. Bitu plūsmas ģenerators veido pseidogadījuma bināru pēc amplitūdas manipulētu (no ang. val. on-off keying – OOK) impulsu secību. Bitu pārraides ātrums ir 40 Gbit/s ar atgriešanos pie nulles (no ang. val. return to zero - RZ) impulsu kodu. Pseidogadījuma elektriskais signāls tiek padots uz Maha Cendera (Mach–Zehnder) modulatoru (MZM), lai veiktu nepārtraukta lāzera starojuma modulēšanu pēc amplitūdas. Eksperimentos tika izmantots ārējā rezonatora tipa lāzers (no ang. val. external cavity laser – ECL). Lai reģeneratora ieejas signāls būtu trokšņains, tika izmainīts elektriskais spriegumu, kas padots uz LiNbO<sub>3</sub> kristālu, tādējādi panākot, ka MZM darbojās neoptimālā darba režīmā. Tādā veidā tiek iegūts kropļots izejas signāls, kura spektrā ir trokšņa harmonikas [42].

Raidītāja daļas izeja tika pieslēgta pie izveidotā reģeneratora. Tas sastāv no erbija leģētās šķiedras pastiprinātāja (EDFA), kas var pastiprināt ieejas optisko signālu līdz pat 25 dBm, lai HNLF šķiedrā panāktu nepieciešamo spektrālo paplašināšanos, ko izraisa SPM. HNLF šķiedras garums ir 863.9 metri, vājinājuma koeficients ir 2.8 dB/km pie 1550 nm, nulles dispersijas viļņa garums  $\lambda_{ZD}$  ir 1525 nm un dispersija pie 1550 nm ir 0.45 ps/nm/km,

savukārt nelineārais koeficients ir  $10.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  [41]. HNLF izejā ir pieslēgts optiskais filtrs. Izstrādātajā reģeneratora maketā tiks izmantoti divi dažādi optiskie filtri: fiksēts un



Att. 12. Izveidotā eksperimentālā reģeneratora shēma.



Att. 13. Fiksētā (a) un pārskrājojama filtra (b) pārvades raksturlīkne.

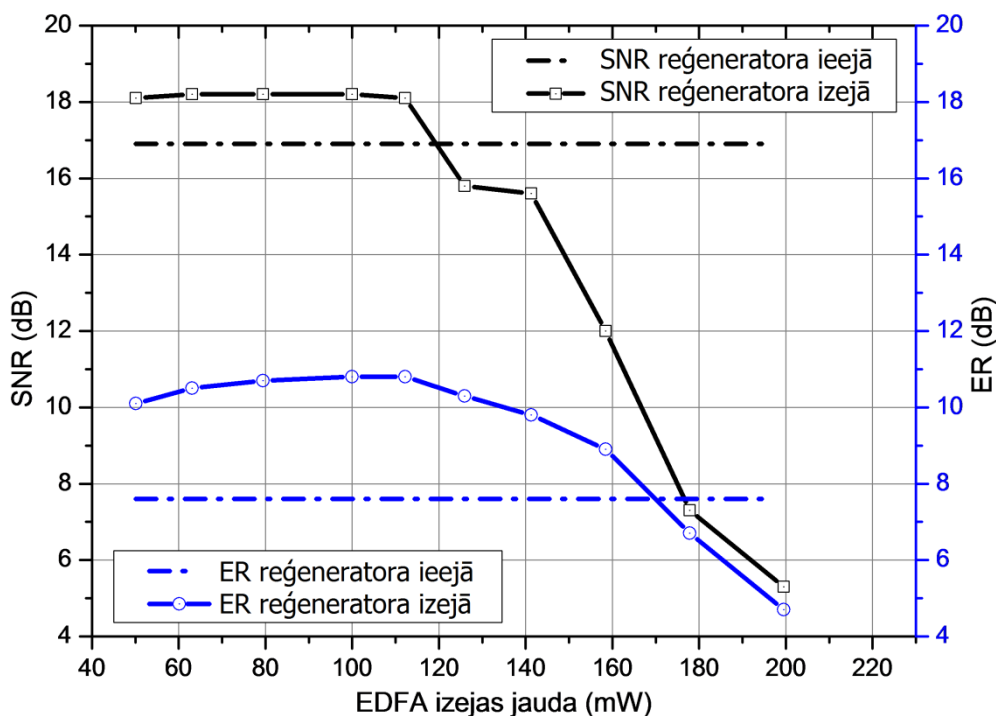
pārskrājojams filtrs (pārvades raksturlīknes skatīt Att. 13.). Pārskrājojamajam filtram ir iespējams uzstādīt caurlaides joslas centrālo viļņa garumu diapazonā no 1450 – 1650 nm un caurlaides joslas platumu -3 dB līmenī no 0.1 – 0.7 nm. Fiksētajam filtram centrālais viļņa garums ir 1549.32 nm. Lai panāktu dažādas viļņa garumu nobīdes  $\Delta\lambda$  attiecīgi raidītāja daļā tika izmantots pārskrājojams lāzers.

