



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Sociālais fonds

Prioritāte: 1.1. Augstākā izglītība un zinātne

Pasākums: 2.1.1.1. Zinātnes un pētniecības potenciāla attīstība

Aktivitāte: 2.1.1.1. Cilvēkresursu piesaiste zinātnei

Projekta nosaukums: "Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai" (ViPTeh)

Līguma noslēgšanas datums: 16.09.2013.g.

Projekta sākuma datums: 01.09.2013.g.

Projekta beigu datums: 31.08.2015.g.

Vienošanās Nr.2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016

Eiropas Savienības fonda finansējuma saņēmējs: Elektronikas un datorzinātņu institūts (EDI)

### ZINĀTNISKĀ PĒTĪJUMA PROGRESU APLIECINOŠĀ DOKUMENTĀCIJA

Pārskata numurs Nr.3. par periodu no 01.03.2014.g līdz 30.06.2014.g.

*Projekta zinātniskais vadītājs:* Kaspars Sudars, Dr.sc.comp., pētnieks  
*Pētījuma projekta izpildītāju saraksts:* Jurģis Poriņš, Dr.sc.ing., pētnieks  
Ilya Lyashuk, Dr.sc.ing., pētnieks  
Sergejs Olonkins, pētnieks  
Igorš Homjakovs, Dr.sc.comp., pētnieks  
Krišjānis Nesenbergs, asistents  
Atis Hermanis, asistents  
Ričards Čacurs, programmēšanas inženieris  
Jānis Judvaitis, elektronikas inženieris

---

ELEKTRONIKAS UN DATORZINĀTŅU INSTITŪTS

Rīga, Latvija

2014.gads

# Saturs

<b>Ievads</b>	<b>2</b>
ViPTeh . . . . .	2
<b>1 Sensoru mezglu relatīvās orientācijas noteikšana</b>	<b>3</b>
1.1 Ievads . . . . .	3
1.2 TRIAD algoritms . . . . .	4
1.3 FQA algoritms ar absolūtās orientācijas kompensāciju. . . . .	5
1.4 Eksperimentālie rezultāti . . . . .	5
<b>2 Optiskās datu pārraides sistēmas</b>	<b>7</b>
2.1 Ievads . . . . .	7
2.2 Optisko pastiprinātāju raksturlielumu salīdzinājums un izpēte . . . . .	8
2.3 Optisko pastiprinātāju kombinēto risinājumu izmantošanas analīze . . . . .	9
2.4 Ramana-EDFA kombinēta risinājuma novērtējums . . . . .	12
2.5 Ramana-SOA kombinēta risinājuma apraksts . . . . .	14
2.6 Kopsavilkums un EDFA-SOA kombinēta risinājuma apraksts . . . . .	15
<b>Kopsavilkums</b>	<b>17</b>

# Ievads

## Anotācija

”Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai” (ViPTeh) ir ESF atbalstīts projekts zinātnisko grupu veidošanai. Šī projekta zinātniskais mērķis ir viedo pilsētu izpētes ietvaros veikt pētījumus par modernu datu ieguves, datu pārraides un informācijas apstrādes paņēmieniem, kas mērķēti cilvēku dzīves kvalitātes uzlabošanai, tajā skaitā, īpašu uzmanību veltot, jaunas optikas datu pārraides tehnoloģijas izstrādei.

Šajā dokumentā izklāstīts projekta aktivitātēs paveiktais darbs zinātniskajā pētniecībā un rezultāti. Pielikumā ir iekļautas šajā periodā iesniegtās un apstiprinātas zinātniskās publikācijas. Projektu atbalsta Eiropas Savienības fondi, līguma Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016.

## ViPTeh

”Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai” (ViPTeh) ir ESF atbalstīts projekts, kura zinātniskais mērķis ir viedo pilsētu izpētes ietvaros veikt pētījumus par modernu datu ieguves, datu pārraides un informācijas apstrādes paņēmieniem, kas mērķēti cilvēku dzīves kvalitātes uzlabošanai, tajā skaitā, īpašu uzmanību veltot, jaunas optisko datu pārraides tehnoloģijas izstrādei.

Par pārskata periodu ViPTeh projekta ietvaros ir veikts zinātniski pētnieciskais darbs sekojošos darbības virzienos:

- Sensoru mezglu relatīvās orientācijas noteikšana
- Datu pārraide pa optiskajām datu pārraides sistēmām

Turpmākajās nodaļās ir apkopoti galvenie sasniegumi minētajos virzienos.

# Nodaļa 1

## Sensoru mezglu relatīvās orientācijas noteikšana

### 1.1 Ievads

Objektu relatīvās orientācijas noteikšana telpā var būt ļoti lietderīga dažādos kontekstos, sākot ar pielietojumiem mobilu robotisku platformu navigēšanai un lokalizēšanai vidē, līdz pat sarežģītu mehānisku sistēmu dažādo segmentu savstarpējās pozīcijas noteikšanai, piemēram, nosakot robota manipulatora pozīciju vai viedā apģērba formu, kas var sniegt derīgu informāciju par tā valkātāju u.c. Viedo pilsētu pielietojumos bieži orientāciju nepieciešams noteikt reālā laikā, kā arī mehāniskajai sistēmai iespējams liels segmentu skaits. Līdz ar to nepieciešams atrast metodi, kas ļautu atsevišķo sistēmas segmentu orientāciju iegūt ar nelieliem, lētiem sensoriem, turklāt pēc iespējas samazinot nepieciešamo skaitļošanas jaudu datu apstrādei. Šajā apakšnodaļā pētītas datu apstrādes metodes, kas ļauj no salīdzinoši lētiem MEMS (MikroElektroMehāniskās Sistēmas) paātrinājuma un magnētiskā lauka sensoriem iegūt sensora mezgla orientāciju. Tiek vērsta uzmanība, lai metodei nepieciešamā aparatūru būtu realizējama ar neliela izmēra, ierobežotas veiktspējas un jaudas patēriņa elektroniskajām ierīcēm, tādām kā MEMS sensori, mikrokontroleri u.c., kā arī nepieciešamais datu apstrādes algoritms varētu tikt realizēts reālā laika pat izmantojot lielu skaitu sensoru mezglu.

Vispārīgi Eilera teorēma norāda, ka jebkura cieta ķermeņa orientācija var tik aprakstīta kā viena rotācija ap fiksētu asi. Līdz ar to sensora orientāciju var aprakstīt kā vienkāršu sensora atskaites sistēmas rotāciju ap kādu fiksētu asi attiecībā pret globālo atskaites sistēmu. Šādu rotāciju iespējams aprakstīt ar ortogonālu rotācijas matricu  $R$ . Eksistē vairāki veidi kā atrast šo rotācijas matricu  $R$ . Vairums šo metožu ir pētītas saistībā ar kosmosa kuģu orientācijas noteikšanu, kur  $R$ , kas apraksta kosmosa kuģa orientāciju, tiek atrasts, balstoties uz dažādu globālajā atskaites sistēmā zināmu virzienu (vektoru) novērojumiem, piemēram, saules vai zvaigžņu virzieniem. Objektu orientācijas noteikšanai līdzīgas metodes var izmantot arī uz zemes, piemēram, izmantojot zemes gravitācijas un magnētiskā lauka vektoru virzienu mērījumus.

