

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Vilmantas Simpukas**

**ROF SIGNALO PERDAVIMO KOKYBĖS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Paulius Tervydis

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA**

**ROF SIGNALO PERDAVIMO KOKYBĖS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (621H64001)**

Vadovas

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

Recenzentas

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

Projektą atliko

(parašas) Vilmantas Simpukas  
(data)

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Vilmantas Simpukas

(Studento vardas, pavardė)

IŠMANIOSIOS TELEKOMUNIKACIJŲ TECHNOLOGIJOS (621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „RoF signalo perdavimo kokybės tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 5 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vilmanto Simpuko** baigiamasis projektas tema „RoF signalo perdavimo kokybės 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)

Simpukas, Vilmantas. RoF signalo perdavimo kokybės 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: *Radijo, signalas, skaidula, moduliacija, ponešliai, perdavimas.*  
Kaunas, 2017. 59 p.

## **SANTRAUKA**

Baigiamajame magistro projekte tyrinėjama radijo signalo perduodamo naudojant optinę skaidulą kokybė. Pasirinkta OFDM technologija, 4QAM ir 16QAM moduliacijos. Tiriama kaip signalo perdavimo kokybę įtakoja skaidulos ilgis, moduliacijos tipas, bitų perdavimo sparta bei ponešlių kiekis. Skaidulos atstumas tiriamas diapazone nuo 0 iki 200km. Pasirinkti 3 skirtingi ponešlių kiekiai: 128, 256 ir 512 ponešlių. Bitų perdavimo spartai keisti naudojamos 5 skirtingos spartos, 1Gbit/s, 5Gbit/s, 10Gbit/s, 20Gbit/s ir 40 Gbit/s. Įvertinti darbo rezultatams naudojami klaidingų simbolių kiekio, kokybės faktoriaus bei klaidingų bitų vektorinio dydžio parametrai. Rezultatų atvaizdavimui pateikiami grafikai lyginant perdavimo kokybę prie skirtingų bitų perdavimo spartų bei konsteliacijų grafikai, kurių rezultatai fiksuoti su skirtingomis moduliacijomis ties 10km, 50km, 100km, 150km ir 200km. Darbo pabaigoje pateikiamos apibendrinančios tyrimą išvados.

Simpukas, Vilmantas. Investigation of RoF Signal Transmission Quality. 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: *Radio, signal, fiber, modulation, subcarriers, transmission.*

Kaunas, 2017. 59 p.

## SUMMARY

In the final master's project it is researched how the radio signal transmitted through the optical fiber quality is changing. OFDM technology 4QAM and 16QAM modulations were investigated. Researched how signal transmission quality is influenced by fiber length, modulation type, bit rate and the subcarrier number. Fiber distance studied ranges from 0 to 200km. Selected three different subcarrier levels: 128, 256 and 512 subcarrier. Bit rate used in 5 different speeds: 1Gbit/s, 5Gbit/s, 10Gbit/s, 40 Gbit/s and 20Gbit/s. To evaluate work results these measures were used: quantity of false symbols, quality factor and false bit vector size measurements. Results are displayed in graphs and constellations visualizations to compare how the transmission quality depends on different bit rate, on different modulations and fiber length at 10km, 50km, 100km, 150km and 200km. At the end of the project the findings of the investigation are provided.

## TURINYS

ĮVADAS .....	7
1. ROF TECHNOLOGIJOS APŽVALGA .....	8
1.1. RoF naudojamos technikos .....	8
1.2. Analoginė RoF sistema .....	9
1.3. Skaitmeninis RoF .....	13
1.4. Signalo keitimas iš elektrinio į optinį .....	17
1.5. Optinio signalo keitimas į elektrinį .....	18
1.6. Aukšto spektrinio-našumo perdavimas .....	20
1.6.1. Ponešlių sutankinimas .....	20
1.6.2. Daugiasluoksni moduliacija .....	22
1.7. Aukšto spektrinio-našumo perdavimas .....	23
1.8. Tinklų modeliai .....	24
1.9. Apie radijo signalą .....	25
1.9.1. Išvesties galia .....	25
1.9.2. Galia radijo dažnių juostoje .....	26
1.9.3. Nepageidaujami signalai .....	27
1.9.4. Fazinis triukšmas .....	28
1.9.5. Moduliacijos kokybė .....	28
2. ROF SIGNALO KOKYBĖS TYRIMAS .....	30
2.1. RoF tyrimo modelis .....	30
2.2. Siųstuvas .....	30
2.3. Radijo signalo į optinį keitimas .....	32
2.4. Optinė skaidula .....	34
2.5. Optinio signalo į radijo keitimas .....	34
2.6. Imtuvas .....	35
2.7. Modeliavimas .....	38
3. GAUNAMI REZULTATAI .....	40
3.1. 128 ponešlių tyrimas .....	40
3.2. 256 ponešlių tyrimas .....	44
3.3. 512 ponešlių tyrimas .....	49
3.4. RoF taikymo galimybių įvertinimas .....	54
IŠVADOS .....	57
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....	58

