

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Ilja Ļašuks

**VIĻNGARUMDALES BLĪVĒŠANAS TEHNOLOĢIJAS
IZMANTOŠANA PASĪVAJOS PIEKĻUVES INFRASTRUKTŪRAS
RISINĀJUMOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Ilja Ļašuks

Doktora studiju programmas „Telekomunikāciju un datoru tīkli” doktorants

**VIĻŅGARUMDALES BLĪVĒŠANAS TEHNOLOĢIJAS
IZMANTOŠANA PASĪVAJOS PIEKĻUVES INFRASTRUKTŪRAS
RISINĀJUMOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., profesors

Ģ.Ivanovs

RTU Izdevniecība

Rīga 2012

UDK 621.391.6+681.7.068](043.2)

La 756 v

Lašuks I. Viļņgarumdales blīvēšanas tehnoloģijas izmantošana pasīvajos piekļuves infrastruktūras risinājumos. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-xx lpp.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2011.gada 29.septembra lēmumu, protokols Nr.6

ISBN 978-9934-10-268-4

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. 12.janvārī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un Telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.comp. Valērijs Zagurskis
Rīgas Tehniskā universitāte, Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte

Profesors, Dr.phys. Antonijs Salītis
Daugavpils Universitāte, Dabaszinātņu un matemātikas fakultāte

Vadošais pētnieks, Dr.phys. Juris Zvirgzds
Latvijas Universitāte, Cietvielu Fizikas Institūts

APSTIPRINĀJUMS

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

Iļja Ļašuks(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 1 pielikumu, 108 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 144 lappuses. Literatūras sarakstā ir 139 nosaukumi.

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Sakaru pakalpojumu nodrošināšana posmā starp sakaru pakalpojumu lietotāju un pakalpojuma sniedzēja piekļuves punktu – t.s. „pēdējā jūdze” – ir vienmēr bijis savā veidā ierobežojošais faktors platjoslas telekomunikāciju attīstībā [58-59, 68,70]. Šī problēma bija veiksmīgi risināta, pielietojot FTTx (*Fiber to the x* – Šķiedra līdz x) tehnoloģijas [14-17]. FTTx ir risinājumu veids, kas paredz optisko šķiedru līnijas pievadi līdz lietotāja mājai, dzīvoklim, vai arī līdz sadales kastei mājas vai dzīvokļa tuvumā [20,21,23-25]. Šie risinājumi ļauj nodrošināt pieeju platjoslas pakalpojumiem, kas ir svarīgi, ievērojot t.s. „triple-play” pakalpojumu komplektu – datu pārraides, telefonijas un televīzijas – izplatīšanos pēdējos gados [28, 45-46,50-51].

Zinātniskajos pētījumos uzmanība tiek pievērsta galvenokārt EPON (*Ethernet Passive Optical Network* – Ethernet Pasīvais Optiskais Tīkls) un GPON (*Gigabit Passive Optical Network* – Gigabitu Pasīvais Optiskais Tīkls) tehnoloģiju iespējamām uzlabojumiem, saglabājot instalēto šķiedru, krosēšanas kabeļus, sazarotājus atbilstībā pret standartiem, kā arī jauno attīstības virzienu izpēti [29,30,35-38]. EPON un GPON tehnoloģijām (kā arī jaunai 10G EPON un 10G GPON) ir ierobežojumi ātrumam un paplašināšanās iespējām (dispersijas iedarbība, sazarotāja vājinājums, abonentu komplekta iespējama sarežģītība, ultraātro uzliesmojoša režīma uztvērēju sarežģītība) [12,44,47-48]. Viens no risinājumiem PON tehnoloģiju attīstībā augošā joslas pieprasījuma nodrošināšanai ir WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing PON* – Viļņa Garuma Multipleksēšana PON) tehnoloģiju kopne [7, 9-11,13,69].

Šobrīd pastāv divi varianti WDM-PON tehnoloģiju attīstīšanai: savietojamība ar pirmās paaudzes PON risinājumiem (EPON, GPON) un pilnīgi jauno risinājumu izveidošana (bez savietojamības) [18-19,22,26,41-42].

Šis darbs ir veltīts viļņgarumdales pielietošanas iespēju novērtējumam piekļuves tīklu fiziskajā slānā perspektīvajām realizācijām, kā arī maksimālā abonentu skaita noteikšanai. Pētījumam tiek paņemti standarta ātrumi (1.25, 2.4, 10 Gbit/s), lai varētu pielietot standartizētus augstākā slāņa protokolus (Ethernet, SDH un GPON) [34], GPON un EPON iespējamās sadalīšanas pakāpes (1×8, 16, 32, 64, 128) [35-38], kā arī standartizētie attālumi (10 un 20 km) [35-38].

Pētījumu galvenie virzieni:

1. Minimālās iespējamās izstarotāja jaudas noteikšana katrai WDM-PON realizācijai pie $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ (ātrums 10 Gbit/s) un $BER < 1 \cdot 10^{-10}$ (ātrums līdz 2.5 Gbit/s) [35-38]

2. WDM-PON realizāciju maksimālā abonentu skaita novērtēšana

Visiem WDM-PON risinājumiem standartu savietojamībai un infrastruktūras saglabāšanai pamatā pieņemti šādi nosacījumi:

1. Ir pielietota visplašāk izplatītā G.652 standarta vienmodu šķiedra [32]
2. Šķiedras garums visiem risinājumiem ir 20 km
3. Frekvences čirpa efekta ietekme un SBS sliekšnis ir jāērķina 20 km garai līnijai
4. Visu WDM-PON risinājumu izveidošanai ir paņemti visplašāk tirgū izplatītie elementi, no šiem elementiem ir izvēlēti tie, kuriem ir vidējie parametri (lāzeru avoti, AWG multiplexori, APD uztvērēji, modulatori, ASE-avoti, LED, konektori, sazarotāji, filtri, cirkulātori utt.)

Darba mērķis un uzdevumi

Balstoties uz prognozēm par piekļuves tīklu straujo attīstību un pārraides ātruma palielināšanu, jāizveido jaunus risinājumus WDM-PON tehnoloģiju ieviešanai.

Minēto iemeslu dēļ **darba mērķis ir novērtēt maksimālā abonentu skaita ierobežojumus WDM izmantošanai pasīvajos piekļuves risinājumos, gan daļēji saglabājot, gan izveidojot pilnīgi jaunu infrastruktūru. Atrast izstarotāju minimālo izejas jaudas līmeni dažādu WDM risinājumu drošai darbībai.**

Lai sasniegtu minēto mērķi bija nepieciešams atrisināt sekojošus uzdevumus:

1. Novērtēt eksistējošo un perspektīvo PON sistēmu attīstības tendences un izvēlēties nepieciešamus WDM konceptus pielietošanai pasīvajos piekļuves tīklos;
2. Izpētīt četrvīļņu mijiedarbes efekta izmantošanas iespēju PON sistēmu realizācijai un novērtēt iespējamo abonentu skaitu;
3. Noteikt WDM/TDM-PON risinājuma izstarotāju minimālo izejas jaudu $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ nodrošināšanai;
4. Noteikt Briljuēna sliekšņa vērtību modulētajam signālam optiski blīvētai PON sistēmai, lai noskaidrotu maksimālā abonentu skaita ierobežojumus;
5. Aprēķināt frekvences čirpa ietekmi uz jaudas zudumu palielināšanu WDM/TDM-PON sistēmai;
6. Aprēķināt minimālo starpkanālu intervālu un joslas platumu SS-WDM sistēmai (LED un ASE-avots ar spektra sagriešanu), noteikt minimālo izejas jaudu ar $BER < 1 \cdot 10^{-10}$ un maksimālo abonentu skaitu:

Pētījumu metodika

Izvirzīto uzdevumu risināšanai un analīzei ir izmantoti gan teorētiskie aprēķini, gan eksperimentālie mērījumi. Eksperimentālo mērījumu daļā WDM/TDM-PON un SS-WDM sistēmām ir izveidotas un pārbaudītas vissvarīgākās komponentes. Iegūtie rezultāti maketā ir izmantoti komponentu izveidošanai ar OptSim modelēšanas programmatūru, kura ļauj izveidot WDM-PON konceptus un modelēt visas komponentes, vajadzīgas WDM/TDM-PON, SS-WDM un FWM WDM-PON realizēšanai. Matemātiskās modelēšanas rezultātā ir iegūta minimālā izstarotāja (lāzers, ASE un LED) jauda nepieciešamā BER līmeņa nodrošināšanai ($<1 \cdot 10^{-12}$ ja ātrums pārsniedz 10 Gbit/s un $<1 \cdot 10^{-10}$ – ātrums līdz 2.5 Gbit/s).

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

Darba zinātniskais jauninājums ir tā gaitā izstrādātas rekomendācijas eksistējošo GPON un 10GPON modernizēšanai kā arī jauno WDM-PON konceptu izveidei. Pirmo reizi ir izpētīta četrvīļņu mijiedarbes izmantošana PON risinājumiem. Promocijas darba **galvenie rezultāti**:

1. Četrvīļņu mijiedarbes efekta izmantošana pasīvajos piekļuves tīklos ar vīļņgarumdales blīvēšanu ļauj izveidot 16 abonentu sistēmu ar 10 Gbit/s ātrumu katram un iespēju to palielināt, pielietojot tikai 2 pumpējošus lāzerus. Pumpējošo lāzeru izejas jauda rūpīgi jākontrolē 0.5 dB robežās, lai iegūto četrvīļņu mijiedarbes harmoniku izejas jaudas nevienādība būtu minimālā;
2. Modernizējot eksistējošo GPON infrastruktūru, var nodrošināt ātrumu līdz 10 Gbit/s katram abonentam ar $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ un attālumu līdz 20 km. Maksimālais abonentu skaits ir ierobežots ar SBS nelineāro efektu līdz 32.
3. Frekvences čirpa ietekmi noteikti jāievēro sistēmas izveidošanā, jo jaudas zudumu palielināšana WDM/TDM-PON gadījumā sasniedza 5 dB ar čirpa parametra < 10 un joslas platuma $\Delta\lambda = 35$ nm optiski blīvētai līnijai;
4. Izmantojot spektrālo sagriešanu ar vienu platjoslas avotu un 16 gaismas diodēm, ir iespējams nodrošināt lejupielādes ātrumu līdz 1.25 Gbit/s un augšupielādes – līdz 622 Mbit/s ar $BER < 1 \cdot 10^{-10}$ LED un abonentu skaitu līdz 16. Optimālais starpkanālu intervāls 1.6 nm un joslas platums - 0.9 nm, nepieciešamā minimālā jauda ASE-avotam ar izlīdzināšanas filtru ir 11 dBm un LED jauda ir -5.8 dBm;

Darba praktiskā vērtība

- Promocijas darbā ir dotas nepieciešamās rekomendācijas WDM-PON sistēmu ieviešanai, papildinot eksistējošo infrastruktūru un būvējot tīklu no jauna
- Promocijas darba izstrādātus WDM-PON konceptus (WDM/TDM-PON, ASE/LED un FWM WDM-PON) var izmantot nākamās paaudzes sistēmu ražošanā
- Uz iegūto rezultātu bāzes ir izstrādāts WDM-PON makets nākamo promocijas darbu sagatavošanai, rezultātu patentēšanai un sadarbībai ar ražotājiem
- Ir sagatavots patenta pieteikums spektra sagriešanas avotam „**Spektrāli sagriežts platjoslas gaismas avots viļņgarumdales blīvēšanas pasīvajā optiskajā tīklā**” Int. Cl. H04B10/17
- Promocijas darba rezultāti prezentēti VAS „LDz” tehniskajam centram, kā arī iegūtie dati ir izmantoti PON un DWDM tīklu modernizēšanai un attīstībai.

Aizstāvamās tēzes

1. Ar eksistējošiem lāzeriem var realizēt 8 un 16-kanālu piekļuves sistēmas, izmantojot četrviļņu mijiedarbes efektu, un nodrošināt lejupielādes pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s vienam abonentam, pielietojot tikai 2 lāzerus.
2. Modernizējot GPON un 10GPON sistēmas ar eksistējošās infrastruktūras daļējo saglabāšanu un 10 Gbit/s pārraides ātrumu vienam abonentam, var realizēt abonentu skaitu līdz 32, bet ir vajadzīgs maksimālais lāzeru skaits.
3. Jaunizveidotiem WDM-PON ar abonentu skaitu līdz 16, pārraides ātrumu lejupielādē līdz 1.25 Gbit/s, augšupielādē – 622 Mbit/s, jāpielieto lēto spektra sagriešanas SS-WDM tehnoloģiju ar vienu platjoslas ASE-avotu lejupielādē un 16 LED augšupielādē;

Zinātniskais jauninājums

- Ir izstrādātas rekomendācijas eksistējošo GPON un 10GPON modernizēšanai, papildinot eksistējošo infrastruktūru, kā arī jaunizveidoto WDM-PON risinājumu izveidei
- Ir izpētīts kombinēts ASE un LED koncepts ar starpkanālu intervālu 200 GHz un joslas platumu 0.9 nm ar un bez izlīdzinošā filtra

- Pirmo reizi ir izpētīta četrvīļņu mijiedarbes efekta izmantošana PON attīstībai

Darba rezultātu aprobācija:

Promocijas darba galvenie rezultāti bija prezentēti 5 starptautiskajās konferencēs, ka arī ir atspoguļotās 5 zinātniskajos rakstos.

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti sekojošās konferencēs:

1. The 12th International Conference „ELECTRONICS 2008”, KTU, Kaunas, Lithuania, 20.-22.05.2008
2. The 13th International Conference “ELECTRONICS 2009”, KTU, Kaunas, Lithuania, 12.-14.05.2009
3. The 14th International Conference “ELECTRONICS 2010”, KTU, Kaunas, Lithuania, 18.-20.05.2010
4. The 15th International Conference “ELECTRONICS 2011”, KTU, Kaunas, Lithuania, 17.-19.05.2011
5. RTU 50th Scientific Conference, Section Telecommunications, LATVIJA, Rīga
6. IEEE Swedish Communication Technologies Workshop, "Investigation of DWDM System Based on Cascaded Four-Wave Mixing"

Kopumā ir publicēti 6 zinātniski raksti dažādos zinātniskos izdevumos:

1. Ļašuks I., Ozoliņš O., Ščemeļevs A. Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // Electronics and Electrical Engineering, 2008. No. 5(85). pp. - 45-48.
2. Ļašuks I. Investigation of Colorless WDM-PON Using a Broadband ASE-Source // Electronics and Electrical Engineering , 2009. - No.6(94). - pp.- 43-46.
3. Ļašuks I. The Effect of Stimulated Brillouin Scattering on WDM-PON // Electronics and Electrical Engineering, 2010. - No. 7(103). – pp. 105-108
4. Ivanovs Ģ. , Ļašuks I., Ščemeļevs A. A Hybrid TDM/WDM PON System with FWM-Generated Source of Multiwavelength Optical Signals // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2010. - Vol. 5. -pp. 3-14,
5. Ļašuks I. The evaluation of 16-channel Hybrid ASE and LED WDM-PON// Electronics and Electrical Engineering, 2011. – No. 6(112). – pp. 33-36

6. O. Ozoliņš, V. Bobrovs, Ģ. Ivanovs, I. Ļašuks, International Journal of Physical Sciences, approved. „New-Generation Optical Access Transmission System Based on the Thin Film Filter Technology”

Promocijas darba rezultāti izstrādes laikā tika izmantoti vairāku projektu pētījumu daļas realizācijā

1. Valsts pētījumu programmas „Informācijas Tehnoloģijas projekts” Nr. 5 „Jaunas elektronisko sakaru tehnoloģijas” novirziens - elektrosakaru sistēmu drošums un drošība. RTU projekts Nr. V7408.1. (2008, 2009)
2. «Spektrāli blīvēto platjoslas pasīvo optisko tīklu realizāciju izpēte» (2009), RTU
3. Trafika apvienošanas izpēte „IP virs WDM tīklos”, Nr. ZP 2008/16, RTU.
4. „Trafika vadības izpēte „dzīsla līdz mājai” optiskajā sakaru sistēmā”, Nr. ZP 2007/13, RTU
5. „Nākošās paaudzes kombinēto optiski blīvēto sakaru sistēmu ieviešanas izpēte”, Nr. EEZ09AP-42/09, EEZ grants.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 141 lappuse. Darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, izmantotās literatūras saraksta un pielikumiem.

Ievadā ir dots īss ieskats mūsdienu piekļuves tehnoloģiju attīstībā.

Pirmajā nodaļā ir apskatītas PON tehnoloģiju attīstības tendences no TDM-PON līdz WDM-PON un veikta salīdzinoša analīze starp dažādām tehnoloģijām. Rezultāta ir izvēlētas 3 pamatkonceptijas PON risinājumu attīstībai, pielietojot viļņgarumdales blīvēšanu (WDM) un formulēts promocijas darba mērķis un uzdevumi.

Darba otrajā nodaļā ir apskatīta pētījumu metodika. Ir apskatīti 2 svarīgie pētījumu posmi: matemātiskā modelēšana un praktiskā realizācija.

Ir piedāvātas shēmas praktiskiem mērījumiem, kā arī ir paskaidrots modelēšanas programmatūras OptSim darbības princips un BER noteikšanas metodika.

Trešajā nodaļā ir izpētīta četrvīļņu mijiedarbes pielietošana PON sistēmās. Pirmkārt ir atrasti optimālie nosacījumi kanālu ģenerēšanai ar minimālo jaudas neviendabību, lai iegūt maksimālo abonentu skaitu. Otrkārt ir atrasta maksimāli iespējama zudumu rezerve 8 un 16-kanālu sistēmām.

Ceturtajā nodaļā ir izveidota WDM/TDM-PON koncepcija eksistējošās infrastruktūras papildināšanai. Ir izveidots TDM-PON makets ŠOPS laboratorijā un iegūti nepieciešamie dati matemātiskai modelēšanai. Ir iegūti minimālās

nepieciešamas jaudas lielumi augšupielādei un lejupielādei, kā arī apskatīti abonentu skaita ierobežojošie efekti: frekvences čirps un Briljuēna izkliede. Ir atrasts maksimāli iespējams abonentu skaits

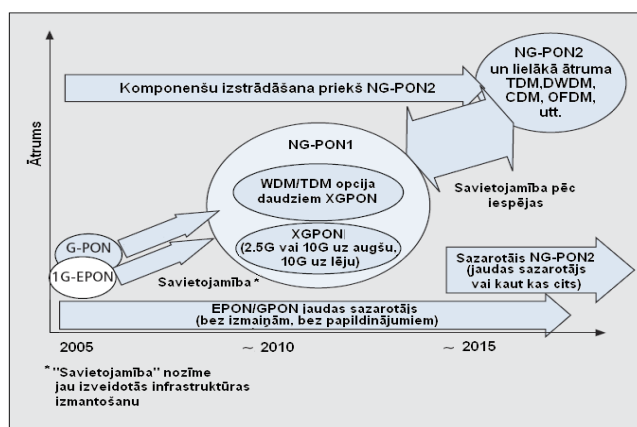
Piektajā nodaļā ir apskatīta SS-WDM koncepcija (spektra sagriešana) ar platjoslas ASE-avotu lejupielādē un LED augšupielādē. Ir aprēķināts optimālais starpkanālu intervāls un joslas platums. ŠOPS laboratorijā ir izveidots ASE-avota makets, lai iegūt nepieciešamus parametrus modelēšanai. Ir iegūti minimālās nepieciešamas jaudas lielumi augšupielādei un lejupielādei, un atrasts maksimāli iespējams abonentu skaits.