Pirms uztvērēja daļas ir pieslēgts nesimetrisks (20/80) optiskais sazarotājs, lai varētu kontrolēt pienākošā signāla jaudas līmeni. Ja līmenis ir pārāk augsts, ar regulējamu optisko vājinātāju (no ang. val. variable optical attenuator – VOA) tas tiek samazināts līdz pieļaujamajam optiskā osciloskopa ieejas līmenim, lai veiktu acu diagrammu mērījumus. Lai atrastu MTR filtra parametrus, pie kuriem ir iegūstama izejas signāla kvalitātes uzlabošanās, vispirms tika veiktas datormulācijas ar programmu Synopsys OptSim 5.3. Aprēķini ir balstīti uz nelineārā Šrēdingera (Schrodinger) vienādojuma atrisināšanu pielietojot sadale-solis metodi. Simulācijas tika veiktas ar modeli, kas pilnībā sakrīt ar eksperimentāli izveidoto reģeneratoru (skat. Att. 12.). Līdz ar to visu komponentu parametri tika uzstādīti tieši tādi, kā eksperimentos izmantotajām komponentēm.



Pirmkārt, tika noteikts pie kāda pārskaņojamā filtra caurlaides joslas platuma tiek iegūts viszemākais BER līmenis filtrējot 40Gbit/s RZ OOK signālu. Viszemākais filtra izejas signāla BER tika iegūts pie filtra caurlaides joslas platuma 0.625 nm -3dB līmenī. Nākošais solis bija noteikt filtra caurlaides joslas nobīdi no signāla centrālā viļņa garuma, pie kuras tiek iegūta vislabākā optiskā signāla atjaunošana. Veicot datorsimulācijas tika noteikts, ka viszemākais BER reģeneratora izejas signālam ir gadījumā, kad filtra caurlaides josla ir nobīdīta no signāla centrālā viļņa garuma par 0.7 nm.

Veicot eksperimentālu optiskā signāla atjaunošanu tika novērtēta reģeneratora izejas signāla SNR un ER parametru uzlabošanās, salīdzinot ar trokšņaina ieejas signāla parametriem. No rezultātiem tika iegūts, ka vislabākie rezultāti fiksētā filtra gadījumā ir pie filtra nobīdes  $\Delta\lambda = 0.7$  nm un EDFA izejas jaudas 100 mW, kas dod ER uzlabojumu par 3.1 dB un SNR uzlabojumu par 1.3 dB (skatīt *Att. 14.*).