Eksistē vairāki algoritmi, kas var noteikt orientāciju pēc zināmu vektoru virzienu novērojumiem. Vispārīgā gadījumā šo problēmu apraksta tā saucamā

*Wahbas* problēma [1], kur  $R$  tiek meklēts kā minimizācijas problēmas risinājums šādai izteiksmei [2, 3]:

$$\sum_{j=1}^n \|v_j^* - Rv_j\|^2, \quad (1.1)$$

kur  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  un  $\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$  ir kopas ar  $n$  vektoru novērojumiem objekta un globālajā atskaites sistēmā.

## 1.2 TRIAD algoritms

Viens no ātrākajiem un skaitļošanas jaudas taupīgākajiem algoritmiem ir TRIAD (Three axis attitude determination) [4]. Tās izveido kopu pāri, kur katrā kopā ir trīs savstarpēji perpendikulāri vienību gari vektori. Viena kopa tiek veidota no savstarpēji neparalēliem vektoriem globālajā atskaites sistēmā, otra kopa tiek veidota no šo pašu vektoru mērījumiem sensoru atskaites sistēmā.

Ja mēs apzīmējam zemes gravitācijas vektoru ar  $E_g$ , magnētiskā lauka vektoru ar  $E_m$ , sensora gravitācijas vektora mērījumu ar  $S_g$  un sensora magnētiskā lauka vektora mērījumu ar  $S_m$  (visi vektori normalizēti), tad globālās atskaites sistēmas trīs vektoru kopa var tikt veidota šādi:

$$e_1 = E_g \quad (1.2)$$

$$e_2 = \frac{E_g \times E_m}{|E_g \times E_m|} \quad (1.3)$$

$$e_3 = e_1 \times e_2, \quad (1.4)$$

un sensoru atskaites sistēmas trīs vektoru kopa:

$$s_1 = S_g \quad (1.5)$$

$$s_2 = \frac{S_g \times S_m}{|S_g \times S_m|} \quad (1.6)$$

$$s_3 = s_1 \times s_2. \quad (1.7)$$

Šīs kopas tiek izmantotas globālās atskaites sistēmas matricā:

$$M_e = [e_1 \quad e_2 \quad e_3], \quad (1.8)$$

un sensoru atskaites sistēmas matricā:

$$M_s = [s_1 \quad s_2 \quad s_3]. \quad (1.9)$$

Tad rotācijas matrica  $R$ , kas apskata sensora atskaites sistēmas orientāciju attiecībā pret globālo atskaites sistēmu var iegūt šādi:

$$R = M_e M_s^T. \quad (1.10)$$

Rotācijas matrica  $R$  var tikt izmantota, lai transformētu globālajā atskaites sistēmā novietotus vektorus atbilstoši sensoru orientācijai:

$$v' = Rv, \quad (1.11)$$

kur  $v$  ir vektors globālajā atskaites sistēmā  $v'$  ir šis pats vektors, kurš ir transformēts atbilstoši sensora orientācijai.

Dēļ salīdzinoši vienkāršajiem aprēķiniem TRIAD algoritms ir ar zemu skaitļošanas jaudas nepieciešamību [5], līdz ar to ir labi izmantojams ierīcēs, kurās ir ierobežota gan skaitļošanas gan elektriskā jauda. Šī algoritma trūkums ir tas, ka sensoru orientācijas parametri, piemēram, Eilera leņķi ir netieši izteikti ar rotācijas matricu  $R$ , un tos ir grūti izdalīt atsevišķi. Gadījumos, kad nepieciešams izdalīt atsevišķus rotācijas parametrus, jāizmanto sarežģītāki algoritmi, piemēram, ja nepieciešams noteikt relatīvo orientāciju pret citiem sistēmas segmentiem, atmetot absolūto orientācijas noteikšanu pret zemes magnētiskā lauka virzienu.

### 1.3 FQA algoritms ar absolūtās orientācijas kompensāciju.

Lai atņemtu absolūto orientācijas noteikšanu pret zemes magnētiskā lauka virzienu, nepieciešams atsevišķi iegūt orientācijas datus ap vertikālo asi (virzienu). Avotā [6] aprakstīts algoritms FQA (Factored Quaternion Algorithm), kurš piedāvā objekta orientāciju aprakstīt ar trīs parametriem, izmantojot kvaternionu reprezentāciju. Katrs no šiem parametriem skaitliski tiek aprakstīts ar savu kvaternionu attiecīgi: pacēlums (pitch) -  $q_p$ , sagāzums (roll) -  $q_r$  un virziens (heading) -  $q_h$ .

Detalizētu informāciju kā šos kvaternionus var iegūt no paātrinājuma un magnētiskā lauka virzienu mērījumiem var atrast avotā [6]. Kad šie parametri ir iegūti, kvaternionu, kurš apraksta pilnu orientāciju var iegūt ar kvaternionu reizināšanu:

$$q = q_h q_p q_r \quad (1.12)$$

Algoritma īpašība, kas ļauj atsevišķi atdalīt virziena informāciju, vairāku sensoru sistēmā ļauj atņemt absolūto orientāciju pret zemes magnētiskā lauka virzienu. Ja mēs apzīmējam sistēmas absolūto orientāciju pret magnētiskā lauka virzienu ar  $q_{abs}$ , tad vienādojumu (1.12) iespējams pārveidot tā, lai tas apraksta tikai relatīvo orientāciju:

$$q_{rel} = q_{abs}^{-1} q_a q_e q_r, \quad (1.13)$$

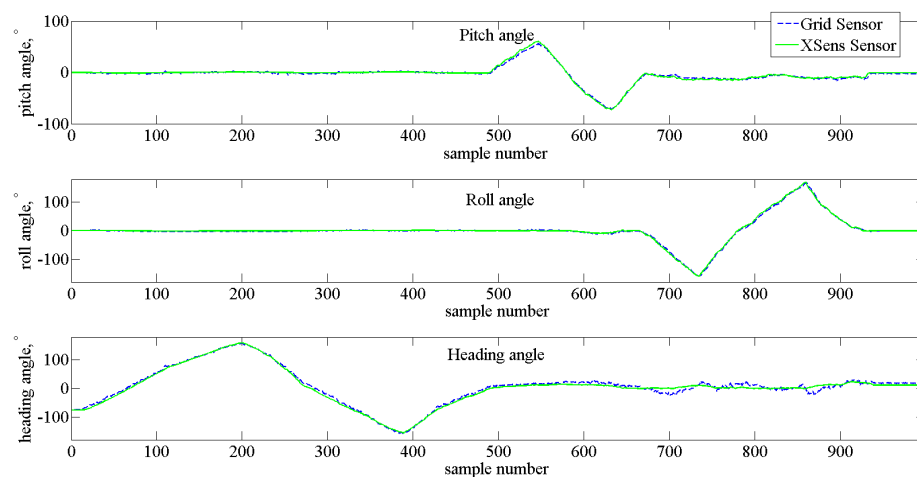
kur  $q_{rel}$  apraksta sensora orientāciju ar tikai relatīvi pret zemes magnētiskā lauka virzienu. Parametrs  $q_{abs}$  var tikt iegūts no kāda atskaites sensora sistēmā izmantojot šo pašu FQA algoritmu.