Darba noslēgumā ir dots promocijas darba galveno secinājumu apkopojums, kā arī ir definēts turpmāko pētījumu virziens.

DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Darba pirmajā nodaļā ir apskatīta PON tehnoloģiju evolūcija un iespējamās attīstīšanas tendences. Eksistējošās GPON un EPON tehnoloģijas ir plaši pielietotas dažādās valstīs un pasaules reģionos [17,28]. Jebkurai tehnoloģijai tūlīt pat pēc ieviešanas jau vajag attīstīties tālāk [64-66].



attīstīšanas tendences. Eksistējošās GPON un EPON tehnoloģijas ir plaši pielietotas dažādās valstīs un pasaules reģionos [17,28]. Jebkurai tehnoloģijai tūlīt pat pēc ieviešanas jau vajag attīstīties tālāk [64-66]. 10G EPON un 10G GPON palielināja ātrumu kopējā kanālā ar TDM blīvēšanu, tomēr modernizēšanas iespēju nav. Pastāv 2 attīstīšanas koncepcijas. FSAN (Full Service Access Networks - Visu Pakalpojumu Piekļuves Tīkls)

1.1. Att. FSAN koncepcija PON tehnoloģiju attīstīšanai

koncepcija ir redzama 1.11. attēlā [59]. Šeit tiek definēti 2 iespējamie ceļi. NG-PON1 (*Next Generation PON* – Nākamās Paaudzes PON) ir pirmais ceļš, kuram jāizmanto eksistējošo šķiedru un jaudas sadalītāju infrastruktūru ar iespējamo papildus filtru izmantošanu klienta pusē, kā arī ātruma palielināšanu vienā kanālā līdz 10 Gbit/s (XGPON – šeit X ir 10). Šai koncepcijai jāizpilda savietojamības nosacījumus ar EPON un GPON. NG-PON2 ceļš prasa jauno jaudas sazarotāšanas ierīču pielietošanu, kā arī WGR (*Waveguide Grating Router* – Viļņuvadu Rēžģu Maršrutētājs) izmantošanu [1,31,43,49]. Savietojamība ar eksistējošo infrastruktūru un izmantotiem standartiem šajā gadījumā nav obligāta. Šie risinājumi ir domāti ātrumam līdz 1 Gbit/s vienam abonentam. Eksistē viena vīzija uz piekļuves tīklu attīstību (att. 1.12). Šajā gadījumā FTTH WDM-PON nozīme dažādu XGPON plūsmu ievietošana vienā šķiedrā un ultra-dense WDM PON –

NG-PON2 ar pilnu jaudas sadalītāju aizvietošanu ar AWG (*Arrayed Waveguide Grating* - Sakārtotu Viļņuvadu Režģis) un vienu viļņa garumu izdalīšanu katram klientam [45,46]. Abas koncepcijas apvieno WDM izmantošana, kas ir vienīgais ceļš tālākai attīstībai.

Apskatot visas iespējamās tehnoloģijas, no koncepcijas, kas paredz eksistējošās infrastruktūras papildināšanu (NGPON1), un no koncepcijas, kurai vajag pilnīgi jaunu infrastruktūru (NGPON2), ir izvēlētas 3 tehnoloģijas:

- FWM WDM-PON

Četrviļņas mijiedarbes efekta pielietošana WDM-PON ir pilnīgi jauns risinājums, kas ļauj sasniegt pārraides ātrumu lejupielādē un augšupielādē līdz 10 Gbit/s, pielietojot tikai 2 lāzerus, un iespējai iegūt līdz 16 nesējfrekvences tālākai modulēšanai [54]

- WDM/TDM-PON no NGPON1 koncepcijas (ar modernizēšanu līdz DWDM-PON)

Tehnoloģijas priekšrocība ir iespēja daļēji saglabāt eksistējošo infrastruktūru un pielietot plaši ražotās komponentes. Pārraides ātrums lejupielādē sasniedz līdz 10 Gbit/s, augšupielāde - līdz 10 Gbit/s. Šim risinājumam vajag vienu lāzeru katram abonentam [56]

- SS-WDM

Šī tehnoloģija ļauj ātri un ekonomiski efektīvi („bezkrāsu” LED pielietošana augšupielādē un kopīgā platjoslas ASE-avota izmantošana lejupielādē) izveidot jaunus tīklus, pielietojot drošas komponentes (LED kalpošanas laiks līdz 10^8 stundas). Pārraides ātrums lejupielādē sasniedz līdz 1.25 Gbit/s, augšupielāde - līdz 622 Mbit/s [52,53,55]. Visiem abonentiem vajag viens platjoslas avots lejupielādē un gaismas diode katram abonentam augšupielādē.

Otrā nodaļa.

Promocijas darba otrajā nodaļā ir apskatīti pētījumu posmi.

1. Matemātiskā modelēšana

Iegūtie rezultāti maketā ir izmantoti matemātiskā modelēšanā ar OptSim programmatūru, kura ļauj izveidot WDM-PON sistēmu un simulēt lineārus un nelineārus efektus šķiedrā un modelēt visas komponentes, vajadzīgas

WDM/TDM-PON, SS-WDM un FWM WDM-PON realizēšanai. Kvalitātes novērtēšanai ir izmantots BER parametrs, kas ir visplašāk izmantots ŠOPS novērtēšanai. Matemātiskās modelēšanas rezultātā ir iegūta minimālā izstarotāja (lāzers, ASE un LED) jauda BER līmeņa nodrošināšanai ($<1 \cdot 10^{-12}$ ja ātrums ir līdz 10 Gbit/s un $<1 \cdot 10^{-10}$ – ātrums līdz 2.5 Gbit/s).

2. Maketa izveidošana praktiskiem eksperimentiem.

WDM/TDM-PON un SS-WDM sistēmām ir daļēji izveidots makets, lai noteikt komponentu vissvarīgākos parametrus (piem. ASE avota realizēšana spektra sagriešanas zudumu novērtējumam). Pilna sistēmas realizācija maketā nav iespējama ierobežoto materiālo resursu dēļ.

Pētījumu etapi:

1. FWM WDM-PON sistēmas izstrāde

- 1.1. Pumpējošo lāzeru jaudas noteikšana 8 un 16-kanālu ģenerācijai
- 1.2. Zudumu budžeta aprēķināšana
- 1.3. 8 un 16-kanālu WDM-PON sistēmas simulēšana ar $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ līmeņa nodrošināšanu, izmantojot OptSim.

2. WDM/TDM-PON sistēmas izstrāde

- 2.1. Zudumu budžeta aprēķināšana
- 2.2. Vienkanāla TDM-PON sistēmas realizēšana šķiedru optikas pārraides sistēmu laboratorijā
- 2.3. Minimālās nepieciešamas lāzeru izejas jaudas noteikšana lejupielādei 16, 32 un 64-kanālu sistēmām ar $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ līmeņa nodrošināšanu, izmantojot OptSim matemātisko modelēšanu
- 2.4. Minimālās nepieciešamas lāzeru izejas jaudas noteikšana augšupielādei 16, 32 un 64-kanālu sistēmām ar $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ līmeņa nodrošināšanu, izmantojot OptSim matemātisko modelēšanu
- 2.5. SBS (Briljuēna sliekšņa vērtības) eksperimentālā noteikšana un maksimālā iespējamo abonētu skaita aprēķināšana, balstoties uz iegūtiem datiem
- 2.6. Frekvences čirpa ietekmes aprēķins uz jaudas zudumu palielināšanu WDM/TDM-PON sistēmas augšupielādei

3. SS-WDM sistēmas izstrāde

- 3.1. Minimālās nepieciešamās LED jaudas noteikšana augšupielādei 8, 16 un 32 kanālu sistēmai ar $BER < 1 \cdot 10^{-10}$ līmeņa nodrošināšanai, izmantojot OptSim matemātisko modelēšanu

- 3.2. ASE-avota un spektrālās sagriešanas realizēšana, pielietojot erbijs šķiedru, pumpēšanas lāzerus un Brega režģu filtru
- 3.3. Minimālās nepieciešamās ASE-avota jaudas noteikšana augšupielādei 8,16 un 32 kanālu sistēmai ar $BER < 1 \cdot 10^{-10}$ līmeņa nodrošināšanai, izmantojot OptSim matemātisko modelēšanu

Matemātiskā modelēšana

Matemātiskais aparāts WDM (arī WDM-PON) sistēmas aprēķiniem izmanto nelineāro Šrodingera vienādojumu [2,60-62]. Ja impulsa platums > 5 ps, un pīķa intensitāte $< 1 \text{ GW/cm}^2$, tad vienādojums ir [2,60-62]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\alpha}{2} A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (2.1)$$

Kur: T – impulsa platums [s], A – amplitūda [dBm], α – vājinājums [dB/km], β_2 – dispersijas parametrs [ps^2/km], z – attālums z -ass virzienā [km], γ – nelinearitātes koeficients

Šrodingera vienādojumam analītiskajam risinājumam pielieto dažādas skaitliskās pseidospektrālās metodes. Split-Step Furje metode pieder pie šīs klases un raksturojās ar īsāko aprēķināšanas laiku [2,60-62]. OptSim darbība ir balstīta uz TDSS (*Time Domain Split Step* – Laikā Apgabalā Sadalīts Solis) algoritmu, lai realizēt signāla izplatīšanas vienādojumu šķiedrā [2,60-62].

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2.2)$$

$\hat{D}$ diferenciālais operators apraksta dispersiju un vājinājumu lineārā vidē. $\hat{N}$ ir operators, kurš apraksta nelineāro efektu ietekmi uz impulsa izplatīšanos [75].

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2} \quad (2.3)$$

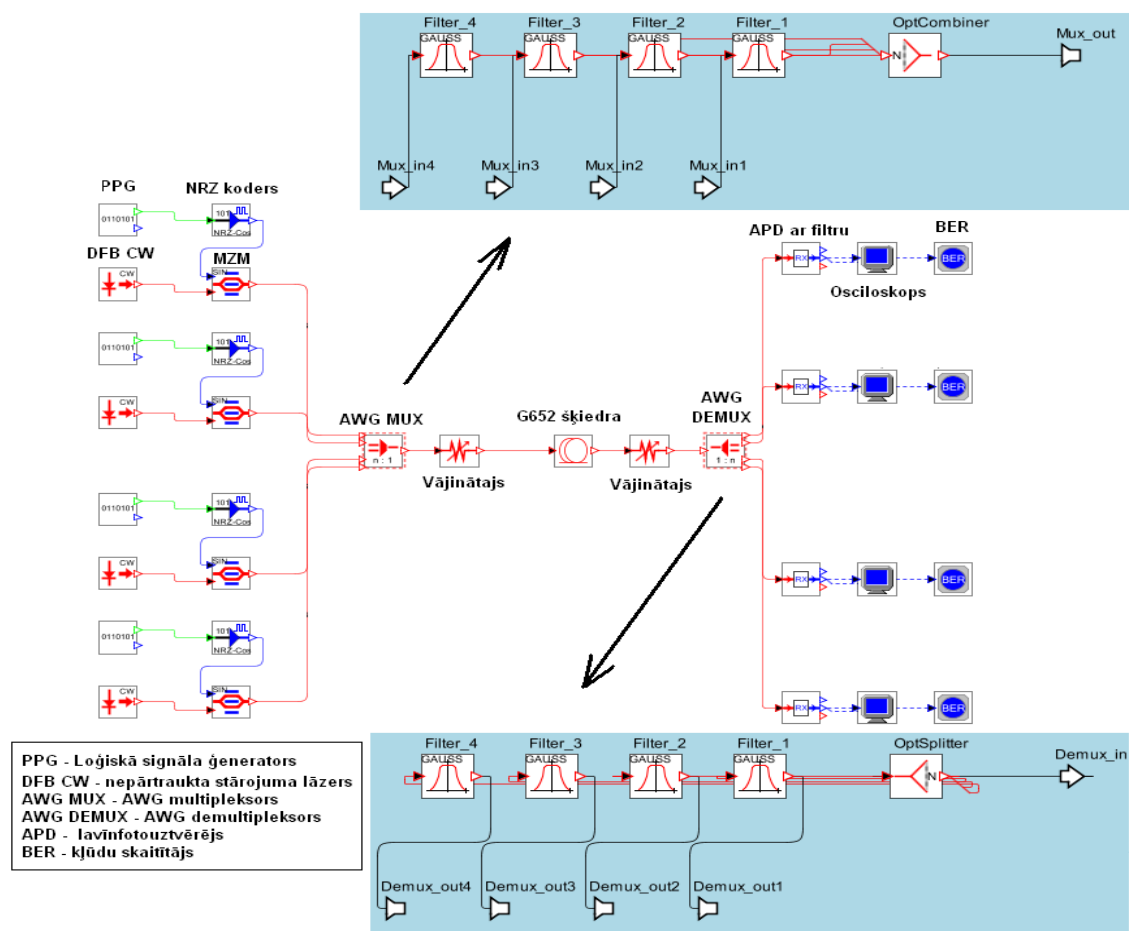
Algoritms pielieto $A(t, z)$ aprēķinam atsevišķi $\hat{D}$ un $\hat{N}$ operatorus ar soli Δz (h). Split-step metode ir aptuvenš risinājums, kas definē, ka lineārie un nelineārie efekti aprēķināti ar soli h . TDSS rēķina $\hat{N}$ laikā apgabalā, aprēķinot konvolūcijas rezultātu laika nolasei [2,60-62]:

$$TDSS \rightarrow A_L[n] = A[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A[k] h[n-k] \quad (2.4)$$

OptSim simulēšanas programmatūra ļauj izveidot šķiedru optikas pārraides sistēmu kā savienotu bloku kopni, kur katrs bloks reprezentē vienu no sistēmas komponentiem (piem., lāzers vai ārējais modulators). Visiem komponentiem var

mainīt parametrus, optimizējot viņus darbībai reālos apstākļos. Katrs bloks ir simulēts atsevišķi, balstoties uz to ievadītiem parametriem un signālu ieejā. WDM shēma sastāv no impulsu ģeneratora, kurš ir savienots ar koderi. Šajā gadījumā visur ir pielietots NRZ kods, jo viņš ir visplašāk izplatīts. Kodērs savienots ar ārējo MZM (Mach-Zander Modulator – Maha-Zandera modulators). MZM arī ir savienots ar CW lāzeru. Visās simulācijās, kur ir aprēķināta BER atkarība no lāzera jaudas, šī jauda ir mērīta pēc MZM, kas atbilst jaudai, kas ir ievadīta šķiedrā. WDM multipleksors OptSim realizācijā sastāv no filtriem ar noteikto amplitūdas-frekvenču raksturlīkni (šajā gadījumā Gausa) un apvienotāju ar vājinājumu (Zīm.2.1.). Pirms un pēc šķiedras ir ievietoti vājinātāji, kuri apraksta vājinājumu operatoru un klientu pusēs savienošanas dēļ. Visās simulācijas ir izmantota standarta vienmodu šķiedra G.652D. Vājinājuma līmenis bija paņemts ar rezervi: 0.25 dB/km C un L joslās un 0.4 dB/km O joslā.

Uztvērējs visos gadījumos ir APD ar jūtību -24 dBm pie BER $1 \cdot 10^{-12}$. Elektriskais filtrs OptSim modelī ir uztvērēja iekša ar 4-kārtas filtrēšanu un 7.5 GHz 3-dB joslu. Aiz filtra ievietoti Osciloskops vai Acu-diagrammas analizators. Visi rezultāti ir balstīti uz Acu-diagrammas analizatora radījumiem.



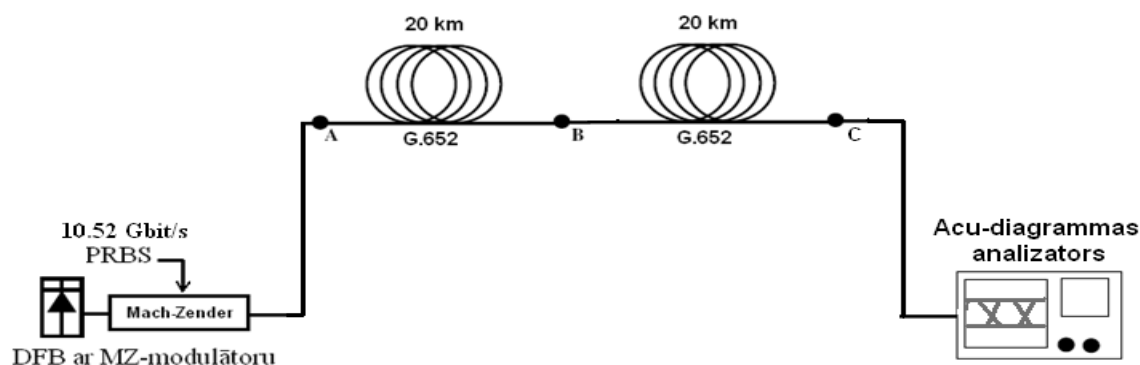
Zīm. 2.1. OptSim WDM sistēmas shēma

Eksperimentālā realizācija

Eksperimentālie mērījumi izdarīti šķiedru optikas pārraides sistēmu laboratorijā, izmantojot mērīšanai augsti precīzus spektra analizatoru, jaudas un viļņa garuma mērītāju. Signāla kvalitātes novērtēšanai bija izmantots Acu-diagrammas analizators (ar BER-maskām) un PPG (*Pulse Pattern Generator* – Impulsu Secības Ģenerators) ģenerators ar iespēju izveidot dažādas standartizētus pārraides ātrumus.