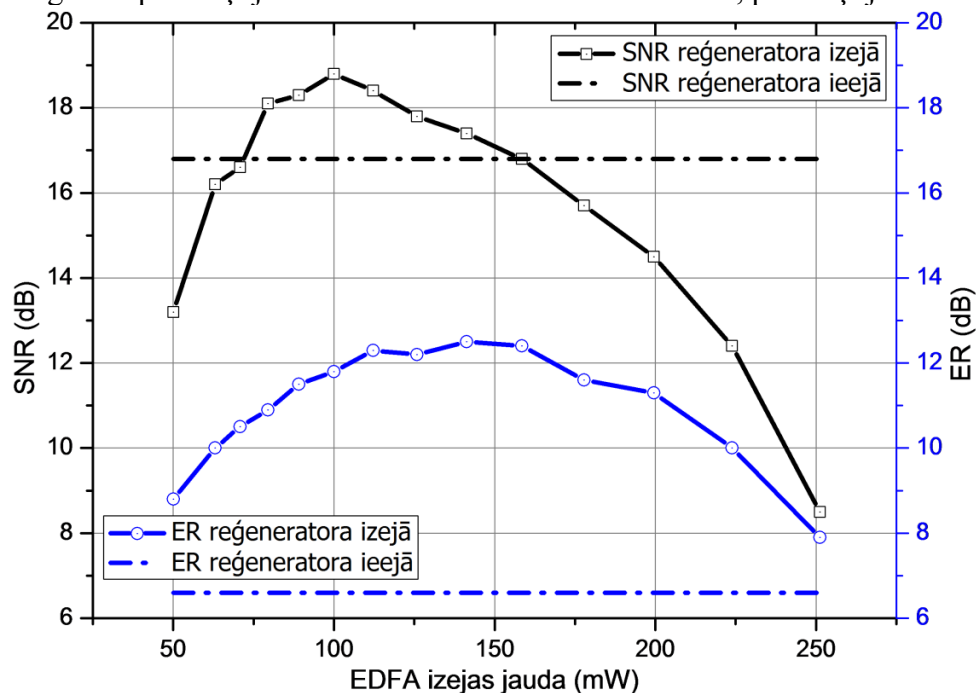


*Att. 14.* Ieejas un izejas optiskā signāla ER un SNR fiksētā filtra gadījumā pie filtra nobīdes  $\Delta\lambda=0.7$  nm.

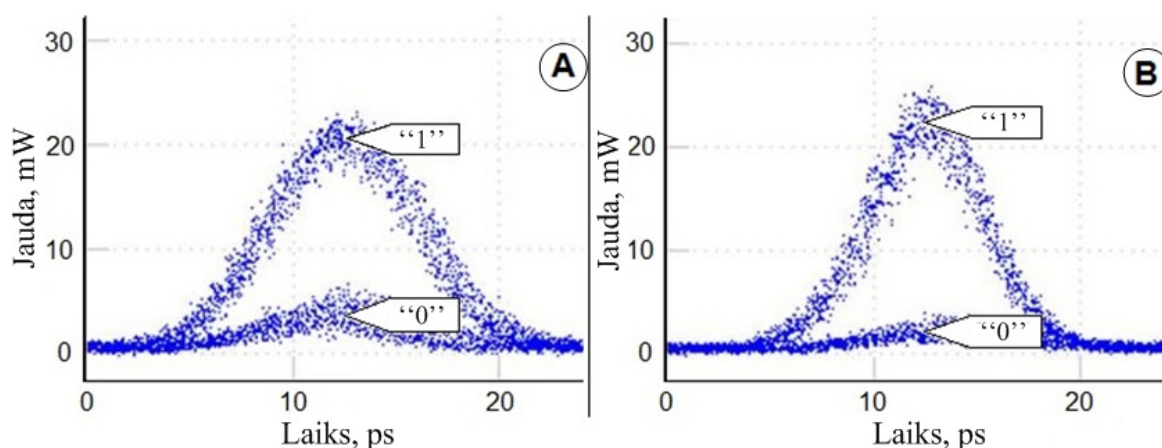
Pēc tam, kad tika atrasti labākie MTR parametri (EDFA izejas jauda un filtra nobīde  $\Delta\lambda$ ) ar fiksēto filtru, reģenerators blokshēmā tika ievietots pārskaņojamais filtrs. Arī šajā gadījumā vislabākā optiskā signāla kvalitātes uzlabošanās tika iegūta pie filtra nobīdes  $\Delta\lambda=0.7$ nm, kas sakrīt ar datorsimulācijās iegūtajiem rezultātiem. Šajā gadījumā tika iegūts ER uzlabojums par 5.2 dB un SNR uzlabojums par 2.3 dB pie EDFA pumpējošās jaudas 100 mW (skatīt *Att. 15.*).

Kropļotā ieejas signāla acu diagramma un atjaunotā izejas signāla acu diagramma pārskaņojamā filtra gadījumā ir dota *Att. 16.* Ir redzams, ka uz SPM balstīts reģenerators ļoti efektīvi samazina troksni pie “nullēm”, bet “vieninieku” līmenis tiek pacelts augstāk dēļ signāla pastiprināšanas, kas tiek veikta pirms HNLF šķiedras. Kā redzams “vieninieku” līmenis joprojām ir salīdzinoši trokšņains. Tas ir tādēļ, ka reģenerators darbojas viļņa garumu diapazonā, kur izmantotajai HNLF šķiedrai ir pozitīva dispersija ( $\lambda > \lambda_{ZD}$ ). Vēlamāks ir viļņa garumu diapazons, kur dispersija ir mazāka par nulli ( $\lambda < \lambda_{ZD}$ ), jo nerodas nevēlama modulācijas nestabilitāte vai arī nelineāra mijiedarbība starp signālu un ASE troksni, kas var ienest papildus troksni [19]. Tomēr arī apgabalā, kur dispersija ir lielāka par nulli ( $\lambda > \lambda_{ZD}$ ) signāla atjaunošana ir iespējama, jo lielāka impulsu amplitūda nodrošina lielāku ER un attiecīgi arī SNR.

