



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Ingrida Jokūbaitė

**SPEKTRO PASKIRSTYMO ELASTINIUOSE OPTINIUOSE
TINKLUOSE EFEKTYVUMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Paulius Tervydis

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA

SPEKTRO PASKIRSTYMO ELASTINIUOSE OPTINIUOSE
TINKLUOSE EFEKTYVUMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 612H64001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Paulius Tervydis
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Rūta Jankūnienė
(data)

Projektą atliko

(parašas) Ingrida Jokūbaitė
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Ingrida Jokūbaitė

(Studento vardas, pavardė)

Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Spektro paskirstymo elastiniuose optiniuose tinkluose efektyvumo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 26 d.
_____ Kaunas _____

Patvirtinu, kad mano **Ingridos Jokūbaitės** baigiamasis projektas tema „Spektro paskirstymo elastiniuose optiniuose tinkluose efektyvumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Jokūbaitė, Ingrida. Spektro paskirstymo elastiniuose optiniuose tinkluose efektyvumo tyrimas. Telekomunikacijų inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Paulius Tervydis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Telekomunikacijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *EON, Spektrinis efektyvumas, QPSK moduliacija, lankstus tinklelis, C dažnių juosta, 10 Gbps, 40 Gbps ir 100 Gbps*

Kaunas, 2017. 47 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe supažindinama su EON koncepcija ir veiksniais lėmusiais jos plėtrą. Taip pat tiriamas signalų spektras optinėje ryšio linijoje perduodant duomenis 10 Gbps, 40 Gbps ir 100 Gbps spartomis. Gautos Q faktoriaus priklausomybės nuo perdavimo atstumo, atskyrimo tarp kanalų Δf verčių ir bitų perdavimo spartos leidžia įvertinti kaip arti vienas kito galima formuoti kanalus, jog duomenų perdavimas būtų vykdomas su pageidautinu kokybės lygiu BER 10^{-12} , kurį atitinka Q faktoriaus vertė = 7, bei koku atstumu įmanomas duomenų perdavimas išlaikant nustatytą kokybės lygį. Signalų kokybei vertinti buvo pasirinktos signalo žvaigždyno diagramos.

Jokūbaitė, Ingrida. Investigation of Spectrum Allocation Efficiency in the Elastic Optical networks. Master's thesis in Telecommunications engineering master degree / supervisor assoc. prof. Paulius Tervydis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: EON, Spectral Efficiency , QPSK modulation, flexible grid, C band, 10 Gbps, 40 Gbps and 100 Gbps.

Kaunas, 2017. 47 p.

SUMMARY

This Master thesis was written to introduce with the conception of EON and main drivers for developing the EON paradigm. Also spectral resource is studied when data bit rates reach 10 Gbps, 40 Gbps or even 100 Gbps. Results of Q factor relationship with optical reach, gap between channels Δf and demanded bit rates show how close to each other could be new channels formed in the flexible grid, that quality of data transmission wouldn't be worse than BER 10^{-12} . This level of the quality corresponds to Q factor = 7. Also it's possible to say what maximum optical reach is available at each condition. To determine the quality level of the signals at the receiver end constellation diagrams were used.

TURINYS

ĮVADAS	6
1 EON TINKLŲ ANALIZĖ	8
1.1 EON vystymąsi lemiantys veiksniai	8
1.2 EON standartizavimas	9
1.3 EON jungtinio kanalo sąvoka	10
1.4 Spektro paskirstymas prisitaikantis prie atstumo.....	11
2 OPTINIO SIGNALO CHARAKTERISTIKOS IR JAS ĮTAKOJANTYS VEIKSNIAI	13
2.1 Moduliacijų schemas	13
2.2 Kanalo pralaidumas	14
2.3 Netiesiniai efektai, pasireiškiantys optinėje skaiduloje	16
2.3.1 Keturbangis susimaišymas	16
2.3.2 Savosios fazės moduliacija ir abipusė fazių moduliacija	17
2.3.3 Skatintosios Brijueno ir Ramano skaidos	18
2.4 Priimamo signalo kokybės charakteristikos.....	19
3 SPEKTRO PASKIRSTYMO EON TYRIMAS	21
3.1 Imitacinių modelių aprašymas	21
3.2 Pradinės sąlygos.....	22
3.3 Optinio spektro panaudojimo tyrimas.....	23
3.3.1 Skirtingų spartų signalų spektrai	23
3.3.2 Optinio spektro tyrimas, kai R=40 Gbps.....	26
3.3.3 Optinio spektro tyrimas, kai R=100 Gbps.....	32
3.3.4 Optinio spektro tyrimas, kai R=10 Gbps.....	37
3.3.5 Netiesinių efektų įtaka	39
3.3.6 Kanalų formavimas EON tinkluose.....	42
IŠVADOS.....	45
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	46
PRIEDAI	Klaida! Žymelė neapibrėžta.

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

BER	Klaidingų bitų santykis (angl. <i>Bit Error Rate</i>)
CD	Chromatinė dispersija (angl. <i>Chromatic Dispersion</i>)
CWDM	Stambaus sutankinimo WDM (angl. <i>Coarse WDM</i>)
DP-QPSK	Dvigubos poliarizacijos kvadratūrinė fazinė manipuliacija (angl. <i>Dual-polarization quadrature phase shift keying</i>)
DSF	Paslinktosios dispersijos optinės skaidulos (angl. <i>Dispersion-shifted fiber</i>)
DWDM	Smulkaus sutankinimo (angl. <i>dense WDM</i>)
EON	Elastinis optinis tinklas (angl. <i>Elastic Optical Network</i>)
FWM	Keturbanis susimaišymas (angl. <i>Four Wave Mixing</i>)
NDSF	Skaidulos su nepaslinktąja dispersija (angl. <i>Non Dispersion-shifted Fiber</i>)
OOK	Intensyvumo keitimas (angl. <i>On-Off Keying</i>)
OSNR	Optinio signalo ir triukšmo santykis (angl. <i>Optical Signal to Noise Ratio</i>)
PMD	Poliarizacijos modų dispersija (angl. <i>Polarization-Mode Dispersion</i>)
PSK	Fazės keitimo moduliacija (angl. <i>Phase Shift Keying</i>)
QAM	Kvadratūrinė amplitudinė moduliacija (angl. <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>)
SBS	Skatinamoji Brijueno sklaida (angl. <i>Stimulated Brillouin Scattering</i>)
SLICE	Padalinto spektro elastinis optinis kelias (angl. <i>Spectrum-sliced elastic optical path</i>)
SNR	Signalų ir triukšmo galių santykis (angl. <i>Signal to Noise Ratio</i>)
SPM	Savosios fazės moduliacija (angl. <i>Self Phase Modulation</i>)
SRS	Skatinamoji Ramano sklaida (angl. <i>Stimulated Raman Scattering</i>)
WDM	Bangos ilgių sutankinimas (angl. <i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
WSS	Bangos ilgio parinkimo komutatorius (angl. <i>Wavelength Selective Switch</i>)
XPM	Abipusė moduliacija (angl. <i>Cross-Phase Modulation</i>)

IVADAS

Intensyvus Interneto srauto augimas smarkiai paveikė optinio ryšio perdavimo technologijų raidą. „Cisco Systems Inc.“ duomenimis [1] 1992 metais, t. y. daugiau nei prieš 20 metų internetu perduodamų duomenų kiekis sudarė 100 GB per dieną. Per 10 metų šis skaičius išaugo iki 100 Gbps, 2015 metais perduodamų duomenų kiekis pasiekė 20.000 Gbps. „Cisco Systems Inc.“ specialistai prognozuoja jog 2020 metais Interneto srautas turėtų augti dar bent tris kartus ir pasiekti 61.386 GBps.

Viena pagrindinių magistraliniuose optiniuose tinkluose taikomų technologijų yra bangos ilgių sutankinimas (angl. *Wavelength Division Multiplexing* (WDM)). Per paskutinius porą dešimtmečių ši optinio ryšio perdavimo technologija iš praeityje naudotos stambaus sutankinimo (angl. *coarse WDM* (CWDM)) peraugo į šiandien plačiai naudojamą smulkaus sutankinimo (angl. *dense WDM* (DWDM)).

DWDM sistemose optiniai signalai perduodami C (1530 nm – 1565 nm) ir L (1565 nm – 1625 nm) bangų ilgių juostose [2] naudojant tipinę 100 GHz arba 50 GHz atskirtį tarp kanalų. Priklausomai nuo optinio ryšio sistemoje naudojamo kanalų kiekio ir pasirinktos moduliacijos schemos galima užtikrinti iki 10 Gbps, 40 Gbps ar 100 Gbps duomenų perdavimo spartą. Tačiau atsižvelgiant į ateityje prognozuojamus duomenų perdavimo spartos poreikius, interneto prieinamumo augimą, įrenginių, turinčių prieigą prie interneto, kiekio didėjimą bei platų teikiamų paslaugų spektrą [1] ieškoma technologinių sprendimų leidžiančių užtikrinti ne tik didesnes nei 100 Gbps duomenų perdavimo spartas bet ir efektyvesnę optinio signalo spektro panaudojimą.

Šios problemos sprendimui siūloma elastinio optinio tinklo (angl. *Elastic Optical Network* (EON)) koncepcija [3]. Kaip vienas pagrindinių EON privalumų išskiriama tai, jog šio tipo optiniuose tinkluose spektro optimizavimas įgyvendinamas efektyviau išnaudojant optinio spektro resursus. Kitaip tariant EON tipo tinkluose naudojamas mažesnis kanalų atskyrimas, todėl jie gali būti išdėstyti arčiau vienas kito, taip atlaisvinama neišnaudojamo optinio spektro dalis ir padidinamas tinklo talpumas.

Kalbant apie spektro efektyvumo didinimą mažinant atskyrimą tarp skirtingų optinių kanalų svarbu atkreipti dėmesį į netiesinius optinius efektus, kurie gali atsirasti optinėje skaiduloje ir turėti neigiamą įtaką signalo perdavimo kokybei. Nuo optinės galios, bangos ilgio bei laikinių charakteristikų priklauso šie parametrai: Skatinamoji Brijueno sklaida (angl. *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS)), savosios fazės moduliacija (angl. *Self Phase Modulation* (SPM)) ir abipusė moduliacija (angl. *Cross-Phase Modulation* (XPM)). Prie netiesinių efektų taip pat priskiriami nuo optinės galios ir bangos ilgio priklausantys keturbangis susimaišymas (angl. *Four Wave Mixing* (FWM)) ir skatinamoji Ramano sklaida (angl. *Stimulated Raman Scattering* (SRS)).

Darbo tikslas — pasiūlyti ir įvertinti metodą, kuris leistų efektyviau išnaudoti optinį spektrą EON tinkluose, atsižvelgiant į signalo perdavimo kokybės rodiklius.

Darbo uždaviniai:

- atlikti mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjamas spektro paskirstymas EON tinkluose, analizę ir optinio signalo sklidimą įtakojančių netiesinių efektų apžvalgą.
- atlikti imitacinį modeliavimą, kuris leistų įvertinti kaip išnaudojamas optinis spektras perduodant skirtingų spartų signalus.
- iširti, kokią įtaką optinio signalo sklidimui ir optiniam spektrui daro netiesiniai efektai.
- pasiūlyti metodą, kuris leistų efektyviau paskirstyti EON tinkle bangų ilgių resursus, atsižvelgiant į signalo perdavimo atstumą ir kokybę

1 EON TINKLŲ ANALIZĖ

Dabartiniuose magistraliniuose optiniuose tinkluose, kurie remiasi WDM technologija, optiniai signalai išdėstomi naudojant fiksuotą atskyrimą tarp kanalų. ITU-T G.694.1 standartas [4] apibrėžia, jog DWDM sistemose kanalų atskirtis gali būti 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz arba 100 GHz. Kitas svarbus WDM technologijos aspektas yra tai, jog moduliacijos schema optiniam signalui parenkama pagal pageidaujama bitų perdavimo spartą neatsižvelgiant į duomenų perdavimo atstumą. Iki šiol optinio tinklo talpumo didinimo buvo siekiama gerinant spektrinį efektyvumą, t. y. didinant kanalų perduodamų bitų kiekį tuo pačiu siekiant išlaikyti esamus arba netgi mažinant tarpus tarp gretimų perdavimo kanalų [3]. Tyrinėtojai pastebėjo ir išreiškė abejones dėl tolimesnių galimybių didinti esamų optinių tinklų talpumą, todėl per pastaruosius metus mokslininkų ir tyrinėtojų dėmesys yra nukreiptas į EON koncepciją, leidžiančią adaptyvų spektro resursų išskyrimą ryšio linijoje priklausomai nuo duomenų apimtys bei duomenų perdavimo atstumo.

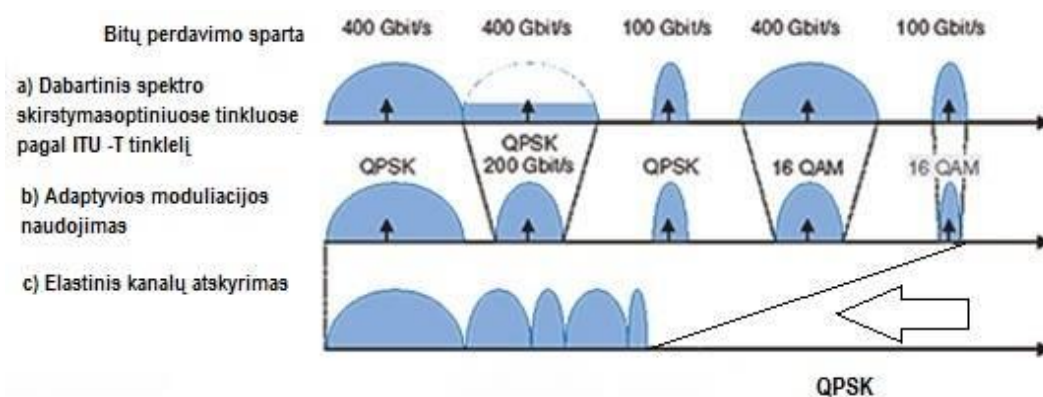
1.1 EON vystymąsi lemiantys veiksniai

Vienu iš pagrindinių veiksnių, lemiančių EON vystymąsi yra poreikis didinti kanalų pralaidumą. Dažnių juosta, kuri yra reikalinga perduoti duomenis 400 Gbps, 1 Tbps ar didesne sparta netelpa į šiuo metu naudojamą fiksuotą ITU tinklą (angl. *fixed grid*) [5]. Tačiau tai nereiškia, kad didelės spartos srautai negali būti perduodami. Norint perduoti 400 Gbps srautą jis išskirstomas į mažesnius 100 Gbps ar 200 Gbps srautus, kurie telpa fiksuotame tinklėlyje. Ši metodika yra žinoma, kaip atvirkštinis sutankinimas (angl. *inverse multiplexing*). EON tinkluose, kur siūloma naudoti lankstų tinklą (angl. *flexible grid*) šios problemos nebeliktų, nes kiekvienam duomenų srautui priklausomai nuo perdavimo spartos būtų išskirtas reikalingas dažnių juostos plotis. Turint galvoje, jog 100 Gbps ir didesnės duomenų perdavimo spartos bus palaikomos tame pačiame tinkle tampa aktualu kiekvienam srautui reikalingą dažnių juostos plotį išskirti atsižvelgiant į duomenų perdavimo spartą bei perdavimo atstumą.

Kitas svarbus veiksnys yra greta esančių kanalų atskyrimo mažinimas. Koherentinių signalų aptikimo (angl. *coherent signal detection*) technologija, skaitmeninis signalų apdorojimas (angl. *digital signal processing*) [6] ir moduliacijos schemos pasižyminčios geresniu spektriniu efektyvumu parinkimas, kai perduodama 2 ar daugiau bitų per simbolį, leidžia mažinti atskyrimą tarp gretimų kanalų. Šiuo atveju atlaisvinamas neišnaudotas spektras ir kartu gerinamas spektro paskirstymo efektyvumas. Koherentinių signalų aptikimo (angl. *coherent signal detection*) technologijos naudojimas imtuvuose leidžia priimti įvairių moduliacijų signalus t.y. DPSK, 8PSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM. Šių signalų fazės ir poliarizacijos aptikimas perkeliamas iš optinių elementų į skaitmeninius (angl. *digital domain*) [7]. Tai supaprastina optinio signalo priėmimą, kai jis koduotas

naudojant kelių dimensijų moduliacijos schemas ir leidžia užtikrinti didesnes perdavimo spartas bei talpumą. Kitas šios technologijos privalumų yra, tai, jog skaitmeninis koherentinis aptikimas leidžia kompensuoti tiesinių efektų neigiamą įtaką optinėje skaiduloje. Optinis signalas sklisdamas ryšio linijoje labiausiai nukenčia nuo chromatinės dispersijos (angl. *Chromatic Dispersion (CD)*) ir poliarizacijos modų dispersijos (angl. *Polarization-Mode Dispersion (PMD)*) [7].

1.1.1 pav. matome, kad 400 Gbps spartai ryšio linijoje užtikrinti reikalingas spektro plotis sumažėja, kai signalas moduluojamas naudojant 16 QAM schemą. Kitas pavyzdys rodo, spektro pločio poreikį, kai perdavimo sparta yra 100 Gbps.



1.1.1 pav. Atskyrimo tarp kanalų mažinimas [3]

Iš pateiktų pavyzdžių matome, kad duomenų perdavimui 400 Gbps sparta reikalingas spektro plotis yra didesnis nei spektras reikalingas duomenų perdavimui 100 Gbps. Esant mažesnėms nei 100 Gbps perdavimo spartos reikalingas spektro plotis dar mažėja. Todėl spektro išskyrimas priklausomai nuo norimos duomenų perdavimo spartos yra efektyvesnis būdas, nei signalų perdavimui naudoti fiksuotą tinklą (angl. *fixed grid*).

1.2 EON standartizavimas

EON koncepcija pirmą kartą buvo pademonstruota 2008 metais. Šio optinio tinklo idėją pasiūlė *Nippon Telegraph and Telephone* korporacija. Tiesa pirminė naujos kartos optinio tinklo architektūra vadinosi padalinto spektro elastinis optinis kelias (angl. *Spectrum-sliced elastic optical path (SLICE)*) [11]. Vėliau dėl paprastumo buvo pasiūlytas EON pavadinimas.

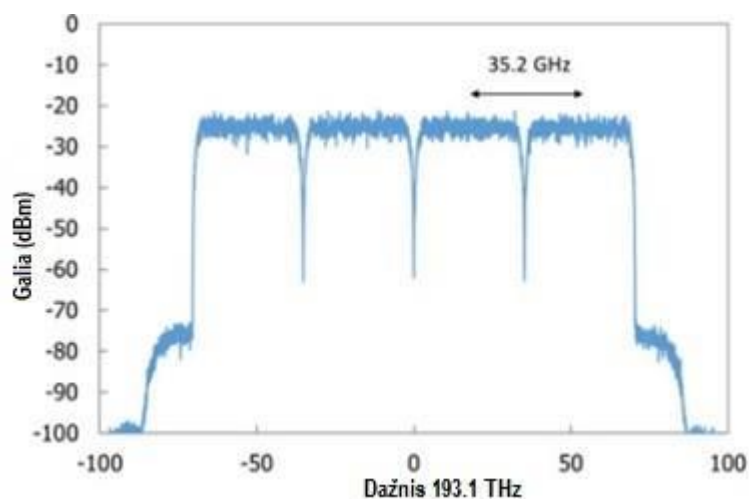
Norint įgyvendinti adaptyvų optinio spektro resursų skirstymą buvo būtina pradėti EON standartizavimą. Pirmi žingsniai žengti 2012 metais, kai ITU-T atnaujino G 694.1 rekomendaciją, įtraukiant lankstaus tinklo (angl. *flexible grid*) sąvoką ir pristatant dažnių ruožo (angl. *slot*) apibrėžimą.