FQA algoritma rezultāts ir identisks TRIAD, tomēr tas ir lēnāks. Līdz ar to praktiski vairāku sensoru sistēmā iespējams pielietot FQA tikai izvēlētajam atskaites sensoram, lai iegūtu parametru  $q_{abs}$ . Pārējo sensoru absolūtās orientācijas iespējams aprēķināt ar TRIAD, bet lai iegūtu relatīvās orientācijas rezultātus iespējams koriģēt ar iegūto parametru  $q_{abs}$ .

### 1.4 Eksperimentālie rezultāti

Tika izveidots sensoru mezgls, kura galvenās komponentes ir sensors LSM303DLHC, kas ietver trīs asu paātrinājuma sensoru (uzstādīts  $\pm 2g$  diapazonā un ar 12 bitu izšķirtspēju), un trīs asu magnētisko sensoru (uzstādīts

$\pm 1.2$  gausu diapazonā un ar 12 bitu izšķirtspēju), un mikrokontroleris MSP430g2553. Iegūtie sensoru dati tika izmantoti par ieeju sensoru orientācijas noteikšanas algoritmā. Iegūtie orientācijas parametri tika salīdzināti ar komerciālu orientācijas sensoru X-sens MTi-G. Abi sensori tika sastiprināti kopā un veiktas dažādas rotācijas. Iegūto parametru salīdzinājums redzams attēlā 1.1. 1000 nolasījumu virknei aprēķinātās kļūdu RMS vērtības priekš pacēluma, sagāzuma un virziena leņķiem bija attiecīgi 1.7, 1.8 un 5.4 grādi.



Att. 1.1: Xsens MTi-G un izstrādātā sensoru mezgla aprēķināto orientācijas parametru salīdzinājums.

## Nodaļa 2

# Optiskās datu pārraides sistēmas

### 2.1 Ievads

Tāpat kā Ramana izkliede, Brilljuēna izkliede reprezentē fotona ar noteikto enerģijas līmeni pārveidošanu fotonā ar zemāko enerģijas līmeni, un enerģija, kas tika izkliedēta šajā procesā, rada fononu. Galvenā atšķirība starp stimulēto Ramana izkliedi (SRS) un stimulēto Brilljuēna izkliedi (SBS) ir tas, ka SBS gadījumā enerģijas pārejā tiek izmantoti akustiskie fononi, kuri reprezentē silīcija molekulu vibrācijas fāzē, un SRS gadījumā tiek izmantoti optiskie fononi, kuri reprezentē molekulu vibrācijas ar nesaskaņotām fāzēm. Tāpat kā SRS gadījumā, SBS izkliedētās gaismas intensitāte eksponenciāli palielinās pēc tam, kad krītošās gaismas intensitāte pārsniedz noteikto vērtību – Brilljuēna sliekšņa vērtību. SBS un SRS pēc savas būtības ir līdzīgi procesi, bet tiem ir sekojošas atšķirības:

- SBS parādās tikai pretējā virzienā, bet SRS var izpausties gan tiešajā, gan pretējā virzienos;
- Izkliedētai gaismai SBS gadījumā frekvenču nobīde ir tikai ap 10-11 GHz. Šī frekvenču nobīde tiek definēta kā Brilljuēna nobīde;
- Brilljuēna pastiprinājuma spektrs ir ārkārtīgi šaurs un aizņem frekvenču joslu šaurāku par 100 MHz.

Šādu atšķirību esamības galvenais cēlonis ir tas, kas akustiskie procesi optiskajās šķiedrās norit daudz lēnāk par optiskiem. Fiziskais process, kas ir atbildīgs par Brilljuēna izkliedi, ir materiālu tendence saspieties elektriska lauka esamībā – šo fenomenu mēdz saukt par elektrostrikciju. Pie elektriska lauka esamības ar frekvenci  $\Omega_p$ , šī procesa rezultātā tiek ģenerēts akustiskais vilnis ar frekvenci  $\Omega$ . Spontāna Brilljuēna izkliede var tikt aprakstīta kā pumpējoša starojuma izkliede caur šo akustisko vilni, kas rada jaunu vilni ar frekvenci  $\Omega$ . Kad izkliedētais vilnis tiek ģenerēts spontāni, tas pulsē kopā ar pumpējošo vilni un rada spektrālo komponenti ar frekvenci, kas ir vienāda ar akustiska viļņa frekvenci  $\Omega$ . Rezultātā šī pulsēšana kalpo kā avots



akustiska viļņa amplitūdas palielināšanai, kas savukārt palielina izkliedēta viļņa amplitūdu, radot savdabīgu atgriezenisko saiti. SBS izpaužas tieši šajā atgriezeniskajā saitē, kas var pārnest visu pumpējošā viļņa enerģiju uz izkliedēto vilni. SBS radītais pastiprinājums var tikt izmantots vāju optisko signālu pastiprināšanai, kuru frekvence ir nobīdīta attiecībā pret pumpējoša starojuma frekvenci uz lielumu, kas ir vienāds Briljuēna nobīdei. Pusvadītāju lāzeri var tikt izmantoti, lai pumpētu Briljuēna pastiprinātājus, jo to radīta starojuma frekvenču josla ir daudz mazāka par Briljuēna pastiprinājuma joslu. Briljuēna pastiprinātāji spēj nodrošināt 30 dB pastiprinājumu pie pumpējoša starojuma jaudas mazākas par 10 mW, kas ir milzīgs ieguvums, salīdzinot ar citiem optisko pastiprinātāju tipiem. Briljuēna pastiprinājuma spektrs ir šaurāks par 100 MHz, pie tam pumpējoša un pastiprināma starojumu frekvenču starpībai jāatbilst Briljuēna nobīdei ar precizitāti līdz 10 MHz. Šī iemesla dēļ Briljuēna optiskie pastiprinātāji netiek izmantoti šķiedru optikas pārraides sistēmās optisko signālu pastiprināšanai. Tie var tikt izmantoti citiem nolūkiem, piemēram, lai uzlabotu uztvērēja jūtību, selektīvi pastiprinot signāla nesējfrekvenci pirms detektēšanas, vai arī kā pārskaņojamais šaurjoslas optiskais filtrs kanālu izvēlei blīvai daudzkanālu sistēmai ar dažu desmitu megabitu sekundē pārraides ātrumu kanālā.