## SUTRUMPINIMŲ SĄRAŠAS

ADC	analoginis – skaitmeninis keitiklis (angl. <i>A/D Converter</i> )
A/D	analoginis į skaitmenį (angl. <i>Analog to Digital</i> )
BB	nemoduluotas signalas (angl. <i>Baseband</i> )
BER	klaidingų bitų santykis (angl. <i>Bit Error Rate</i> )
BS	bazinė stotis (angl. <i>Base Station</i> )
CA	nešlių priskyrimas (angl. <i>Carrier Agregation</i> )
DAC	skaitmeninis - analoginis keitiklis (angl. <i>D/A Converter</i> )
DC	nuolatinė srovė (angl. <i>Digital Current</i> )
DEMUX	demultiplekseris (angl. <i>Demultiplexer</i> )
D-RoF	skaitmeninis RoF (angl. <i>D/A Digitized Radio over Fiber</i> )
E/O	elektrinis į optinį (angl. <i>Electrical to Optical</i> )
EVM	klaidos vektorinis dydis (angl. <i>Error Vector Magnitude</i> )
FDM	dažninis sutankinimas (angl. <i>Frequency Division Multiplexing</i> )
I/Q	palaiptinė fazė ir kvadratūrinė fazė (angl. <i>In-phase and Quadrature phase</i> )
iRoF-BB	RoF atitinkanti sąsaja(angl. <i>Radio over Fibre Baseband interface</i> )
iRoF-IF	RoF tarpinio dažnio sąsaja(angl. <i>Radio over Fibre Intermediate Frequency band interface</i> )
iRoF-RF	RoF radijo dažnio atitinkanti sąsaja (angl. <i>Radio over Fibre Radio Frequency band interface</i> )
LD	lazerinis diodas(angl. <i>Laser Diode</i> )
M-QAM	M-ary tipo kvadratūrinė amplitudinė moduliacija(angl. <i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i> )
MUX	multiplekseris (angl. <i>Multiplexer</i> )
OAN	optinės prieigos tinklas (angl. <i>Optical Access Network</i> )
O/E	optinis į elektrinį (angl. <i>Optical to Electrical</i> )
OFDM	statmenas dažninis sutankinimas (angl. <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> )
QAM	kvadratūrinė amplitudinė moduliacija (angl. <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> )
QPSK	kvadratūrinis fazinis poslinkis (angl. <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> )
RF	radijo dažnis (angl. <i>Radio Frequency</i> )
RRH	nutolusi radijo antena (angl. <i>Remote Radio Head</i> )
RRU	nutolęs radijo vienetas (angl. <i>Remote Radio Unit</i> )

## IVADAS

Išaugę plačiajuosčio ryšio prieigos vartotojų poreikiai sukuria situaciją, kuri reikalauja didesnės bitų perdavimo spartos bei aukštesnio radijo bangų perdavimo dažnio iš radijo ryšio paslaugų tiekėjų. Šių paslaugų realizavimui reikalingi fiziškai mažesni radijo prieigos taškai, kurie aptarnauja mažesnius gyvenamus plotus. Todėl radijo prieigos antenų skaičius itin išaugo. Be to, dalis šių paslaugų vartotojų yra teritorijose, kuriose radijo ryšys gali būti neprieinamas („radijo šešėlių“ zonose), pavyzdžiui, požeminės erdvės, tuneliai, teritorijos blokuojamos didelių pastatų, dangoraižių viršutiniai aukštai, teritorijos esančios kalnuotose regionuose. Daugelis radijo signalo perdavimo per optines skaidulas (angl. *Radio over Fiber (RoF)*) technologinių sprendimų skirtų šioms problemoms spręsti buvo sukurtos bei dislokuotos tiriant mikrobangų fotonikos (toliau MWP) taikymams.