Tinklelis buvo formuojamas naudojant nominalią centrinio dažnio vertę 193,1 THz bei pridėdant arba atimant 6,25 GHz kartotinio vertę, o dažnių ruožo plotis buvo apibrėžtas 12,5 GHz kartotiniu [4]. Priežastis dėl kurios buvo pasirinkta būtent 6,25 GHz vertė aiškinama, jog bet koks

dažnių ruožo plotis, kuris yra 12,5 GHz kartoninis būtų efektyviai užpildytas.

1.3 EON jungtinio kanalo sąvoka

EON tinkluose pristatoma nauja sąvoka – jungtinis kanalas (angl. *Superchannel*). Tai gana arti vienas kito esančių kanalų grupė. Optiniai signalai yra moduluoti ir sutankinti kartu panaudojant aukštą spektro efektyvumą, o šių signalų perdavimas bei maršrutizavimas optiniame tinkle nuo pražios iki pabaigos vykdomas signalų neatskiriant [8]. Metodai, leidžiantys atskyrimą tarp optinių kanalų priartinti prie Naikvisto juostos (angl. *Nyquist bandwidth*) priskiriami prie jungtinių kanalų perdavimo sistemų. 1.3.1 pav. yra pateikta jungtinio kanalo koncepcija.



1.3.1 pav. Jungtinio kanalo koncepcija [5]

Naikvisto WDM (angl. *Nyquist WDM*) bei Co-OFDM (angl. *Coherent optical OFDM*) metodai pasižymi aukštu spektro išnaudojimo efektyvumu, todėl gali būti naudojami jungtinių kanalų formavimui. Co-OFDM atveju atskirtis tarp kanalų, sudarančių jungtinį kanalą, arba kitaip vadinamų ponešlių (angl. *subcarrier*), yra lygi simbolių perdavimo spartai (angl. *baud-rate*). Nors iš pirmo žvilgsnio tai labai efektyvu, tačiau naudojant šį metodą reikalinga plati Tx/Rx elektrinė juosta, o tai gana sunku įgyvendinti remiantis [10] pateikiama informacija. Visgi šis metodas rekomenduojamas esant mažai simbolių perdavimo spartai.

Kai simbolių perdavimo sparta yra aukštesnė nei 27,75 Gbaud, labiau tinkamu metodu formuoti jungtiniam kanalui laikomas Naikvisto WDM [9]. Šiuo atveju ponešlių persidengimas sumažinamas vykdant ponešlio spektrinį formavimą Tx dalyje bei išlaikant kompromisą tarp talpumo ir sistemos veikimo efektyvumo praplečiant arba sumažinant atstumus tarp ponešlių. Formuojant jungtinį kanalą rekomenduojama išlaikyti nedidelį jį sudarančių ponešlių skaičių.

Spektro panaudojimo efektyvumui EON tinkluose iliustruoti galima pateikti šaltinyje [8] nagrinėjamą pavyzdį. Skirtumas tarp simbolių perdavimo spartos ir spektro skirto optinių signalų perdavimui naudojant dvigubos poliarizacijos kvadratūrinę fazinę manipuliaciją (angl. *Dual-*

polarization quadrature phase shift keying (DP-QPSK)) DWDM sistemose su 50 GHz atskyrimu tarp kanalų parodo teorinį spektro paskirstymo efektyvumą. Pasirinkus nulinio faktoriaus Naikvisto (angl. *Nyquist*) filtravimą ir turint galvoje tai, jog simbolių perdavimo sparta yra 32 Gbaud, gausime 56 % procentais efektyvesnį spektro panaudojimą EON ($50 \text{ GHz} / 32 \text{ GHz} = 1,56$). Atsižvelgus į šiuos duomenis matoma, jog C juostoje vietoj 96 galima sutalpinti 150 kanalų su 32 GBaud simbolių perdavimo sparta.

Tuo tarpu praktikoje kalbant apie spektro išnaudojimo efektyvumą EON dėl techninių bangos ilgio parinkimo komutatoriaus (angl. *Wavelength Selective Switch* (WSS)) apribojimų tarp gretimų jungtinių kanalų reikalingas apsauginis intervalas (angl. *guard band*). Spektro paskirstymo efektyvumo pagerinimas priklauso nuo jungtinių kanalų sudarančių kanalų skaičiaus – m . Konservatyvaus spektro padalijimo atveju nagrinėjant tą pačią anksčiau aptartą DWDM sistemą jungtiniam kanalui būtų išskirta 50 GHz užimantis dažnių ruožas (angl. *slot*) su $m = 1$, o apsauginiam intervalui paliekant 18 GHz ($50 \text{ GHz} - 32 \text{ GHz}$). Darant prielaidą, kad minimalus apsauginis intervalas tarp atskirų dažnių ruožų yra ne mažesnis nei 18 GHz, o dažnių ruože mažiausias galimas padalijimas (angl. *granularity*) yra 12,5 GHz, minimalus reikiamas dažnių ruožas išreikštas gigahercais yra S :

$$S = \min\{12.5n | (32m + 18) \leq 12.5n, n \in N\} \quad (1)$$

kur n yra natūralusis skaičius. Remiantis šia skaičiavimo logika 400 Gbps ir 1 Tbps jungtinis kanalas gali būti sutalpintas 150 GHz ir atitinkamai 350 GHz užimančiuose dažnių ruožuose. Po tokių jungtinių kanalų suformavimo spektro skirstymo efektyvumas išaugtų 33% bei 48 %.

1.4 Spektro paskirstymas prisitaikantis prie atstumo

Dar vienas EON tinkluose pasiūlytų sprendimų, leidžiančių efektyviau paskirstyti spektrą yra adaptyvus spektro paskirstymas prisitaikantis prie atstumo (angl. *Distance Adaptive Spectrum Allocation*). Jis remiasi idėja, jog duomenims mažais atstumais perduoti gali būti parenkama aukštesnio lygmens moduliacijos schema, pasižyminti aukštesniu spektro panaudojimo efektyvumu [8]. Modernios skaitmeninės koherentinės (angl. *digital coherent*) technologijos taikymas optiniuose tinkluose leidžia aptikti įvairių moduliacijų optinius signalus naudojant vieno tipo optinį siūstuvą.

Remiantis [9,10] šaltiniuose vykdomais tyrimais galima teigti, jog aukštesnio lygmens moduliacijos schemas naudojimas trumpesniems jungtiniams kanalams leidžia pasiekti didesnę duomenų perdavimo spartą ryšio linijoje arba lemia siauresnį jungtiniam kanalui reikalingo dažnių ruožo užėmimą. Tai reiškia, jog optinių signalų perdavimui naudojant 8 QAM, 16 QAM ar 64 QAM moduliacijos schemas ir įvairias simbolių perdavimo spartas 32 ar 43 GBaud, nešlio (angl. *carrier*) perduodamų bitų sparta nuo 100 Gbps gali išaugti iki 200 Gbps arba net 400 Gbps, kai perdavimo atstumai yra nedideli. Kita vertus duomenų perdavimui 400 Gbps sparta reikalingas dažnių ruožas

panaudojant aukštesnę moduliacijos schemą gali būti sumažintas nuo 150 GHz iki 50 GHz. Svarbu paminėti, jog šis moduliacijos parinkimo būdas daugiau privalumų teikia mažesniuose optiniuose tinkluose. Natūralu, jog didelės geografinės zonas užimančiuose optiniuose tinkluose bus naudojamos žemesnės QAM moduliacijos schemas.

2 OPTINIO SIGNALO CHARAKTERISTIKOS IR JAS ĮTAKOJANTYS VEIKSNIAI

Šiame skyriuje atliekama optiniuose tinkluose naudojamų moduliacijos schemų apžvalga, nagrinėjami netiesiniai efektai, bei aptariami pagrindiniai optinių signalų kokybę nusakantys parametrai, kuriais bus remiamasi tiriamojoje dalyje.

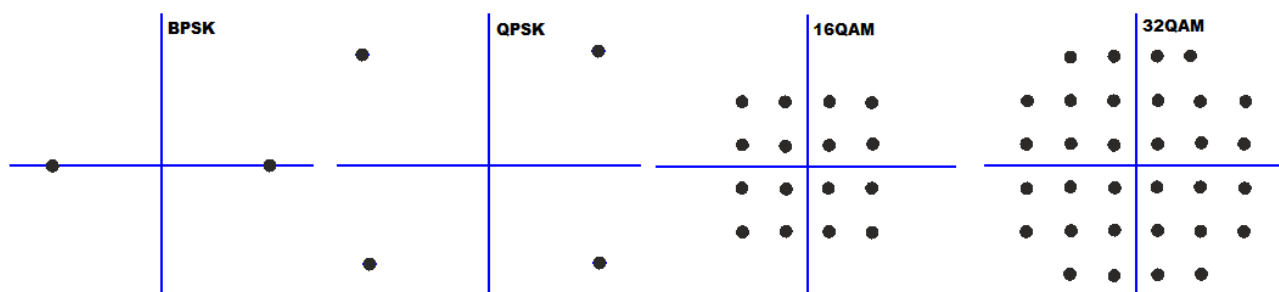
2.1 Moduliacijų schemas

Optinėse ryšio linijose norint perduoti elektrinio signalo duomenis, siūstuve esančio šviesos šaltinio spinduliuojama šviesa turi būti moduluojama. Tam naudojamos įvairios moduliacijos schemas. Senesnėse DWDM sistemose viena pagrindinių moduliacijų yra intensyvumo keitimas (angl. *On-Off Keying* (OOK)) [14]. Šiuo atveju kai norima perduoti loginį 1 šviesos šaltinis įjungiamas, kai norima perduoti loginį 0 – šviesos šaltinis turi būti išjungiamas. Atsiradus poreikiui didinti duomenų perdavimo spartą kanale, nuo 40 Gbps iki 100 Gbps ir daugiau, optiniuose tinkluose pradėtos naudoti ir sudėtingesnės moduliacijų schemas. Šiuolaikinėse sistemose pradėta naudoti aukštesnio lygio fazės keitimo (angl. *Phase Shift Keying* (PSK)) moduliacijas ir skirtingų lygmenų kvadratūrinės amplitudines moduliacijas (angl. *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)).

Tarpusavyje PSK ir QAM moduliacijų variacijos skiriasi spektriniu efektyvumu. Nagrinėjant binarią fazės keitimo moduliaciją PSK, kiekvienas simbolis atitinka 0 arba 1. Šiuo atveju perduodamas 1 bitas per simbolį ir 2 skirtingi signalo elementai (angl. *signal elements*). Tačiau per simbolį perduodamų bitų kiekį galima nesunkiai padidinti. Kvadratūrinės fazės keitimo moduliacijos atveju naudojami 4 skirtingi fazės pokyčiai (angl. *phase shifts*) dėl to per simbolį perduodamų bitų skaičius išauga iki 2. Kiti PSK moduliacijos tipai bitams perduoti naudoja dar daugiau fazės pokyčių, pavyzdžiui 8 PSK atveju 8 fazės pokyčių registravimas padeda perduoti 3 bitus per simbolį. [15]

Kvadratūrinės amplitudinės moduliacijos schemose skirtingiems bitų kiekiams perduoti naudojamas rinkinys skirtingų amplitudžių lygių ir fazių pokyčių. 16 QAM leidžia perduoti 4 bitus per simbolį, 32 QAM atveju per simbolį perduodamų bitų skaičius išauga iki 5. Dėl šios priežasties aukštesnio lygio moduliacijos leidžia duomenis perduoti didesnėmis nei 40 Gbps spartomis.

Fazės ir amplitudės pokyčius naudojamus signalams koduoti skirtingose moduliacijos schemose geriausiai atspindi signalo žvaigždyno (angl. *constellation*) diagramos. 2.1.1 paveiksle matoma, teorinės diagramos, kai duomenų perdavimui naudojama BPSK, QPSK, 16 QAM ir 32 QAM moduliacijos schemas. Kiekvienu atveju diagramoje atsispindi reikalingas signalo elementų skaičius.



2.1.1 pav. Signalų žvaigždynų diagramos BSPK, QPSK, 16 QAM ir 32 QAM

Anksčiau šiame poskyryje aptartas ryšys tarp moduliacijos schemas, per simbolį perduodamų bitų skaičiaus ir signalo elementų kiekio (angl. *signal elements*) pateikiamas 1 lentelėje:

1 lentelė. Moduliacijų schemų suvestinė

Moduliacijos schema	Signalų elementai (M)	Bitai per simbolį
BPSK	2	1
QPSK	4	2
8PSK	8	3
16 PSK	16	4
8QAM	8	3
16QAM	16	4
32QAM	32	5
64QAM	64	6

2.2 Kanalo pralaidumas

Bet kokios ryšio linijos efektyvumą galima nusakyti dažnių juostos pločiu, naudojama siųstuvo galia, bei signalo ir triukšmo santykiu, bet kuriame ryšio linijos taške. Šiame poskyryje bus apžvelgiama kanalo pralaidumo sąvoka bei atliekami teoriniai skaičiavimai leidžiantys įvertinti, pasirinktos duomenų spartos signalui perduoti reikalingą dažnių juostos plotį arba kitaip kanalo pralaidumą.

Kanalas gali būti dviejų tipų be ir su triukšmais. Kanalo be triukšmo talpumą apibrėžia žemiau pateikta Naikvisto (angl. *Nyquist*) teorema:

$$C = 2B \log_2 M \quad (2)$$

kur, C – kanalo pralaidumas arba bitų sparta bps; B – dažnių juostos plotis Hz; M – signalo elementų skaičius.

Remiantis šia išraiška galima įvertinti minimalų kanalo pralaidumą, reikalingą signalams optinėje ryšio linijoje perduoti 40 Gbps ir 100 Gbps spartomis naudojant įvairių tipų moduliacijas. Skaičiavimai pateikti 2 lentelėje atlikti remiantis 2 lentelėje pateikta informacija apie skirtingų moduliacijų savybes:

2 lentelė. Minimalus pralaidumas, kai $C=50$ Gbps ir 100 Gbps

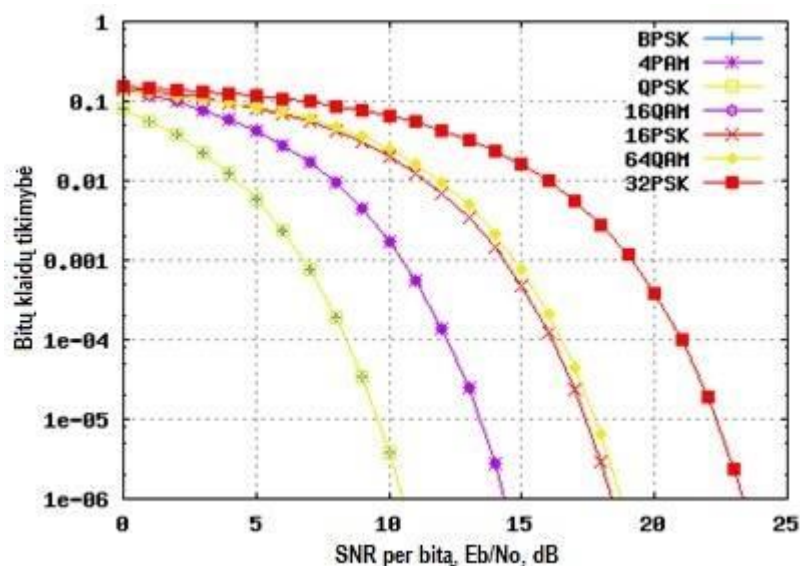
Moduliacijos schema	Bitai per simbolį	B_{\min} HZ, kai $C=40$ Gbps	B_{\min} HZ, kai $C=100$ Gbps
BPSK	1	$20 \cdot 10^9$	$50 \cdot 10^9$
QPSK	2	$10 \cdot 10^9$	$25 \cdot 10^9$
8PSK	3	$6,6 \cdot 10^9$	$16,6 \cdot 10^9$
16 PSK	4	$5 \cdot 10^9$	$12,5 \cdot 10^9$
8QAM	3	$6,6 \cdot 10^9$	$16,6 \cdot 10^9$
16QAM	4	$5 \cdot 10^9$	$12,5 \cdot 10^9$
32QAM	5	$4 \cdot 10^9$	$12 \cdot 10^9$
64QAM	6	$3,3 \cdot 10^9$	$8,3 \cdot 10^9$

Remiantis skaičiavimų rezultatai matome, jog sudėtingėjant moduliacijos schemai, minimalus teorinis kanalo pralaidumas, kai jame nėra triukšmo, reikalingas duomenis perduoti ta pačia sparta mažėja. Galima teigti jog, 40 Gbps signalui reikalingas pralaidumas, sumažėja perpus jei vietoje 8 QAM moduliacijos schemos pasirenkama 64 QAM.

Realiose optinio ryšio linijose triukšmo išvengti nepavyksta, todėl kanalo pralaidumui apibrėžti naudojama Klodo Šenono (angl. *Claude Shannon*) teorema:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (3)$$

kur, C – kanalo pralaidumas arba bitų sparta bps; B – dažnių juostos plotis Hz; SNR (angl. *Signal to Noise Ratio*) – signalo ir triukšmo galių santykis, tenkantis dažnių juostai, imtuvo jėgime. Ši teorema apibrėžia ribinę duomenų perdavimo spartos vertę, su kuria ryšio linijoje duomenys perduodami be klaidų arba su santykinai mažu klaidų kiekiu. Norint vykdyti kokybišką duomenų perdavimą, pasirinkta sparta turi būti mažesnė už ribinę C vertę.



2.2.1 pav. SNR vertės įvairioms moduliacijų schemoms [16]

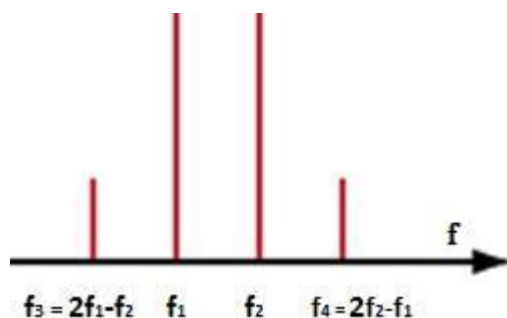
2.2.1 paveiksle pateiktos BER (angl. Bit Error Rate) ir SNR priklausomybės leidžia įvertinti, kokios teorinės SNR vertės reikalingos duomenų perdavimui naudojant skirtingas moduliacijų schemas ir norint užtikrinti tam tikrą kokybės lygį. Matome, jog didėjant SNR vertėms, t.y. signalo galios santykiui su triukšmu, klaidingai imtuve priimtų bitų tikimybė mažėja. Remiantis teoriniais skaičiavimais [16] galima teigti, jog optinėje ryšio linijoje signalų moduliavimui naudojant QPSK moduliaciją SNR vertė turėtų siekti bent 10 dB, norint informaciją perduoti su ne didesne nei $1 \cdot 10^{-6}$ klaidos tikimybe.

2.3 Netiesiniai efektai, pasireiškiantys optinėje skaiduloje

Netiesinių efektų svarbą lėmė optinio ryšio perdavimo sistemų technologinis progresas. Pastebėta, jog didinant perduodamų duomenų spartas, persiuntimo atstumus, kanalų skaičių ir optinės galios lygį optinėje skaiduloje pasireiškia neigiami efektai, kitaip dar vadinami netiesiniais. Galima išskirti dviejų tipų netiesinius efektus [12]. Pirmojo tipo netiesinių efektų šaltiniu yra laikoma lūžio rodiklio priklausomybė nuo spinduliuotės intensyvumo. Šiai grupei yra priskiriami FWM, SPM ir XPM reiškiniai. Antrojo tipo netiesiniai efektai atsiranda dėl optinio signalo sklaidos (angl. *scattering*) reiškinio. Šiai grupei yra priskiriama SBS ir SRS. Netiesiniai efektai atspindi fundamentalius apribojimus darančius įtaką duomenų kiekiui, kurį norima perduoti optine skaidula. Todėl projektuojant optinio ryšio sistemas būtina įvertinti šiuos efektus.