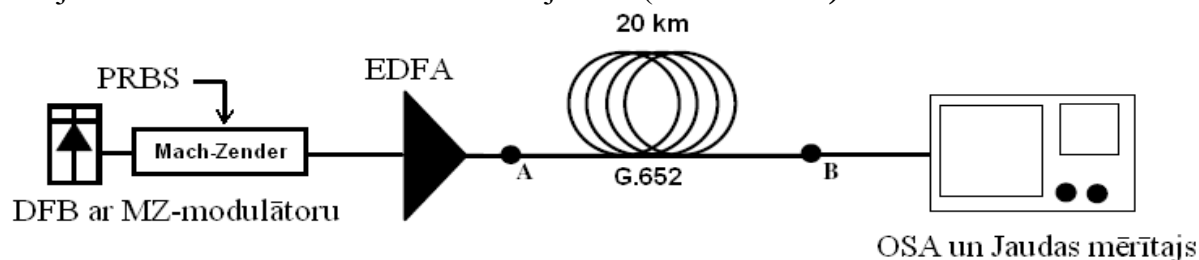
WDM/TDM-PON sistēmas realizācijai ir izmantots DFB lāzers ar mainīgo viļņa garumu un izejas jaudu, Maha-Zandera ārējais modulators, G652D šķiedra, vājinātājs un Acu-diagrammas analizators. Sistēma ir realizēta vienkanālu variantā (sk. Zīm. 2.2.) ar iespēju iegūt parametrus, kuri nav atkarīgi no kanālu skaita (ER – vieninieka un nulles attiecība, impulsa augšanas un krišanas laiks, impulsa forma līnijas galā, lai pareizi izvēlēties BER aprēķināšanas metodiku).

Briljuēna sliekšņa mērījumiem papildus izmantots EDFA pastiprinātājs ar izejas jaudas līmeni līdz 23 dBm un jaudas mērītājs ar viļņa garuma noteikšanu. Briljuēna sliekšnis ir atrasts modulētam signālam un CW režīmam.



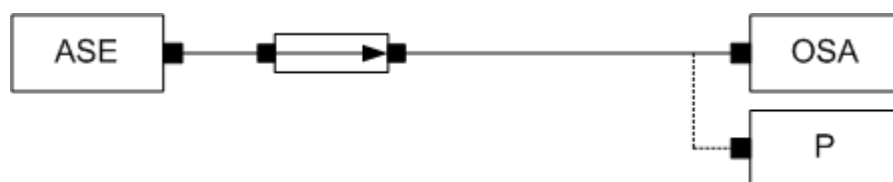
2.2. att. WDM/TDM-PON mērījumu shēma

Lāzera izejas jauda bija pakāpeniski palielināta, lai iegūt robežu, kur Briljuēna izkliede sāk atstarot ievadīto jaudu. (sk. Zīm. 2.3.)

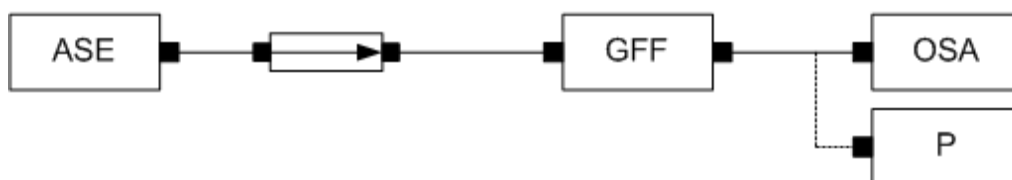


2.3. att. Briljuēna sliekšņa mērījumu shēma

SS-WDM sistēmas realizācijai bija pielietots ASE-avots ar izejas jaudu 7.7 dBm un spektra platumu (FWHM) 32.28 nm (zīm. 2.4). Ar GFF filtra pielietošanu jaudas līmenis sastāda 2.2 dBm (zīm. 2.5). Balstoties uz iegūto ASE-avota spektru, ir izveidots matemātiskais modelis tālākajiem aprēķiniem.



2.4. att. ASE avota spektra mērījuma shēma



2.5.att. ASE avota spektra mērījuma shēma, pielietojot izlīdzinošo filtru

Apkopojot OptSim programmatūras aprakstu:

- Šķiedru optikas pārraides sistēmu kvalitātes novērtēšanai jāizmanto BER parametru
- Visiem BER aprēķiniem izmantota Gausa statistika, izņemot gadījumu ar čirpa un SOA trokšņa ietekmi, kur jāpielieto Hi-kvadrāt statistika χ^2 [60-62]
- Lai BER deviācija nepārsniegtu 5% robežu, WDM/TDM-PON, SS-WDM un FWM WDM-PON sistēmas simulācijām izmantoti 1024 biti [60-62]

Ar maketa palīdzību ir iegūti parametri OptSim komponentu izveidei WDM/TDM-PON gadījumā:

- Vieninieka un nulles attiecība (Extinction Ratio)
- Impulsa augšanas un krišanas laiks
- Impulsa forma līnijas galā, lai pareizi izvēlēties BER aprēķināšanas metodiku

Briljuēna sliekšņa līmenis CW un modulētajam signālam ir izveidots ar maketa palīdzību WDM/TDM-PON risinājumam.

ASE-avota gadījumā:

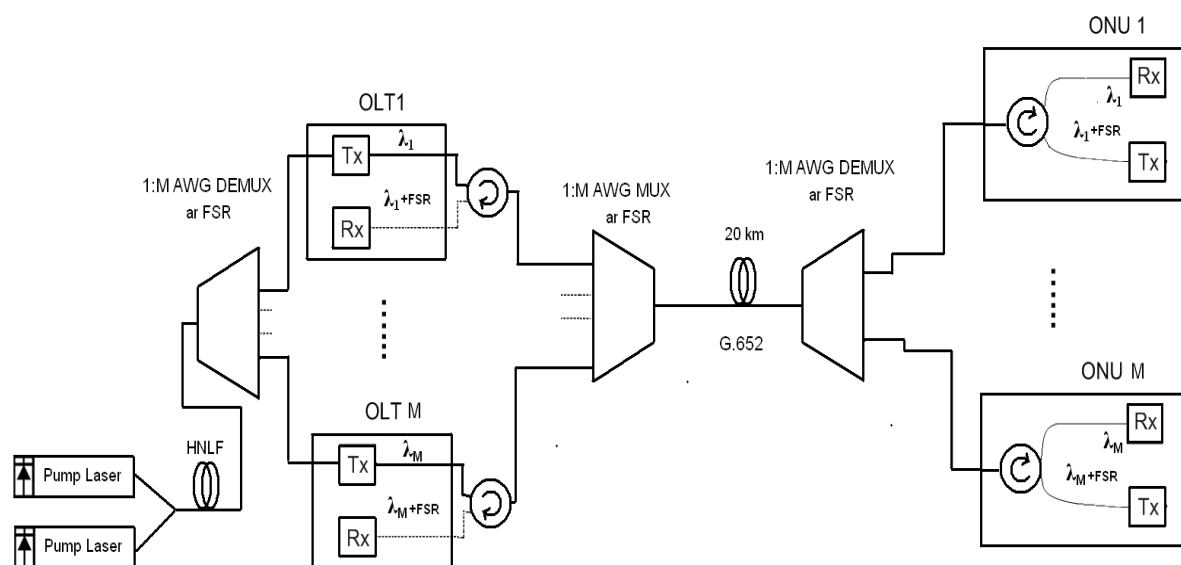
- ASE-avota izstarojuma spektrs
- Sagriešanas zudumu vērtība
- Sagrieztā kanāla spektrālā forma

Trešā nodaļa

Četrviļņu mijiedarbes efekts pieder pie nelineāriem Kerra efektiem. Šis efekts galvenokārt ir novērojams WDM sistēmās ar vairāku kanālu skaitu un vienmēr bija uzskaitīts par nelabvēlīgo. Kā derīgo efektu to sāka izmantot parametriskajos pastiprinātajos [3-6,63]. Šajos pētījumos bija novērots, ka kopā ar pastiprināšanas efektu var uzģenerēt nesējfrekvences, izmantojot vienu vai divus pumpēšanas lāzerus. Balstoties uz šo parādību, ir iespējams izmantot uzģenerētus nesējsignālus tālākai izmantošanai [6]. Četrviļņu mijiedarbes efekts nebija iepriekš izmantots PON sistēmu realizēšanai [54].

Šīs koncepts balstās uz to, ka vispirms ar divu lāzeru palīdzību notiek četrviļņu mijiedarbes efekta produktu (harmoniku) ģenerēšana augsti nelineārajā šķiedrā. Pēc tam harmonikas vai nesējfrekvences ir demultipleksētas un modulētas (ar ārējo modulatoru) un multipleksētas, jaudas līmenis harmonikām līdz 10 dBm un spektrs ir šaurs (1 GHz), kas ļauj pārraidīt signālus ar ātrumu līdz 10 Gbit/s. Šīs ātrums ir izvēlēts, lai varētu pielietot Ethernet protokolu, kas ir visvairāk izmantots pārraides tīklos. Ir definēti šādi uzdevumi sistēmas matemātiskai modelēšanai (sk. zīm. 3.1.)

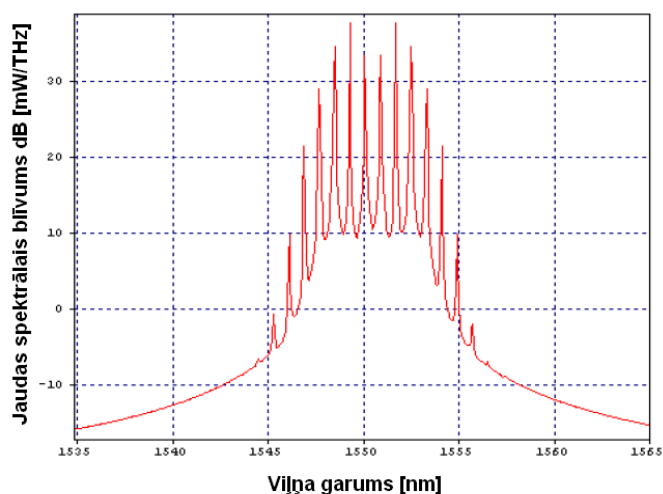
- Pumpējošo lāzeru jaudas noteikšana 8 un 16-kanālu ģenerācijai, izmantojot OptSim matemātiskās modelēšanas datus.
- 8 un 16-kanālu sistēmas simulēšana ar $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ līmeņa nodrošināšanai



3.1. Att. FWM WDM-PON sistēmas ar WDM augšupielādi

Nesējfrekvenču ģenerēšanas paņēmiens ir balstīts uz četrviļņa mijiedarbes efekta, kas notiek īsa garumā ($\approx 1\text{km}$) augsti nelineārajā šķiedrā ar pumpējošo

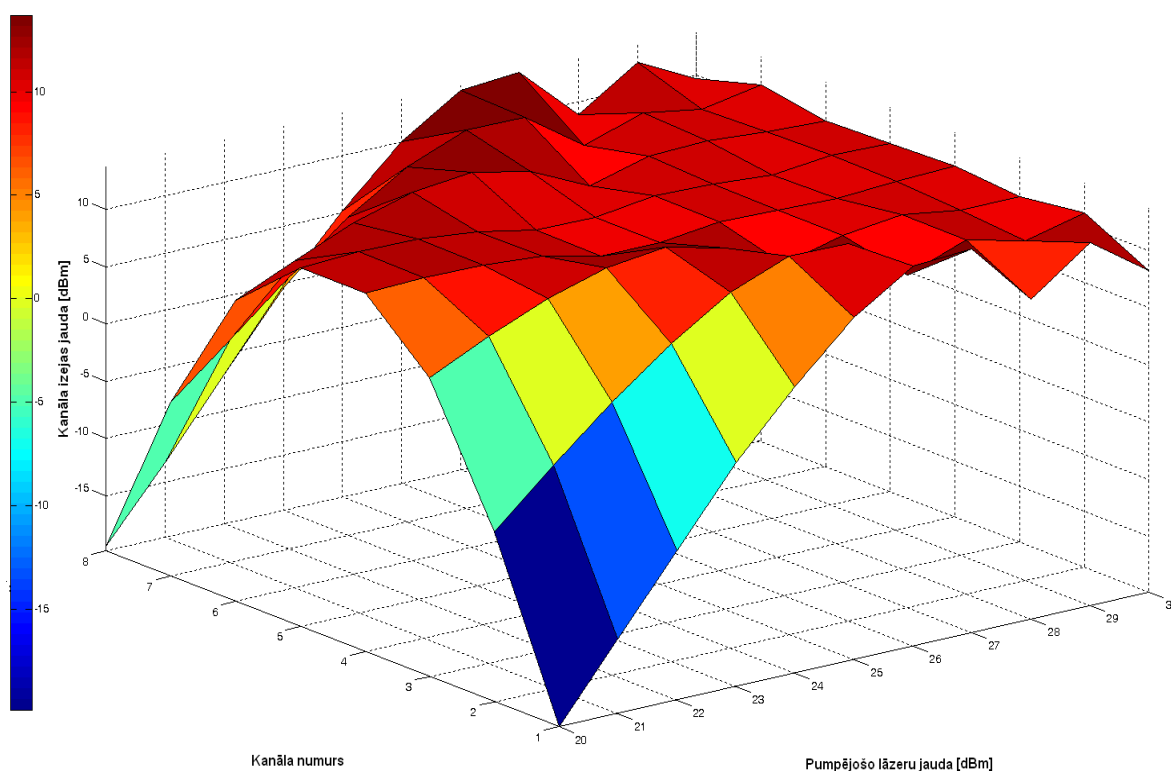
lāzeru palīdzību. Nesējsignālu ģenerēšanas shēma ir parādīta 3.1. zīmējumā. Pēc nesējsignālu ģenerēšanas notiek filtrēšana un atsevišķo kanālu modulēšana [54].



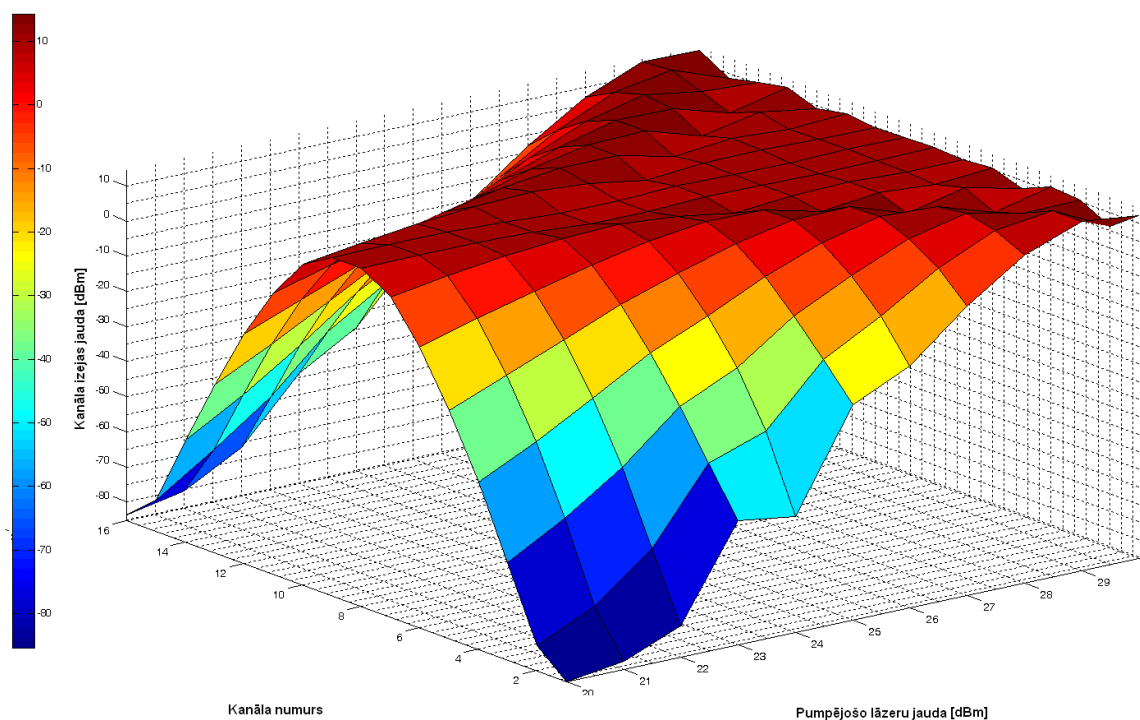
3.2.att. Uzģenerētās harmonikas

Iegūtie kanāli ir atkal multipleksēti un ievesti šķiedrā. (Zīm. 3.1). 3.2. attēlā var redzēt uzģenerētās harmonikas pirms demultipleksēšanas.

Mainot pakāpeniski pumpējošo lāzeru jaudu un HNLF garumu, ir atrasts optimālais stāvoklis, kad kanālu jaudu starpība ir minimālā un vidēja izejas jauda ir maksimālā. Attēlos 3.3-3.4 ir parādīts kanālu izejas jaudu sadalījums.



3.3.Att. Harmoniku jaudas atkarība no pumpējošo lāzeru jaudas 8-kanālu sistēmai



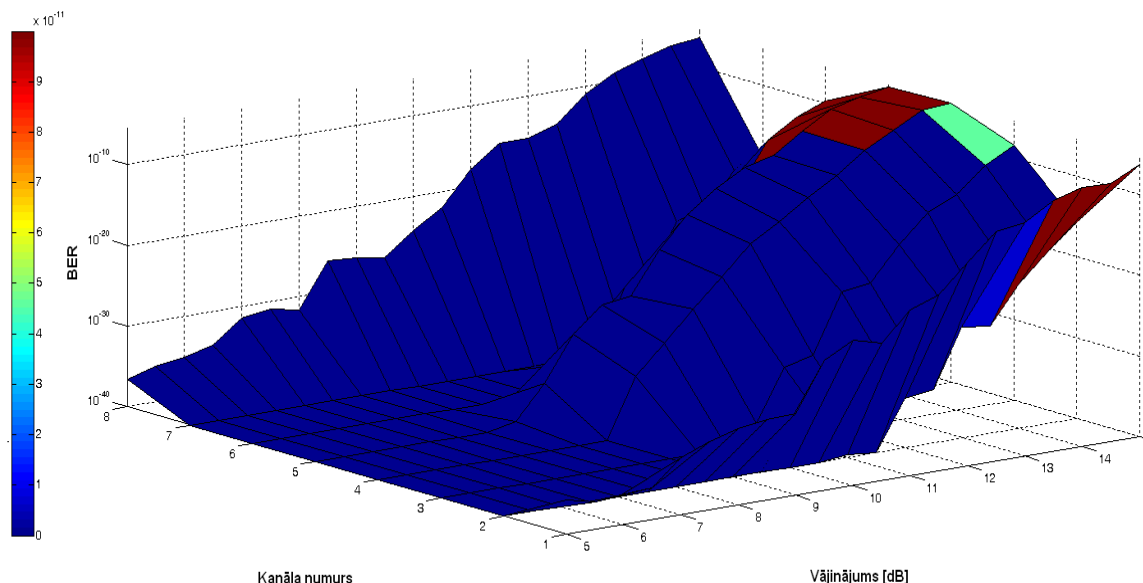
3.4.Att. Harmoniku jaudas atkarība no pumpējošo lāzeru jaudas 8-kanālu sistēmai

Tabula 3.1.