## 2.2 Optisko pastiprinātāju raksturlielumu salīdzinājums un izpēte

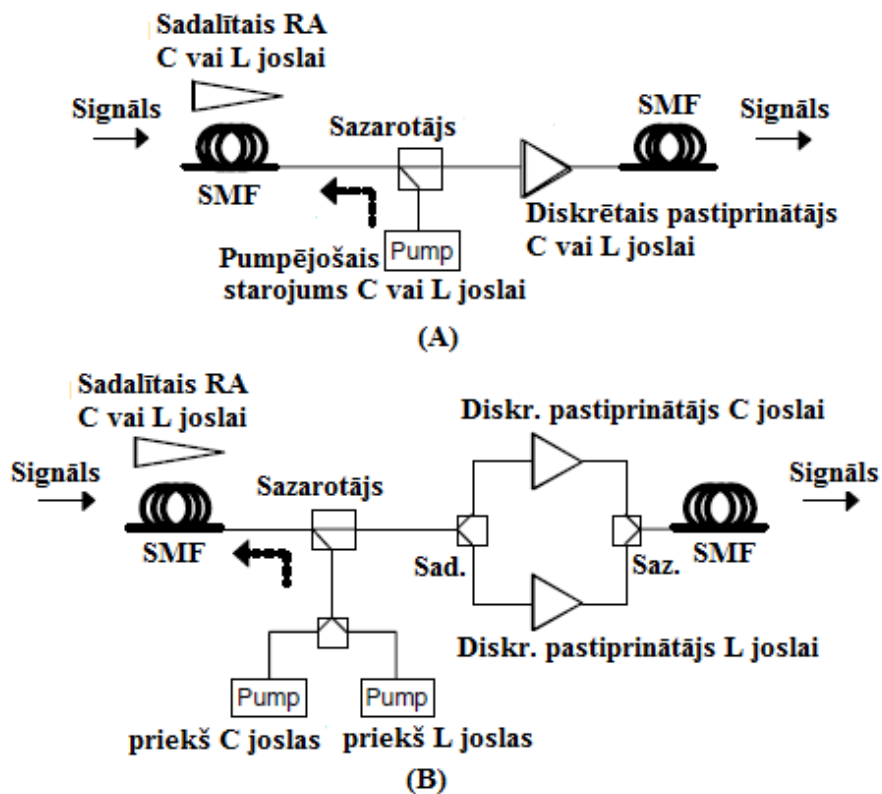
Pusvadītāju optiskie pastiprinātāji ir ekonomiski izdevīgs optisko signālu pastiprināšanas risinājums, kurš var tikt viegli ievietots jau esošā WDM sakaru sistēmā. Tas spēj nodrošināt pastiprinājumu līdz 30 dB plašā frekvenču diapazonā, un atkarībā no izmantotā pusvadītāju materiāla parametriem var tikt pielietots jebkurā no viļņu garumiem, kas mūsdienās tiek izmantoti optisko signālu pārraidē. Pusvadītāju pastiprinātājiem ir ļoti daudz būtisku trūkumu, kuri var ievērojami ietekmēt pārraides sistēmas darbību. Visbūtiskākais no tiem ir milzīgais radītais ASE trokšņu daudzums, kura galvenais cēlonis ir īss enerģētiska līmeņa spontānais dzīveslaiks pusvadītāju materiālā. Tipiska ienesto trokšņu rādītāja vērtība SOA pastiprinātājiem ir no 7 līdz 12 dB. Var samazināt ASE trokšņus strādājot tuvu pastiprinātāja piesātinājuma režīmam, tādā veidā pēc iespējas vairāk nesēji tiks izmantoti signāla pastiprināšanai, nevis spontānas emisijas radīšanai, bet tad parādās pastiprinājuma šķērsmodulācijas problēma. Papildus tam vēl rodas problēmas ar polarizācijas jūtību un nelineāro efektu ietekmi. Leģēto šķiedru optiskie pastiprinātāji mūsdienās ir vispopulārākais optisko signālu pastiprināšanas risinājums. Galvenokārt tiek izmantoti tieši EDFA optiskie pastiprinātāji, jo erbija jonu enerģētiskie līmeņi ir ideāli piemēroti optisko signālu pastiprināšanai šķiedras minimālā vājinājuma diapazonā. EDFA ļauj panākt diezgan lielu pastiprinājumu, kas noteiktos apstākļos var sasniegt pat 54 dB, bet tipisks EDFA pastiprinājums ir ap 30 dB. EDFA rada daudz mazāku ASE trokšņu daudzumu, salīdzinot ar SOA, parasti ienesto trokšņu rādītāja vērtība ir ap 5-6 dB, bet ir EDFA pastiprinātāji, kuriem šī vērtība ir ap 3 dB, kas ir milzīgs ieguvums salīdzinot ar pusvadītāju pastiprinātājiem. Par EDFA būtisko trūkumu var nosaukt stingru pastiprinājuma frekvenču atkarību un salīdzinoši šauru

pastiprinājuma spektru. Papildus tam EDFA pastiprinājuma spektrs ir samērā nelīdzens, un tā forma ir stipri atkarīga no populācijas inversijas līmeņa. Jo lielāks ir populācijas inversijas līmenis, jo mazāk ASE trokšņu radīs pastiprinātājs, bet, no citas pusēs, jo nevienmērīgāks kļūst pastiprinājuma spektrs. Ramana optiskie pastiprinātāji šobrīd ir vispopulārākais optisko signālu pastiprināšanas risinājums, būvējot jaunu maģistrālo optisko tīklu, kura garums sasniedz vairākus simtus vai pat dažus tūkstošus kilometru. Šāda tipa optiskie pastiprinātāji, pateicoties koherentam SRS procesa raksturam, rada ļoti maz trokšņu un spēj nodrošināt pastiprinājumu ļoti plašā frekvenču joslā. Vēl viena būtiska Ramana pastiprinātāju priekšrocība ir iespēja mainīt pastiprinājuma spektru, variējot pumpējošo starojumu viļņa garumus un jaudas. Ramana pastiprinātājiem ir zema pastiprināšanas efektivitāte, salīdzinot ar citiem optisko pastiprinātāju tipiem, tātad, lai iegūtu konkrēto pastiprinājuma vērtību, tiem būs nepieciešams daudz jaudīgāks pumpējoša starojuma avots nekā, teiksim, EDFA gadījumā. Citi kvalitāti degradējošie faktori, kas iespaido Ramana pastiprinātāju darbību, ir Relēja izkliedes radītie trokšņi un pastiprinājuma polarizācijas jūtība. Briljuēna optiskie pastiprinātāji spēj nodrošināt ļoti lielu pastiprinājuma efektivitāti, un ar to palīdzību var iegūt signāla pastiprinājumu līdz pat 30 dB, bet to pastiprinājuma spektrs ir pārāk šaurs, un nobīde starp pumpējoša starojuma un pastiprināma starojuma frekvencēm ir tikai ap 10-11 GHz, kas ir pārāk maz mūsdienīgām ātrdarbīgām sistēmām. Šī iemesla dēļ Briljuēna optiskie pastiprinātāji netiek plaši pielietoti optisko signālu pastiprināšanā, un tāpēc tie netiks ņemti vērā, apskatot iespējamās kombinēto optisko signālu pastiprināšanas risinājumus. Gan SOA milzīgais radītais ASE trokšņu daudzums, gan šaura un nelīdzena EDFA pastiprinājuma spektra problēmas var tikt daļēji atrisinātas, izmantojot tos kombinācijā ar Ramana pastiprinātāju. Gadījumos, kad ir nepieciešams paplašināt jau esošas sistēmas spektru, var tikt pielietoti arī SOA-EDFA kombinētie risinājumi, jo tie ir finansiāli izdevīgi.