2.3.1 Keturbangis susimaišymas

Keturbangis susimaišymas yra trečios eilės iškreipis atsirandantis optinio ryšio sistemose, kur vienu metu persiunčiama daug kanalų [12, 18, 19]. Dėl šios priežasties jis labai aktualus nagrinėjant tiek DWDM sistemą, tiek ir EON tinklą. FWM gali pasireikšti jei netiesinėje terpėje, tokioje kaip optinė skaidula, perduodami bent du skirtingi bangos ilgiai. Grafinė keturbangio susimaišymo išraiška dažnių srityje pateikiama 2.3.1.1 paveiksle:

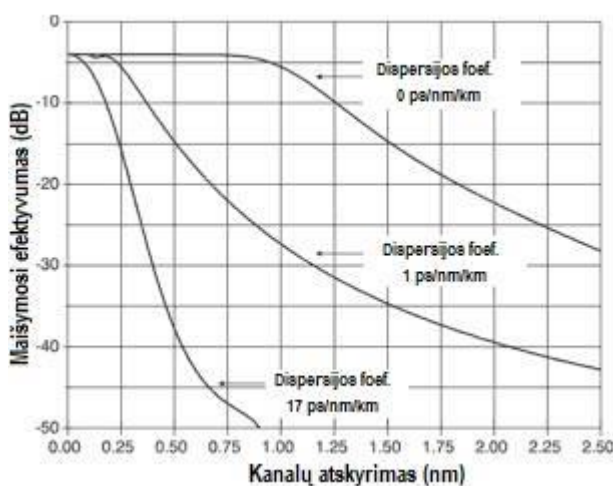


2.3.1.1 pav. Keturbangis susimaišymas

Darome prielaidą, jog optine skaidula keliauja du bangos ilgiai atitinkantys dažnius f_1 ir f_2 (kai $f_2 > f_1$), pasireiškus netiesinei lūžio rodiklio priklausomybei spektre suformuojamos dvi

papildomos komponentės atitinkančios dažnius f_3 ir f_4 kai, $f_3 = f_1 - (f_2 - f_1) = 2f_1 - f_2$, o $f_4 = f_2 + (f_2 - f_1) = 2f_2 - f_1$. Be to FWM atveju interferencijos kanalų bangos ilgiai gali sutapti su pradiniais bangos ilgiais. Šiuo atveju pasireiškia parametrinis stiprinimas (angl. *parametric amplification*) [20] ir pradiniai dažniai f_1 ir f_2 yra sustiprinami. Papildomi interferenciniai kanalai f_3 ir f_4 gali būti pašalinti naudojant specialius optinius filtrus, taip išvengiant jų įtakos kitiems optine skaidula perduodamiems signalams. Tačiau interferencijos produktai, kurie sustiprino originalius signalus negali būti nei atskirti nei kaip nors pašalinti. FWM sukeliamas kanalų persidengimas turi neigiamos įtakos perduodamų signalų kokybei.

Turint galvoje, kad sutampančių interferencinių kanalų pašalinimui priemonių nėra reikia vengti jų susidarymo. FWM efektas įvertinamas maišymosi efektyvumu. Išskiriami du veiksniai nuo kurių priklauso FWM daroma įtaka. Vienas jų yra atstumai tarp kanalų – atskyrimui mažėjant pastebimas dramatiškas maišymosi efektyvumo augimas. Kitas veiksnys yra dispersija, maišymosi efektyvumas yra atvirkščiai proporcingas dispersijai optinėje skaiduloje ir yra stipriausias nulinės dispersijos taške. 2.3.1.2 paveiksle pateikiama maišymosi efektyvumo priklausomybė nuo atskirties tarp kanalų ir dispersijos:



2.3.1.2 pav. Maišymosi efektyvumo priklausomybė nuo kanalų atskirties ir dispersijos [12]

Optinio ryšio sistemoje su nepaslinktos dispersijos optine skaidula (angl. *Non Dispersion-shifted Fiber* (NDSF)) esant 17 ps/nm/km dispersijai ir 0,8 nm intervalu tarp kanalų, maišymosi efektyvumas yra -48 dB. Toks FWM efektyvumas turės tik labai nedidelę įtaką signalų perdavimui optine skaidula. Tačiau naudojant paslinktos dispersijos skaidulą (angl. *Dispersion-shifted fiber* (DSF)) su 1 ps/nm/km dispersija ir atskyrimą tarp kanalų sumažinus iki 0,4 nm matoma, kad FWM efektyvumas yra -12 dB. Tokiomis sąlygomis FWM stipriai paveiks sistemos veikimą.

2.3.2 Savosios fazės moduliacija ir abipusė fazių moduliacija

Savosios fazės moduliacijos SPM atsiradimo optinėje skaiduloje pagrindu laikomas Kero efektas (angl. *Kerr effect*). Kero efektas – tai terpės lūžio rodiklio priklausomybė nuo ja sklindančios

šviesos intensyvumo I [20]. Tokioje terpėje lūžio rodiklis užrašomas taip:

$$n = n_0 + n_1 I \quad (4)$$

čia n_0 – tai įprastinis lūžio rodiklis, stebimas prie žemų šviesos intensyvumų. Kaip impulsas keliauja skaidula jo priekinis frontas didina lūžio rodiklį, tuo tarpu galinis frontas atvirkščiai – sumažina lūžio rodiklį. Šie pokyčiai lemia dažnio skambesių atsiradimą (angl. *chirp*). Vykstant sąveikai tarp dažnio skambesių ir chromatinės dispersijos efekto skaiduloje, matomas signalo impulso praplatėjimas [12,22].



2.3.2.1 pav. Savosios fazės moduliacijos įtaka signalo impulso pločiui [12]

Lūžio rodiklio pakitimus atspindi mėlynasis ir raudonasis poslinkiai (2.3.2.1 paveikslas), mėlynasis poslinkis atitinka lūžio rodiklio padidėjimą, raudonasis poslinkis – lūžio rodiklio sumažėjimą.

Abipusės fazių moduliacijos XPM efektas labai panašus į SPM efektą. Pagrindinis skirtumas tas, jog SPM užtenka vieno impulso, tuo tarpu XPM gali būti stebimas tik tuo atveju, kai viena skaidula keliauja bent du bangos ilgiai, t. y. daugiakanalėse perdavimo sistemose [12, 23]. Jei optine skaidula sklindantys du gretimi impulsai persikloja, tai atsiranda iškreipymai dėl XPM. Kaip ir FWM atveju, mažinant atstumus tarp gretimų kanalų XPM efekto pasireiškimo galimybė išauga. Kitas skirtumas tarp SFM ir XPM yra chromatinės dispersijos poveikis šiems reiškiniams. Chromatinė dispersija didina SFM, tuo tarpu XPM reiškiniams dispersija didelės įtakos neturi [12].

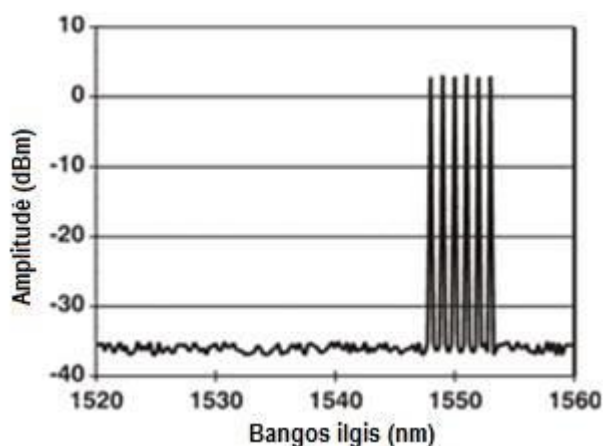
2.3.3 Skatintosios Brijueno ir Ramano skaidos

Skatintųjų Brijueno ir Ramano sklaidų efektai vyksta tada, kai dėl didelės šviesos fotonų galios atsiranda mažesnės galios fotonų, kurių bangos ilgiai yra didesni už juos sukūrusios šviesos. Dėl šių efektų sumažėja signalo galia ir gali susidaryti gretimų kanalų interferencija. [14]

SBS yra skaidulos viduje sklindančio kintančio elektrinio lauko sąveika su medžiagos iš kurios pagaminta skaidula akustinių virpesių moda. Dėl per didelės galios gretimi silicio atomai pradeda virpėti tomis pačiomis kryptimis. SBS apriboja didžiausią galimą galią optinėje skaiduloje. Signalo galiai pasiekus ar viršijus rekomenduojamą SBS slenkstinę vertę didelė dalis spinduliuotės

gali būti atspindima atgal į siūstuvą, dėl to gali pasireikšti įsisotinimas ryšio linijos imtuve. Be to atspindėjusi spinduliuotė optinėje skaiduloje sukelia papildomą triukšmą, kuris padidina klaidų skaičių. Dėl šių priežasčių didelės spartos perdavimo sistemose būtina kontroliuoti SBS. Tiesiogiai moduluojant bangų ilgį iš C dažnių juostos vienmodėje optinėje skaiduloje SBS slenkstinė vertė gali būti nuo 8 dB iki 10 dB [12].

SRS atveju elektrinio lauko sąveika su medžiagos akustine moda sukelia gretimų silicio atomų virpėjimą priešingomis kryptimis. Skatintoji Ramano skaida yra mažesnė problema optinio ryšio perdavimo sistemose nes pasižymi daug aukštesne slenkstine verte. Spinduliuotės galia optinėje skaiduloje turi siekti apie 1 W, tai yra beveik tūkstantį kartų didesnė vertė, nei reikalinga SBS pasireiškimui. SRS trumpabangių kanalų galią sumažinama, ją nukeliant į ilgabangius kanalus, pvz.: 980 nm maitinimo galia stiprina 1550 nm signalą. Todėl šis efektas taikomas Ramano optiniuose stiprintuvuose.



2.3.3.1 pav. Skatintoji Ramano skaida [12]

Aukščiau pateiktame 2.3.3.1 paveiksle vaizduojamas dėl SRS pasireiškiantis poveikis ilgabangiems kanalams. Paveiksle matoma, jog trumpabangių kanalų amplitudės lyginant su ilgabangiais yra žymiai mažesnės.

2.4 Priimamo signalo kokybės charakteristikos

Šiame poskyryje bus trumpai aptariamas Q faktoriaus parametras. Jis nusako optinio signalo kokybę jo vertėmis bus remiamasi atliekant tiriamojoje dalyje aprašytus tyrimus.

Q faktorius apibendrina signalo patiriamus pakenkimus jam sklindant optine ryšio linija. Pagrindiniai reiškiniai, veikiantys signalo sklidimą ir įvertinami apskaičiuojant Q faktoriaus vertę yra optinio stiprintuvo sukeltas triukšmas, netiesinių efektų poveikis, poliarizacijos poveikis, chromatinė dispersijos poveikis. Priimamo signalo kokybė gali pablogėti ir dėl siūstuve ar imtuve signalų apdorojimui naudojamų analoginių funkcijų. Q faktorius įvertina ir šiuos veiksnius, galinčius pabloginti signalo kokybines charakteristikas. [17]

Q faktorius parodo loginio 1 ir loginio 0 atskirtį ir yra apskaičiuojamas pagal 5 formulę:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5)$$

kur I_1 ir I_0 yra ties bito trukmės viduriu apskaičiuoti išmatuotų loginio 1 ir loginio 0 lygio srovės stiprumų verčių aritmetiniai vidurkiai, o σ_1 ir σ_0 yra standartiniai nuokrypiai. [14]

Paprasčiausiu atveju Q faktorius yra bedimensis dydis, kurio reikšmė didesnė už 1 ($Q > 1$). Kuo didesnė parametro vertė gaunama, tuo geresnė signalo perdavimo kokybė ir mažesnis neigiamų efektų poveikis. Q faktorius ir BER tarpusavyje susiję pagal žemiau pateiktą formulę. $Q=7$ vertė atitinka BER 10^{-12} kokybinį lygį.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (6)$$

Q faktorius vertė gali būti konvertuojama į decibelus pagal žemiau pateiktą formulę. Konvertavimas reikalingas jei Q faktoriaus apskaičiavimui naudojama OSNR reikšmė.

$$Q \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10} Q \quad (7)$$

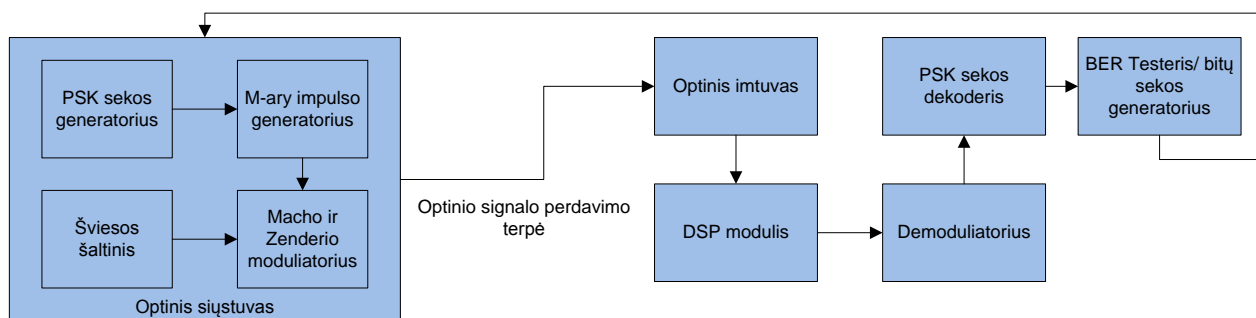
3 SPEKTRO PASKIRSTYMO EON TYRIMAS

Šiame skyriuje aprašyti tiriamajame darbe naudoti imitaciniai modeliai, blokinėse schemose nurodant svarbiausius komponentus. Taip pat pateikiami vykdant tyrimus gauti rezultatai, grafiškai pavaizduojamos gautos priklausomybės, signalų žvaigždynų diagramos, bei signalo spektro vaizdai iš programinėje įrangoje spektro stebėjimui naudojamo optinio spektro analizatoriaus.

3.1 Imitacinių modelių aprašymas

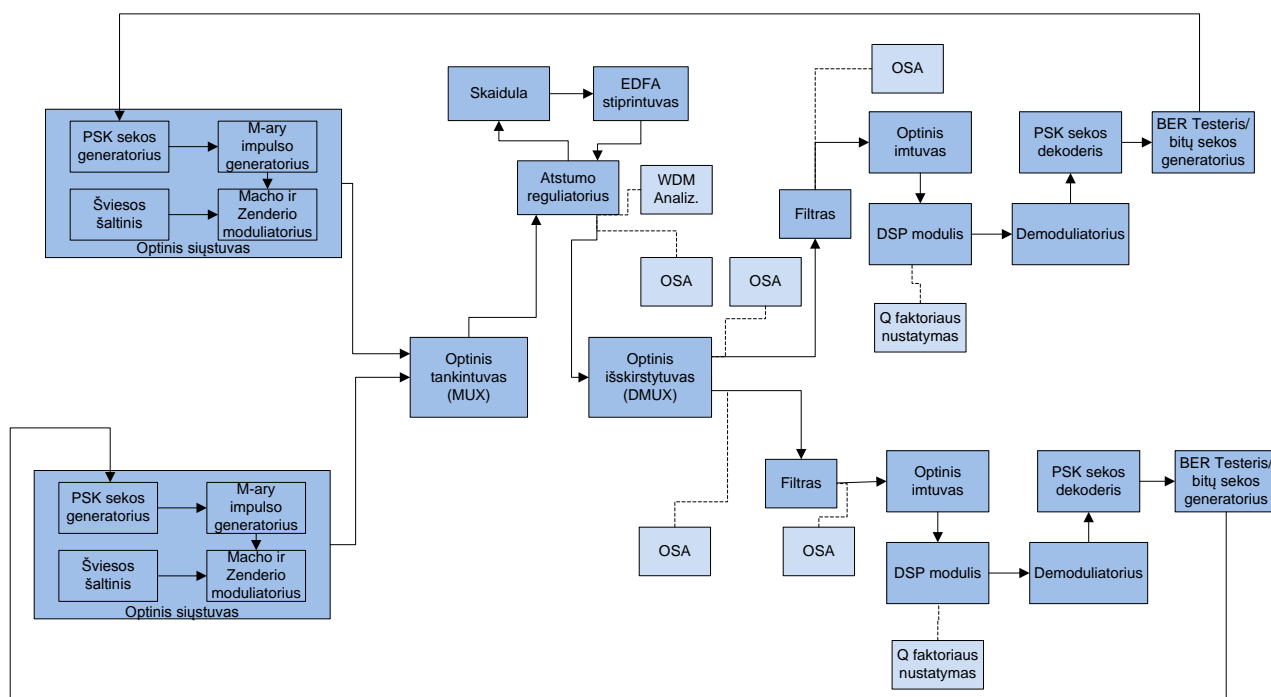
Visi imitaciniai modeliai, reikalingi tyrimams vykdyti buvo sukurti naudojant OptiSystem 14 programinę įrangą [24], kuri yra laisvai prieinama studentams, užsiregistravusiems produkto kūrėjų portale. Kiekvienam naujam vartotojui suteikiama 30 dienų licencija. Šis įrankis buvo pasirinktas todėl, jog turi plačią komponentų biblioteką, leidžiančią imituoti optinių signalų perdavimą įvairiomis sąlygomis.

Norint įvertinti duomenų perdavimo spartos įtaką signalų spektrui buvo sukurtas imitacinis modelis, kurio blokinė schema pateikiama 3.1.1 paveiksle. Šis modelis leis įvertinti signalo spektro pokyčius kai naudojama QPSK moduliacija, o signalų perdavimas vykdomas 10 Gbps, 40 Gbps bei 100 Gbps spartomis.



3.1.1 pav. Blokinė imitacinio modelio schema

Kitas imitacinis modelis buvo sukurtas siekiant imituoti dvikanalės DWDM sistemos veikimą. Siųstuvai perdavinės signalus 10 Gbps, 40 Gbps ir 100 Gbps sparta. Signalų moduliavimui naudojama QPSK moduliacijos schema. Šiuo atveju schema, pateikta 3.1.1 paveiksle naudojama kaip bazinė, siųstuvo ir imtuvo architektūra lieka tokia pati. Signalams iš dviejų siųstuvų perduoti viena skaidula naudojamas tankintuvas, vėliau seka skaidula ir stiprintuvas. Taip pat pridėtas atstumo reguliavimo modulis. Signalai į du imtuvus nukreipiami optinio išskirstytuvo pagalba. Toliau yra grandinė komponentų skirtų signalo priėmimui, apdorojimui, nepageidaujamų efektų pašalinimui ir galiausiai kokybės įvertinimui. Šviesiai mėlyna spalva pažymėti matavimo prietaisai, leidžiantys nustatyti, OSNR, Q faktoriaus vertes, bei atvaizduojantys signalų spektrus bei žvaigždynų diagramas. Aptarta blokinė modelio schema pavaizduota 3.1.2 paveiksle.



3.1.2 pav. Blokinė pagrindinio imitacinio modelio schema

3.2 Pradinės sąlygos

Visos simuliacijos vykdomos C bangų ruože, kurį atitinka 1530 nm – 1565 nm bangos ilgiai arba 195.94 THz – 191.56 THz dažniai. Šis bangų ruožas naudojamas DWDM sistemose bei EON. bangų ilgiai šiame ruože silpsta mažiau palyginus su S bangų ruožu. C bangų ruožo privalumu galima laikyti jame funkcionuojančius erbiu legiruotos skaidulos optinius stiprintuvus (angl. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers* (EDFA)), kurie leidžia optinius signalus perduoti didesniais nuotoliais. C bangų ruožo trūkumas yra, tai jog šiuose dažniuose ryškiau pastebima chromatinės dispersijos įtaka, kuri gali gana neigiamai paveikti perduodamo signalo kokybines charakteristikas. Imitaciniuose modeliuose naudojami DSP komponentai leidžia iš dalies arba visiškai kompensuoti chromatinės dispersijos ir netiesinių efektų poveikį.