Harmoniku ģenerēšanas parametru apkopojums

Kanālu skaits	8	16
HNLf garums (km)	1.1	1.25
Lāzeru jauda (dBm)	25	28
Maksimālā jaudas neviendabība (dB)	3.25	6.76

Ņemot vērā to, ka izejas jaudas vērtības šeit ir fiksētās un to izmaiņa pievedīs pie citu kanālu izejas jaudu nestabilitāti, šajā gadījumā BER atkarība ir iegūta no papildus ienesta vājinājuma. Papildus vājinājums bija palielināts ar noteikto soli (1 dB), kamēr BER līmenis nerasniedza $1 \cdot 10^{-12}$. Jaudas rezerve (2 dB) ir iekļauta jaudas budžetā. Atpakaļ plūsma ir realizēta pēc DWDM/TDM-PON principa (att. 3.1.), kur katram abonentam ir savs viļņa garums augšupielādei.



3.5. Att. BER atkarība no ienesta vājinājuma 8-kanālu sistēmai.

Tabula 3.2.

8 un 16-kanālu sistēmas simulēšanas rezultāti

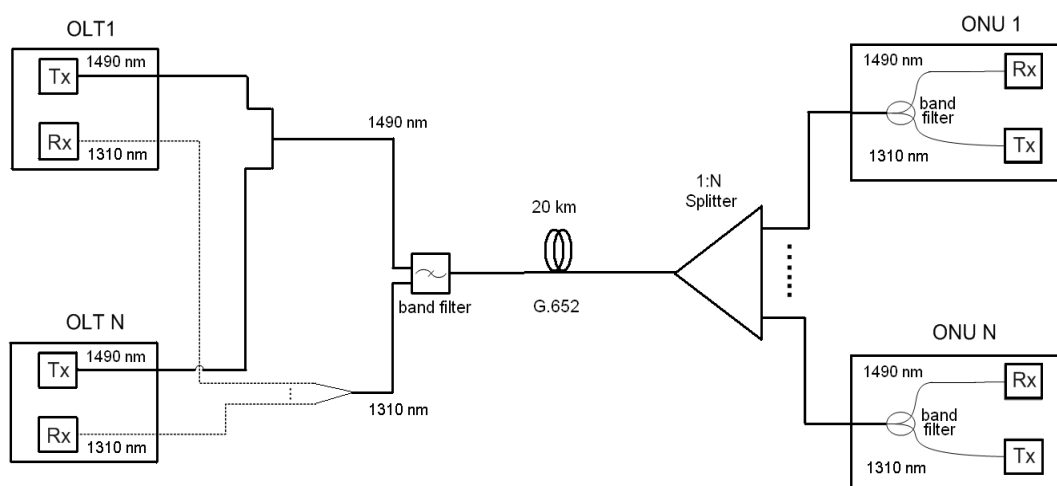
Kanālu skaits	8	16
Maksimālais ienestais vājinājums [dB]	13	11.5
BER maksimālā starpība (blakus kanāli)	$1 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{25}$

Balstoties uz rezultātiem (sk. zīm. 3.5), var secināt, ka BER nevienādība kopā ar izejas jaudas nevienādību palielinājās 16-kanālu sistēmai līdz 6.76 dB. Jaudas rezerves (kopā ar iekļauto 2 dB rezervi) pilnīgi pietiek stabilai sistēmas darbībai. Jāpiebilst, kā pumpējošo lāzeru izejas jauda rūpīgi jākontrolē, 0.5 dB robežās, lai saglabāt izejas iegūto nesējfrekvenču jaudas stabilitāti. Abonentu skaitu var palielināt, izmantojot 3 pumpēšanas lāzerus, tomēr nesējfrekvenču ģenerēšanas nosacījumi (pumpējošo lāzeru izejas jauda un nelineāras šķiedras garums) izmainīsies.

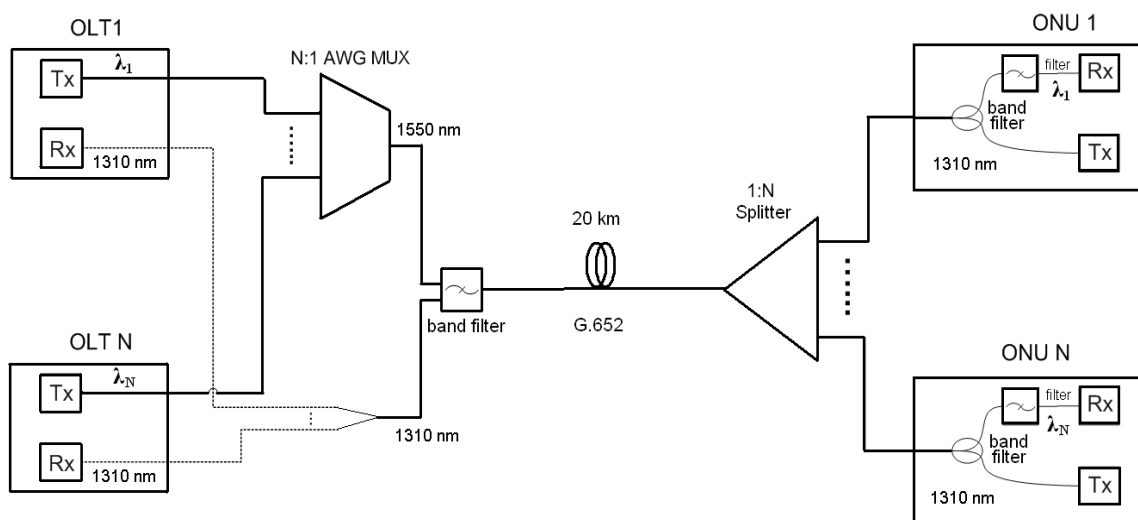
Ceturtnā nodaļa

Šajā nodaļā ir apskatītas WDM/TDM-PON tehnoloģijas ieviešanas iespējas, kas iekļauj sevī lāzera minimālās jaudas noteikšanu standarta risinājumam ar eksistējošās infrastruktūras daļēju saglabāšanu), saglabājot BER līmeni zemāk par $1 \cdot 10^{-12}$. Šis risinājums prasa vienu lāzeru katram abonentam lejupielādē (32 lāzeri) un vienu lāzeru visiem abonentiem augšupielādē ar laika blīvēšanu. Eksistējošā infrastruktūra iekļauj sevī G.652D šķiedru ar maksimālo attālumu līdz 20 km un jaudas sazarotāju ar maksimālo sadalīšanas pakāpi 1×64 [35-38], kas atbilst GPON standartam. Ir aprēķināta ierobežojošo faktoru ietekme uz maksimālo abonentu skaitu un jaudas zudumu palielināšanu.

TDM-PON vai GPON (sk. att. 4.1.) modernizēšana prasa eksistējošās infrastruktūras izmantošanu. Jau izveidota sistēma (parasti GPON) iekļauj sevī kabeļus, uznavas, savienošanas paneļus, dažāda veida savienojumus un jaudas sazarotājus. OLT atrodas pie pakalpojuma sniedzēja un ONU pie klienta. Šī infrastruktūra (bez ONU un OLT) maksā vismaz 70 % (līdz 90%) no sistēmas CAPEX [23], tieši tāpēc to maksimāli jā saglabā bez izmaiņām.



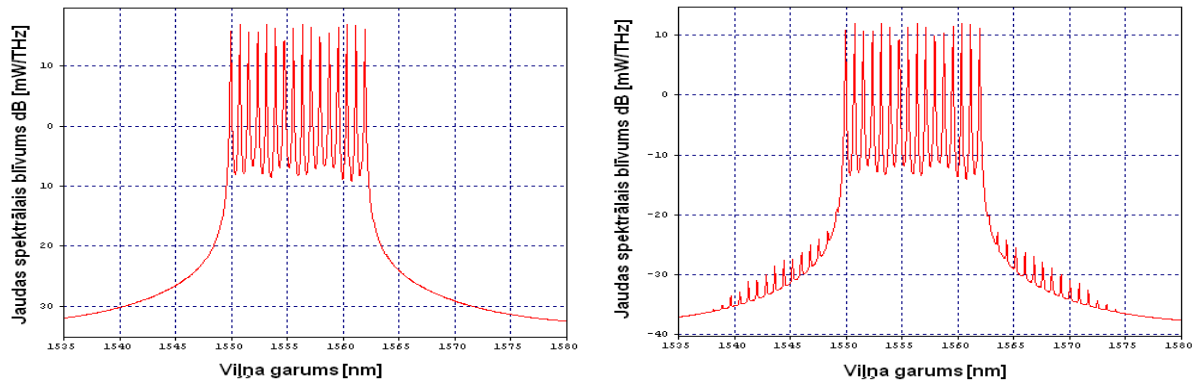
4.1. att. TDM-PON loģiskā shēma



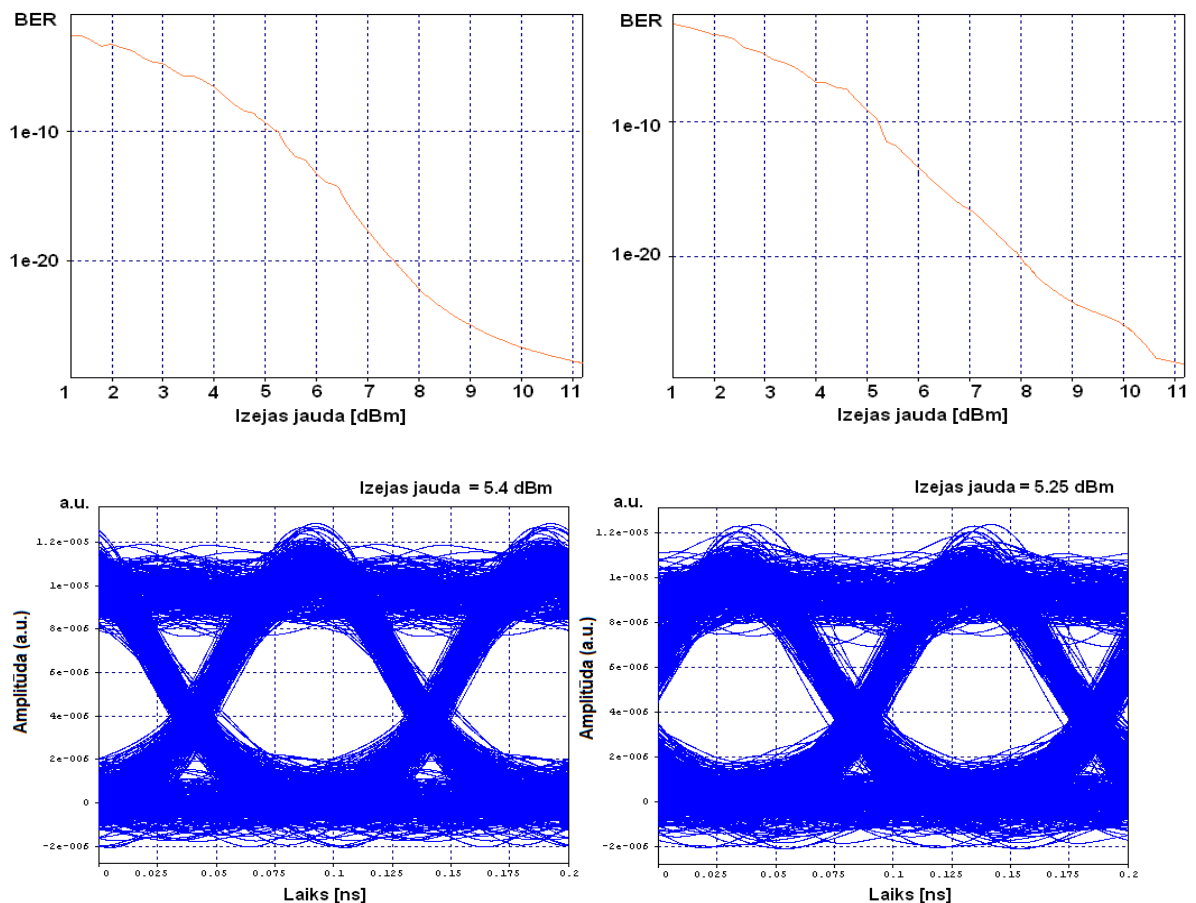
4.2.att. WDM/TDM-PON loģiskā shēma

Attēlā 4.2. ir parādīta WDM/TDM-PON realizācija TDM-PON modernizēšanai. Atšķirībā no ITU definētā risinājuma [35-38], WDM/TDM-PON lejupielādes kanāli ir realizēti, izmantojot viļņgarumdaļes blīvēšanu ar standartsoli starp kanāliem (100 GHz) [33], izmantojot lāzeru masīvu un AWG multipleksoru. Jaudas sadalītājs ir saglabāts, tomēr katrā ONU tiek papildinātā ar TFF(*Thin Film*

Filter - Plāno Kārtiņu Filtrs) filtru. Augšupielādes plūsma ir realizēta ar TDM palīdzību, izmantojot 1310 nm viļņa garumu. Atšķirība no citiem pētījumiem [10,11,58] viļņgarumdaļes blīvēšana ir pielietota lejupielāde un TDM koncepcija ir saglabāta augšupielāde (ar sazarotāja izmantošanu).

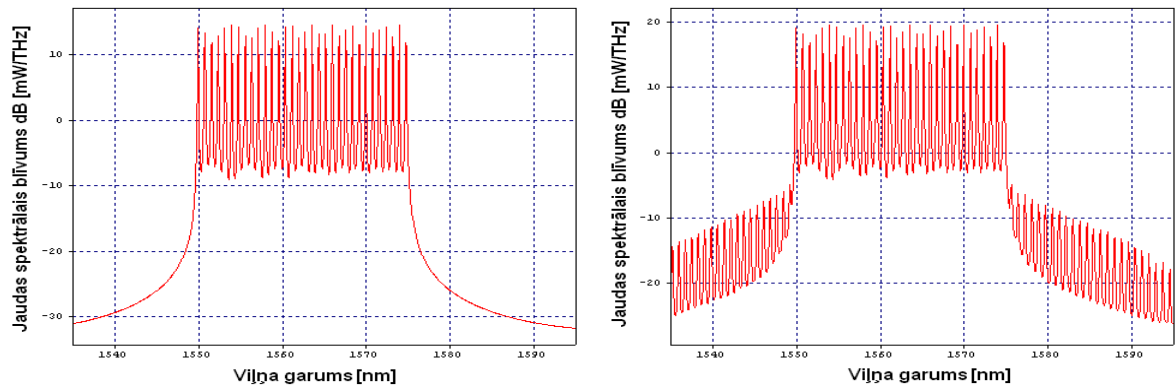


4.3. Att. Jaudas spektrālais blīvums līnijas sākumā un beigās pie 5.4 dBm (vissliktākā kanāla jauda pie $\text{BER} = 1.27 \cdot 10^{-12}$) izejas jaudas 16-kanālu sistēmai

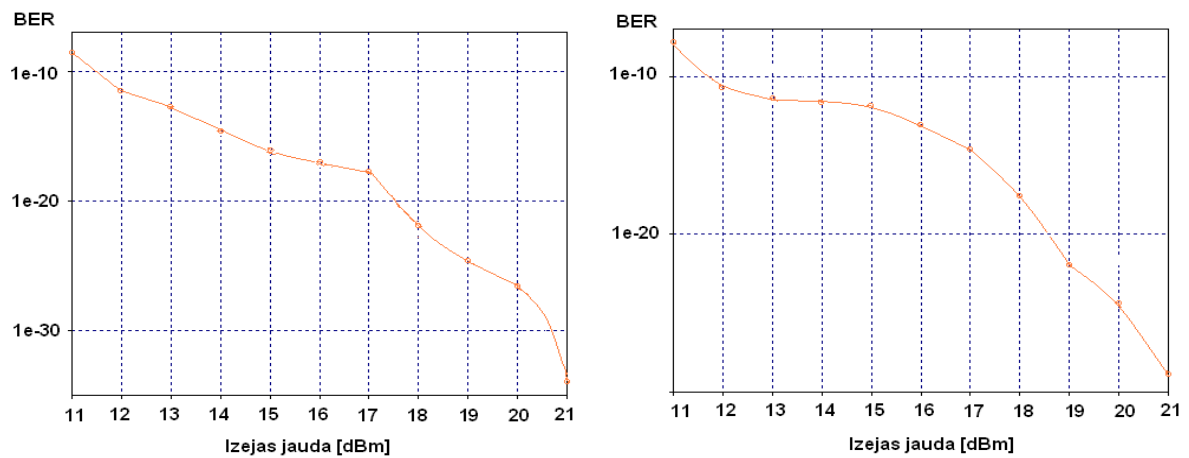


4.4. att. 16 kanālu sistēma a.) BER atkarība no izejas jaudas vissliktākajam un vislabākajam kanālam b.) Acu diagrammas vissliktākajam un vislabākajam kanālam pie $\text{BER} \approx 1 \cdot 10^{-12}$

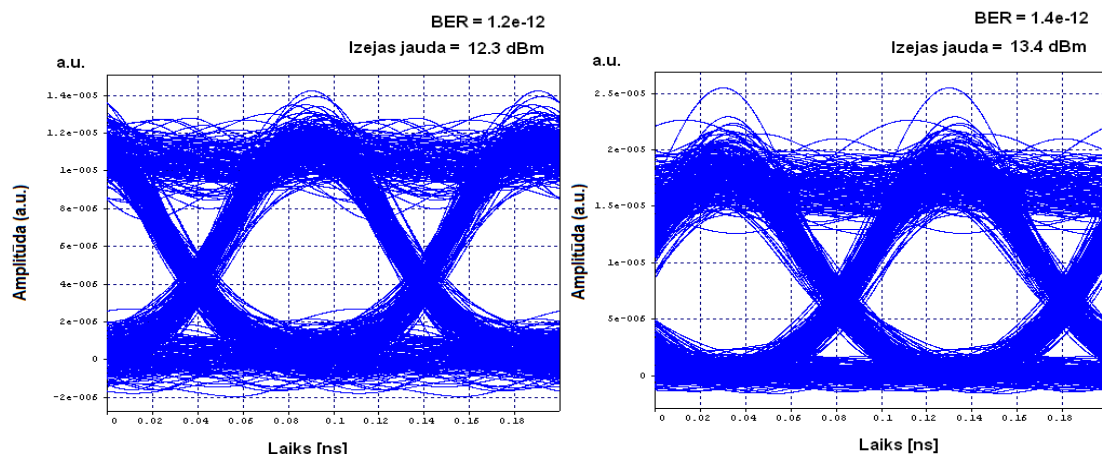
16, 32 un 64 kanālu sistēmu matemātiskā modelēšana ir izveidota tā, lai dabūt minimālo vajadzīgo lāzera jaudu (pēc ārēja modulatora), lai sistēmas BER būtu mazāks par $1 \cdot 10^{-12}$. Visu savienojumu vājinājums un jaudas rezerve ir imitēti ar vājinātājiem. Papildus zudumu budžeta samazināšana dispersijas un ER (*Extinction Ratio* – vieninieka un nulles attiecība) ir iekļauti, kalkūlējot BER. ER ir iegūts ar maketa palīdzību. Visas IL vērtības ir izvēlētas, balstoties uz optisko ierīču tirgū piedāvāto komponentu analīzi [51].