Labāki reģeneratora darbības rezultāti, ņemot vērā ieejas un izejas signālu ER un SNR, tika iegūti ar pārskāņojamo filtru. Salīdzinot ar fiksēto filtru, pārskāņojamā filtra



Att. 15. Ieejas un izejas optiskā signāla ER un SNR pārskāņojamā filtra gadījumā pie filtra nobīdes  $\Delta\lambda=0.7$  nm.



Att. 16. Izkropļots optiskais signāls reģenerators ieejā (A) un atjaunotais signāls izejā (B) pielietojot pārskāņojamo filtru.

gadījumā atjaunotā signāla ER uzlabojums tika iegūts lielāks par 2.1 dB un SNR uzlabojums lielāks par 1.0 dB. To var izskaidrot ņemot vērā abu pielietoto filtra pārvades raksturlīknes (skat. Att. 13.). Pārskāņojamā filtra joslas platums -3dB līmenī ir praktiski identisks ar fiksētā filtra joslas platumu, bet lielākā atšķirība ir pie -20dB līmeņa, kur joslas platums ir par 1.325 nm šaurāks nekā fiksētajam filtram. Tas nozīmē, ka šajā līmenī pārskāņojamais filtrs ir vairāk kā divas reizes šaurāks un iegūtā reģenerators pārvades funkcija ir daudz piemērotāka optisko signālu atjaunošanai. Tas pierāda to, ka ne tikai filtra nobīdei no signāla centrālā viļņa garuma  $\Delta\lambda$ , bet arī filtra pārvades raksturlīknei ir būtiska ietekme uz reģenerators darbību [42].

Augstākas ER un SNR vērtības varētu tikt iegūtas pielietojot vairākkārtēju signālu atjaunošanu, jeb izveidojot reģenerators kaskādes slēgumu. Ar šādu slēgumu var arī panākt, ka izejas optiskā signāla viļņa garums ir tāds pats kā ieejas signālam, otrajā posmā veicot filtrāciju uz sākotnējo viļņa garumu. Tas ir iespējams, jo SPM spektrālā paplašināšanās ir simetriska.

## PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Veicot darba pirmajā nodaļā definēto uzdevumu izpildi iegūti šādi **galvenie promocijas darba rezultāti un secinājumi**:

1. Veicot iegūto  $A_{eff}$  rezultātu salīdzinājumu starp aprēķiniem ar plaknes viļņu superpozīcijas metodi, infrasarkanā CCD kameru un šķērsnobīdes metodi ITU-T rekomendācijai G.652 D atbilstošai vienmodas šķiedrai, tika atrasts, ka eksperimentālo šķērsnobīdes mērījumu rezultāti ir ticami, jo visi rezultāti ir kļūdas intervāla robežās ( $\pm 1 \mu\text{m}^2$ );
2. Ja optiskās šķiedras laušanas koeficienta profils nav dots, tad  $A_{eff}$  aprēķini ar plaknes viļņu superpozīcijas metodi nav iespējami. Šādā gadījumā  $A_{eff}$  novērtēšanai jāizmanto mērījumi;
3. Ar eksperimentālo šķērsnobīdes metodi tika iegūts, ka EDF šķiedras  $A_{eff}$  viļņa garumu diapazonā no 1470 līdz 1575 nm palielinās par  $1.1 \mu\text{m}^2$ . Savukārt vienmodas šķiedras gadījumā tika iegūts, ka  $A_{eff}$  palielinās par  $4.4 \mu\text{m}^2$  viļņa garumu diapazonā no 1520 līdz 1580 nm, kas ir skaidrojams ar laušanas koeficienta atkarību no viļņa garuma. Līdz ar to var secināt ka optiskās šķiedras nelineārais koeficients samazinās pieaugot optiskā signāla viļņa garumam, jo samazinās optiskā starojuma intensitāte;
4. Ar izstrādāto P-SPM metodi tika iegūta daudz plašāka spektrālā paplašināšanās nekā ar CW-SPM metodi gan G.652 D, gan G.655 C tipa šķiedrai. Līdz ar to aprēķinātais koeficients  $\gamma$  abām šķiedrām P-SPM gadījumā ir lielāks ( $\Delta\gamma=0.07$  vai par 8%). Tas norāda, ka impulsveida optiskais signāls labāk ierosina SPM parādīšanos šķiedrā. Turklāt CW-SPM metodes gadījumā ir jāreķinās ar stimulētās Briljuēna izkliedes ietekmi uz mērījumu gaitu;
5. Ar eksperimentālo  $\gamma$  mērījumu metodi, kas balstīta uz FWM ir iespējams noteikt gan šķiedras  $\gamma$ , gan  $\gamma_{eff}$ , kas parāda šķiedras polarizācijas modu dispersijas ietekmi uz FWM. HNLF šķiedras gadījumā, tāpat kā DSF šķiedrai,  $\gamma_{eff}$  izmaiņu, atkarībā no pumpējošā un signāla lāzera viļņa garumu starpības, vislabāk apraksta hiperboliskā sekansa funkcija. Tomēr atšķiras koeficienti  $A_0$  un  $T_0$  pie funkcijas argumenta  $\Delta\lambda$ , kas HNLF gadījumā ir:  $A_0=2.0$  un  $T_0=1.56 \cdot 10^{-17}$ ;
6. Ar datorprogrammu Synopsis RSoft OptSim 5.3 iegūtā optiskā filtra caurlaides joslas nobīde no signāla centrālā viļņa garuma ( $\Delta\lambda=0.7$  nm) pilnībā sakrīt ar eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem, gan fiksētā, gan pārskatāmā filtra gadījumā;
7. Vislabākais optiskā signāla atjaunošanas rezultāts tika iegūts ar pārskatāmo optisko filtru pie EDFA izejas jaudas 100 mW un optiskā filtra caurlaides joslas platuma 0.625 nm, kas nobīdīta no signāla centrālā viļņa garuma par 0.7 nm. Signāla ER uzlabojums par 5.2 dB un SNR uzlabojums par 2.3 dB. Salīdzinot rezultātus starp signāla atjaunošanu ar fiksēto un pārskatāmo filtru ir redzams, ka reģeneratoram ar pārskatāmo filtru atjaunotā signāla ER ir lielāks par 2.1 dB un SNR lielāks par 1.0 dB.

Nobeigumā jāuzsver, ka izpētītās efektīvā laukuma un nelineārā koeficienta mērījumu metodes var tikt pielietotas gan ekspluatācijā esošu, gan jaunu uz SiO<sub>2</sub> bāzes veidotu optisko šķiedru novērtēšanai. Sadarbības līguma ietvaros, optisko šķiedru nelineārā koeficienta mērīšanas aktualitāte ietverta VAS "Latvijas Valsts Radio un Televīzijas Centram" sagatavotajā „Maģistrālo tīklu tehnoloģiju un to projektēšanas pamattendenču novērtējumā”. Izstrādāta arī jauna funkcionalitāte: 40 Gbit/s RZ-OOK signāla formas atjaunošana pilnībā optiskajā apgabalā pielietojot uz HNLF šķiedras bāzes izveidotu Mamiševa tipa reģeneratoru. Tas ļauj uzlabot optisko sakaru sistēmu ātrdarbību un palielināt maksimālo pārraides attālumu.

Pētījumu gaitā sagatavoti arī vairāki patenti. Izstrādātajai  $\gamma$  parametra mērījumu shēmai, kur SPM tiek ierosināta ar NRZ-OOK optisko signālu ar bitu pārraides ātrumu 10 Gbit/s, kas atbilst sinhronās digitālās hierarhijas datu pārraides ātrumu hierarhijas līmenim STM-64 (9953,28 Mbit/s) ir piešķirts Latvijas patents Nr. LV-14296. Saņemti arī divu Eiropas patenta pieteikumu asptiprinājumi par jaunas konstrukcijas optisko šķiedru savienotāju un stimulētās Briljuēna izkliedes sliekšņa jaudas mērījumu shēmu.