## **2.3 Optisko pastiprinātāju kombinēto risinājumu izmantošanas analīze**

Par pastiprinātāju kombinēto risinājumu (hibrīdo pastiprinātāju) tiek uzskatīts dažādu tipu optisko pastiprinātāju kaskādes slēgums, kas tiek veidots ar mērķi paplašināt pastiprinājuma spektru vai iegūt lielāko pastiprinājumu pie mazāka ienesto trokšņu daudzuma. Šāda kombinēta risinājuma iegūtais pastiprinājums ir summa no tajā izmantoto optisko pastiprinātāju radītajiem pastiprinājumiem. Literatūrā galvenokārt kombinētie optisko signālu pastiprināšanas risinājumi tiek asociēti ar Ramana-EDFA pastiprinātāju kaskādi, tomēr dažos rakstos tiek aprakstīta arī Ramana-SOA kombinēta risinājuma darbība. Informācija par EDFA-SOA kopēju izmantošanu ir diezgan skopa. Tas arī ir loģiski, jo SOA milzīgs radītais ASE trokšņu daudzums un EDFA pastiprinājuma spektra stingra viļņa garuma atkarība padara šo kombināciju par nepievilcīgu, salīdzinot ar šo pastiprinātāju kombinācijām ar Ramana pastiprinātājiem. Tomēr šis risinājums var būt pievilcīgs sistēmā, kur jau esošo EDFA pastiprinājumu ir nepieciešams paplašināt, lai palielinātu pārraidāmo kanālu skaitu, izmantojot ekonomiski visizdevīgāko risinājumu. Tāpēc tālāk tiks aprakstīti kombinētie

risinājumi, kur SOA vai EDFA tiek izmantots kombinācijā ar Ramana pastiprinātāju, bet EDFA-SOA risinājums tiks īsi apskatīts tālāk. Optisko signālu pastiprināšanas kombinētie risinājumi tiek klasificēti divās pamatgrupās. Pirmā grupa - šaurjoslas kombinētie risinājumi (NB-HA), kur dažādi optisko pastiprinātāju tipi tiek izmantoti, lai iegūtu lielāko pastiprinājumu pie lielākas optiskas signāla-trokšņu attiecības. Un otrā grupa ir platjoslas kombinētie risinājumi (SWB-HA), kur dažādu tipu optiskie pastiprinātāji tiek izmantoti, lai iegūtu platāku pastiprinājuma spektru kombinācijā ar zemāko ienesto trokšņu daudzumu. Tipiskais pastiprinājuma spektra platums šaurjoslas kombinēto risinājumu gadījumā ir ap 30-40 nm, bet platjoslas kombinēto risinājumu gadījumos – ap 80 nm. Šaurjoslas risinājumi parasti tiek pielietoti C vai L viļņa garuma joslās, bet platjoslas risinājumu gadījumā var tikt izmantotas arī abas šīs joslas paralēli, tādējādi veidojot divjoslu pastiprinātāju. Parasta kombinēta optisko signālu pastiprināšanas risinājuma un divjoslu kombinēta pastiprināšanas risinājuma piemēri, kur diskrētais pastiprinātājs tiek izmantots kombinācijā ar sadalīto Ramana pastiprinātāju, ir parādīti 2.1 attēlā. Risinājums, kas ir parādīts 2.1(b) attēlā, spēs nodrošināt lielāko pastiprinājumu pie zemākām ienesto trokšņu rādītāja vērtībām gan C, gan L optiskajā joslā, un tas ir ļoti labs risinājums mūsdienīgām maģistrālām optiskām pārraides līnijām. Tomēr šāda risinājuma komponentu izmaksas ir divreiz lielākas nekā risinājumam, kas parādīts 2.1(a) attēlā. Šajā risinājumā Ramana un diskrētais pastiprinātājs var pastiprināt vienu un to pašu joslu, lai iegūtu lielāko pastiprinājumu un mazāko kopējo ienesto trokšņu rādītāja vērtību vai arī blakusesošās viļņa garuma joslas, lai paplašinātu diskrēta pastiprinātāja radīta pastiprinājuma spektru.



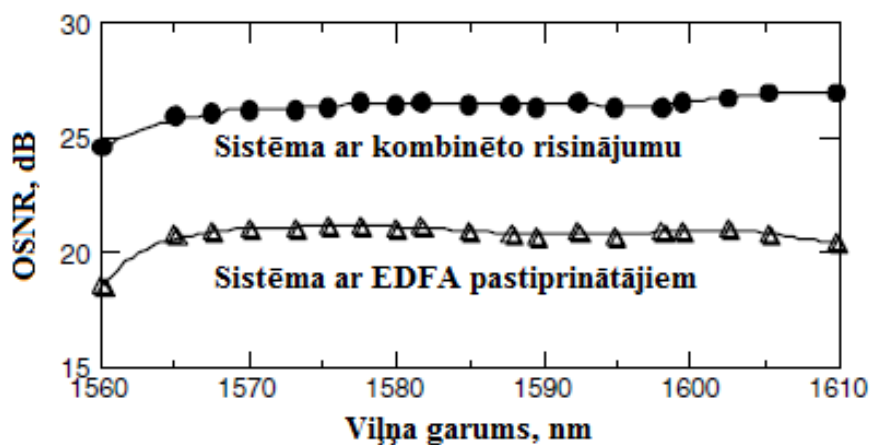
Att. 2.1: Parastais kombinētais optisko signālu pastiprināšanas risinājums (a) un divjoslu kombinētais pastiprināšanas risinājums (b), kur diskrētais pastiprinātājs tiek izmantots kombinācijā ar Ramana sadalīto pastiprinātāju ar pretēji vērsto pumpējošo starojumu.