4.5. att. Jaudas spektrālais blīvums līnijas sākumā un beigās pie 13.4 dBm izejas jaudas 32-kanālu sistēmai



4.6.att. BER atkarība no izejas jaudas vissliktākajam un vislabākajam kanālam



4.7.att. Acu diagrammas vissliktākajam un vislabākajam kanālam pie $BER \approx 1 \cdot 10^{-12}$ (32-kanālu sistēma)

Tabula 4.1.

Zudumu budžetu starpība (WDM/TDM-PON ar sazarotāju)

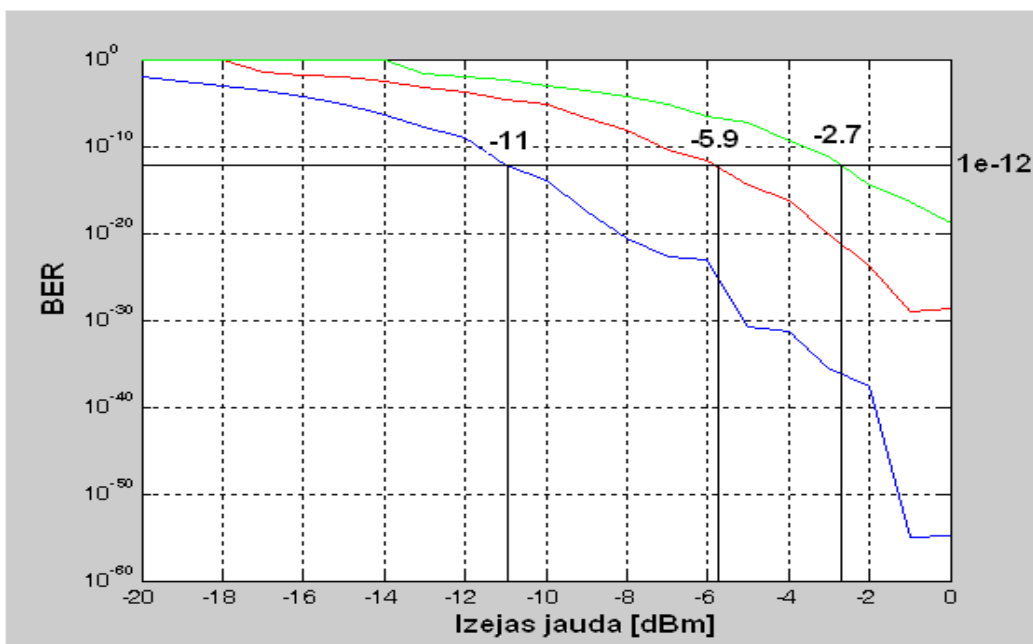
Kanālu skaits	Teorētiskais zudumu budžets [dB]	Nepieciešamais zudumu budžets [dB]	Izejas jauda [dBm]
16	28.9	29.7	5.7
32	35.1	37.7	13.7
64	39.8	43.4	19.4

Augšupielādes plūsma ir realizēta 2. optiskajā logā - 1310 nm(WDM/TDM-PON) un 3. Logā - 1550 nm (DWDM/TDM-PON). Simulācija ir veikta, izmantojot tādu pašu metodiku, kā lejupielādes plūsmas realizēšanā. Ir meklēta minimālā lāzera jauda, lai BER līmenis būtu vienāds vai zemāks, nekā $1 \cdot 10^{-12}$. Papildus ir izmantota FEC kodēšana (lejupielādes plūsmas modelēšanā nebija iespējas izmantot FEC OptSim ierobežojumu dēļ), pielietojot RS(25a,23b,16) kodu atbilstoši ITU G.987.2 rekomendācijai. 10 Gbit/s ātrums augšupielādei ir izvēlēts, lai varētu izmantot gatavu 10G GPON ITU-T rekomendāciju.

Tabula 4.2

Zudumu budžets augšupielādei (WDM/TDM-PON)

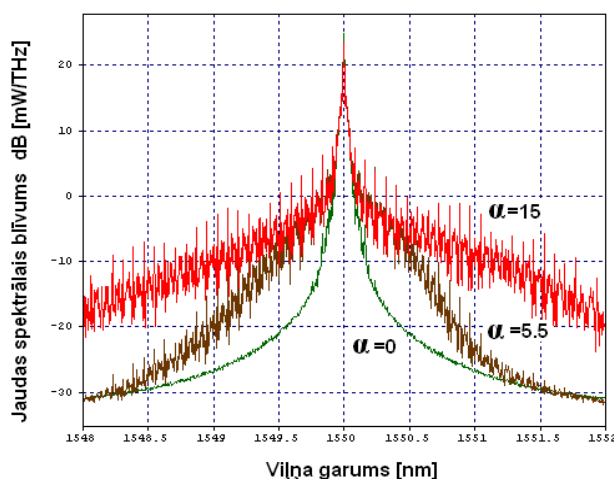
Kanālu skaits	Ienestais vājinājums [dB]	Izejas jauda [dBm]
16	26.7	2.7
16 (FEC)	26.7	0.1
32	31.4	7.4
32 (FEC)	31.4	4.8
64	34.7	10.7
64 (FEC)	34.7	8.1



4.8. Att. BER atkarība no izejas jaudas 16,32,64 kanālu sistēmām bez FEC°

Balstoties uz iegūtiem rezultātiem, 32 abonentu sistēmai minimālā nepieciešamā lāzera izejas jauda ir 13.7 dBm, augšupielādei – 4.8 dBm ar BER $< 1 \cdot 10^{-12}$.

Frekvences čirps



4.9. Frekvences čirpa izrasīta spektra paplašināšana, kur α ir spektra paplašināšanas faktors

palielināšanu, kas savukārt ierobežo jaudas budžetu un abonentu skaitu. Lāzera čirpa parametrus var dabūt lāzera pases datos (viņi var mainīties no 1 līdz 10) [2].

Lejupielādei WDM/TDM-PON konceptam ir izmantots ārējais modulators raidītājā. Lai samazinātu izdevumus abonentu komplektam, augšupielādē jāpielieto lāzeri ar iekšējo modulēšanu, izvairoties no dārgā ārēja modulatora. Izmantojot iekšējo modulēšanu, parādīsies frekvences čirpa degradējoša iedarbība [2]. Lineāra frekvences modulācija (vai frekvences čirps) – ir viens no nelabvēlīgiem efektiem, kas var būtiski ierobežot pārraides ātrumu un palielināt zudumus. Šis efekts novērojams visos lāzeros ar iekšējo modulāciju. Frekvences čirps galvenokārt ietekme jaudas zudumu

Formulas 4.1 un 4.2 [2] ļauj analītiski to aprēķināt. β_3 parametra ietekme uz D parametru ir aprēķināti atsevišķi.

$$\delta_d = -5\log_{10} \left[1 - (4BLD\sigma_\lambda)^2 \right] \quad (4.1)$$

B – bitu ātrums [bit/s]

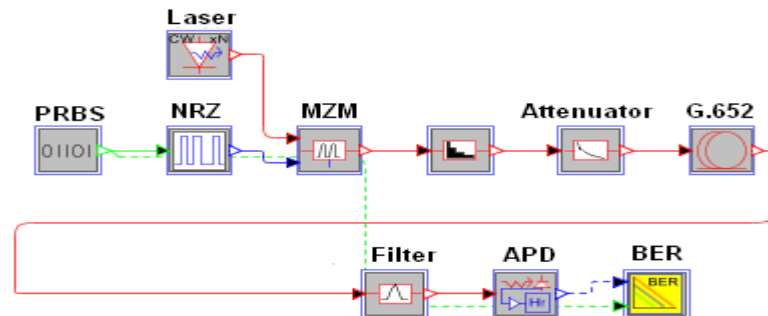
L – līnijas garums [km]

D – dispersijas parametrs [ps•nm/km]

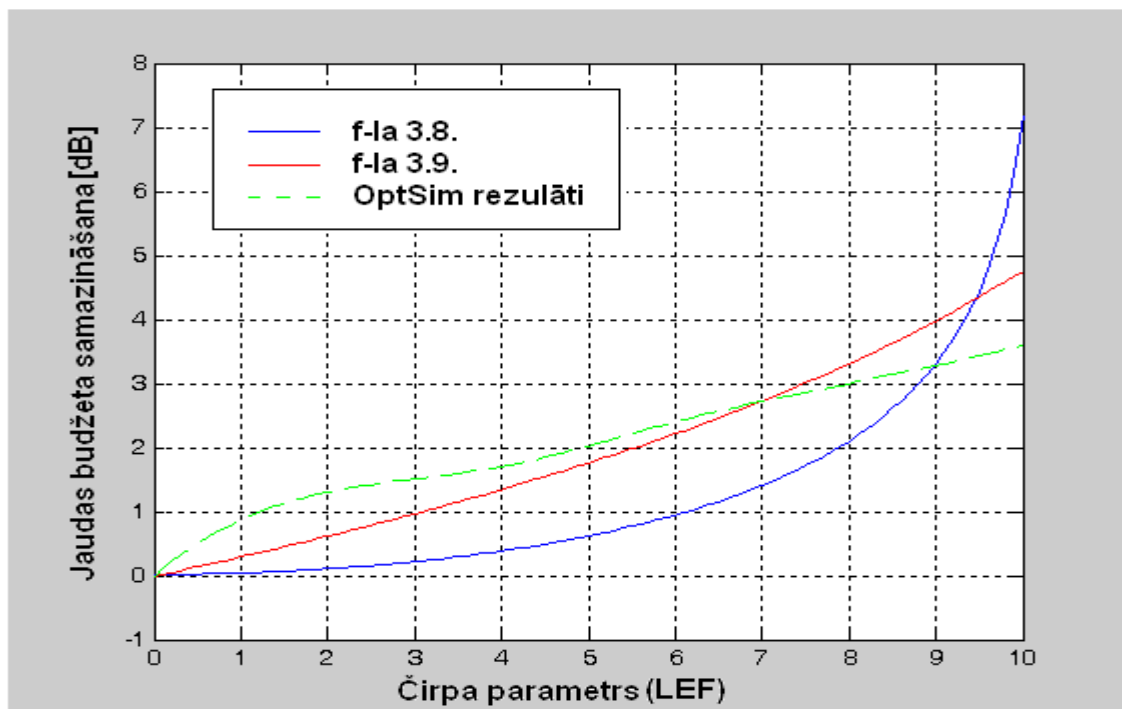
σ_λ - spektra paplašināšana

C – čirpa parametrs

$$\delta_c = 5\log_{10} \left[(1 + 8C^2\beta_2B^2L)^2 + (8\beta_2B^2L)^2 \right] \quad (4.2)$$



4.10.att. OptSim shēma čirpa ietekmes noteikšanai

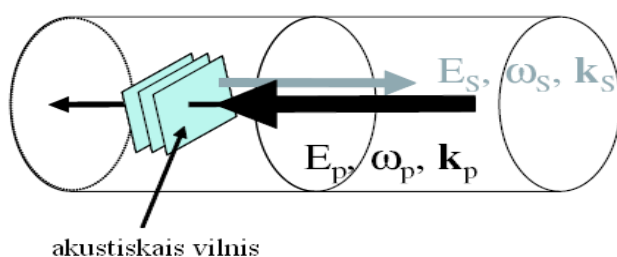


4.11. Att. Jaudas budžeta samazināšana frekvences čirpa ietekmē (1310 nm)

Shēma attēlā 4.10 pilnīgi sakrīt ar minimālās izejas jaudas noteikšanai WDM/TDM-PON sistēmas augšupielādes plūsmai (4.2. att.). Šajā gadījumā tiek pakāpeniski palielināts čirpa parametrs ārējā modulatorā (šajā gadījumā iekšējais modulators ir imitēts ar ārējo, mainot čirpa parametra vērtību) un atrasta minimālā izejas jauda (pēc modulatora), kura atbilst $BER = 1 \cdot 10^{-12}$. Minimālo nepieciešamo jaudu starpība ar mērījumu, kur $C=0$, ir uzskatīta par jaudas zudumu palielināšanu. Čirpa iedarbības noteikšanai izmantoti OptSim dati, jo formulas 4.8 un 4.9 dod neprecīzus rezultātus.

Apkopojot rezultātus, frekvences čirpa ietekmi noteikti jāievēro sistēmas izveidošanā, jo jaudas zudumu palielināšana WDM/TDM-PON gadījumā sasniedza 5 dB ar čirpa parametra < 10 un $\Delta\lambda=35$ nm optiski blīvētai līnijai. Tas nozīmē, ka augšupielādes plusmas izejas jaudai jābūt 9.8 dBm (atšķirībā no iegūtas vērtības 4.8 dBm), un abonentu skaits ir ierobežots ar 32.

Briljuēna izklike

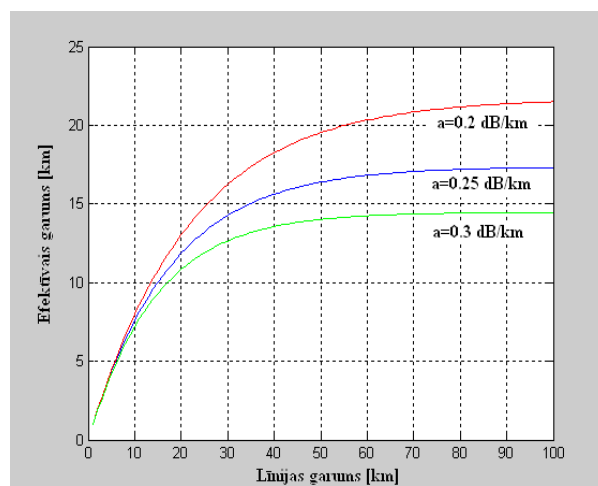


4.12. att. Briljuēna efekts optiskajā šķiedrā

jaudas budžets. Šī efekta dēļ (jo SBS ierobežo maksimālo ievadīto jaudu), nevar izmantot jaudīgākus lāzerus. Lai paskaidrot efekta būtību 4.12. attēlā var redzēt, ka gaismas viļņa iedarbībā veidojas akustiskais vilnis, kurš maina materiāla laušanas koeficientu ar noteikto frekvenci. No laušanas koeficienta izmaiņas akustiskā viļņa dēļ, notiek derīgā gaismas viļņa atstarošanas.

SBS izklike gadījumā notiek enerģijas pārpumpēšana no viena gaismas viļņa uz citu ar lielāku viļņa garumu, bet zaudēto enerģiju „absorbē” molekulārās

Briljuēna izklike ir viena no galvenajām problēmām modernos tīklos (it īpaši FTTH), jo šis efekts ierobežo maksimālo ievadīto jaudu un līdz ar to maksimālo iespējamo abonentu skaitu [2, 70]. Optiskās piekļuves tīkliem ir ļoti ierobežots



4.13. att. Efektīvā garuma (parametrs, vajadzīgs sliekšņa aprēķinam) atkarība no vājinājuma un līnijas garuma

svārstības vai vides fononi. SBS izkliedei ir akustiskie fononi. Otrais vilnis ir saukts par Stoksa vilni [2,71].

Lai aprēķināt sliekšņa jaudu, pie kuras Briljuēna izkliede ierobežo ievadīto jaudu, jāizmanto f-la [2,71]:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p - \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B} \quad (4.3.)$$

g – Briljuēna pastiprināšanas koeficients [W/m]

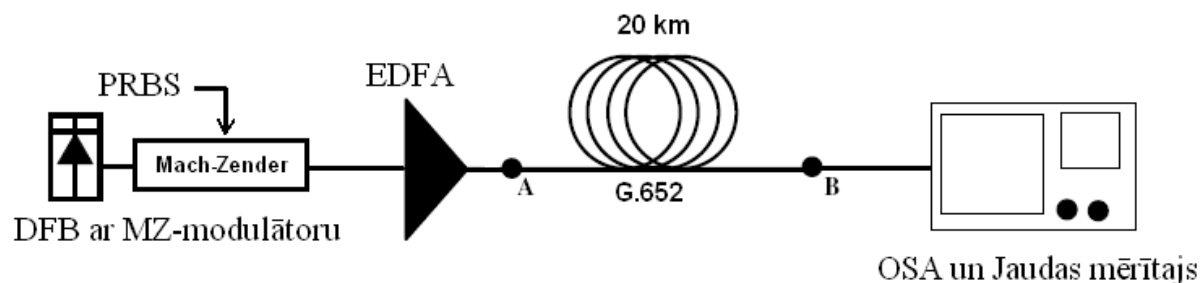
K – Polarizācijas stāvokļa brīvības pakāpe (pēc ITU G.652, $K=2$)

A_{eff} - serdeņa efektīvais laukums [μm^2]

$\Delta\nu_B$ – Briljuēna spektrālās joslas platums [GHz]

$\Delta\nu_p$ – Izstarotāja spektrālās joslas platums [GHz]

Datu pārraides tīklos izmanto modulāciju. Mūsu gadījumā tas ir ASK modulācija (*Amplitude Shift Keying* - Amplitūdas Manipulācija) vai NRZ kodēšana. Amplitūdas manipulācijas izmantošana palielinās spektra platumu un palielinās SBS sliekšni. Lai atrast SBS sliekšni modulētajam signālam (ātrums līdz 10 Gbit/s), bija izveidota shēma (sk. Zīm. 4.14).