Tyrimo naudotos vienmodės skaidulos (angl. *Single Mode Fiber* (SMF)) charakteristikos pateikiamos 3 lentelėje:

3 lentelė. SMF charakteristikos

Dispersijos koeficientas D	16.75 ps/(nm-km)
Slopinimas skaiduloje α_{dB}	0.2 dB/km
Netiesinis atspindžio indeksas n_2	$2.6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
Efektivas plotas A_{eff}	80 μm^2
Bangos ilgis	1550 nm
Bangos ilgį atitinkantis dažnis	193.41 THz

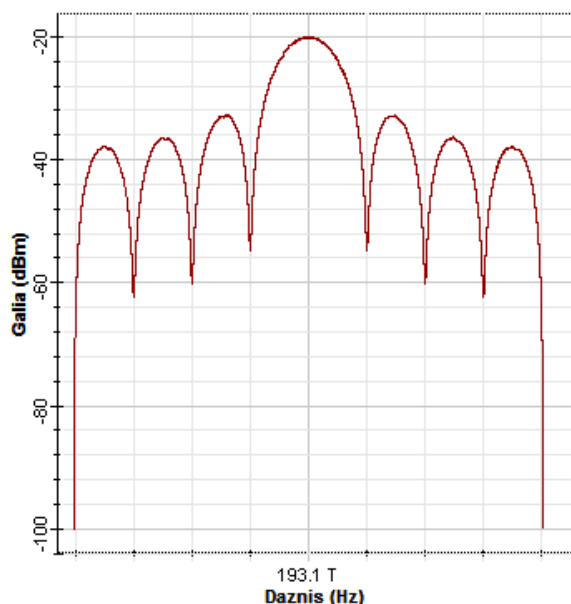
Viso tiriamojo darbo metu šios charakteristikos laikomos konstantomis ir nekeičiamos.

3.3 Optinio spektro panaudojimo tyrimas

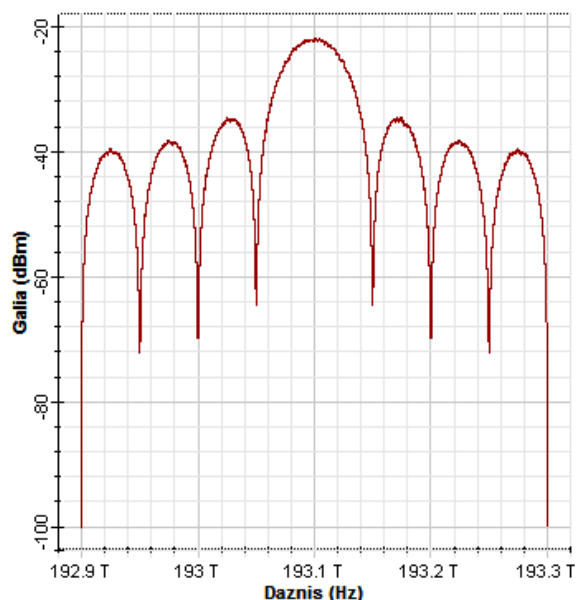
Šio tyrimo metu siekiama išsiaiškinti atskyrimo tarp dviejų kanalų Δf ir perdavimo atstumo įtaką optinių signalų kokybei. Mažinant atstumus tarp gretimų kanalų didėja rizika, jog signalo kokybę neigiamai paveiks netiesiniai efektai. Įvertinus signalo kokybinius parametrus bus galima nustatyti, kaip arti vienas kito galima formuoti perdavimo kanalus parenkant centrinius dažnius ir vykdyti informacijos perdavimą išlaikant kokybinį lygį reikalingą tiksliam signalų perdavimui. Remiantis 2.4 skyriuje pateikta informacija, tinkamu kokybiniu lygiu laikoma Q faktoriaus vertė didesnė arba lygi 7, nes tai atitinka BER 10^{-12} kokybinį lygį. Žinant kaip arti vienas kito galima formuoti kanalus bus galima įvertinti spektro panaudojimo efektyvumą.

3.3.1 Skirtingų spartų signalų spektrai

Tyrimui naudojama 3.1.1 paveiksle pavaizduota schema. Duomenys yra perduodami 10 Gbps sparta, vėliau duomenų perdavimo sparta padidinama iki 40 Gbps ir galiausiai iki 100 Gbps. Visų simuliacijų metu šviesos šaltinio šviesa buvo moduluojama naudojant QPSK moduliacijos schemą, o centrinis dažnis yra 193,1 THz. Gauti skirtingomis spartomis moduluotų signalų spektrai pateikiami 3.3.1.1 bei 3.3.1.2 paveiksluose.



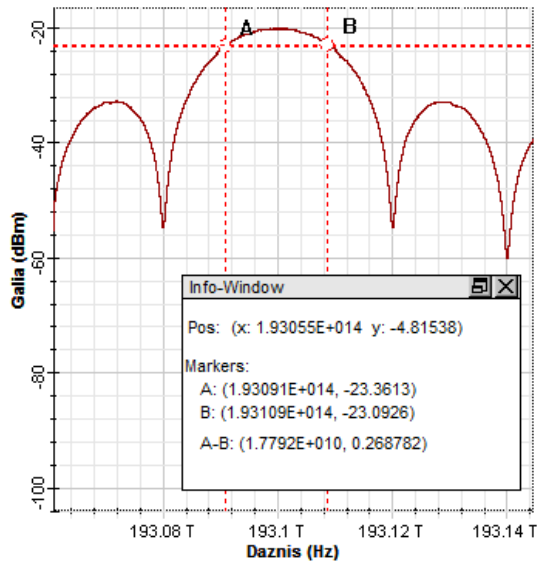
3.3.1.1 pav. Signalų spektras, kai R=40 Gbps



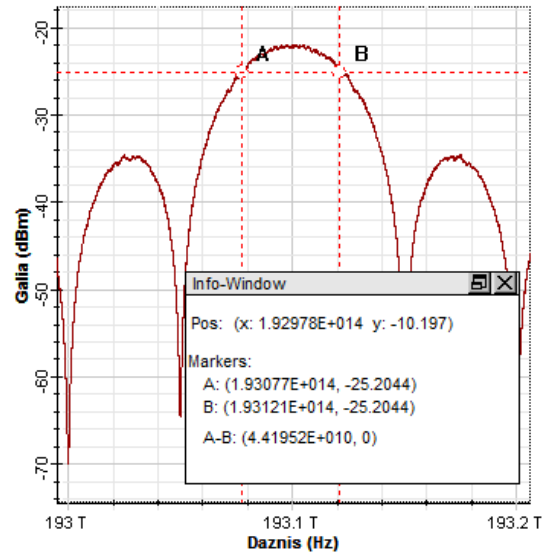
3.3.1.2 pav. Signalų spektras, kai R=100 Gbps

Iš pateiktų OSA diagramų matome, kad antro signalo spektras kur kas platesnis, nei pirmojo. Norint tiksliau įvertinti skirtumus, signalų spektro pločiai matuojami 3 dB žemiau piko vertės, nes šiame plotyje yra sukaupta beveik visa signalo galia. Abiejų signalų pikai yra -20 dBm lygyje, todėl matavimai vykdomas -23 dBm lygyje. Programinės įrangos pagalba išmatuojama, jog perduodant duomenis 40 Gbps sparta reikalingas minimalus pralaidumas yra 17,79 GHz. Tuo tarpu duomenų siuntimą vykdyti 100 Gbps sparta pralaidumo poreikis išauga iki 44,19 GHz.

Matavimo rezultatai pateikiami 3.3.1.3 ir 3.3.1.4 paveiksluose.

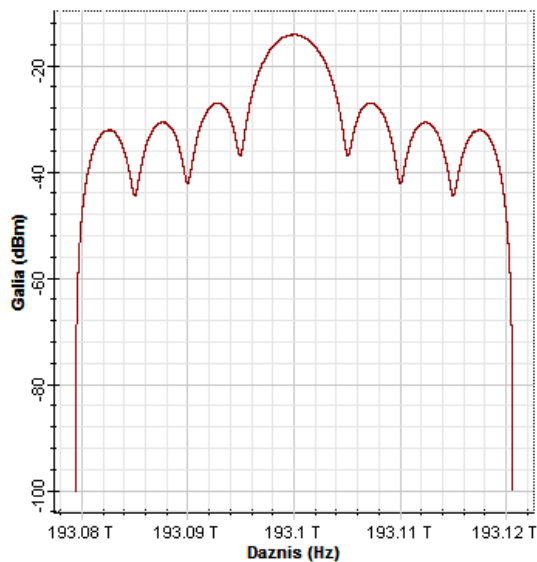


3.3.1.3 pav. Signalų spektras, kai R=40 Gbps

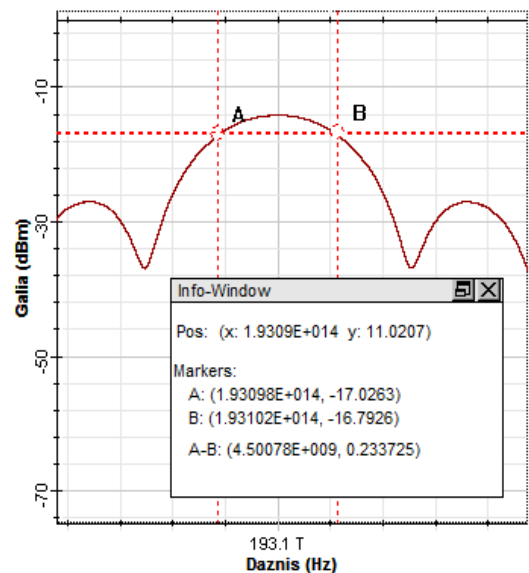


3.3.1.4 pav. Signalų spektras, kai R=40 Gbps

Laikantis to pačio principo nustatyta jog, kai duomenų perdavimo sparta yra 10 Gbps reikalingas kanalo pralaidumas yra 5 GHz. Signalų spektras pateikiamas 3.3.1.5 ir 3.3.1.6 paveiksluose.



3.3.1.5 pav. Signalų spektras, kai R=10 Gbps



3.3.1.6 pav. Signalų spektras, kai R=10 Gbps

Pagal gautas spektro pločio vertes galima apytiksliai nustatyti kaip arti vienas kito galima formuoti kanalus daugiakanalėse sistemose. Matant gautus rezultatus galima daryti prielaidą, jog gretimų kanalų atskirtis, kai abejais duomenis norima perduoti 10 Gbps sparta turėtų būti ne mažesnė nei 5 GHz, kai sparta yra 40 Gbps atskirtis arba Δf turi būti ne mažesnė nei 18 GHz, tuo tarpu jei duomenys perduojami 100 Gbps sparta gretimų kanalų atskirtis negali būti mažesnė nei 45 GHz.

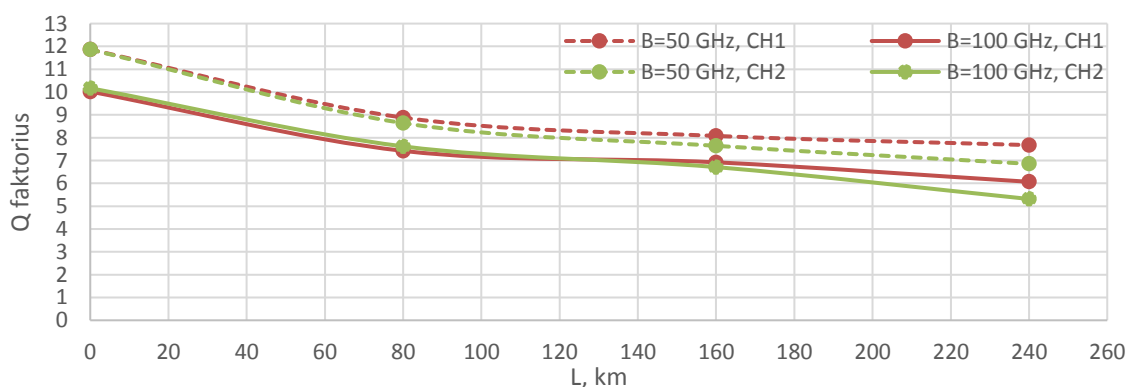
Kitas svarbus aspektas pastebėtas tiriant spektrus, jog šviesos šaltinio išspinduliuotas spektras be pagrindinio lapelio aplink centrinę dažnį sukuria ir papildomus lapelius į abi puses nuo pagrindinio. Tikėtina, jog artinant kanalus vieną prie kito, t.y. mažinant Δf vertę signalų spektrai gali persidengti ir neigiamai paveikti vienas kito kokybinius rodiklius. Šiai problemai spręsti pasinaudota skirtingomis tankintuvo ir išskirstytuvo praleidžiamos dažnių juostos (angl. *bandwidth*) vertėmis ir papildomais filtrais prieš imtuvus. Dar geresni rezultatai būtų gauti siūstuve naudojant filtras ar specialius lazerius, kurie sumažintų išspinduliuojamo spektro plotį.

Testavimo metu atrinktos optinių tankintuvų, optinių išskirstytuvų ir filtrų praleidžiamų dažnių juostos vertės pateikiamos 4 lentelėje:

4 lentelė. Pagrindiniai imitacinio modelio parametrai

MUX/DMUX B, kai R=10 Gbps	15 GHz
Filtro B, kai R=10 Gbps	5 GHz
MUX/DMUX B, kai R=40 Gbps	50 GHz
Filtro B, kai R=40 Gbps	25 GHz
MUX/DMUX B, kai R=100 Gbps	100 GHz
Filtro B, kai R=100 Gbps	50 GHz

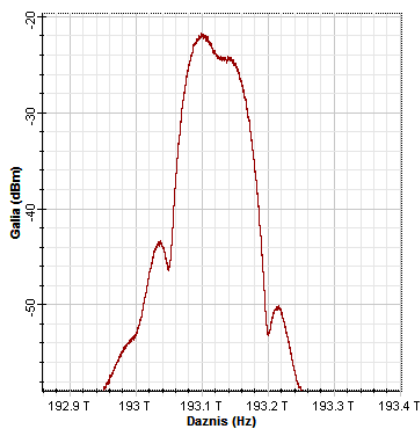
Norint geriau iliustruoti filtro prieš imtuvą privalumus ir ištirti filtro praleidžiamų dažnių ruožo įtaką signalų kokybei įvykdyta simuliacija kai R=100 Gbps, $\Delta f=50$ GHz; L kinta nuo 0 iki 240 km, o filtro B=100 GHz. Gauti rezultatai palyginami su Q vertėmis, gautomis, kai filtro praleidžiamų dažnių juosta B=50 GHz. Rezultatai pateikiami 3.3.1.7 paveiksle pavaizduotoje diagramoje, Q vertės (žiūrėti 5 lentelėje, Priedai).



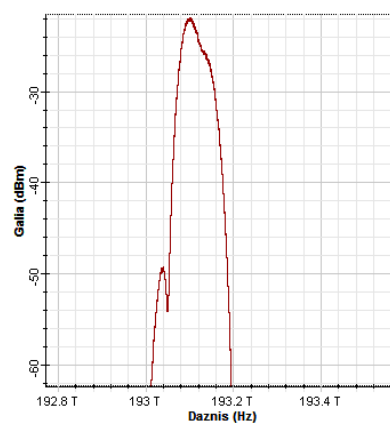
3.3.1.7 pav. Q faktoriaus priklausomybė nuo skaidulos ilgio, kai R=100 Gbps ir naudojami 50 GHz ir 100 GHz pralaidumo filtras prieš imtuvą.

Iš diagramoje pateiktos priklausomybės matome, jog didinant atstumą, geresnė kokybė užtikrinama naudojant filtrą su siauresne praleidžiamų dažnių juosta, t.y. 50 GHz. Per visą perdavimo ilgį Q faktoriaus vertė pirmame kanale kinta nuo 11,85 iki 7,67. Palyginimui, kai filtro praleidžiamų dažnių ruožas padidinamas iki 100 GHz, Q faktoriaus vertė pirmame kanale kinta nuo 10,02 iki 6,06.

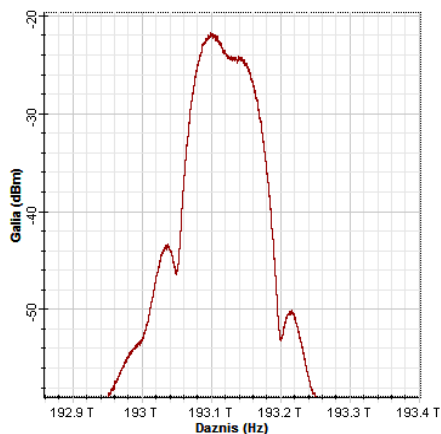
Mažesnio pralaidumo filtras praleidžia mažiau gretimo signalo dedamųjų, tai leidžia tikslesnį signalų priėmimą, ir kokybiškesnį duomenų atkūrimą vėlesnėse signalo apdorojimo stadijose. 3.3.1.9 ir 3.3.1.11 paveiksluose pateikiamas spektras filtro išėjime, kai jo praleidžiamų dažnių ruožas yra 100 GHz ir 50 GHz. Matome, jog antru atveju nufiltruojami papildomi lapeliai. Remiantis Q faktoriaus vertėmis (žiūrėti 4 lentelėje, Priedai) tokio pobūdžio filtravimas teigiamai veikia signalo kokybę. Abiejuose kanaluose Q faktoriaus vertės gautos didesnės naudojant filtrą su 50 GHz dažnių juosta.



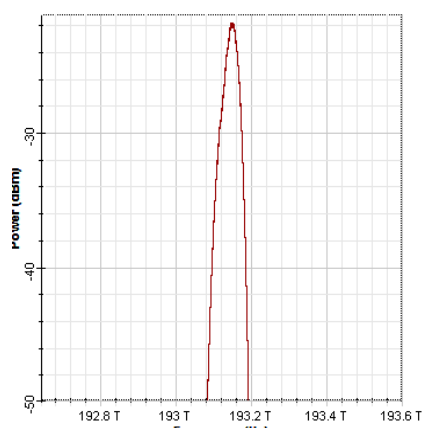
3.3.1.8 pav. CH1 spektras filtro įėjime



3.3.1.9 pav. CH1 spektras filtro išėjime, kai $B=100$ GHz



3.3.1.10 pav. CH1 spektras filtro įėjime



3.3.1.11 pav. CH1 spektras filtro išėjime, kai $B=50$ GHz

3.3.2 Optinio spektro tyrimas, kai $R=40$ Gbps

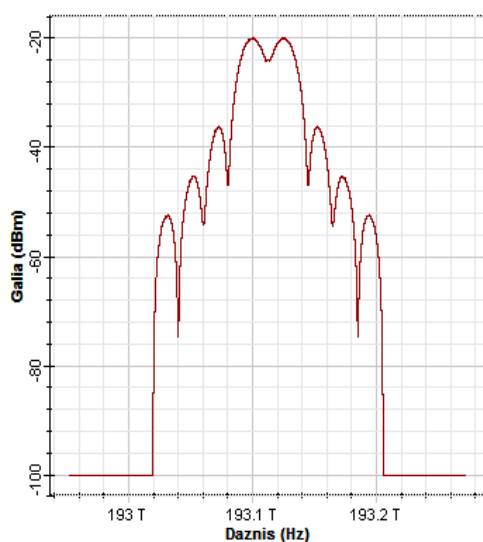
Tyrimui naudojama 3.1.2 paveiksle pateikta blokinė schema. Pilna schema naudota programiniame pakete pateikta 1 pav. Priedai. Šioje dvikanalėje sistemoje siųstuvų galios yra 0 dBm, duomenys perduodami 40 Gbps sparta, moduliacijai naudojant QPSK. Iteracijos vykdomos atstumą tarp dviejų kanalų Δf mažinant nuo 25 GHz iki 15 GHz, kas 5 GHz bei didinant perdavimo atstumą nuo 0 km iki 240 km, kiekvieną kartą pridėdant po 80 km. Prieš imtuvus yra filtrai, kurių praleidžiamų dažnių ruožas yra 25 GHz. Kiekvieno modeliavimo metu sugeneruojama ir perduodama atsitiktinė 65536 bitų seka. Signalų perdavimo kokybę vertimą lyginant siųstuvo perduotą bitų seką su imtuve priimta bitų seka. Aptartieji modelio parametrai pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. Pagrindiniai imitacinio modelio parametrai

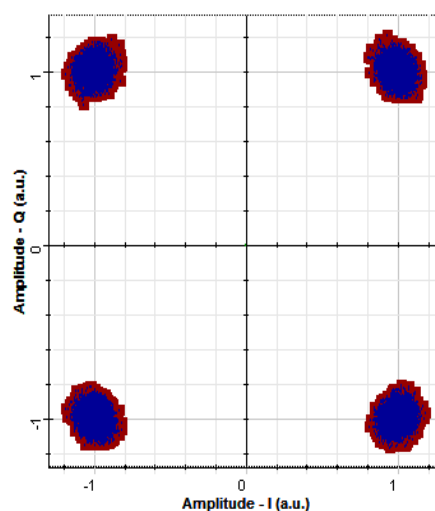
Siųstuvo Tx1 galia	0 dBm	Duomenų perdavimo sparta	40 Gbps
Siųstuvo Tx2 galia	0 dBm	Moduliacijos schema	QPSK
Skaidulos ilgis	0 – 240 km	EDFA stiprinimas	16 dB
Atskyrimas tarp kanalų Δf	25 GHz – 15 GHz	EDFA triukšmas	4 dB

Kiekvienos iteracijos metu buvo matuojamos OSNR reikšmės po signalų sutankinimo, stebimas signalų spektras, skaičiuojamos Q faktoriaus vertės bei sudaromos signalo žvaigždynų diagramos po dispersijos kompensavimo.