Gadījumos, kad ir nepieciešams iegūt mazāku trokšņu daudzumu kopā ar lielāko pastiprinājumu, labāk pielietot EDFA vai SOA kombinācijā ar sadalīto Ramana pastiprinātāju, jo tieši sadalītais Ramana pastiprinātājs rada vismazāk pārraidāmā signāla kropļojumus. Šajā gadījumā nebūs nepieciešams pārāk jaudīgs pumpējoša starojuma avots, jo daļu no pastiprinājuma jau nodrošina diskrētais pastiprinātājs. Gadījumos, kad ir nepieciešams paplašināt un izlīdzināt jau esoša EDFA vai arī cita diskrēta pastiprinātāja pastiprinājuma spektru, var izmantot visdažādākās optisko pastiprinātāju kombinācijas, un šeit izvēle galvenokārt būs atkarīga tieši no prasībām pēc pastiprinātāja trokšņiem un finanšu daudzuma, kas tiek plānots patērēt šīs problēmas risināšanai. Visizdevīgākais no finansiālā viedokļa ir pusvadītāju pastiprinātāju izmantošana, bet SOA ienes ļoti ielu trokšņu daudzumu. Sadalīta Ramana pastiprinātāja izmantošana no ienesto trokšņu viedokļa ir vislabākā izvēle, bet pastiprinājuma zemā efektivitāte rada nepieciešamību pēc ļoti jaudīgiem lāzēriem, kas ievērojami palielina risinājuma izmaksas. Šajā gadījumā vispiemērotākā izvēle ir izmantot diskrēto Ramana pastiprinātāju, kas var tikt realizēts arī uz DCF šķiedras bāzes, jo tas rada samērā maz trokšņu un neprasa tik jaudīgus lāzērus, jo pastiprinājuma efektivitāte Ramana

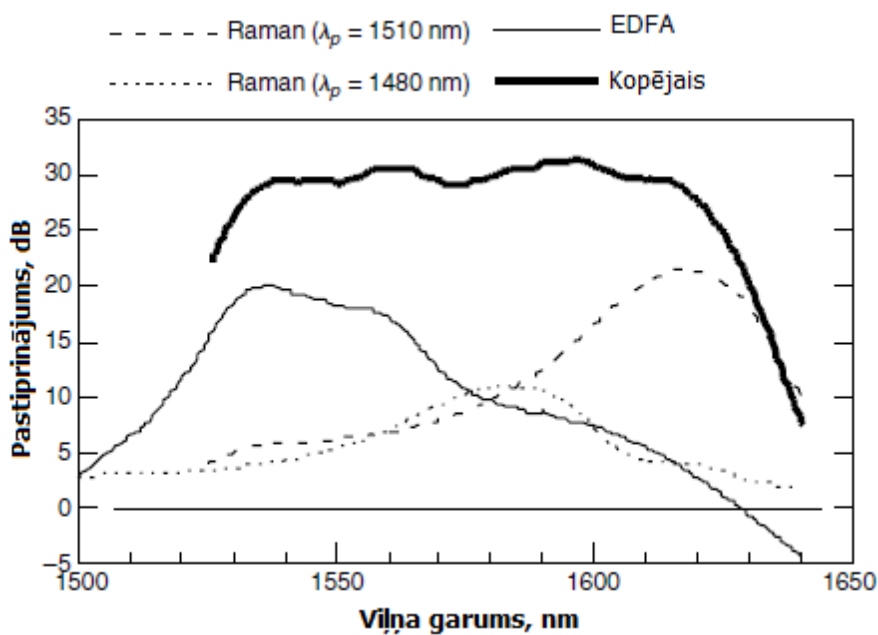
pastiprinātājiem DCF vai HNLF šķiedrās ir daudz lielāka nekā SMF šķiedrās un, piemēklējot pumpējošo starojumu parametrus, var iegūt ļoti līdzenu kopējo pastiprinājuma spektru. Secības, kurās var tikt ieslēgti optiskie pastiprinātāji, ir dažādas. Apskatīsim gadījumu, kad sadalītais Ramana pastiprinātājs ar pretēji vērsto pumpējošo starojumu tiek izmantots kā priekšpastiprinātājs diskrētam pastiprinātājam. Kombinēto risinājumu ienesto trokšņu rādītājs galvenokārt tiek noteikts ar pastiprinātāju, kas kaskadē ir ieslēgts kā pirmais. Gadījumā, kad diskrētais pastiprinātājs tiek ievietots pirms tieši vērsta sadalīta Ramana pastiprinātāja, sadalītais Ramana pastiprinātājs pastiprinās ne tikai derīgo signālu, bet arī diskrētā pastiprinātāja radītos trokšņus, kas nevar neiespaidot kopējo sistēmas darbību. Šādos gadījumos vēl ir ļoti būtiski sekot pastiprināmā signāla intensitātes līmenim, jo sadalītais Ramana pastiprinātājs pakāpeniski paaugstinās pastiprināmā signāla intensitāti, tātad augsts intensitātes līmenis tiks uzturēts garākā SMF šķiedras gabalā. Tas var izraisīt daudz lielāku nelineāro efektu ietekmi nekā gadījumos, kad diskrētais pastiprinātājs tiek ieslēgts aiz sadalīta Ramana pastiprinātāja, jo tad pastiprināmā signāla intensitāte sāk samazināties uzreiz aiz diskrēta pastiprinātāja izejas.

## 2.4 Ramana-EDFA kombinēta risinājuma novērtējums

Ramana-EDFA signālu pastiprināšanas risinājums ir visplašāk izmantotais kombinētais risinājums starp visām iespējamajām kombinācijām, un bieži kombinēto risinājumu termins tiek asociēts tieši ar šo divu pastiprinātāju kaskādes slēgumu. Ramana-EDFA optisko pastiprinātāju kombinācijā lielāko trokšņu daļu viennozīmīgi ienes EDFA pastiprinātājs, un tas ir viens no galvenajiem iemesliem, kāpēc vairumā gadījumos Ramana pastiprinātājs tiek izmantots kā priekšpastiprinātājs. EDFA spēj nodrošināt lielāko pastiprinājumu nekā Ramana pastiprinātājs un nodrošina mazākas ienesto trokšņu rādītāja vērtības pie lielāka populācijas inversijas līmeņa. Jo garāka ir leģēta šķiedra, jo vairāk tiek pastiprināti spontānas emisijas radītie fotoni. No šī viedokļa kombinētos risinājumos labāk izmantot EDFA ar salīdzinoši īsu leģētu šķiedru. Ar sadalīta Ramana pastiprinātāja izmantošanu var iegūt lielākas optiskas signāla trokšņu attiecības, un līdz ar to arī zemākas ienesto trokšņu rādītāja vērtības nekā gadījumā, kad tiek izmantots tikai EDFA pastiprinātājs. Šo faktu arī apstiprina eksperimenti, kuri ir aprakstīti. Šo eksperimentu rezultātā iegūtas OSNR vērtības sistēmām ar EDFA un Ramana-EDFA optisko signālu pastiprināšanas risinājumiem ir parādītas 2.2 attēlā. Kā ir redzams 2.2 attēlā, ar kombinēta risinājuma pielietošanu ir iespējams iegūt ap 5 dB optiskas signāla-trokšņu attiecības palielinājumu. Faktu, ka ar sadalīto Ramana pastiprinātāju var ievērojami paplašināt un izlīdzināt sistēmā jau esoša EDFA pastiprinājuma spektru, pierāda cits eksperiments, kurš tika aprakstīts. Šī eksperimenta ietvaros EDFA pastiprinātājs tika papildināts ar Ramana pastiprinātāju ar diviem pretēji vērstiem pumpējošo starojumu avotiem.