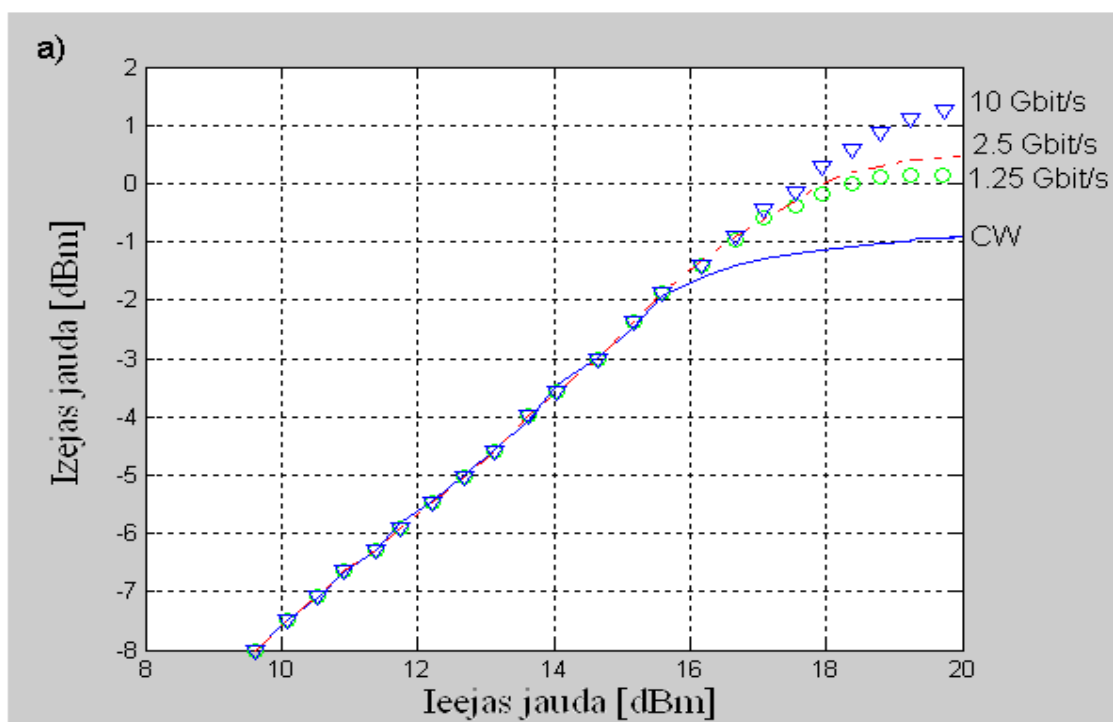
4.14. att. SBS sliekšņa mērījumi

Tabula 4.3

SBS sliekšnis

Bitu ātrums [Gbit/s]	CW	1.25	2.5	10
Teorētiskie rezultāti[dBm]	15.1	18.1	18.1	18.1
Praktiskie rezultāti[dBm]	15.5	16.9	17.2	18

Tabulā ir apkopoti iegūtie eksperimentālie rezultāti un teorētiskie aprēķini. Šie rezultāti ir derīgi 20 km optiski blīvētai līnijai un lāzeram ar joslas platumu 80 MHz un modulēšanas ātrumu 10 Gbit/s



4.15. att. SBS sliekšņa samazināšana ASK dēļ (praktiskais makets)

WDM/TDM-PON sistēmas matemātiskai modelēšanai ir izvēlēti lāzeri ar joslu, zemāku par 20 MHz (viņi ir plašāk izplatīti tirgū). Līdz ar to, dati, iegūti laboratorijas lāzeram (josla 80 MHz) ir piemēroti matemātiskai modelēšanai, izveidot pārveidojumu pēc f-las 4.3. SBS sliekšņa palielināšanas ASK dēļ rezultāti arī var būt pielietojami lāzeriem ar mazāko joslu. Pie līnijas garuma = 20 km, joslas < 20 MHz, ņemot vērā mērīšanas rezultātus, SBS sliekšnis CW režīmā ir vienāds ar 8.9 dBm un ASK režīmā ar ātrumu 10 Gbit/s - ar 11.4 dBm. Tas nozīmē, ka SBS nelineārais efekts ierobežo abonentu skaitu līdz 32, jo minimālā nepieciešama jauda 64 abonentu realizācijai ir 15.4 dBm.

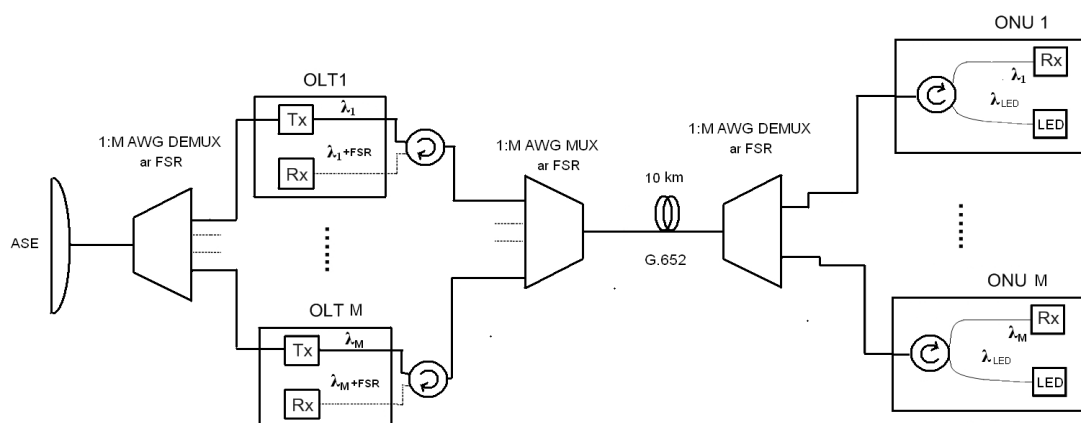
Piektā nodaļa

WDM/TDM-PON galvenā koncepcija bija eksistējošās infrastruktūras daļēja saglabāšana. Ja piekļuves tīkls ir būvēts no jauna, tad risinājuma izvēle nav ierobežota ar eksistējošās infrastruktūras izmantošanas ierobežojumiem. Par konceptu, kurš samazinās piekļuves tīklu izmaksas, var kļūt „spektrāli sagriezts” WDM (SS-WDM). SS-WDM sistēmās netiek izmantotas dārgas lāzeru diodes, bet tiek izmantoti plaša izstarošanas spektra gaismas avoti, piemēram, gaismas diodes, kuras ir manāmi lētākas un ar ilgāku kalpošanas laiku [41, 57, 52, 53, 55].

Piedāvātā konfigurācijā (zīm.5.1) augšupielādē ir izmantots LED, kurš ir „sagriezts” 8 vai 16 kanālos (gaismas diožu skaits ir vienāds ar abonentu skaitu). Lejupielādē ir izmantots viens ASE-avots, kurš savukārt arī ir „sagriezts” ar to

pašu kanālu skaitu. ASE avots ir izvēlēts tāpēc, ka viņam ir lielāka jauda, un līdz ar to var izmantot lielākus pārraides ātrumus (jo lielāks pārraides ātrums, jo mazāks jaudas budžets). LED maksimālais modulācijas ātrums ir < 1000 Mbit/s un izejas jaudas ierobežojums līdz -5 dBm [62]. Abonentu komplektos ar LED ir izmantotā iekšēja modulācija, bet lejupielādē ir izmantota ārējā (šajā risinājuma ietvaros iekšējo modulāciju sagriežtiem ASE-kanāliem pielietot nevar).

Spektra sagriešanas princips izskatās šādi: vispirms ar filtra palīdzību (šajā gadījumā AWG) ir sagriezts viens kanāls, kurš ir atsevišķi modulēts lejupielādes gadījumā. Augšupielādē gaismas diode vispirms ir modulēta, un pēc tam ir sagriezta spektra daļa. Pielietojot šo operāciju, neizbēgami rodas zudumi sagriešanas dēļ. Balstoties uz aprēķiniem LED un ASE-avotam kanāla joslas platums un starpkanālu intervāls ir izvēlēts 0.9 un 1.6 nm. Tas ir kompromiss starp dispersijas ietekmi (palielinot vēl joslas platumu, BER nesamazinās) un sagriešanas zudumiem (18.8 dB pie joslas platuma 0.9 nm). Starpkanālu intervālu nav iespējams palielināt platjoslas avotu spektra joslas trūkuma dēļ.



5.1. att. Dupleksā SS-WDM sistēma

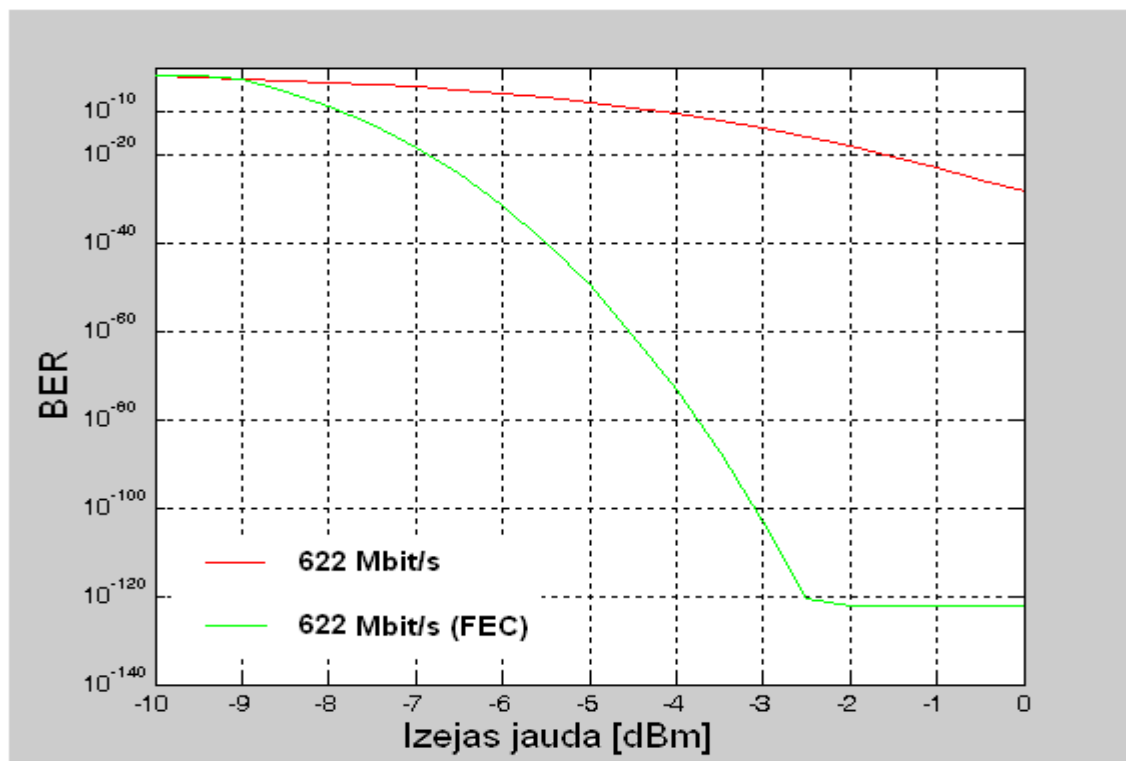
Augšupielādes plūsma

Raidītāja (gaismas diode) jauda bija pakāpeniski palielināta, kamēr BER līmenis nerasniedz $1 \cdot 10^{-10}$ ar un bez FEC pielietošanas (lai iegūt minimāli iespējamu izejas jaudu sistēmas drošai darbībai). Visi zudumi savienojumos, komponentu ienestais vājinājums un jaudas rezerve bija iekļauti aprēķinos. Ātrums 622 Mbit/s ir paņemts, balstoties uz STM-4 interfeisu. 311 Mbit/s ātrums nav standartizēts un ir puse no STM-4. 1 Gbit/s ātrumu (Ethernet standarts) augšupielādē nav iespējams pielietot, jo LED modulēšanas ātrums ir ierobežots.

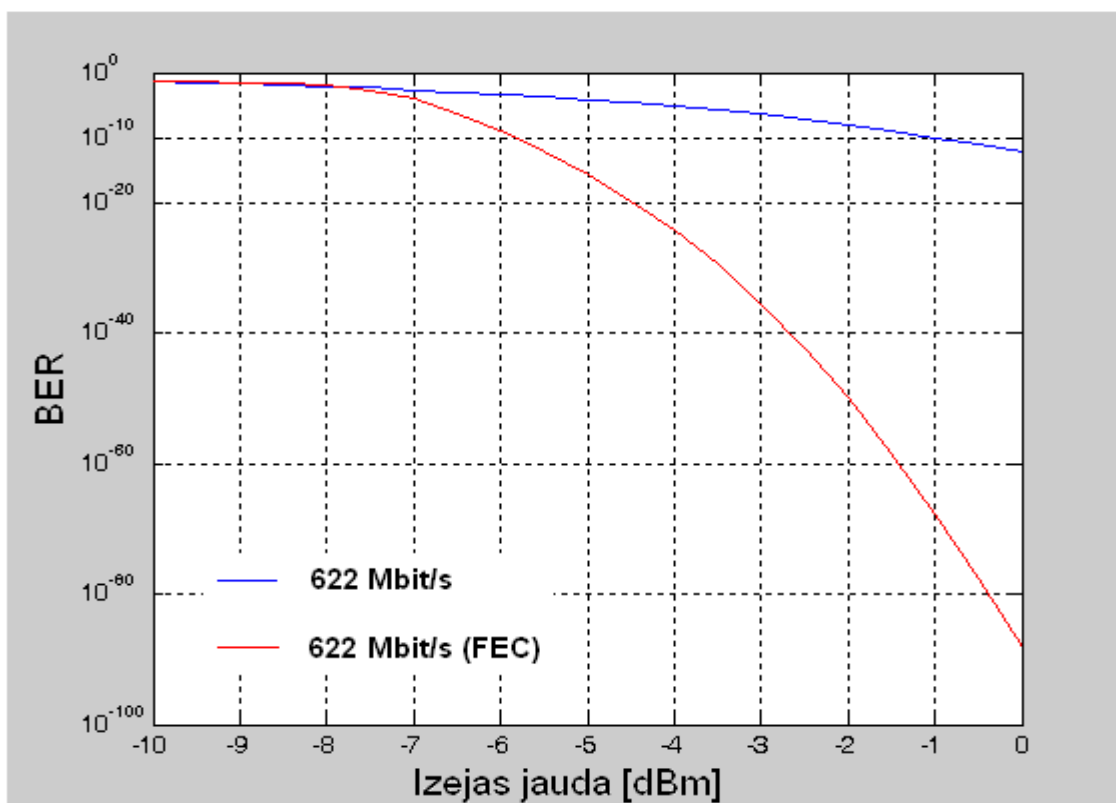
Tabula 5.1.

Minimālā nepieciešama jauda augšupielādei

Ātrums	Minimālā nepieciešama jauda (dBm)			
	311 Mbit/s		622 Mbit/s	
	Bez FEC	Ar FEC	Bez FEC	Ar FEC
8 kanāli	-7.2	-10.6	-4	-7.8
16 kanāli	-5.6	-8.8	-1	-5.8
32 kanāli	1.4	-2	3.5	-0.1



5.2.att. BER atkarība no ieejas jaudas 8-kanālu sistēmai



5.3. att. BER atkarība no ieejas jaudas 16-kanālu sistēmai

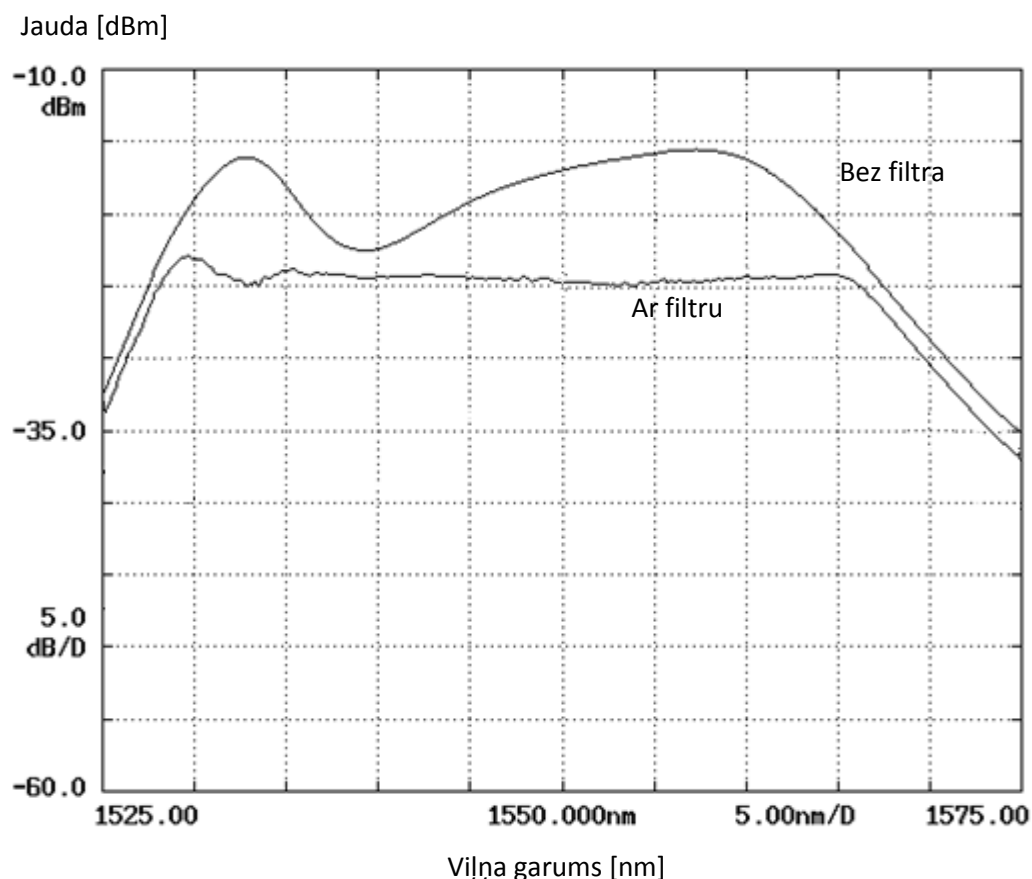
Apkopojot iegūtus datus, LED var būt droši izmantots augšupielādē 8 un 16-kanālu konfigurācijā. 32-kanālu sistēma nav iespējama ASE-avota joslas trūkuma dēļ lejupielādei (1532-1581 nm).

322 Mbit/s risinājums var būt pielietots bez FEC (izejas jauda zemāka par -5 dBm) 8 un 16-kanālu sistēmām. 622 Mbit/s pārraides ātrums katram abonentam nav iespējams bez FEC pielietošanas. 32 abonentu sistēma nav iespējama LED izejas jaudas ierobežojumu dēļ (-5 dBm).

Lejupielādes plūsma

ASE platjoslas avots ir izmantots lejupielādei SS-WDM realizācijā (5.4. zīm.) [8, 27]. Tapāt, kā LED, ASE-avots ir arī „sagriezts” kanālos (zīm. 5.6) ar AWG palīdzību. Šajā gadījumā ir izmantota ārēja modulācija, jo ASE avots ir kopīgs visiem kanāliem (atšķirībā no LED, kuri visi bija modulēti atsevišķi). Atšķirībā no LED, ASE avotam ir plašāks spektrs un lielāka izejas jauda (līdz 25 dBm).