Iš techninės pusės, klasikinės RF vaizdo perdavimo/transliavimo technologijos yra taip pat laikomas RoF technologijos dalimi, tačiau naudojama tik žemynkrypčio perdavimo funkcija. Kadangi RoF sistema paprastai laikoma analoginio perdavimo sistema, tai kokybiškam signalo perdavimui turi būti užtikrintas tinkamas signalo-triukšmo galios santykis, o signalo galios dinaminis diapazonas turėtų būti toks, kad būtų užtikrintas sistemos tiesiškumas. Alternatyvus radijo signalo perdavimo metodas – radijo signalo pavertimas skaitmeniniu ir jo perdavimas šviesolaidžiu (angl. *Digitized radio over fiber arba D-RoF*). D-RoF – skaitmeninė RoF technologijos versija. Tai yra patraukli alternatyva radijo signalų perdavimui, ypač tais atvejais, kada signalui tenka per didelis triukšmas ar neužtikrinamos tiesiškumo sąlygos. Dėl signalo skaitmenizavimo D-RoF pralaidumas tampa daug mažesnis negu naudojant analoginę RoF perdavimą. Skaitmeninės sąsajos, naudojamas mobiliosiose stotyse, dažnai naudoja RoF technologijas.

Darbo tikslas – ištirti radijo signalo perduodamo per optines skaidulas kokybės parametrų priklausomybes nuo skirtingų moduliacijos tipų, signalo perdavimo atstumo, bitų perdavimo spartos.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti RoF technologijų analizę ir signalo perdavimo kokybės rodiklių apžvalgą.
- Sudaryti signalo perdavimo per RoF sistemas tiriamąjį modelį.
- Atlikti RoF signalo kokybės priklausomybių įvertinimą.
- Pateikti RoF taikymo galimybių įvertinimą.

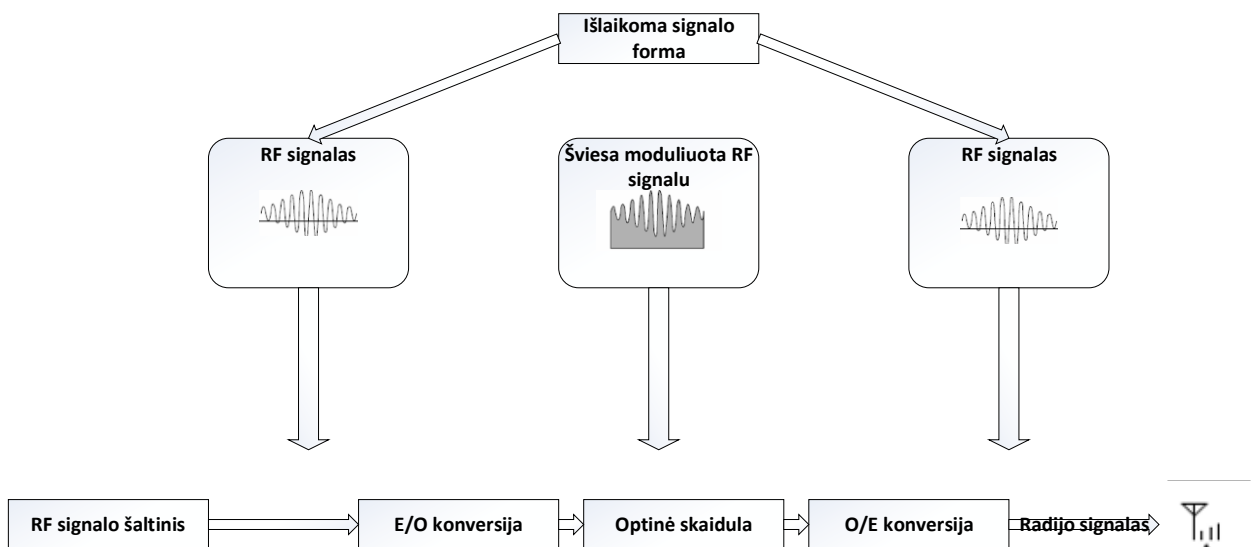


## 1. ROF TECHNOLOGIJOS APŽVALGA

Daugelio sistemų architektūros yra paremtos RoF technologija. Kuomet sistema sudaryta iš vienos bazinės stoties (BS) ir daugelio nuotolinių antenų zonų (tipinis RoF sistemos modelis), ją galima priskirti prie vienos iš dviejų kategorijų, kurias skiria per optines skaidulas perduodamų signalų tipai. Pirma sistema skirta perduoti nešlio signalams, antroji – ekvivalentiškiems žemo dažnio signalams perduoti. RoF sistemos tinkamos reliniam signalų perdavimui, bei „radijo šešėlių“ prevencijai. Šios architektūros ir jų ypatybės bus aiškinamos detaliai. Reikia pabrėžti, kad šiame skyriuje minimos sistemų architektūros yra standartinės ir tai, kad yra galimos ir kitokios architektūros.