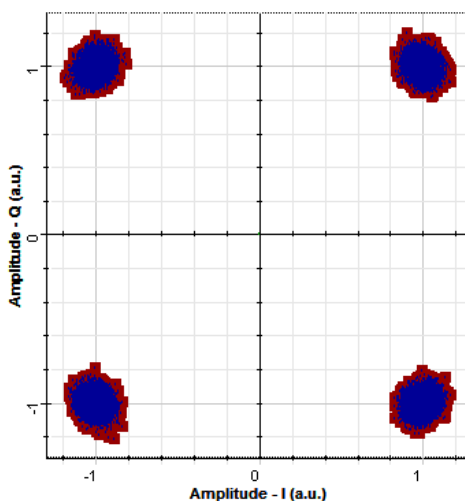
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f = 25$ GHz, o atstumas 0 km pateikiami 3.3.2.1, 3.3.2.2, 3.3.2.3 ir paveiksluose.



3.3.2.1 pav. Spektras, kai $\Delta f = 25$; $L = 0$ km

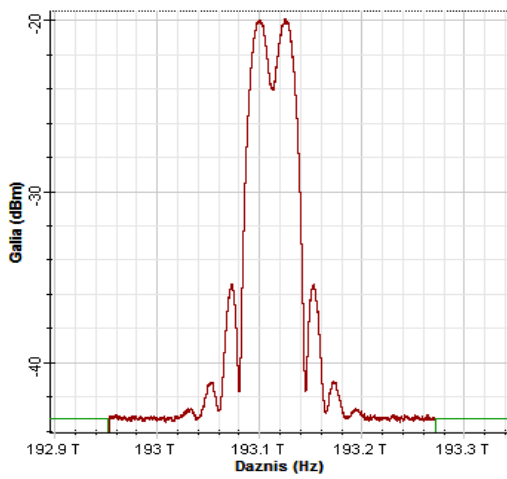


3.3.2.2 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

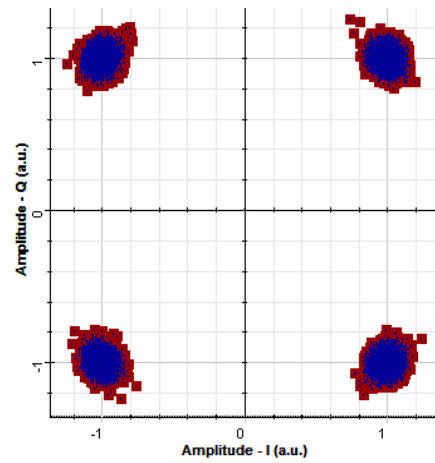


3.3.2.3 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

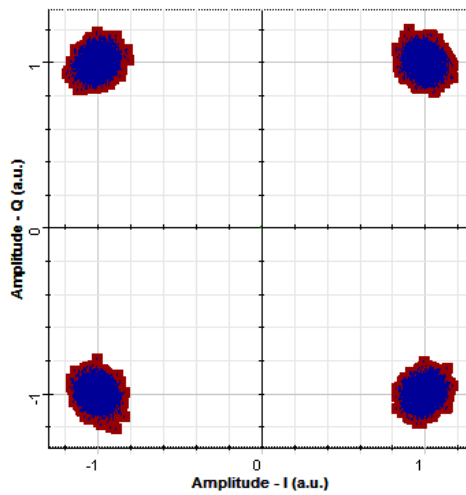
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f = 25$ GHz, o atstumas 80 km pateikiami 3.3.2.4, 3.3.2.5, 3.3.2.6 paveiksluose.



3.3.2.4 pav. Spektras, kai $\Delta f=25$; $L=80$ km

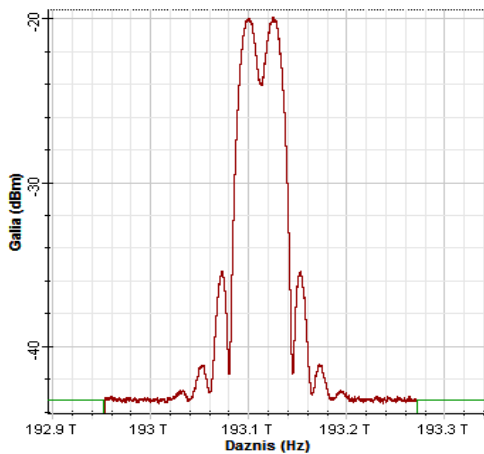


3.3.2.5 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

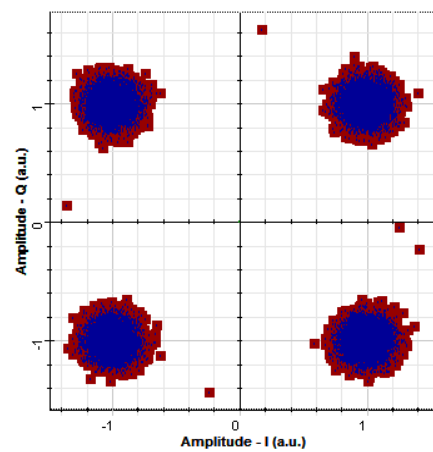


3.3.2.6 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

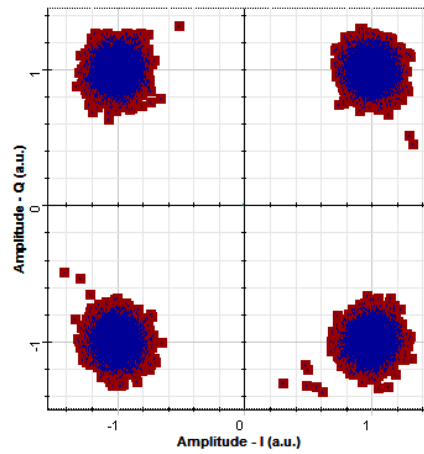
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f = 25$ GHz, o atstumas 160 km pateikiami 3.3.2.7, 3.3.2.8, 3.3.2.9 paveiksluose.



3.3.2.7 pav. Spektras, kai $\Delta f=25$; $L=160$ km

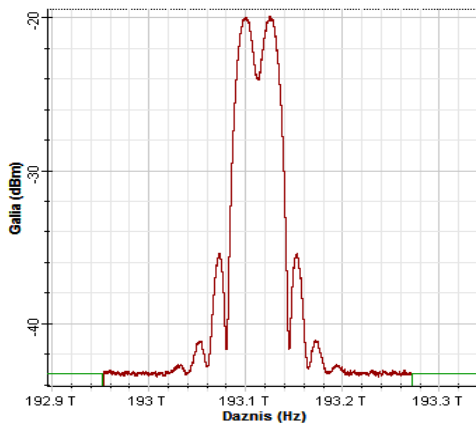


3.3.2.8 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

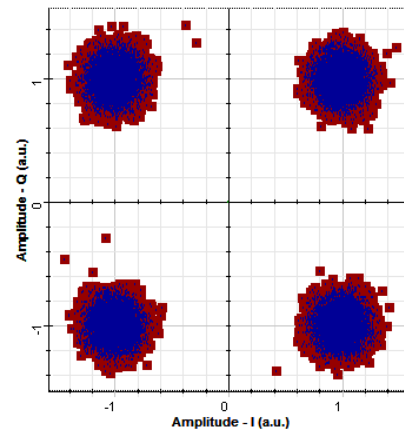


3.3.2.9 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

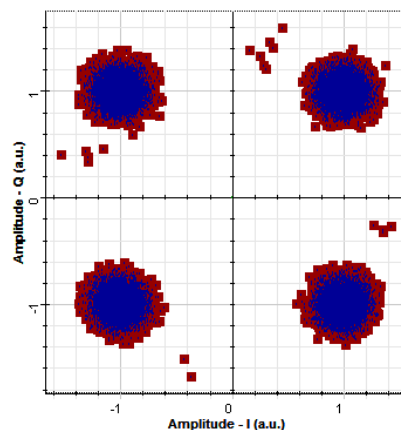
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f = 25$ GHz, o atstumas 240 km pateikiami 3.3.2.10, 3.3.2.11, 3.3.2.12 paveiksluose.



3.3.2.10 pav. Spektras, kai $\Delta f=25$; $L=80$ km



3.3.2.11 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo



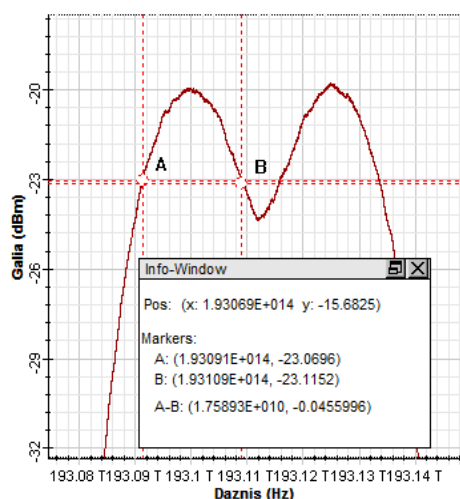
3.3.2.12 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

Tarpusavyje lyginant signalų spektrus stipriai išsiskiria, pirmasis signalo spektras (3.3.2.1 pav.), kuris gaunamas, kai atstumas yra 0 km. Diagramoje matomi 2 pikai, kurie atitinka kanalus su

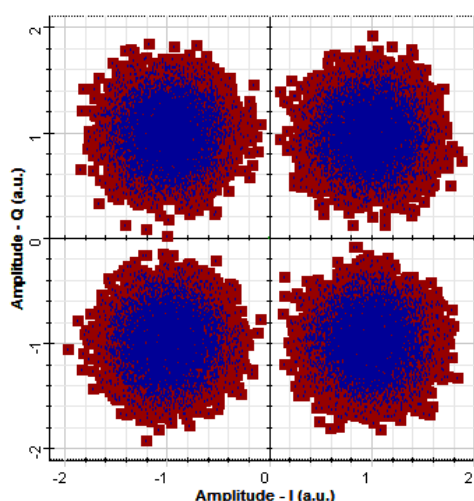
193.1 THz ir 193.125 THz centriniais dažniais. Abu impulsai yra prasipletę lyginant su kitais spektrų grafikais. Nepaisant impulsų persiklojimo perdavimo kokybė išliko gana aukšta. Tai rodo toli vienas nuo kito esantys taškai signalo žvaigždyno diagramose (3.3.2.2 pav. ir 3.3.2.3 pav.) bei didesnės nei 7 Q faktoriaus reikšmės (žiūrėti 1 lentelėje, Priedai).

Lyginant likusias OSA diagramas (3.3.2.4 pav., 3.3.2.7 pav. ir 3.3.2.10 pav.) ir Q faktoriaus vertes (žiūrėti 1 lentelėje, Priedai), kiekvienu atveju matome, jog abu signalai yra arti vienas kito, tačiau kokybė žiūrint į signalų žvaigždynų schemas ir Q vertes kinta nežymiai. Taip yra todėl, jog dispersijos efektų kompensavimas atstato aukštą kokybės lygį ryšio linijoje.

Atlikus papildomą modeliavimą, kai $\Delta f = 25$ GHz, $L = 80$ km, bei nekompensuojant dispersijos įtakos $Q_1 = 3,93$, $Q_2 = 4,01$. Tai didelis sumažėjimas lyginant su $Q_1 = 11,05$ ir $Q_2 = 10,46$, kai dispersijos poveikis buvo kompensuojamas. Signalų spektras ir CH1 signalo žvaigždynų diagrama pateikiami 3.3.2.13 pav. ir 3.3.2.14 pav.



3.3.2.13 pav. Spektras, kai $\Delta f = 25$ GHz;
 $L = 80$ km (be dispersijos kompensavimo)

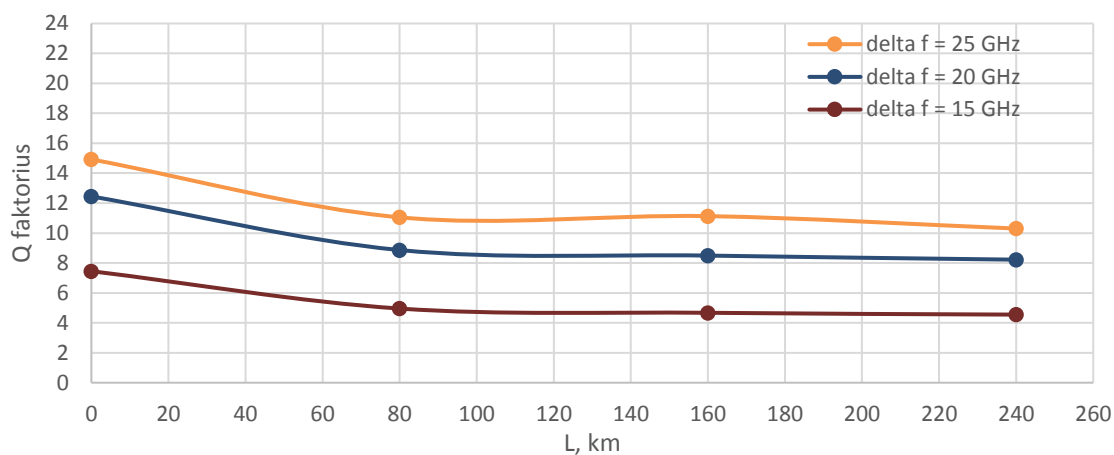


3.3.2.14 pav. CH1 signalo žvaigždynų
diagrama (be dispersijos kompensavimo)

Matome, kad dviejų kanalų spektrai nesusijungia į vieną aukščiau nei -3 dB nuo signalo viršūnės. Dėl šios priežasties signalo žvaigždynų diagramoje matome keturis taškus, būdingus naudojant QPSK moduliaciją. Tačiau taškai per daug išsisklaidę dėl dispersijos poveikio ir kokybės standartus atitinkantis duomenų persiuntimas tokioje linijoje negalimas. Būtent dėl kritinio Q faktoriaus sumažėjimo visose simuliacijose neigiamas dispersijos poveikis kompensuojamas.

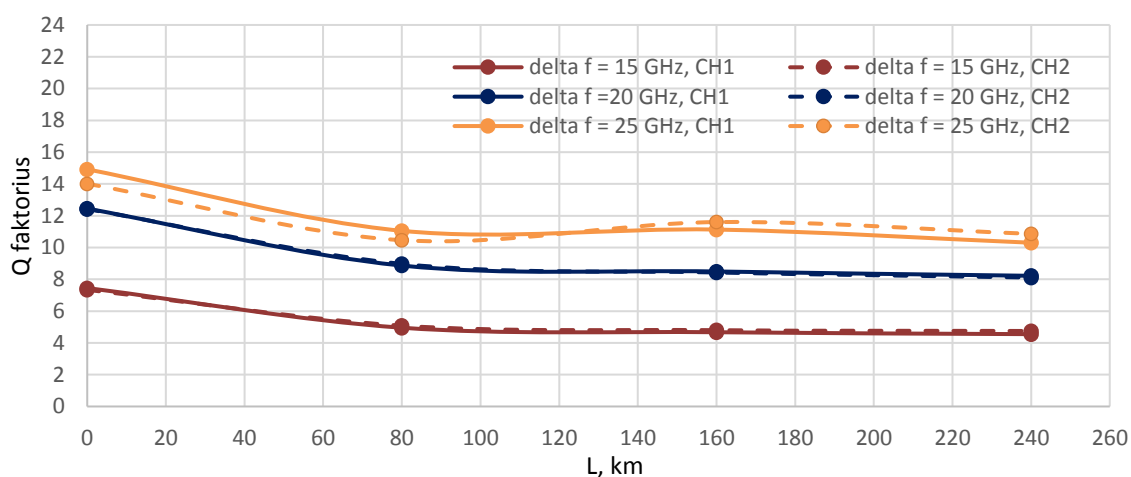
Visi matavimai siekiant efektyvaus spektro panaudojimo buvo vykdomi prieš imtuvus pastačius filtrus, kurių praleidžiamų dažnių ruožas yra 25 GHz. Ši reikšmė pasirinkta atsižvelgus į 3.3.1 skyriuje modeliavimo metu gautą 40 Gbps signalo spektro pločio vertę, kuri buvo apie 18 GHz ir Q faktoriaus vertės kitimą, keičiant filtro praleidžiamų dažnių juostą. Optimaliausi rezultatai buvo gauti parinkus 25 GHz.

3.3.2.15 paveiksle pateikiama Q faktoriaus priklausomybė pirmame kanale nuo skaidulos ilgio, kai $R = 40$ Gbps, o kanalų atskyrimas Δf kinta nuo 25 GHz iki 15 GHz.



3.3.2.15 pav. Q faktorius priklausomybė nuo skaidulos ilgio (CH1), R=40 Gbps

3.3.2.16 paveiksle pateikiama Q faktorius priklausomybė abiejuose kanaluose nuo skaidulos ilgio, prie kanalų atskyrimo $\Delta f=25$ GHz, 20 GHz ir 15 GHz verčių.



3.3.2.16 pav. Q faktorius priklausomybė nuo skaidulos ilgio (CH1 ir CH2), R=40 Gbps

Tiriant Q faktorius priklausomybę nuo atstumo prie įvairių Δf verčių bei bandant nustatyti, kokius atskyrimus tarp centrinių dažnių naudoti formuojant daugiakanales perdavimo sistemas svarbu įvertinti kokybę ne tik pirmajame, bet ir kituose kanaluose. Kadangi tyrimo objektu buvo pasirinkta dvikanalė perdavimo sistema, mažinant atskyrimą tarp gretimų kanalų Q faktorius vertės pokytis buvo vertinimas tiek pirmame, tiek ir antrame kanale.

Iš 3.3.2.16 pav. tiesi linija žymi Q faktorius verčių kitimą pirmame kanale, punktyru yra žymimos Q faktorius verčių kitimas antrame kanale. Kai Δf yra 15 GHz ir 20 GHz Q vertės kanaluose labai panašios, nes tiesi ir punktyrinė linijos persidengia. Tai reiškia, jog sumažintas atskyrimas tarp kanalų neturi žymaus neigiamo poveikio gretimam kanalui. Tiesa, 15 GHz atskyrimo naudojimą duomenų perdavimui didesniu nei 20 km atstumu reiktų atšesti, nes šiuo atveju Q faktorius vertė netenkina kokybinių reikalavimų.