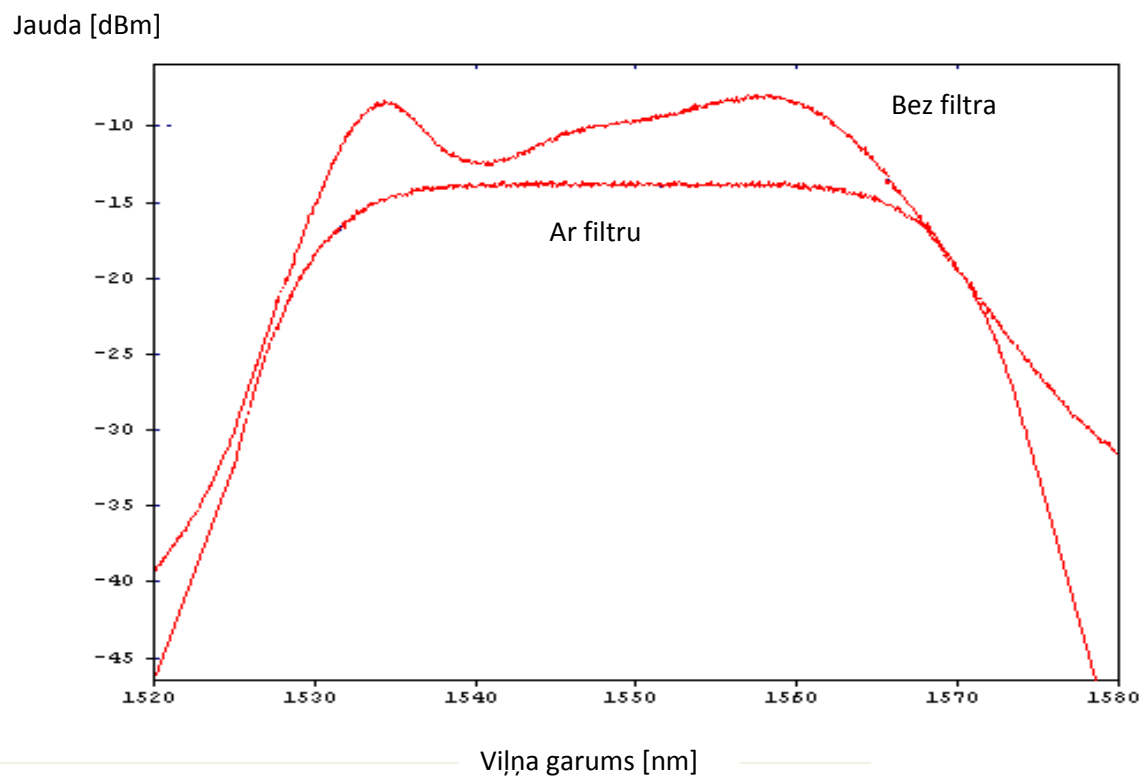
Lai izveidot ASE avotu OptSim simulatorā 8 un 16-kanālu sistēmu matemātiskai modelēšanai ir uztaisīts eksperiments ŠOPS laboratorijā. Eksperimentā ir izmantoti: ASE avots uz EDF šķiedras, optiskā spektra analizators (OSA), jaudas mērītājs (P) un pasīvie elementi.



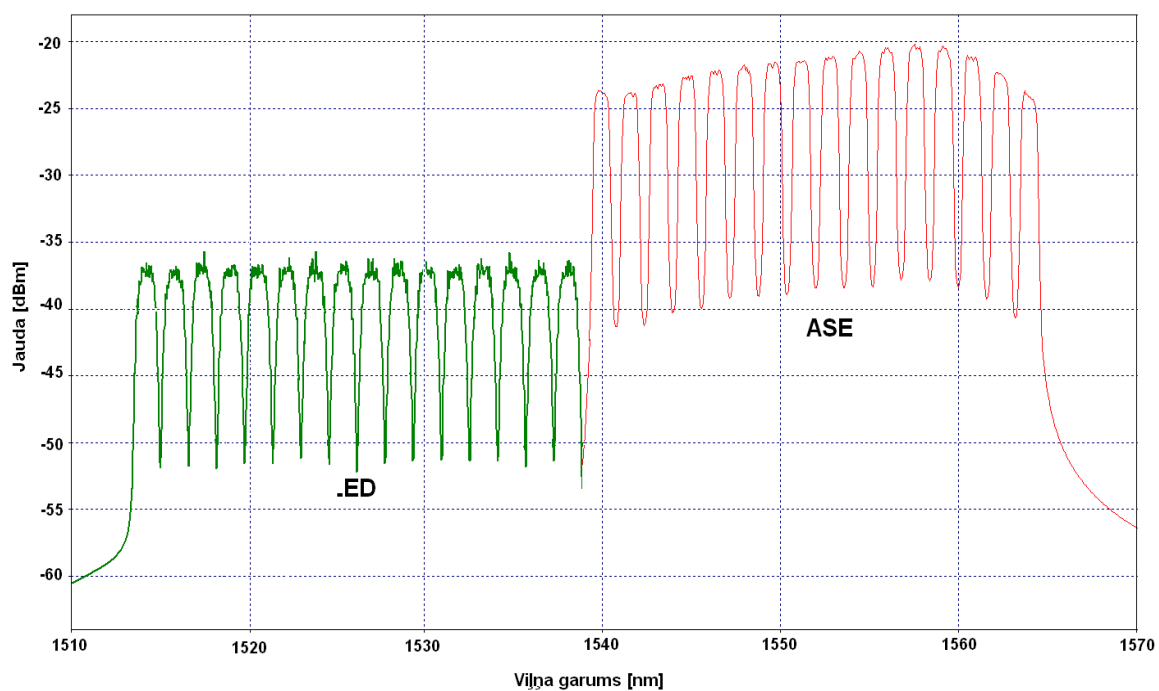
5.4.att. ASE avota filtrētais un nefiltrētais spektrs

Balstoties uz iegūto ASE-avota spektru ar un bez izlīdzināšanas filtra (5.4. att.), ir izveidots OptSim modelis (5.5. att.), kurš izmantots visos aprēķinos. 1 un 2.4 Gbit/s ātrumi ir izvēlēti ar iespēju pielietot standartizētus Ethernet un GPON interfeisus.

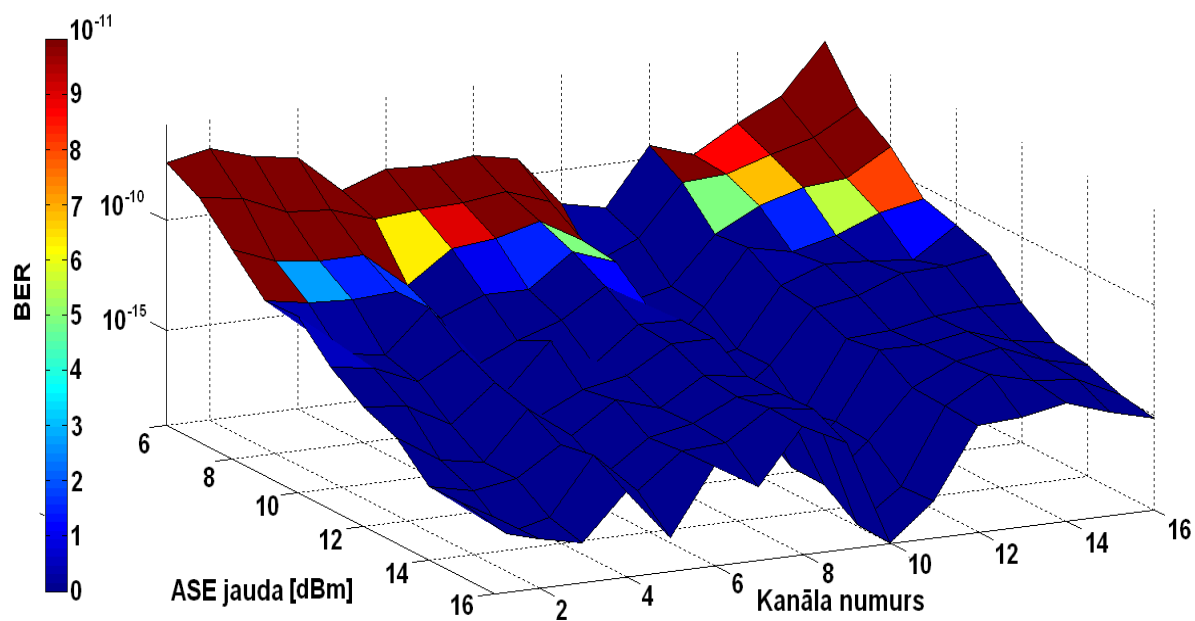
Simulācijas gājiens bija sekojošs: ASE-avota jauda bija palielināta ar noteikto soli (1 dB), kamēr BER līmenis nepārsniedz $1 \cdot 10^{-10}$. Ir uztaisīta matemātiskā modelēšana diviem ātrumiem. Rezultātā iznāca, ka izlīdzināšanas filtra pielietošana palielina nepieciešamo minimālo izejas jaudu uz 2 dB. Neskatoties uz potenciālo iespēju palielināt jaudas budžetu, izvairoties no izlīdzināšanas filtra, ātrumu līdz 2.4 Gbit/s palielināt nevar spontānās emisijas trokšņu dēļ. Abonentu skaits arī ir ierobežots, jo ASE-avotam ir ierobežots spektrs (1532-1581 nm).



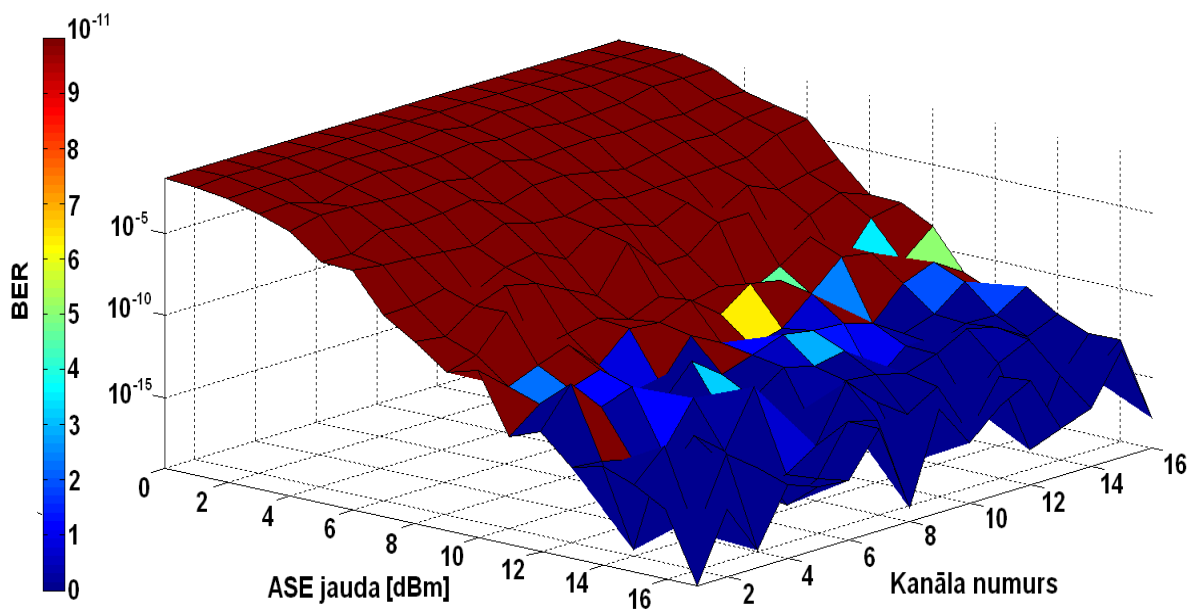
5.5. att. ASE avota OptSim modelis ar un bez izlīdzināšanas.



5.6.att. 16-kanālu sistēmas spektrāla aina



5.7. att. BER atkarība no ASE jaudas 16-kanālu sistēmai ar ātrumu 1 Gbit/s



5.8. att. BER atkarība no ASE jaudas 16-kanālu sistēmai ar ātrumu 1 Gbit/s ar GFF

Tabula 5.2.

Bitu ātrums	Minimālā ASE izejas jauda			
	Minimālā nepieciešama jauda			
	1 Gbit/s		2.4 Gbit/s	
ASE konfigurācija	Bez GFF	Ar GFF	Bez GFF	Ar GFF
8-kanāli	7	9	-	-
16-kanāli	9	11	-	-

Balstoties uz iegūtiem rezultātiem ir izdarīti secinājumi:

Optimālais joslas platums un starpkanālu intervāls SS-WDM sistēmai ar spektra sagriešanu ir 0.9 un 1.6 nm.

622 Mbit/s pārraides ātrums augšupielādē ir iespējams tikai, pielietojot FEC, bet 311 Mbit/s pārraides ātrumam FEC nav vajadzīgs. Minimālā nepieciešama jauda ir -5.8 dBm.

Lejupielādē 2.4. Gbit/s ātrums nav iespējams. Izejas jaudas palielināšana nedeva pozitīvus rezultātus. Izlīdzināšanas filtra pielietošana vidēji palielina zudumus par 2 dB, bet kanālu jaudas nevienmērība ir minimālā. Novērtējot acu diagrammas, var secināt, kā pastāv spontānās emisijas troksnis, kas degradē sistēmu un neļauj sasniegt $1 \cdot 10^{-10}$ BER līmeni, vienkārši palielinot jaudu (kas ir īpaši redzams 2.4 Gbit/s sistēmā). 1 Gbit/s realizācijai minimālā nepieciešama jauda ir 11 dBm ar izlīdzināšanas filtru.

Maksimāli iespējams abonentu skaits ir 16 ASE-avota joslas un LED izejas jaudas trūkuma dēļ.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darbā tika izvirzīts mērķis, balstoties uz teorētisko analīzi, matemātisko modelēšanu un praktiskiem eksperimentiem **izpētīt un novērtēt maksimālā abonentu skaita ierobežojumus WDM izmantošanai pasīvajos piekļuves risinājumos, gan daļēji saglabājot, gan izveidojot pilnīgi jaunu infrastruktūru. Atrast izstarotāju minimālo izejas jaudas līmeni dažādu WDM risinājumu drošai darbībai**

Veicot literatūras analīzi un apskatot WDM-PON risinājumu attīstības tendences, ir konstatēts, ka pastāv divas koncepcijas nākamās paaudzes piekļuves tīklu izveidošanai: NGPON1, kas iekļauj sevī eksistējošās infrastruktūras daļējo saglabāšanu, un NGPON2, kas paredz jaunas infrastruktūras izveidošanu. Apskatot un salīdzinot iespējamās realizācijas, bija izvēlēti 3 koncepti WDM-PON attīstīšanai (tab.1.7).

Pirmais no konceptiem ir četrviļņu mijiedarbes efekta izmantošana (FWM WDM-PON). Četrviļņu mijiedarbes efekta pielietošana ir pilnīgi jauns risinājums, kas ļauj sasniegt pārraides ātrumu lejupielādē un augšupielādē līdz 10 Gbit/s katram abonentam. Salīdzinot ar parasto WDM, šeit 16 viļņu garumu ģenerēšanai ir izmantoti tikai 2 lāzeri. Augsti nelinearajā šķiedrā notiek paātrināta četrviļņu mijiedarbība, un rezultātā parādās 16 nesējfrekvences (viļņu garumi), kuras pēc tam ir modulētas. Šajā sistēmā jāņem vērā to, ka lāzeru izejas jaudai jābūt precīzi kontrolētai, jo izmaiņa virs 0.5 dB var pievest pie izejas nesējfrekvenču izejas jaudas palielinātas nevienmērības.

Vispirms ir atrasta optimālā pumpēšanas lāzeru izejas jauda ar minimāli iespējamo četrvīļņu mijiedarbes harmoniku (derīgo kanālu šajā gadījumā) minimālo jaudas neviendabību, mainot pakāpeniski pumpējošo lāzeru jaudu un augsti nelineāras šķiedras garumu. Ņemot vērā to, ka izejas jaudas vērtības šeit ir fiksētās un to izmaiņa pievedīs pie citu kanālu izejas jaudu nestabilitātes, šajā gadījumā BER atkarība ir iegūta no papildus ienestā vājinājuma. Atpakaļ plūsma ir realizēta pēc DWDM-PON principa (att. 3.3.), kur katram abonentam ir savs viļņa garums augšupielādei. Ņemot vērā sākuma nosacījumus:

- Joslas platums – 1 GHz;
- Starpkanālu intervāls - 100 GHz;
- Pumpēšanas frekvences 193.3 un 193.4 THz ;

Apkopojot iegūtos matemātiskās modelēšanas datus ir izdarīti sekojoši secinājumi:

- 8-kanālu ģenerēšanai ar minimālo jaudas starpību 3.25 dB un maksimālo izejas jaudu 13.25 dBm pumpēšanas lāzeru jaudai jābūt vienādei ar 25 dBm un HNLF garums – 1.1 km;
- 16-kanālu ģenerēšanai ar minimālo jaudas starpību 6.76 dB un maksimālo izejas jaudu 13.94 dBm pumpēšanas lāzeru jaudai jābūt vienādei ar 28 dBm un HNLF garums – 1.25 km;
- 32-kanālu sistēmu izveidošana ir problemātiska ar šobrīd eksistējošu lāzeru izejas jaudas un stabilitātes ierobežojumiem;

Iegūts galvenais rezultāts FWM WDM-PON konceptam:

Četrvīļņu mijiedarbes efekta izmantošana pasīvajos piekļuves tīklos ar viļņgarumdales blīvēšanu ļauj izveidot 16 abonentu sistēmu ar 10 Gbit/s ātrumu katram un iespēju to palielināt, pielietojot tikai 2 pumpējošus lāzerus. Pumpējošo lāzeru izejas jaudu rūpīgi jākontrolē 0.5 dB robežās, lai iegūto četrvīļņu mijiedarbs harmoniku izejas jaudas neviendabība būtu minimālā;

Otrais no konceptiem ir domāts eksistējošās infrastruktūras daļējai papildināšanai, ar nosaukumu WDM/TDM-PON. Šis koncepts ir plānots GPON/10GPON modernizēšanai tuvāko 5-gadu laikā. Šajā gadījumā katram abonentam lejupielādē ir savs lāzers. Atšķirībā no citiem konceptiem no NGPON1 ir saglabāta laika blīvēšana augšupielādē izmaksu samazināšanai, kā arī saglabāts sazarotājs. Lejupielādes pārraides ātrums – līdz 10 Gbit/s abonentam, augšupielādes – līdz 1.25 Gbit/s. Attālums bija izvēlēts pēc ITU rekomendācijas – 20 km. Simulāciju stratēģija lejupielādei un augšupielādei bija sekojošā: 16, 32 un 64 kanālu sistēmu matemātiskā modelēšana ir izveidota tā, lai iegūtu minimālo vajadzīgo lāzera jaudu (pēc ārēja modulatora), lai sistēmas BER būtu mazāks par $1 \cdot 10^{-12}$. Lai atrast maksimāli iespējamo abonentu skaitu, eksperimentāli bija iegūts SBS sliekšnis (lai atrast maksimāli iespējamo jaudu, kuru var ievadīt šķiedrā).