Att. 2.2: OSNR atkarības no viļņa garuma sistēmās ar paralēli saslēgtiem nobīdīta pastiprinājuma EDFA pastiprinātājiem, un ar Ramana-EDFA kombinēto risinājumu.



Att. 2.3: Kombinēta risinājuma kopēja radīta pastiprinājuma spektra piemērs ar atsevišķi parādītiem kombinēta pastiprinātāja sastāvdaļu pastiprinājuma spektriem.

2.3 attēlā ir redzams, ka šajā eksperimentā izdevās paplašināt parasta EDFA pastiprinātāja radīta -3 dB pastiprinājuma spektra platumu no 30 nm līdz pat 80 nm, izmantojot Ramana pastiprinātāju ar diviem pretēji vērsto

pumpējošo starojumu avotiem ar viļņa garumiem 1510 nm un 1480 nm. No pastiprinājuma daļu viedokļa, kurus kopējā pastiprinājumā ienes EDFA un Ramana pastiprinātāji un izmantota Ramana pastiprinātāja tipa, platjoslas EDFA-Ramana kombinētos risinājumus var sadalīt 4 pamatkategorijās:

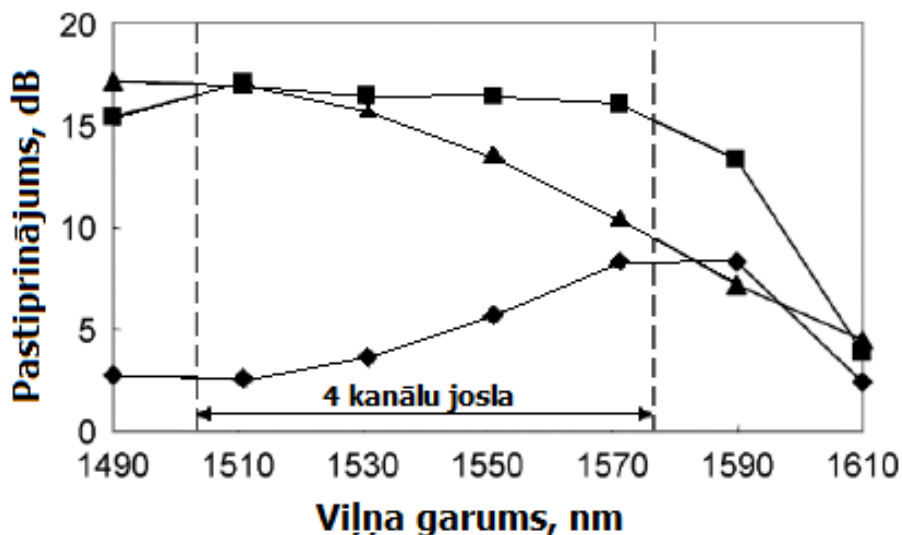
- Platjoslas kombinētais risinājums ar mazu ( $< 50\%$  no kopēja pastiprinājuma) sadalīta Ramana pastiprinātāja radīto pastiprinājumu. Šajā gadījumā gan kopējo pastiprinājumu, gan ienesto trokšņu daudzumu galvenokārt nosaka EDFA pastiprinātājs, bet Ramana pastiprinātājs tiek izmantots tikai spektra paplašināšanai un izlīdzināšanai;
- Platjoslas kombinētais risinājums ar lielu ( $\geq 50\%$  no kopēja pastiprinājuma) sadalīta Ramana pastiprinātāja radīto pastiprinājumu. Šeit Ramana pastiprinātājs var izpildīt visas četras funkcijas: nosaka sasniedzamo pastiprinājumu, var veikt OSNR uzlabošanu, paplašina un izlīdzina pastiprinājuma spektru. Dārgākais risinājums, jo prasa jaudīgus un dārgus Ramana pumpējošo starojumu avotus;
- BPlatjoslas kombinētais risinājums ar mazu diskrēta Ramana pastiprinātāja radīto pastiprinājumu. Šajā gadījumā pastiprinājumu nosaka EDFA. Diskrētais Ramana pastiprinātājs paplašina un izlīdzina pastiprinājuma spektru, bet ienesto trokšņu daudzumu nosaka abi pastiprinātāji;
- Platjoslas kombinētais risinājums ar lielu diskrēta Ramana pastiprinātāja radīto pastiprinājumu. Šeit Ramana pastiprinātājs gan nosaka sasniedzamo pastiprinājumu, gan paplašina un izlīdzina pastiprinājuma spektru, bet ienesto trokšņu daudzumu nosaka abi pastiprinātāji.

Šis pats iedalījums var tikt izmantots arī Ramana-SOA kombinēto risinājumu gadījumā, tikai vienīgā atšķirība būs tāda, ka 3. un 4. kategorijas gadījumos ienesto trokšņu daudzumu noteiks galvenokārt tieši pusvadītāju pastiprinātājs.

## 2.5 Ramana-SOA kombinēta risinājuma apraksts

EDFA pastiprinājuma spektra viļņa garuma atkarības dēļ Ramana-SOA kombinēta risinājuma potenciālais pielietojums ir CWDM sakaru sistēmas, kur starpkanālu intervāli ir ap 20 nm, tātad ir nepieciešamība pēc ļoti platas pastiprinājuma joslas. Kā jau tika pieminēts iepriekšējās nodaļās, gan pusvadītāju pastiprinātāji, gan Ramana pastiprinātāji var tikt izmantoti jebkurā viļņa garuma joslā, kas mūsdienās tiek pielietota šķiedru optikas pārraides sistēmās. Pusvadītāju pastiprinātāju gadījumā pastiprināmā josla ir atkarīga no izvēlēta pusvadītāju materiāla un tā īpašībām, bet Ramana pastiprinātāja gadījumā no pumpējošo starojumu parametriem. Tātad, ja pareizi izvēlas pastiprinātājus un to konfigurācijas, var iegūt ļoti platu un līdzenu pastiprinājuma spektru, kas arī ir nepieciešams CWDM sakaru sistēmās. Pusvadītāju pastiprinātāju tipiska pastiprinājuma atšķirība 70 nm joslā (kas ir nepieciešama četru CWDM sakaru sistēmas kanālu pastiprināšanai) parasti

ir lielāka par 3 dB. Šādu pastiprinājuma atšķirību var viegli kompensēt ar mazas jaudas Ramana pastiprinātāju. Šāds eksperiments tika veikts, kur 6,6 dB pusvadītāju pastiprinātāja pastiprinājuma atšķirība tika likvidēta, izmantojot sadalīto Ramana pastiprinātāju ar 300 mW 1475 nm pretēji vērsto pumpējošo starojumu. Konstruēta kombinēta risinājuma radītais pastiprinājums, kas tika iegūts šī eksperimenta ietvaros, ir parādīts 2.4 attēlā.