### 1.1. RoF naudojamos technikos

Apibendrintas RoF sistemos veikimas pavaizduotas 1 pav. Jame parodyta, kad radijo signalas yra perduodamas per šviesolaidį, kuris nedaro esminės įtakos signalo formai perdavimo metu. Signale užkoduota reikšminga radijo ryšio informacija, pavyzdžiui, paties signalo formatas bei apkrova. Reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad radijo signalo perdavimo dažnis nedaro įtakos informacijos apdorojimui, todėl šiuo atveju yra laikomas neesminiu dydžiu.



1 pav. RoF sistemos struktūra

Taigi, RoF signalas turėtų būti matomas kaip analoginis signalas, perduodantis tokį pat radijo dažnį per optinį lygmenį, neatsižvelgiant į tai, kad radijo signalo (toliau RF) nešlio dažnis gali skirtis nuo pradinio radijo signalo. Kaip matome 1 pav., RoF sistema susideda iš keitiklių, kurie keičia elektrinį signalą į optinį (toliau E/O) bei optinį į elektrinį (toliau O/E), bei optinio kabelio signalo perdavimui. RoF turi dvi pagrindines ypatybes:

- Signalo formos išlaikymas: signalo forma išlieka iš esmės nepakitusi optinio perdavimo metu esant idealiomis arba beveik idealiomis sąlygomis;
- Apsauga prieš elektromagnetinius trikdžius: RoF signalai, keliaujantys šviesolaidiniu pluoštu, išlieka nepaveikti elektromagnetinių signalų, sklaidžiamų iš kitų radijo ryšių šaltinių.

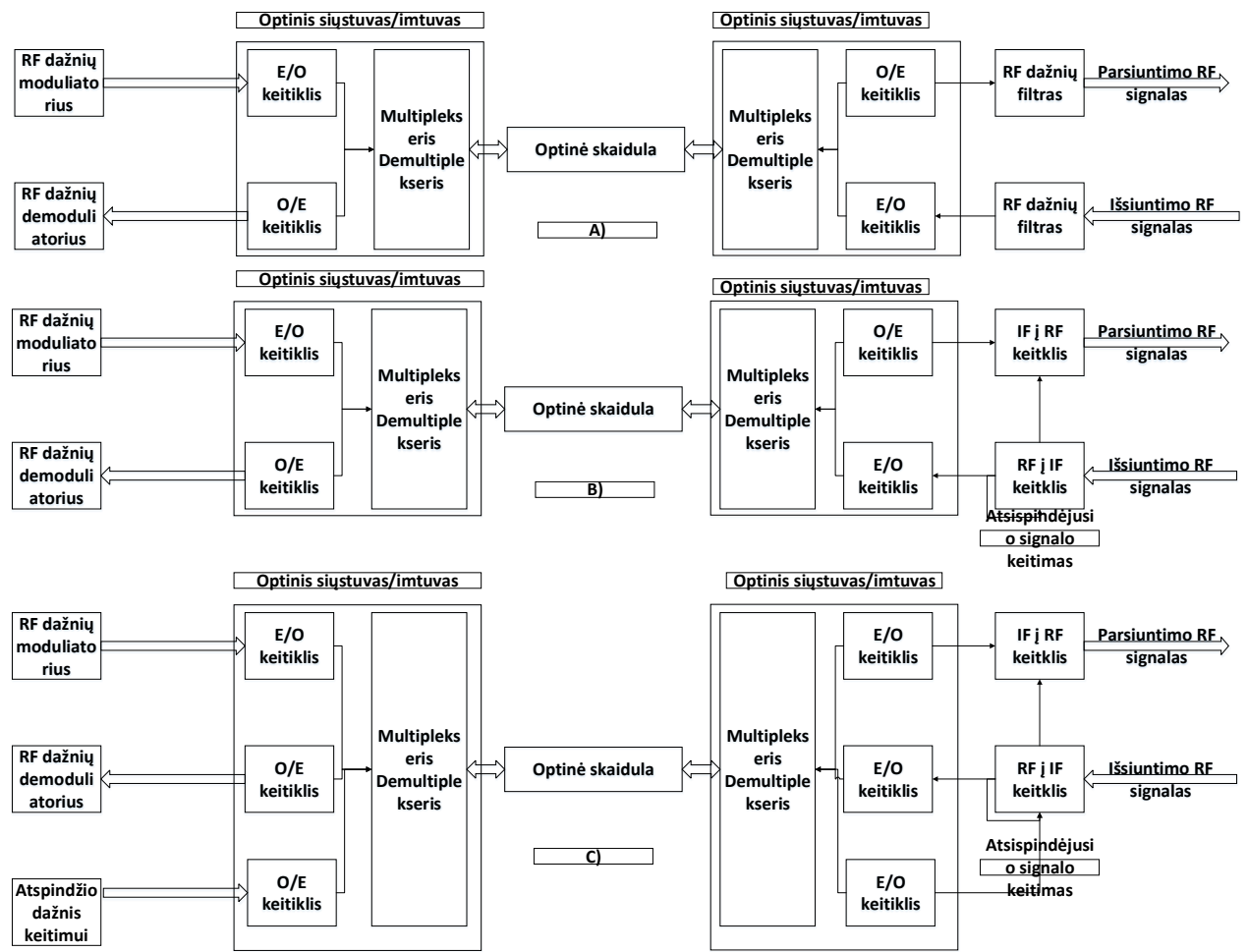
Yra kelios optinės technikos norint sugeneruoti ir perduoti mikrobanginius signalus optinėmis skaidulomis. RoF technikos gali būti skirstomos į tris kategorijas: RFoF (angl. *Radio Frequency over Fiber*), IFoF (angl. *Intermediate Frequency over Fiber*) ir BBoF (angl. *Baseband over Fiber*). Į RFoF technologiją įeina tikro radijo signalo perdavimas skaidula, tačiau IFoF ir BBoF atveju pageidaujamas mikrobanginis signalas yra generuojamas nutolusiame komponente RAU (angl. *Remote Access Unit*) naudojant LO (angl. *Local Oscillator*), kuris jau gali būti įdiegtas nutolusioje antenoje. Nuo naudojamos signalo perdavimo technologijos priklauso RAU sudėtingumas, tai gali būti sudėtingas arba labai paprastas įrenginys.