Otrais nelābvēlīgs efekts ir frekvences čirps. Šis efekts parādās līdz ar iekšējās modulācijas pielietošanu un palielina zudumus. Čirpa ietekme uz zudumu palielināšanu bija aprēķināta augšupielādes plūsmai.

Iegūtie galvenie rezultāti WDM/TDM-PON konceptam:

- **Modernizējot eksistējošo GPON infrastruktūru, var nodrošināt ātrumu līdz 10 Gbit/s katram abonentam ar $BER < 1 \cdot 10^{-12}$ un attālumu līdz 20 km. Maksimālais abonentu skaits ir ierobežots ar SBS nelineāro efektu līdz 32.**
- **Frekvences čirpa ietekmi noteikti jāievēro sistēmas izveidošanā, jo jaudas zudumu palielināšana WDM/TDM-PON gadījumā sasniedza 5 dB ar čirpa parametra < 10 un $\Delta\lambda = 35$ nm optiski blīvētai līnijai;**

Trešais no konceptiem ir ASE/LED ar spektra sagriešanas pielietošanu. Šajā gadījumā, pielietojot tikai vienu platjoslas trokšņveida ASE-avotu, var iegūt līdz 16 kanāliem. Atpakaļplūsma ir realizēta ar drošām un lētām gaismas diodēm. Šis koncepts ir domāts jaunizveidotiem tīkliem NGPON2 ietvaros, pielietojot vienkāršotas komponentes ar palielinātu drošumu („bezkrāsu” LED un ASE). Šo konceptu var ieviest jau tuvākajā laikā. Atšķirībā no citiem SS-WDM risinājumiem, lejupielādes pārraides ātrums sasniedz 1.25 Gbit/s un augšupielādes – 622 Mbit/s. Ir atrasts optimālais kanāla joslas platums un starpkanālu intervāls 16 abonentu sistēmai. Balstoties uz publikāciju analīzi, ir izvēlēts attālums 10 km dispersijas iedarbības un sagriešanas zudumu dēļ. Pirmo reizi ir izpētīta ASE-avota izmantošana bez izlīdzināšanas filtra spektrālai sagriešanai. ASE-avota plaša spektrālā josla ir „sagriežta”, pielietojot AWG multipleksoru. Iegūtie kanāli pēc tam ir modulēti ar ārējo modulātoru. Lai izveidot sistēmu, vispirms bija atrasts nepieciešams starpkanālu intervāls un joslas platums.

Simulāciju process bija sekojošs: atrādot bilanci starp dispersijas iedarbību un sagriešanas zudumiem, bija noteikta kanāla josla un starpkanālu intervāls visai sistēmai. Pēc tam ASE-avota un LED jauda bija palielināta ar noteikto soli (1 dB), kamēr BER līmenis nepārsniedz $1 \cdot 10^{-10}$. Simulācijas ir izveidotas 8 un 16-kanālu sistēmām, mainot ātrumu no 1 līdz 2.4 Gbit/s un pielietojot izlīdzinātu vai neizlīdzinātu ASE spektru lejupielādei. Augšupielādes trakta gadījumā bija pielietoti ātrumi 322 un 622 Mbit/s bez un ar FEC. Apkopojot starprezultātus:

LED augšupielādes daļai pie joslas platuma 0.9 nm, starpkanālu intervāla 1.6 nm un attāluma 10 km ir iegūti secinājumi:

- 622 Mbit/s ātrums nav iespējams bez FEC pielietošanas (jo minimālā LED izejas jauda ir 5 dBm), bet 311 Mbit/s realizācijā FEC nepielieto;

- 32-kanālu sistēma nav iespējama jaudas trūkuma dēļ. Iespējamais abonentu skaits ir līdz 16;

ASE lejupielādes daļai pie joslas platuma 0.9 nm, starpkanālu intervāla 1.6 nm un attāluma 10 km ir izdarīti sekojoši secinājumi (precizējot ASE avota spektra formu un filtrēšanas īpašības šķiedru optikas pārraides sistēmas laboratorijā):

- Spektrālas joslas trūkuma dēļ (1532-1581 nm) 32-kanālu sistēmas realizācija nav iespējama;
- Spontānās emisijas trokšņu dēļ, kuri samazina jaudas rezervi vismaz uz 10 dB, 2.4 Gbit/s realizācija nav iespējama;
- Izlīdzināšanas filtra pielietošana palielina nepieciešamo ASE minimālo izejas jaudu par 2 dB, bet samazina kanālu jaudas nevienādību līdz 0.5 dB, salīdzinot ar 3.2 dB bez filtra;

Galvenais rezultāts ASE/LED SS-WDM konceptam:

Izmantojot spektrālo sagriešanu ar vienu platjoslas avotu, ir iespējams nodrošināt lejupielādes ātrumu līdz 1.25 Gbit/s un augšupielādes – līdz 622 Mbit/s ar $BER < 1 \cdot 10^{-10}$ LED un abonentu skaitu līdz 16. Optimālais starpkanālu intervāls 1.6 nm un joslas platums - 0.9 nm, nepieciešamā minimālā jauda ASE-avotam ar izlīdzināšanas filtru ir 11 dBm un LED jauda ir -5.8 dBm;

LITERATŪRA

1. Abd El-Naser A. Mohammed, Ahmed Nabih Zaki Rashed, Gaber E. S. M. El-Abyad and Abd El-Fattah A. Saad. High Transmission Bit Rate of A thermal Arrayed Waveguide Grating (AWG) Module in Passive Optical Networks//International Journal of Computer Science and Information Security, 2009. - Vol. 1, No.1. - pp.13-21
2. Agrawal G. Fiber-optic communication systems.Third Edition. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 531 p.
3. Arismar Cerqueira Jr. S., Chavez Boggio J.M., Hernandez-Figueroa H.E., Fragnito H.L., Knight J.C. Highly efficient generation of cascaded Four-Wave Mixing products in a Hybrid Photonic Crystal Fiber // European Conference on Optical Communications – ECOC, 2007. – pp. 16-20
4. Arismar Cerqueira Jr. S., Chavez Boggio J.M., Rieznik A.A., Fragnito H.L., Hernandez-Figueroa H.E., Knight J.C. Highly efficient generation of broadband cascaded four-wave mixing products// Optics Express, 2008. - No.16. – pp. 2816-2828.
5. Arismar Cerqueira Jr. S., Marconi J.D., Gabrielli L.H., Rieznik A.A., Hernandez-Figueroa H.E., Fragnito H.L., Knight J.C. Multi-wavelength source at ITU-T grid based on ultraflattened dispersion photonic crystal fibers // International Journal on Optics, 2008. – No. 2. – pp. 1-5
6. Arismar Cerqueira Jr. S., Marconi J.D., Hernandez-Figueroa H.E., Fragnito, H.L. Broadband cascaded four-wave mixing by using a three-pump technique in optical fibers // Optics Communications , 2009. – No. 282. – pp. 4436–4439.
7. Banerjee A, Park Y, Clarke F., Song H, Yang S., Kramer G., Kim K., Mukherjee B. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review // JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING, 2005. -Vol. 4, No. 11. – pp.737-758
8. Berendt M.O., Arellana W.A., de Faria I., Fragnito H.L. Extended band erbium amplified spontaneous emission source // Lasers and Electro-Optics Europe, 2000. Conference Digest
9. Bock C., Prat J., Walker S.D. Hybrid WDM/TDM PON using the AWG FSR and featuring Centralized Light Generation and Dynamic Bandwidth Allocation, //Journal of Lightwave Technology, 2005. - Vol. 23, Issue 12. - pp. 3981–3988
10. Bock C., Prat J., Walker S.D. Hybrid WDM/TDM PON using the AWG FSR and featuring centralized light generation and dynamic bandwidth allocation // Journal of Lightwave Technology, 2005. – Vol.23, No.12. – pp. 3981- 3988
11. Bock C., Prat, J., Segarra J., Junyent G., Amrani A. Scalable Twostage. Multi-FSR WDM-PON Access Network Offering Centralized Dynamic Bandwidth Allocation// European Conference on Optical Communication, 2004. - Tu4.6.6.
12. Bouchat C, Martin C, E. Ringoot M. Tassent, Van de Voorde I, Stubbe B., Vaes P., Qiu X.Z. and Vandewege J. Evaluation of superPON

- demonstrator//IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, Broadband Access Technologies, 2000. – pp. 25–26
13. Chan L.Y., Chan C.K., Tong D.T.K., Cheung S.Y., Tong F., Chen L.K. Demonstration of Data Remodulation for Upstream Traffic in WDM Access Networks Using Injection-Locked FP Laser as Modulator//Optical Fiber Communication Conference OFC'01, 2001. - WU5-1
 14. Chen J., Wosinska L., M.Machukaca K., Jaeger M., Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures // IEEE Communications Magazine, 2010. – Vol.48, No.2. – pp. 56-65.
 15. Chinlon L. Broadband optical Access Networks and Fiber-to-the-Home. – England:Wiley and Sons, 2006. – 297 p.
 16. Chomycz B. Planning Fiber Optic Networks. - USA: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2009.
 17. Davey R. Options of Future Optical Access Networks // IEEE Communications Magazine, 2006. – Vol.44, No.10.- pp.50-56.
 18. Delavaux J.M.P., Wilson G.C., Hullin C., Beyret B., Bethea C. QAM-PON and Super PON for Access Distribution Networks// OFC Technical Digest, 2001. - paper WN2
 19. Deng N, Chan C.-K., Chen L.-K Lin C. A WDM Passive Optical Network With Centralized Light Sources and Multicast Overlay // IEEE Photonics Technology Letters, 2008.- Vol. 20, No. 2.- pp. 114-116.
 20. Effenberger F.J.,Mukai H., Park S., Pfeiffer T. Next-Generation PON-Part 2:Next Generation PON// IEEE Communications Magazine, 2009. - Vol.47, No.11. -pp. 50-57
 21. Farmer O.James, Bourg K. Practical deployment of Passive Optical Networks // IEEE Communications Magazine, 2008. - Vol.46, No.7. –pp. 136-145.
 22. Frigo N.J. A Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network with Cost-Shared Components// IEEE Photonics Technology Letters, 1994. - Vol. 6. - pp. 1365 -1367
 23. Frigo N.J., Iannone P.P., Reichmann, K.C. A view of fiber to the home economics// IEEE Communications Magazine, 2004. – Vol.42, Issue 8. - 16-23. pp.
 24. Gutierrez D., K.S. Kim, Rotolo S., An F.T., Kazovsky L. G. FTTH Standards, Deployments and Research Issues// Proceedings of JCS, 2005.- pp.1358-1361
 25. Gutierrez D., Shaw W.T., An F.T., Kim K.S. Next Generation Optical Access Networks// Broadband Communications, Networks and Systems, 2006. –pp. 1-10
 26. Han K.H., Son E. S., Choi H. Y., Lim K. W., Chung Y. C. Bidirectional WDM PON Using Light Emitting Diodes Spectrum-Sliced With Cyclic Arrayed-Waveguide Grating //IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2004. -Vol. 16, No. 10. – pp. 2380 - 2382
 27. Huang W.C., Wai P.K.A., Tam. H.Y., Dong X.Y., Xie H.M., Xie J.P. One-stage erbium ASE source with 80 nm bandwidth and low ripples // Electronics Letters, 2002.- Vol.38, No. 17. – pp.956-957.

28. Hutcheson L. FTTx: Current Status and the Future // IEEE Communications Magazine, 2008. - Vol.46, No.7. - 90-95. pp.
29. IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile, 2004
30. IEEE 802.3av. 10 Gbit/s Ethernet Passive Optical Network, 2009
31. Inoue Y., Kaneko A., Hanawa F., Hattori K., Sumida K. A thermal Silica-Based Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer // Electronics Letters, 2004. - Vol. 33, No. 23. - pp. 5-7
32. ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, 2009
33. ITU-T G.694.1 Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 2002
34. ITU-T G.959.1 Optical transport networks physical layer interfaces, 2009
35. ITU-T G.983.1 Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON), 1998
36. ITU-T G.983.2 ONT management and control interface specifications for ATM PON, 2000
37. ITU-T G.983.3 A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation, 2001
38. ITU-T G.984.1 Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics, 2003
39. ITU-T G.984.2 Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification, 2003
40. ITU-T G.984.3 Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Transmission convergence layer specification, 2004
41. Jung D. K., Shin S. K., Lee C.-H., Chung Y. C. Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Network Based on Spectrum-Slicing Techniques // IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 1998. - Vol. 10, No. 9. – pp. 1334 - 1336
42. Jung D.K..Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Network Based on
43. Kaneko A., Kamei S., Sugita A.A. A thermal Silica-Based Arrayed-Waveguide Grating (AWG) Multi/Demultiplexer With New Low Loss Groove Design// Electronics Letters, 2005. - Vol. 36, No. 4. - pp. 318–319
44. Kani J., Teshima M., Akimoto K, Takachio N, Suzuki H., and Iwatsuki K.. A WDM-based optical access network for wide-area gigabit access services// IEEE Optical Communications Magazine, 2003. - Vol. 41/2. - pp. S43 - S48
45. Kani J.I., Bourgart F., Cui A., Rafel A., Roudrigues S. Next-Generation PON-Part 1:Technology Roadmap and General Requirements// IEEE Communications Magazine, 2009. - Vol.47, No.11. –pp.50-57.
46. Kani J.I., Effenberger F.J., Mukai H., Raszovitz-Wiech M. Next-Generation PON-Part 3: System Specifications for XG-PON// IEEE Communications Magazine, 2009. - Vol.47, No.11. - pp. 58-64.
47. Kim H. D., Kang S.-G., Lee C.-H. A low-Cost WDM Source with an ASE Injected Fabry–Pérot Semiconductor Laser // IEEE Photonics Technology Letters, 2000. - Vol. 12, No. 8. - pp. 1067–1069

48. Kim J., Mun S., Lee H. and Lee C. Self-Restorable WDM-PON With a Color-Free Optical Source // Optical Communication Networks, 2009. - Volume 1.- pp. 565-570 .
49. Kokubun Y., Funato N., Takizawa M. A thermal Waveguide for Temperature-Independent Lightwave Devices // IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2002. - Vol. 5, No. 4. - pp. 1297–1300
50. Kyeong Soo Kim. On the evolution of PON-based FTTH solutions//Information Sciences, 2003. - Vol. 149/1-2. - pp. 21-30
51. Lam C. Passive Optical Networks. – UK: Elsevier's Science & Technology, 2007. – 324 p.
52. Ļašuks I. Investigation of Colorless WDM-PON Using a Broadband ASE-Source // Electronics and Electrical Engineering, 2009. - No.6. – pp. 43-46
53. Ļašuks I. The evaluation of 16-channel Hybrid ASE and LED WDM-PON// Electronics and Electrical Engineering, 2011. – No. 6(112). – pp. 33-36
54. Ļašuks I., Ivanovs Ģ., Ščemeļevs A. A Hybrid TDM/WDM PON System with FWM-Generated Source of Multiwavelength Optical Signals // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2010. - Vol. 5. - pp. 3-14
55. Ļašuks I., Ozoliņš O., Ščemeļevs A. Investigation of Spectrum-Sliced WDM System // Electronics and Electrical Engineering, 2008.- No.5. –pp. 45-48.
56. Ļašuks I. FTTH Upgrade to WDM-PON // RTU 50th Scientific Conference, Papers, Latvia, Rīga, 14.-16. October, 2009. - pp 69-71
57. Leeson M.S., Luo B., Robinson A.J. Spectral Slicing for Data Communications // Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2006.
58. Nowak D., Murphy J. FTTH: The Overview of Existing Technologies// Opto-Ireland, 2005. - Vol. 5825. - pp. 500-509
59. Prat J. Next-Generation FTTH Passive Optical Networks. - USA: Springer Science+Business Media, 2008. - 232 p.
60. RSoft Design Group. OptSim 4.6 Models Reference Volume I Sample Mode. - RSoft Design Group, 2006. –507 p.
61. RSoft Design Group. OptSim 4.6 Models Reference Volume II Block Mode. - RSoft Design Group, 2006. – 632 p.
62. RSoft Design Group. OptSim 4.7 User Guide. - RSoft Design Group, 2006. - 381 p.
63. Ščemeļevs A., Poriņš J. BER Performance of a Lumped Single-pump Fiber Optical Parametric Amplifier in a 10 Gbits 4-channel S-band DWDM System // Electronics and Electrical Engineering, 2009. – No. 5(93). – pp. 11-14.
64. Shea D.P., Mitchell J.E. Operating Penalties in Single-Fiber Operation 10-Gb/s, 1024-Way Split, 110-km Long-Reach Optical Access Networks // IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2006. - Vol. 18, No. 23. – pp. 2463 - 2465
65. Shin D.J., et-al. Hybrid WDM/TDM-PON for 128 subscribers using λ -selection-free transmitters, Optical Fiber Conference, 2004, - PDP4

66. Shin D.J., Jung D.K., Shin H.S., Kwon J.W., Hwang S., Oh Y., Shim C. Hybrid WDM/TDM PON with wavelength-selection-free transmitters //IEEE Journal of Lightwave Technologies, 2005. - Vol.23. – pp. 187 - 195
67. Shinohara H. Broadband access in Japan: rapidly growing FTTH market // IEEE Communication Magazine, 2005. - pp.72–78
68. Stamatios V. Kartalopoulos. Next Generation Intelligent Optical Networks. – USA: Springer Science+Business Media, 2008. – 284 p.
69. Voorde V., Martin C., Vandewege J, Qiu X.Z.. The SuperPON demonstrator:an exploration of possible evolution paths for optical access networks // IEEE Communication Magazine, 2000. – No.2., Vol.38. - pp. 74–82
70. Wellen J. High-speed FTTH technologies in an open access platform—the European MUSE project // Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home. - John Wiley & Sons, 2006. - pp. 139–166.
71. Иванов А.Б. Волоконная Оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – Москва: Syrus systems, 1999.- 671 с.
72. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – Москва: Техносфера. 2004 – 495 с.