## LITERATŪRA

1. Agrawal G.P. Fiber-optic communication systems, 4th ed., John Wiley & Sons, 2010. - 603.p.
2. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics, 4th ed., Academic Press, San Diego, CA, 2007. - 529 p.
3. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics 3rd ed. – San Diego: Academic Press, 2001. – 452 p.
4. Batagelj B. "A simple non-linear coefficient measurement scheme based on Four-Wave Mixing," in Proc. Optical Fiber Measurement Conference, pp. 73-76, September 2001.
5. Batagelj B., Ritosa P., Vidmar M. and Tomazic S. „Noninterferometric Measurement Schemes for Determination of Single Mode Optical Fiber Nonlinear Coefficient: a Comparative Study”, CAOL 2005, 12-17. September 2005, Yalta, Crimea, Ukraine.
6. Bell Labs, Metro Network Traffic Growth: An Architecture Impact Study Strategic White Paper 2013.
7. Bianco A., et. al. Optics vs. electronics in future high-capacity switches/routers, International Conference on High Performance Switching and Routing 2009., pp. 1-6.
8. Billington R. Effective Area of Optical Fibres - Definition and Measurement Techniques, National Physical Laboratory, Centre for Optical and Environmental Metrology, 1999. -19 p.
9. Bloembergen N. Nonlinear optics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1996., 172p.
10. Boyd R.W. Nonlinear Optics, 2nd ed., Academic Press, San Diego, 2003, Chap. 9.
11. Boyd R.W. Nonlinear Optics 3rd ed., Academic Press, San Diego, 2008, 613 p.
12. Desurvire E. “Classical and Quantum Information Theory,” Cambridge University Press, p. 691 (2009).
13. Drapela T.J. „Effective Area and Nonlinear Coefficient Measurements of Single-Mode Fibers: Recent Interlaboratory Comparisons”, Intl. Conf. on Applications of Photonics Tech. (ICAPT 2000), Jun 12-16, 2000, Quebec, Canada, pp. 293-297 (2000).
14. Ferreira M.F.S. Nonlinear Effects in Optical Fibers, Wiley & Sons, 2011. -240 p.
15. Hui R., O’Sullivan M. Fiber Optic Measurement Techniques, Elsevier, 2009. -636 p.
16. Ippen E.P. and Stolen R.H. “Stimulated Brillouin scattering in optical fibers,” Appl. Phys. Lett., Vol. 21, pp. 539–541 (1972).
17. ITU COM 15-273-E “Definition and Test Methods for the Relevant Parameters of Single-Mode Fibres - Appendix on Nonlinearities for G.650”, (1996).
18. Kapron F.P., Keck D.B. and Maurer R.D. “Radiation losses in glass optical waveguides,” Appl. Phys. Lett., Vol. 17, pp. 423–425 (1970).
19. Nakazawa M., Kubota H., Tamura K. "Random evolution and coherence degradation of a high-order optical soliton train in the presence of noise," Opt. Lett., Vol. 24, pp. 318-320 (1999).
20. Namihira Y., et. al. „Comparison of six techniques for nonlinear coefficient measurements of various single mode optical fibers," 12th Symposium on Optical Fiber Measurements, 15-19, Boulder, 2002.
21. Paschotta R. "Field Guide to Optical Fiber Technology", SPIE Press Book, 2010, 128p.
22. Poriņš J. Nelineārie efekti telekomunikāciju šķiedrās, Rīga, 2008., 45 lpp.
23. Poriņš J., Ivanovs Ģ., **Supe A.** ”Measurements of Nonlinear Coefficient in OS2 Optical Fiber” // Electronics and electrical engineering, -5. (2010), pp. 53.-56., ISSN 1392-1215.
24. Poriņš J., **Supe A.** “Methods for Estimation of Optical Fiber Non-linearity Using Self-phase Modulation Effect” // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Vol. 48, No. 6/2011, pp. 29.-40., ISSN 0868-8257 (Print).