Att. 2.4: Pastiprinājuma spektrs SOA ( $\Delta$ ), sadalīta Ramana pastiprinātājam ( $\diamond$ ) un šo divu pastiprinātāju Ramana-SOA kombinēta risinājumam.

Tas var tikt panākts arī, izmantojot pusvadītāju pastiprinātāju paralēlo slēgumu, bet šis risinājums nav piemērots, kad līnijā ir nepieciešami vairāki līnijas pastiprinātāji. Šajā gadījumā katrs nākamais pastiprinātājs ne tikai ienesīs savu daļu no kopēja trokšņu daudzuma, bet arī pastiprinās iepriekšēja pastiprinātāja radītos trokšņus, tātad rezultātā pastiprinātāju kopējais radīto trokšņu daudzums būs ievērojami lielāks nekā Ramana-SOA kombinētā risinājuma gadījumā. Pusvadītāju pastiprinātāju konfigurācija var tikt izvēlēta ar mērķi iegūt vismazāko ienesto trokšņu daudzumu, bet Ramana pastiprinātājs paaugstinās sasniedzamā pastiprinājuma līmeni, paplašinās un izlīdzinās pastiprinājuma spektru un samazinās kopējo ienesto trokšņu radītāja vērtību.

## 2.6 Kopsavilkums un EDFA-SOA kombinēta risinājuma apraksts

Kā jau tika pieminēts iepriekš, EDFA - SOA kombinētais risinājums netiek plaši pielietots. Galvenais iemesls tam ir pusvadītāju un EDFA pastiprinātāju lielais radīto trokšņu daudzums, salīdzinot ar Ramana pastiprinātājiem. Vēl viens faktors, kas dod priekšroku kombinētiem risinājumiem ar Ramana



pastiprinātāju izmantošanu, ir fakts, ka SOA pastiprinājuma spektra formu nevar izmainīt, mainot pastiprinātāja parametrus. EDFA gadījumā tas zināmās robežās var tikt panākts, mainot pumpējošo starojumu jaudas, tādā veidā mainot augstāka enerģētiska līmeņa populācijas inversijas līmeni, bet tas negatīvi iespaidos pastiprinātāja darbību. Tātad, izmantojot EDFA-SOA kombinēto risinājumu, iegūt līdzenu kopējo pastiprinājuma spektru ir sarežģīts uzdevums. Tātad kombinētie risinājumi ar Ramana pastiprinātājiem mazāk trokšņo un spēj nodrošināt līdzenu pastiprinājuma spektru. Tomēr EDFA-SOA kombinētais risinājums varētu būt prioritārs gadījumos, kad ir nepieciešams paplašināt jau eksistējoša EDFA pastiprinājuma spektru vai arī iegūt lielāko pastiprinājumu, izmantojot ekonomiski visizdevīgāko risinājumu ar nosacījumu, ka sistēmā tādu pastiprinātāju daudzums nav liels. Ja šādā sistēmā tiks izmantoti vairāki EDFA-SOA kombinētie līnijas pastiprinātāji, tad katrs nākamais pastiprinātājs ne tikai pievienos signālam paša radītos trokšņus, bet arī pastiprinās visu iepriekšējo pastiprinātāju radītos trokšņus, kas rezultātā būtiski samazinās kopējo sistēmas veiktspēju. EDFA-SOA kombinētais risinājums ir realizēts eksperimentā, kas ir aprakstīts. Autori izmantoja C un L joslu EDFA pastiprinātāju paralēlo slēgumu un papildināja to ar pusvadītāju pastiprinātāju, kas tika ieslēgts kaskādē uzreiz aiz abiem EDFA. Rezultātā šis kombinētais risinājums radīja kopējo pastiprinājumu, kas sasniedz 36 dB, un nodrošināja pastiprinājumu virs 11,5 dB 110 nm platā viļņa garuma joslā no 1500 līdz 1610 nm. No citas puses apskatīta kombinēta risinājuma ienesto trokšņu rādītājs šajā viļņa garuma joslā bija robežās no 5 līdz 7.6 dB. Tātad EDFA-SOA kombinētie risinājumi varētu tikt izmantoti šķiedru optikas pārraides sistēmās, bet tad ir jāreķinās ar nelīdzenu pastiprinājuma spektru un lielu ienesto trokšņu daudzumu.

# Kopsavilkums

Galvenās zinātniskās darbības, kas paveiktas projekta "Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai" (ViPTeh) aktivitāšu 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 un šī pārskata perioda ietvaros:

- Pētīta un analizēta sensoru mezglu relatīvās orientācijas noteikšana;
- Pētīta un analizēta datu pārraide pa optiskajām datu pārraides sistēmām;
- Veikts darbs pie zinātnisko pētījumu rezultātu apkopošanas projekta publikācijās.

Tālāk paredzēts turpināt darbu pie zinātniskās pētniecības viedo pilsētu tehnoloģiju jomā.

# Literatūra

- [1] G. Wahba, A least squares estimate of satellite attitude, *SIAM Review* 7 (3) (1965) 409–409.
- [2] M. D. SHUSTER, S. D. OH, Three-axis attitude determination from vector observations, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 4 (1) (1981) 70–77. doi:10.2514/3.19717.
- [3] F. Markley, D. Mortari, Quaternion attitude estimation using vector observations, *Journal of the Astronautical Sciences* 48 (2-3) (2000) 359–380.
- [4] M. D. Shuster, S. D. Oh, Three-axis attitude determination from vector observations, *J Guid Control* 4 (1) (1981) 70–77.
- [5] F. L. Markley, Attitude determination using two vector measurements, in: *Proceedings Flight Mechanics Symposium, NASA Conference Publication NASA/CP-1999-209235*, 1999, pp. 39–52.
- [6] Y. X. Y. Xiaoping, E. Bachmann, R. McGhee, A Simplified Quaternion-Based Algorithm for Orientation Estimation From Earth Gravity and Magnetic Field Measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57.