Kai Δf yra 25 GHz, atsiranda nuokrypia ir kanaluose gaunamos skirtingos Q faktorius vertės. Šiuo atveju gretimų kanalų poveikis vienas kitam nėra didelis, t.y. kokybės lygis nei viename iš

kanalų nekrenta žemiau reikalaujamos Q faktoriaus vertės, todėl 25 GHz atskyrimas gali būti naudojamas optinio ryšio sistemose.

Remiantis 3.3.2.15 ir 3.3.2.16 pav. pateikta Q faktoriaus priklausomybe, matome, jog 15 GHz atskyrimas netenkina kokybinių reikalavimų, todėl optinio ryšio sistemose norint užtikrinti duomenų perdavimą 40 Gbps sparta būtina naudoti didesnę atskyrimą tarp kanalų. Taip pat pastebėta, jog didžiausias Q faktoriaus verčių sumažėjimas yra pirmoje atkarpoje, kai atstumas didėja iki 80 km. Antroje (80 km -160 km) ir trečioje (160km - 240 km) atkarpose Q faktoriaus vertės mažėja gana nedaug ir išlaikomi kokybiniai reikalavimai. Todėl perduodant duomenis atstumais iki 240 km pakanka 20 GHz atskyrimo tarp gretimų kanalų.

3.3.3 Optinio spektro tyrimas, kai R=100 Gbps

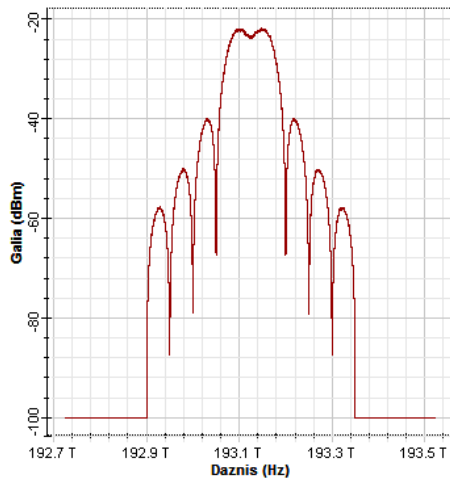
Tyrimui naudojama 3.1.2 paveiksle pateikta blokinė schema. Šioje dvikanalėje sistemoje siųstuvų galios yra 2 dBm, duomenys perduodami 100 Gbps sparta, moduliacija - QPSK. Simuliacijos vykdomos atstumą tarp dviejų kanalų Δf mažinant nuo 55 GHz iki 45 GHz, kas 5 GHz bei didinant perdavimo atstumą nuo 0 km iki 240 km, kiekvieną kartą pridodant po 80 km. Prieš imtuvus yra filtrai, kurių praleidžiamų dažnių ruožas yra 50 GHz. Kiekvieno modeliavimo metu sugeneruojama ir perduodama atsitiktinė 65536 bitų seka. Signalų perdavimo kokybė vertinama lyginant siųstuvo perduotą bitų seką su imtuve priimta bitų seka. Aptartieji modelio parametrai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Pagrindiniai imitacinio modelio parametrai

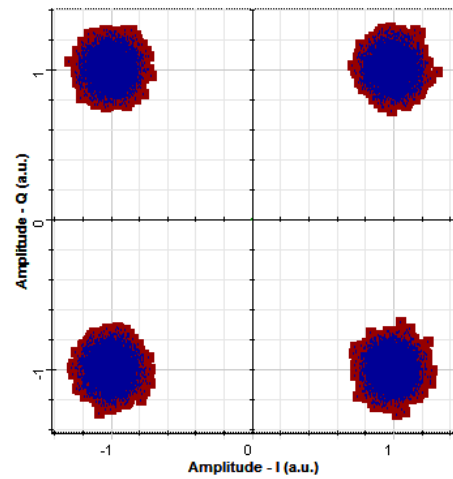
Siųstuvo Tx1/Tx2 galia	2 dBm	Duomenų perdavimo sparta	100 Gbps
Filtro dažnių juosta	50 GHz	Moduliacijos schema	QPSK
Skaidulos ilgis	0 – 240 km	EDFA stiprinimas	16 dB
Atskyrimas tarp kanalų Δf	55 GHz – 45 GHz	EDFA triukšmas	4 dB

Kiekvienos iteracijos metu buvo matuojamos OSNR reikšmės po signalų sutankinimo, stebimas signalų spektras, skaičiuojamos Q faktoriaus vertės bei sudaromos signalų žvaigždynų diagramos po dispersijos kompensavimo. Netiesinių efektų įtaka nekompensuojama. Kadangi grafikai, mažėjant Δf tarpusavyje atrodo tendencingai, pateikiami grafiniai rezultatai gauti kai $\Delta f=50$ GHz.

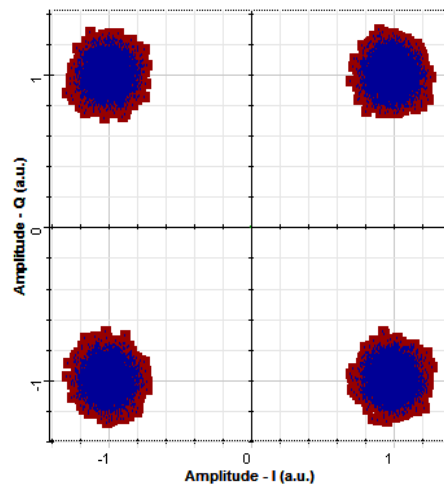
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f =50$, o atstumas 0 km pateikiami 3.3.3.1, 3.3.3.2, 3.3.3.3 paveiksluose.



3.3.3.1 pav. Spektras, kai $\Delta f=50$; $L= 0$ km

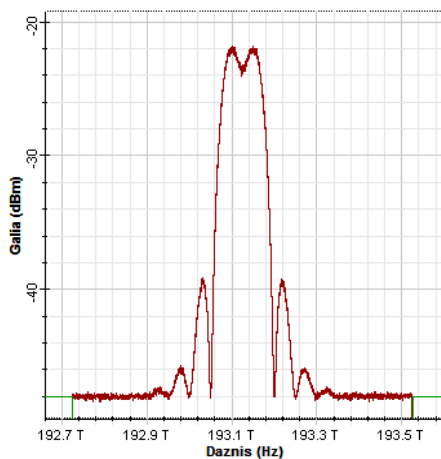


3.3.3.2 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

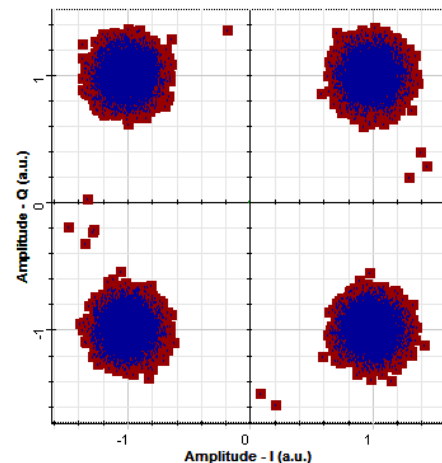


3.3.3.3 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

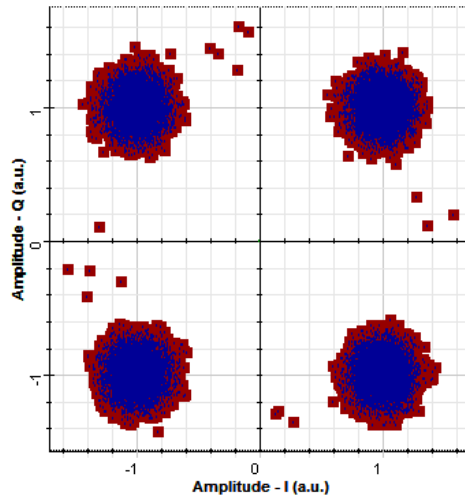
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų s diagramos, kai $\Delta f =50$, o atstumas 80 km pateikiami 3.3.3.4, 3.3.3.5, 3.3.3.6 paveiksluose.



3.3.3.4 pav. Spektras, kai $\Delta f=50$; $L=80$ km

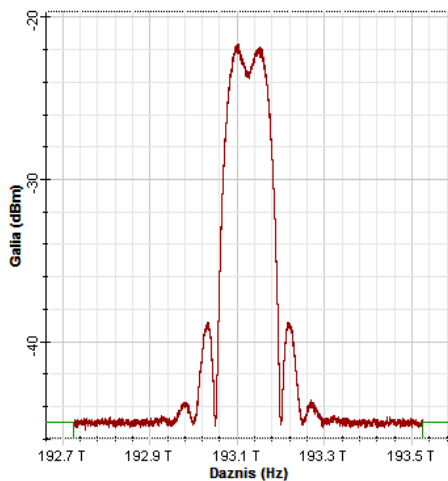


3.3.3.5 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

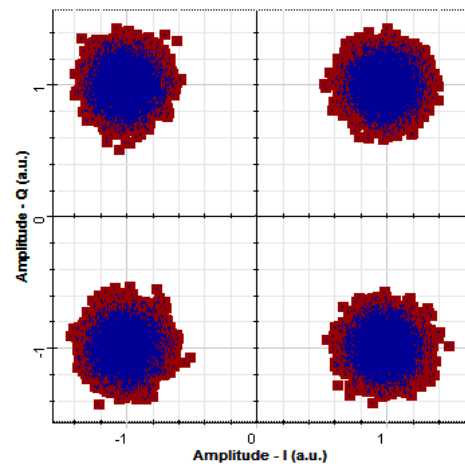


3.3.3.6 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

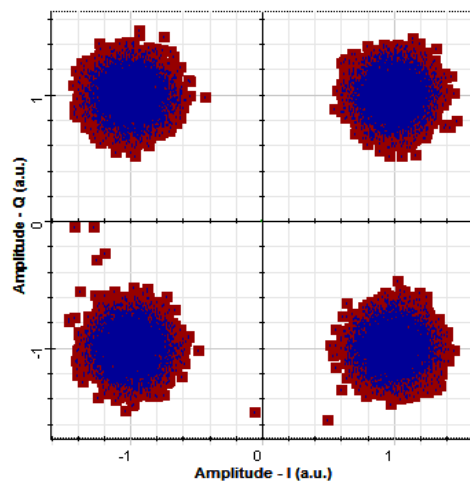
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f = 50$, o atstumas 160 km pateikiami 3.3.3.7, 3.3.3.8, 3.3.3.9 paveiksluose.



3.3.3.7 pav. Spektras, kai $\Delta f = 50$; $L = 160$ km

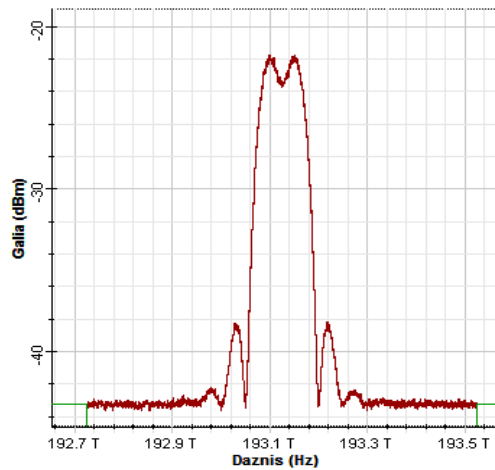


3.3.3.8 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

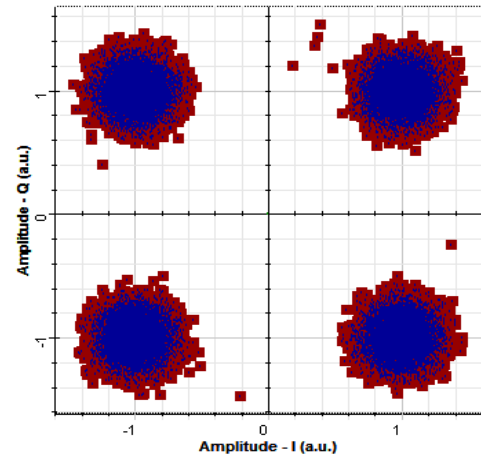


3.3.3.9 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

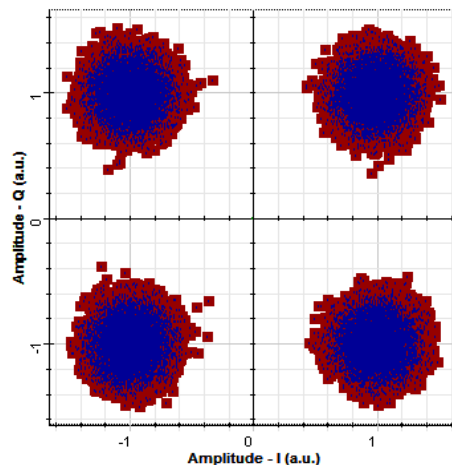
Gauti signalų spektrai ir žvaigždynų diagramos, kai $\Delta f = 50$, o atstumas 240 km pateikiami 3.3.3.10, 3.3.3.11, 3.3.3.12 paveiksluose.



3.3.3.10 pav. Spektras, kai $\Delta f=50$; $L=240$ km



3.3.3.11 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo



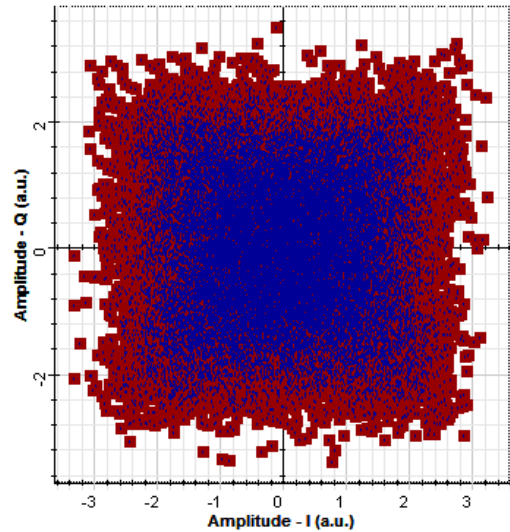
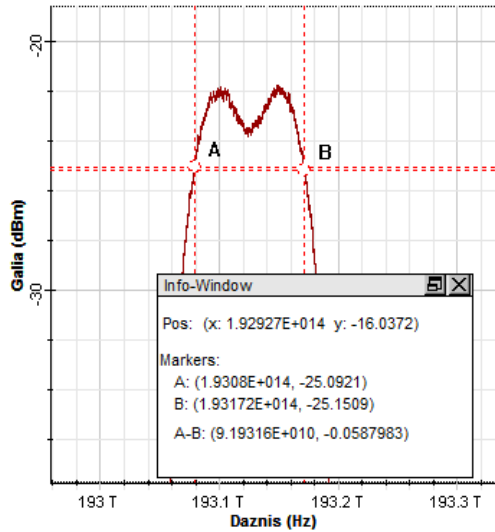
3.3.3.12 pav. CH2 signalo žvaigždynų diagrama po dispersijos kompensavimo

Tarpusavyje lyginant signalų spektrus stipriai išsiskiria, pirmasis signalo spektras (3.3.3.1 pav.), kuris gaunamas, kai atstumas yra 0 km. Diagramoje matomi 2 pikai, kurie atitinka kanalus su 193.1 THz ir 193.15 THz centriniais dažniais. Abu impulsai yra prasiplėtę lyginant su kitais spektrų grafikais. Nepaisant impulsų persiklojimo perdavimo kokybė išliko gana aukšta. Tai rodo toli vienas nuo kito esantys taškai signalo žvaigždynų diagramose (3.3.3.2 pav. ir 3.3.3.3 pav.) bei didesnės nei 7 Q faktoriaus reikšmės (žiūrėti 3 lentelėje, Priedai).

Lyginant likusias OSA diagramas (3.3.3.4 pav., 3.3.3.7 pav. ir 3.3.3.10 pav.) ir Q faktoriaus vertes (žiūrėti 3 lentelėje, Priedai), kiekvienu atveju matome, jog abu signalai yra arti vienas kito, tačiau kokybė žiūrint į signalo žvaigždynų schemas ir Q vertes kinta nežymiai. Taip yra todėl, jog signalų susijungimas yra žemiau nei vertė, kurią atitinka -3 dB ir signalų spektrai iš dalies persidengia, tačiau dispersijos efektų kompensavimas atstato aukštą kokybės lygį.

Atlikus papildomą modeliavimą, kai $\Delta f= 50$ GHz, $L=80$ km, bei nekompensuojant dispersijos

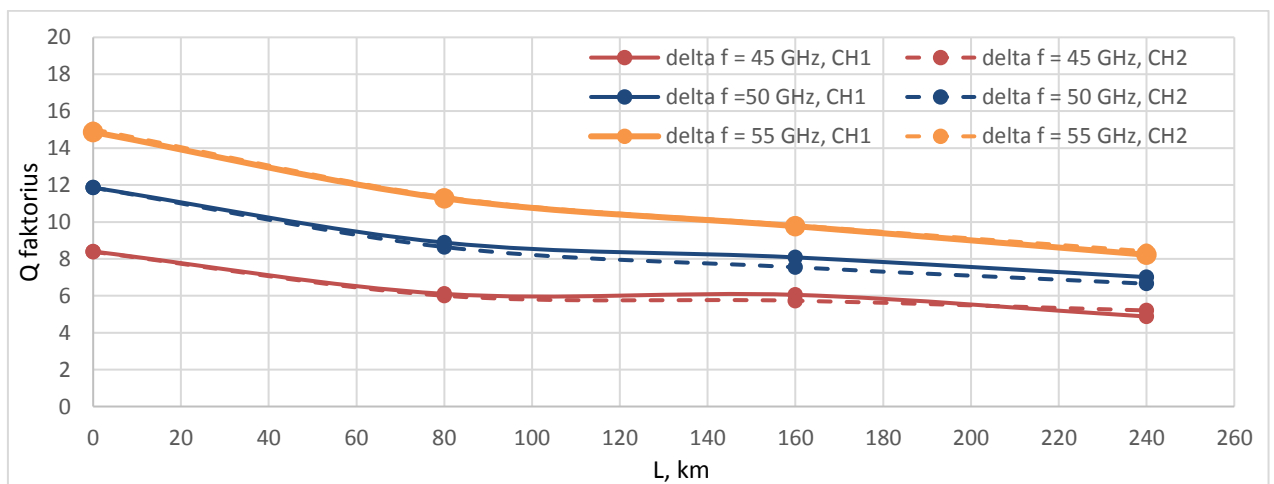
įtakos $Q_1=1,71$, $Q_2=1,73$. Tai didelis sumažėjimas lyginant su $Q_1=8,81$ ir $Q_2=8,64$, kai dispersijos poveikis buvo kompensuojamas. Signalų spektras ir signalo žvaigždynų diagrama pirmame kanale pateikiami 3.3.3.13 pav. ir 3.3.3.14 pav. Vietoje 4 taškų, kurie būdingi naudojant QPSK moduliaciją, dėl stipraus dispersijos poveikio jie susiliejo į vieną. Tokioje ryšio linijoje duomenų perdavimas neįmanomas.



3.3.3.13 pav. Spektras, kai $\Delta f=50$ GHz; $L=80$ km (be dispersijos kompensavimo)

3.3.3.14 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama (be dispersijos kompensavimo)

3.3.3.15 paveiksle pateikiama Q faktoriaus priklausomybė abiejuose kanaluose nuo skaidulos ilgio, prie kanalų atskyrimo $\Delta f=55$ GHz, 50 GHz ir 45 GHz verčių.