25. Poriņš J., Ivanovs Ģ., **Supe A.** "Comparison of Different FWM Realization Methods in Optical Fibre" // *Electronics and electrical engineering*, -5. (2011), pp. 37.-40., ISSN 1392-1215.
26. Poriņš J., **Supe A.** "Interaction Between Electromagnetic Field and Optical Signal Transmission in Fiber Optics" // *Electronics and electrical engineering*, No. 6(122), 2012., pp. 83.-86., ISSN 1392-1215.
27. Poriņš J., Bobrovs V., **Supe A.** "Evaluation of Effective Area of Erbium Doped Fibers", *Lithuanian Journal of Physics*, Vol. 52, No.1, pp. 19.-23. (2012) ISSN 1648-8504.
28. Poriņš J., Ivanovs Ģ., Bobrovs V., **Supe A.** "Investigation of External Electromagnetic Disturbance in HDWDM System" // *Progress In Electromagnetics Research (PIERS 2012): Proceedings*, Malaizija, Kualalumpura, 27.-30. Marts, 2012. - pp. 982.-986., ISSN 1559-9450.
29. Poriņš J., **Supe A.** "Research of Optical Radiation Intensity in Erbium Doped Optical Fibers", 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP 2012): *Proceedings*, Polija, Poznan, 18.-20. Jūlijs, 2012. - pp. 1.-4., Print ISBN: 978-1-4577-1472-6.
30. Poriņš J., Ivanovs Ģ., **Supe A.**, Cauņa, G. "Investigation of Polarization Mode Dispersion Influence to Different Optical Signal Modulation Formats" // 7th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012): *Proceedings*, Kanāda, Viktorija, 12.-14. Novembris, 2012. - pp. 285.-288.
31. Prigent L. and Hamaide J.P. "Measurement of Fiber Nonlinear Kerr Coefficient by Four-Wave Mixing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, pp. 1092-1095, Sept. 1993.
32. Provost L., Finot C., Petropoulos P., Mukasa K. and Richardson D.J. "Design scaling rules for 2R-optical self-phase modulation-based regenerators," *Opt. Express* Vol. 15, No. 8, pp. 5100 – 5113 (2007).
33. Shibata N., Braun R.P. and Waarts R.G. "Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, No. 7, pp. 1205-1210, 1987.
34. Silva N.A., Muga N.J., Pinto A.N. Effective Nonlinear Parameter Measurement Using FWM in Optical Fibers in a Low Power Regime, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 46, No. 3, March 2010, pp. 285-291.
35. Stolen R.H., Ippen E.P. and Tynes A.R. "Raman oscillation in glass optical waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 20, pp. 62-64 (1972).
36. Stolen R.H. and Ashkin A. "Optical Kerr effect in glass waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 22, pp. 294-296 (1973).
37. Stolen R.H. "Phase-matched-stimulated four-photon mixing in silica-fiber waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 11, pp. 100-103 (1975).
38. Stolen R.H. and Lin C. "Self-phase-modulation in silica optical fibers," *Phys. Rev.*, A17, pp. 1448-1453 (1978).
39. **Supe A.**, Poriņš J. "Optical Fibre Effective Area Measurements", *Development in Optics and Communications 2011: Book of Abstracts*, Latvija, Rīga, 28.-30. Aprīlis, 2011., izdevējs – Cietvielu fizikas institūts, Rīga, Latvija, 38.-39. lpp.
40. **Supe A.**, Poriņš J., Ivanovs Ģ. "Optical Fiber Nonlinear Coefficient Measurements Using FWM" // *Progress In Electromagnetics Research (PIERS 2013): Proceedings*, Koreja, Taipeja, 25.-28. Marts, 2013. - pp. 339.-341.
41. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. "Experimental characterization of a highly nonlinear fiber" // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications, *Proceedings*, Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013., 87854D, doi:10.1117/12.2026182.

42. **Supe A.**, Fernandes G.M., Muga N.J., Pinto A.N., Ferreira M.F.S. “Pump and Filtering Optimization in Mamyshev Regenerator” // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications, Proceedings, Portugāle, Porto, 22.-26. Jūlijs, 2013., Proc. SPIE 8785, doi:10.1117/12.2026288.
43. S-108.199 Optical Communications and Instruments, Laboratory exercise: Nonlinearity measurement of optical fibers using continuous-wave self-phase modulation method / *Internets*.-[http://metrology.tkk.fi/courses/s108-199/Lab\\_work\\_nonlinearity\\_theory1.pdf](http://metrology.tkk.fi/courses/s108-199/Lab_work_nonlinearity_theory1.pdf)
44. TIA/EIA TSB 62-23 - Revision / Edition: 01 Chg: Date: 09/00/01 Measurement of the Nonlinear Coefficient of Single-Mode Fibers.