3.3.3.15 pav. Q faktoriaus priklausomybė nuo skaidulos ilgio (CH1 ir CH2), $R=100$ Gbps

Kaip ir pirmu atveju nagrinėjant duomenų perdavimą 40 Gbps sparta, taip ir šiame tyrimo etape, kai duomenų sparta yra 100 Gbps dėmesys atkreipiamas į abiejuose kanaluose gaunamas Q faktoriaus vertes, priklausomai nuo atstumo bei nuo atskyrimo tarp kanalų Δf . Žymėjimo pobūdis išlieka toks pats, nepertraukiama linija žymi Q faktoriaus vertes pirmame kanale, punktyru yra žymimos Q faktoriaus vertės antrame kanale. Atskyrimui tarp gretimų kanalų esant 45 GHz ir 55

GHz Q faktoriaus vertės labai panašios, todėl abi tiesės persiklojusios. Tuo tarpu, kai Δf yra 50 GHz skirtumas tarp Q verčių antroje (80 km - 160 km) ir trečioje (160 km - 240 km) atkarpoje labiau matomas. Projektuojant sistemas, kuriose duomenys būtų perduodami didesniais nei 240 km atstumais ir naudojamas 50 GHz atskyrimas reiktų atkreipti dėmesį ar visuose kanaluose užtikrinami reikiami kokybės reikalavimai.

Remiantis 3.3.3.15 pav. pateikta Q faktoriaus priklausomybe, matome, jog ribinis Δf prie kurio dar tenkinami kokybės reikalavimai ($Q \geq 7$), kai perdavimo atstumas siekia 40 km yra 45 GHz. Toliau didinant atstumą, Q vertė krinta žemiau pageidaujamos perdavimo kokybės. Pirmoje atkarpoje (0 km - 80 km) reikiama kokybė užtikrinama be didelių problemų kai Δf yra 50 GHz ar 55 GHz. Antroje atkarpoje (80 km - 160 km) reikiama kokybė taip pat užtikrinama Δf esant 50 GHz ir 55 GHz. Tuo tarpu žengiant į trečią atkarpą (160 km – 240 km) Q faktorius, kai atskyrimas tarp gretimų kanalų yra 50 GHz vos patenkina į reikiamas ribas. Siekiant užtikrinti kokybišką duomenų perdavimą atstumuose didesniuose nei 210 km geriau naudoti didesnę atskyrimą tarp kanalų. Kai Δf yra 55 GHz Q faktoriaus vertė galiniame taške (240 km) siekia 8,22. Ši vertė leidžia daryti prielaidą, kad duomenis galima perduoti ir didesniu atstumu.

3.3.4 Optinio spektro tyrimas, kai R=10 Gbps

Tyrimui naudojama 3.1.2 paveiksle pateikta blokinė schema. Šioje dvikanalėje sistemoje siųstuvų galios yra 0 dBm, duomenys perduodami 10 Gbps sparta, moduliacija - QPSK. Simuliacijos vykdomos atstumą tarp dviejų kanalų Δf mažinant nuo 15 GHz iki 5 GHz, kas 5 GHz bei didinant perdavimo atstumą nuo 0 km iki 320 km, kiekvieną kartą pridodant po 80 km. Prieš imtuvus yra filtrai, kurių praleidžiamų dažnių ruožas yra 5 GHz. Kiekvieno modeliavimo metu sugeneruojama ir perduodama atsitiktinė 65536 bitų seka. Signalų perdavimo kokybė vertinama lyginant siųstuvo perduotą bitų seką su imtuve priimta bitų seka. Aptartieji modelio parametrai pateikiami 7 lentelėje.

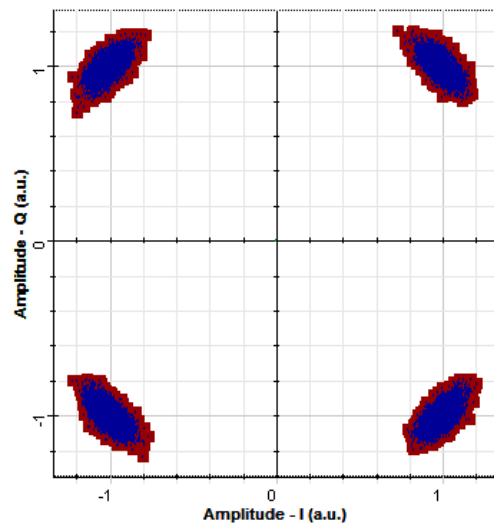
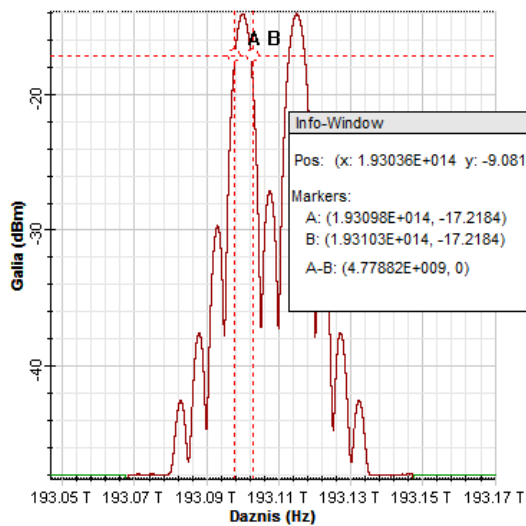
7 lentelė. Pagrindiniai imitacinio modelio parametrai

Siųstuvo Tx1/Tx2 galia	0 dBm	Duomenų perdavimo sparta	10 Gbps
Filtro dažnių juosta	5 GHz	Moduliacijos schema	QPSK
Skaidulos ilgis	0 – 320 km	EDFA stiprinimas	16 dB
Atskyrimas tarp kanalų Δf	15 GHz – 5 GHz	EDFA triukšmas	4 dB

Kiekvienos iteracijos metu buvo matuojamos OSNR reikšmės po signalų sutankinimo, stebimas signalų spektras, skaičiuojamos Q faktoriaus vertės. Netiesinių efektų įtaka nekompensuojama. Tuo tarpu dispersijos reiškiniai kompensuojami DSP modulyje.

Atlikus papildomą modeliavimą, kai $\Delta f = 15$ GHz, $L = 80$ km, bei nekompensuojant dispersijos įtakos $Q_1 = 18,00$, $Q_2 = 17,49$. Rezultatai nekompensuojant dispersijos gauti panašūs į rezultatus gautus vykdant dispersijos kompensavimą $Q_1 = 17,71$ ir $Q_2 = 17,33$. Signalų spektras ir signalo žvaigždynų

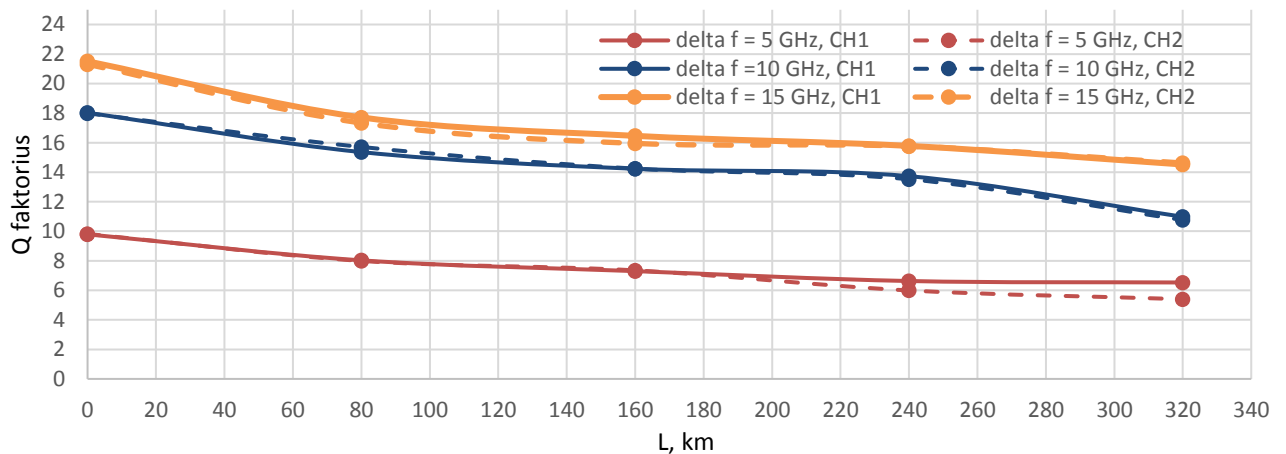
diagrama pirmame kanale pateikiami 3.3.4.1 pav. ir 3.3.4.2 pav. Matome, kad taškai signalo žvaigždynų diagramoje nutolę vienas nuo kito. Tokioje ryšio linijoje duomenų perdavimas vykdomas palaikant daugiau nei dvigubai aukštesnius kokybinius standartus.



3.3.4.1 pav. Spektras, kai $\Delta f=15$ GHz; $L=80$ km (be dispersijos kompensavimo)

3.3.4.2 pav. CH1 signalo žvaigždynų diagrama (be dispersijos kompensavimo)

3.3.4.3 paveiksle pateikiama Q faktoriaus priklausomybė abiejuose kanaluose nuo skaidulos ilgio, prie kanalų atskyrimo $\Delta f=15$ GHz, 10 GHz ir 5 GHz verčių.



3.3.4.3 pav. Q faktoriaus priklausomybė nuo skaidulos ilgio (CH1 ir CH2), $R=10$ Gbps

Žymėjimas išlieka toks pats, nepertraukiama linija atitinka Q faktoriaus kitimą pirmame kanale, tuo tarpu punktyru žymima Q faktoriaus vertės kitimas antrame kanale. Q faktoriaus vertės, kai Δf atitinka 15 GHz ir 10 GHz abiejuose kanaluose gautos panašios. Kai atskyrimas tarp gretimų kanalų sumažinamas iki 5 GHz, matome, jog esant didesniai nei 240 km atstumui skirtumas tarp Q faktoriaus verčių pirmame ir antrame kanale auga.

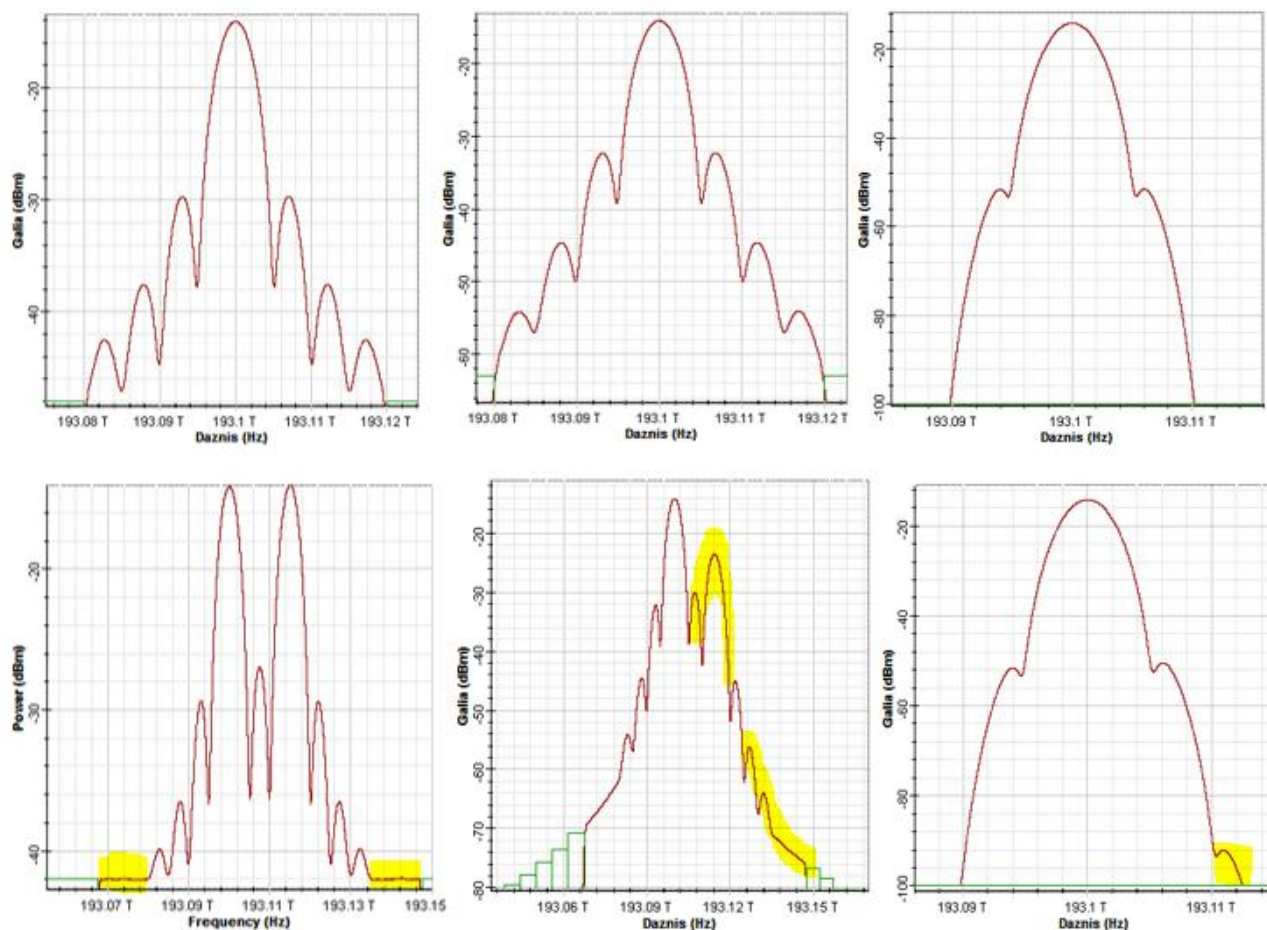
Atsižvelgiant į bendrą Q faktoriaus vertės mažėjimo tendenciją, didinant perdavimo atstumą matome, jog duomenų perdavimą vykdančią 10 Gbps sparta ir naudojant 5 GHz atskyrimą, kokybiškas duomenų perdavimas galimas tik iki 160 km, kol $Q \geq 7$. Didinant atstumą ir išlaikant tokį patį

atskyrimą tarp gretimų kanalų Q faktoriaus vertė krinta žemiau 7. Kai $\Delta f=10$ GHz matome, kad ir pasiekus didžiausią tirtą atstumą 320 km, Q faktoriaus vertė nenukrinta žemiau 10. Tuo tarpu pasirinkus dar didesnę atskyrimą tarp kanalų Q faktoriaus vertė galiniame taške yra ne mažesnė nei 14. Šie duomenys rodo, jog yra kokybinio potencialo duomenis 10 Gbps sparta perdavinėti, kur kas didesniais atstumais. Tikslesnės Q faktoriaus ir OSNR vertės pateikiamos prieduose (žiūrėti 6 ir 7 lentelėje, Priedai).

3.3.5 Netiesinių efektų įtaka

Netiesinių efektų, aprašytų 2.3 skyriuje, įtaka nagrinėjama lyginant signalų spektrus keliais atvejais. Pirmiausia išskirstytuvo įėjime, toliau filtro stoviničio prieš imtuvą įėjime ir išėjime. Grafiškai optinių spektro analizatorių išdėliojimas matomas 3.1.2. blokinėje schemoje.

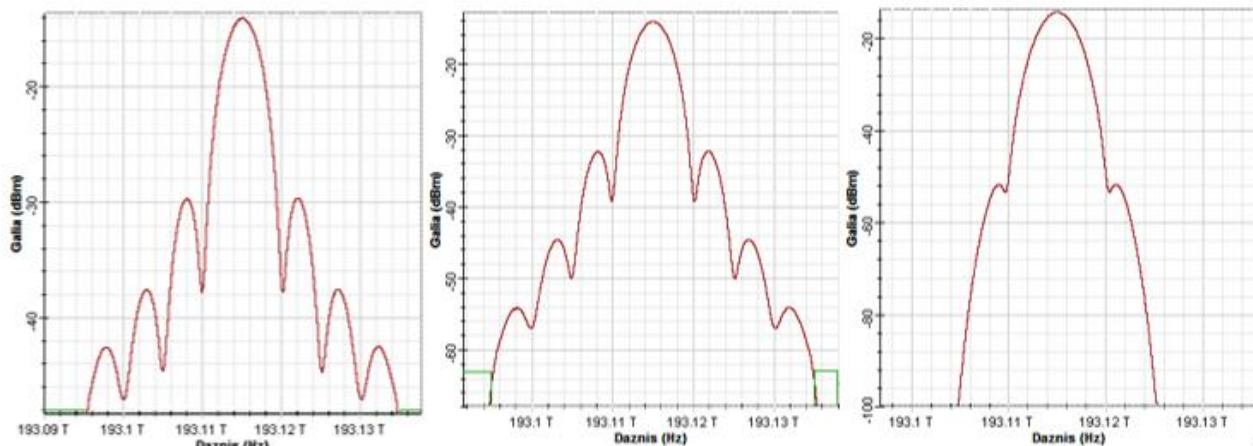
Nagrinėjami signalo perduodamo 10 Gbps sparta spektrai, kai $\Delta f=15$ GHz, o atstumas 80 km. Tai reiškia, jog pirmas siųstuvus naudoja 193,1 THz centrinį dažnį, o antras siųstuvus 193,115 THz centrinį dažnį.



3.3.5.1 pav. CH1 signalo spektrai ir suminiai spektrai naudojant CH1 ir CH2, kai R=10 Gbps

Pirmoje eilėje matome 10 Gbps signalo spektrus, kai duomenys perduodami vienu kanalu, t.y. veikia tik pirmasis siųstuvus. Iš kairės į dešinę: signalo spektras išskirstytuvo įėjime, signalo spektras

filtro stovinčio prieš imtuvą įėjime ir signalo spektras filtro išėjime. Po filtro signalas perduodamas į imtuvą. Antroje eilėje pateikiami signalų spektrai kai naudojami abu siųstuvai. 3.3.5.2 paveiksle pateikiami spektrai, kai veikia tik antrasis siųstuvai. Šio atveju spektro forma identiška kaip 3.3.5.1 pav. pirmoje eilėje, skirtumas tik tas, kad antro kanalo spektras perstumtas dažnių ašyje per Δf vertę.



3.3.5.2 pav. CH2 signalo spektrai, kai R=10 Gbps

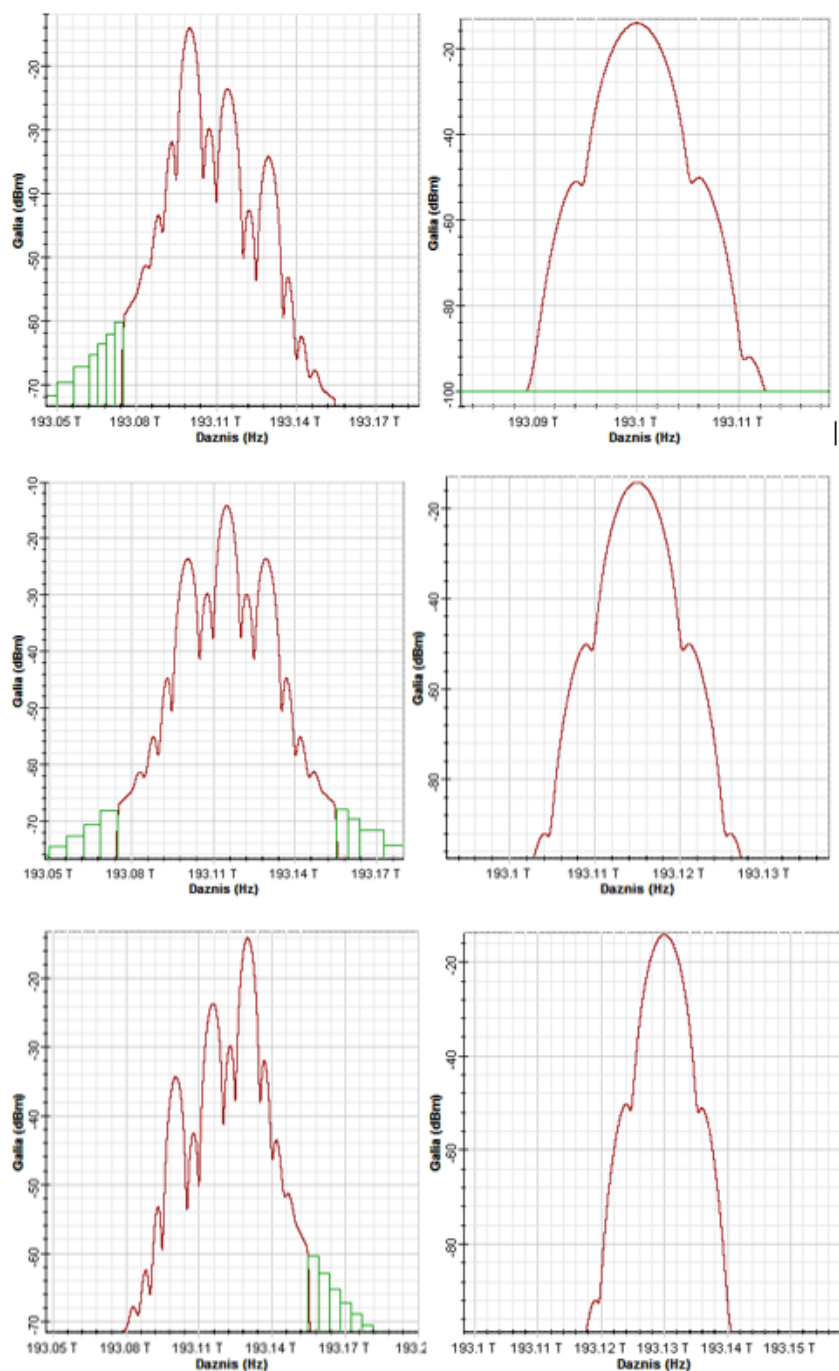
Įvertinus, jog pirmo šviesos šaltinio spektras prasideda ties 193,08 THz verte, o antrojo šviesos šaltinio spektras baigiasi ties 193.134 THz verte, matome, jog perduodant abu kanalus vienu metu -46 dBm lygyje atsiranda papildomų dedamųjų (3.3.5.1 pav. antra eilė, pirmas spektras iš dešinės). Šiuo atveju pasireiškia FWM netiesinis efektas, kurio sukurtos komponentės pasiskirsto dažnių ruože nuo 193,066 THz iki 193,08 THz (t.y. iki tos vietos, kur prasideda pirmo siųstuvo išspinduliuotas spektras) ir nuo 193,134 (t.y. tos vietos kur baigiasi antro siųstuvo išspinduliuotas spektras) iki 193,148 THz. FWM suformuoti papildomi dažniai turėtų paveikti duomenų perdavimo kokybinius rodiklius trečiame ir ketvirtame kanaluose, turint galvoje, jog kanalai būtų formuojami paliekant 15 GHz atskirtį tarp centrinių dažnių.

Norint patvirtinti arba paneigti FWM suformuoto spektro įtaką trečiam kanalui prie esamos blokinės schemos buvo pridėtas dar vienas siųstuvai, imtuvas ir kiti reikalingi komponentai taip suformuojant 3 kanalų DWDM sistemą. Šio tyrimo metu buvo stebimas Q faktoriaus verčių kitimas, kai perdavimo atstumas kinta nuo 0 km iki 320 km, naudojama 15 GHz atskirtis tarp kanalų, o duomenys perduodami 10 Gbps sparta. Gauti tyrimo rezultatai pateikiami 8 lentelėje:

8 lentelė. Q vertės, kai R=10 Gbps

L	CH1	CH2	CH3
0 km	21.38	19.77	21.26
80 km	19.46	17.12	19.05
160 km	18.07	16.72	17.89
240 km	16.19	15.68	16.82
320 km	15.59	14.32	15.71

Iš lentelėje pateiktų duomenų matome, jog FWM pasireiškimas neturi beveik jokios neigiamos įtakos signalų perdavimo kokybei, gretimuose kanaluose. Taip greičiausiai yra dėl to, jog sistemoje palaikomas geras signalo galia/ triukšmas santykis. Signalo pagrindinio lapelio galia siekia -26 dBm, tuo tarpu netiesiniai efektų įtaka pastebima -46 dBm lygyje. Prasčiausios Q faktoriaus vertės gautos antrame kanale, taip yra dėl to jog signalo spektras tarpusavyje persidengia ir su pirmu kanalu, ir su trečiu. Šiame kanale gautos Q vertės apibrėžia blogiausio scenarijaus atvejį, kitaip tariant parodo gretimų kanalų įtaką. Tačiau visais atvejais išlaikomas itin aukštas kokybės lygis, kadangi optinėse sistemose Q faktorius turi būti ne mažiau nei 7, o tyrimo metu Q faktoriaus vertė nenukrito žemiau 14,32 (žiūrėti 8 lentelėje).



3.3.5.3 pav. CH1, CH2 ir CH3 signalų spektrai prieš ir po filtro, kai R=10 Gbps

3.3.5.3 pav. vaizduoja, kaip atrodo signalų spektrai prieš ir po filtro, pastatyto prieš imtuvą, kai vienu metu perduodami 3 signalai. Nors iš išskirstytuvo išėjusių signalų spektruose yra gretimų signalų dedamųjų, tačiau filtras nereikalingus komponentus panaikina. Tai viena iš priežasčių leidžiančių užtikrinti aukštą perdavimo kokybę.

Nagrinęjant 3.3.5.1 pav. antroje eilėje pateiktą vidurinį spektrą, matome jo pokytį lyginant su tuo atveju kai perduodamas tik pirmo arba tik antro siųstuvo signalai. Šiuo atveju iš išskirstytuvo išėjusiame signale matomos ir gretimo kanalo signalo dedamosios (pažymėta geltonai 3.3.5.1 pav. antra eilė vidurinis spektras). Tačiau filtro prieš imtuvą pagalba didelė dalis papildomų dedamųjų panaikinama (3.3.5.1 pav. antra eilė trečias spektras). Esant 2 ar daugiau kanalų, tai leidžia užtikrinti gana aukštą kokybės lygį. Kai perduodamas tik pirmo siųstuvo signalas, priimto signalo kokybė $Q_1=18,02$, kai perduodamas tik antro siųstuvo signalas, priimto signalo kokybė $Q_2=17,99$. Kai abu signalai perduodami vienu metu $Q_1=17,71$, o $Q_2=17,33$. Matome, kad perdavimo kokybė suprastėjo gana nedaug.

Netiesiniai reiškiniai nekelia problemų, esant mažoms spartoms t.y. 10 Gbps ir 40 Gbps, tuo tarpu kai sparta padidinama iki 100 Gbps. Q faktoriaus vertės krinta žemiau būtinos $Q=7$ vertės, kai atskyrimas tarp kanalų 45 GHz, perdavimo atstumas 80 km ir naudojama trijų kanalų DWDM sistema. Šio atveju būtina atkreipti dėmesį ar sistemoje sureguliuotas galios balansas, ar pasirinkti tinkami filtrų pralaidumai. Taip pat esant didelėms spartoms atsiranda apribojimai kylantys dėl skaidulos charakteristikų. Moksliniai tyrimai teigia, jog standartinio efektyvaus skaidulos ploto, kuris yra $80 \mu\text{m}^2$ nepakanka ir reikia jį didinti iki $120 \mu\text{m}^2$. Taip pat vienas iš būdų gerinti signalų perdavimo kokybę yra tikslesnių lazerių naudojimas, kurie išspinduliuoja siauresnį spektrą, bei imtuvuose naudoti specialius filtras, kurie susiaurintų išeinančio signalo spektrą.

3.3.6 Kanalų formavimas EON tinkluose

Šiame skyriuje nagrinėjama kaip būtų galima efektyviau paskirstyti kanalus C juostoje atsižvelgiant į tyrimo metu gautą kokybės priklausomybę nuo atskyrimo tarp gretimų kanalų ir perdavimo atstumo.

Remiantis ITU-T 2012 metais įvestais pakeitimais G.694.1 standarte [4], matome, kad palengvinti naujų sistemų palaikymą mažiausias galimas spektro tinklelio gradavimas yra 6,25 GHz. Ir siūloma spektro paskirstymą aprašyti šia formule:

$$193.1 + n \times 0.00625 \quad (X)$$

kur n yra teigiamas arba neigiamas skaičius įskaitant 0.

Atsižvelgiant į šį G.694.1 standarte aprašytą gradavimo principą tiriamojo darbo metu gautos Δf vertės paverčiamos į arčiausią 6,25 GHz kartotinį. Naujos Δf vertės bus didesnės už tyrimo metu gautas ribines Δf vertes. Tarp gretimų kanalų atsiras apsauginiai intervalai, kurie perdavimo kokybei

gali turėti tik teigiamą įtaką. 9 lentelėje pateikiamos senos ir naujos Δf vertės.

9 lentelė. Δf prieš ir po perskaičiavimo

Tiriamąo darbo metu gauta Δf	Perskaičiuota Δf	Tiriamąo darbo metu gauta Δf	Perskaičiuota Δf
5 GHz	6,25 GHz	25 GHz	31,25 GHz
10 GHz	12,5 GHz	45 GHz	50 GHz
15 GHz	18,75 GHz	50 GHz	56,25 GHz
20 GHz	25 GHz	55 GHz	62,5 GHz

Žinant naujas atskyrimo tarp kanalų vertes galima įvertinti, kiek kanalų pavyks suformuoti C dažnių juostoje, kuriai priklauso 1530 nm – 1565 nm bangos ilgiai arba 191,56 THz – 195,94 THz dažniai. Jei atskyrimas tarp kanalų yra 100 GHz, tai C juostoje telpa 45 kanalai. Skaičiavimų rezultatai, esant mažesniems atskyrimams tarp gretimų kanalų pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė. Kanalų skaičius naudojant lankstų tinklą

Atskyrimas tarp gretimų kanalų	Kanalų skaičius C juostoje	Atskyrimas tarp gretimų kanalų	Kanalų skaičius C juostoje
6,25 GHz	700	31,25 GHz	140
12,5 GHz	350	50 GHz	87
18,75 GHz	233	56,25 GHz	77
25 GHz	175	62,5 GHz	70

Iš lentelėje pateiktų duomenų matome, kad naudojant mažiausią galimą atskyrimą tarp kanalų – 6,25 GHz C juostoje įmanoma sutalpinti net 700 kanalų. Remiantis 3.3.4.3 paveiksle pateiktu grafiku galima teigti, jog toks atskyrimas tarp kanalų pakankamas duomenims 10 Gbps sparta perduoti ne didesniu nei 160 km atstumu išlaikant reikiamą kokybės lygį. Toks perdavimas užtikrintų 7 Tbps perdavimo spartą. Jeigu yra poreikis duomenis perduoti didesniais atstumais būtina didinti Δf . Naudojant 12,5 GHz atskyrimą C juosta galima perduoti 350 kanalų, kiekviename jų duomenis perduodant 10 Gbps sparta. Šiuo atveju perdavimo atstumas išauga iki 320 km, o suminė perdavimo sparta siektų 3,5 Tbps.

Remiantis 3.3.2.15 paveiksle pateiktomis Q faktoriaus priklausomybėmis bei 9 ir 10 lentelėse pateiktais duomenimis galima teigti, jog kokybiškas signalų perdavimas 40 Gbps sparta įmanomas naudojant ne mažesnę nei 18,75 GHz atskyrimą tarp gretimų kanalų. Šiuo atveju C juostoje telpa 233 kanalai, todėl ne didesniu nei 20 km atstumu turėtų būti įmanoma užtikrinti 9,32 Tbps perdavimo spartą. Jei reikalingas didesnis perdavimo atstumas Δf išauga iki 25 GHz. Tai leidžia C juostoje naudoti 175 kanalus ir galimai užtikrina 7 Tbps perdavimo spartą ne didesniu nei 240 km atstumu.

Tyrimo metu analizuojant sistemas, kuriose duomenų perdavimo sparta siekia 100 Gbps, susidurta su kliūtimis, kai vietoj dviejų kanalų buvo naudojami trys. FWM efekto įtaka ir platus

šviesos šaltinio išspinduliuotas spektras lėmė, jog signalų perdavimui naudojant tris kanalus Q faktoriaus vertės krito žemiau pageidaujamo kokybės lygio. Dėl šios priežasties prieš tai naudotas vertinimas R esant 10 Gbps ar 40 Gbps netinkamas šiuo atveju. Pirmiausia reiktų surasti būdą kompensuoti arba dalinai panaikinti netiesinių efektų įtaką. Kaip jau buvo minėta 3.3.5 skyriuje pagrindinės priemonės reguliuojančios netiesinių efektų įtaką galėtų būti atstumo tarp gretimų kanalų didinimas, tikslesnių lazerių naudojimas, kurie išspinduliuoja siauresnį spektrą, siųstuvuose naudoti specialius filtras, kurie susiaurintų išeinančio signalo spektrą. Taip pat užtikrinti sureguliuotą galios balansą skaiduloje ar keisti skaidulos charakteristikas. Teoriniu atveju, jei netiesinių efektų poveikį pavyktų sumažinti, naudojant 62,5 GHz atskyrimą tarp gretimų kanalų C juostoje turėtų pavykti sutalpinti 70 kanalų, kurių kiekvieno perdavimo sparta siektų 100 Gbps. Tokios sistemos suminė perdavimo sparta ne didesniu nei 240 km atstumu būtų 7 Tbps.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad norint iširti EON optinio spektro paskirstymo efektyvumą būtina įvertinti kaip optinis spektras išnaudojamas naudojant skirtingą atskirtį tarp kanalų, bitų perdavimo spartas, keičiant signalų perdavimo atstumą bei netiesinių efektų įtaką. Šiam uždaviniui spręsti buvo sudarytas atitinkamas priklausomybes įvertinantis imitacinis modelis.
2. Ištyrus optinio signalo charakteristikų priklausomybes nustatyta, kaip optinio signalo pareikalaujamas dažnių pralaidumas priklauso nuo bitų perdavimo spartos. Kai bitų sparta yra 10 Gbps reikalingas bent 5 GHz pralaidumas, 40 Gbps reikalingas bent 20 GHz pralaidumas, kai sparta yra 100 Gbps reikalingas bent 50 GHz pralaidumas.
3. Nustatyta, jog signalų perdavimo kokybės faktorius Q labai priklauso nuo atskirties tarp kanalų. Pvz.: kai bitų perdavimo sparta $R=40$ Gbps, atskirtis yra 25 GHz, o atstumas 240 km – $Q=10.3$, kai atskirtis yra 20 GHz esant tam pačiam atstumui $Q=8.22$, kai atskirtis 15 GHz – $Q=4.55$. Naudojant 15 GHz atskyrimą kokybiškas signalų perdavimas įmanomas tik iki 80 km.
4. Įvertinant netiesinių efektų įtaką buvo atliktas modeliavimas, kuris parodė, jog atskyrimui tarp kanalų esant 15 GHz ir duomenis perduodant 10 Gbps sparta, pasireiškia FWM ir matomas kanalų persidengimas, tačiau šie reiškiniai nelemia ženklus signalų perdavimo kokybės suprastėjimo. Stipri netiesinių efektų įtaka pastebėta esant 100 Gbps spartai, Q faktoriaus vertės krito žemiau kokybiškam perdavimui būtinos vertės
5. Pasiūlytas efektyvesnis kanalų skirstymo metodas, kuris priklausomai nuo Q faktoriaus ir perdavimo atstumo leidžia C dažnių juostoje perduoti skirtingą kanalų skaičių. Pvz.: pareikalaujamai spartai esant 10 Gbps, C juostoje galima suformuoti 700 arba 350 kanalų, Šis metodas leistų pasiekti 7 Tbps, kai atstumas neviršija 160 km arba 3,5 Tbps suminę perdavimo spartą, kai atstumas ne daugiau 240 km.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. White Paper „The Zettabyte Era - Trends and Analysis – Cisco“, 2016 m. Prieiga per internetą: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>
2. The Fiber Optic Association, Inc „Guide to Fiber Optics & Premises Cabling“. Prieiga per internetą: <http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/SMbands.html>
3. Toshio Morioka, Masahiko Jinno, Hidehiko Takara, and Hirokazu Kubota „Innovative Future Optical Transport Network Technologies“, 2011 m. Prieiga per internetą: <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201108fa6.html>
4. ITU-T „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“, 2nd ed. ITU-T Recommendation G.694.1, 2012 m. Prieiga per internetą: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>
5. Ori Gerstel, Masahito Jinno, Andrew Lord, S.J. Ben Yoo „Elastic Optical Networking: A New Dawn for Optical Layer?“, 2012 m. IEEE Communication magazine, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6146481&isnumber=6146464>
6. Xiaoxu Li, Xin Chen, Gilad Goldfarb, Eduardo Mateo, Inwoong Kim, Fatih Yaman, Guifang Li „Electronic post-compensation of WDM transmission impairments using coherent detection and digital signal processing“, 2008 m. Prieiga per internetą: https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/15157F51-B090-6D81-9E4825B84E950870_148810/oe-16-2-880.pdf?da=1&id=148810&seq=0&mobile=no
7. Jianjun Yu, Xiang Zhou „Ultra-High-Capacity DWDM Transmission System for 100G and Beyond“, 2010 m. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5434379/>
8. Masahiko Jinno „Elastic Optical Networking „Roles and Benefits in Beyond 100-Gb/s Era“, 2016 m. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7792159/>
9. Gabriella Bosco, Vittorio Curri, Andrea Carena, Pierluigi Poggiolini, Fabrizio Forghieri „On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers“. 2012 m. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5624553>
10. G. Bosco, A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, and F. Forghieri, “Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems,” 2010 m. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5471215/>
11. H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, M. Jinno „Spectrally-efficient elastic optical path networks“, 2012 m. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6476524/>
12. Fiber-Optics.Info, „Fiber Nonlinearities“. Prieiga per internetą: http://www.fiber-optics.info/articles/fiber_nonlinearities
13. Ian Poole „Comparison of 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM 128-QAM, 256-QAM, Types,“ Prieiga per internetą: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php>
14. Paulius Tervydis, Optinio ryšio tinklai, 2012 m ISBN 978-609-02-0693-5

15. Luo Frenzel „What’s The Difference Between Bit Rate And Baud Rate?“, 2012 m. Prieiga per internetą: <http://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-bit-rate-and-baud-rate>
16. Krishna Pillai „Modulation roundup: error rates, noise, and capacity“ 2008 m. Prieiga per internetą: <http://www.embedded.com/print/4017668>
17. ITU-T recommendation G.976 „Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems“, 2014 m. Prieiga per internetą: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.976-201405-I/en>
18. Gouri Deshmukh, Prof. Santosh Jagtap „Four Wave Mixing In DWDM Optical System“, 2013 m. International Journal of Computational Engineering Research. Prieiga per internetą: [http://pakacademicsearch.com/pdf-files/com/319/7-11%20Volume%203,%20Issue%206,\(Version%20II\)%20June,%202013.pdf](http://pakacademicsearch.com/pdf-files/com/319/7-11%20Volume%203,%20Issue%206,(Version%20II)%20June,%202013.pdf)
19. Dr. Rüdiger Paschotta „Four-wave Mixing“. RP Photonics Encyclopedia. Prieiga per internetą: https://www.rp-photonics.com/four_wave_mixing.html
20. Dr. Rüdiger Paschotta „Parametric Amplification“. RP Photonics Encyclopedia. Prieiga per internetą: https://www.rp-photonics.com/parametric_amplification.html
21. [M] Dr. Mikas Vengris „Kinetinė spektroskopija: paskaitų konspektas“, 2006-2008 m. Prieiga per internetą: http://web.vu.lt/ff/m.vengris/images/KS_konsp.pdf
22. Dr. Rüdiger Paschotta „Self-phase Modulation“. RP Photonics Encyclopedia. Prieiga per internetą: https://www.rp-photonics.com/self_phase_modulation.html
23. Dr. Rüdiger Paschotta „Cross-phase Modulation“. RP Photonics Encyclopedia. Prieiga per internetą: https://www.rp-photonics.com/cross_phase_modulation.html
24. Optiwave Systems Inc. „OptiSystem Overview“. Prieiga per internetą: <https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/>