Schemos reikalaujančios atskiro LO nutolusioje antenoje gali padidinti sistemos kainą, ypač naudojant daugiamodes bangas, tačiau tokios sistemos suteikia geresnį imtuvo jautrumą. Signalo perdavimas RFoF atveju turi pranašumą prieš kitas sistemas, kadangi gali būti naudojamas paprastesnis RAU, kuriame nereikalingas dažnio keitimas, tačiau tai reikalauja aukštesnių dažnių iš pagrindinės stoties. RFoF sistema taip pat yra jautri dispersijos poveikiui ir fazės sukeltam triukšmui. BBoF ir IFoF sistemos gali šiuos nepageidaujamus efektus įveikti naudojant sudėtingesnę RAU, išskyrus atvejį kai LO yra integruojamas atskirai.

RoF technikos taip pat gali būti klasifikuojamos pagal pagrindinius moduliacijos/aptikimo darbo principus. Tokiu atveju, technikos gali būti grupuojamos į tris kategorijas: IMDD (angl. *Intensity Modulation Direct Direction*), RHD (angl. *Remote Heterodyne Detection*) bei harmonikų keitimo kategorijas. RFoF technika priklauso IMDD kategorijai. IFoF ir BBoF, kurios naudoja LO nutolusiame taške taip pat galima priskirti prie IMDD kategorijos, tačiau daugeliu atveju šios technikos priskiriamos prie RHD. [1]

## 1.2. Analoginė RoF sistema

**Ponešlio signalų perdavimas.** 1.1 pav. atvaizduojamos fundamentalios RoF sistemų architektūros, skirtos perduoti ponešlių signalams, pavyzdžiui, kai naudojamas RF-band ponešlis, tarpinių juostinių dažnių (IF-band) ponešlis ir atsispindėjusių dažnių signalai. 1.1 pav. kairėje pusėje pavaizduota optinė jungtis, kuri yra vietiniame ofise, o dešinėje įranga, esanti prie nuotolinės antenos.



1.1 pav. RF perdavimas: a) RF band perdavimas; b) IF band perdavimas; c) Reference IF band perdavimas

1.1 pav. a) pavaizduota RF-band RoF perdavimo schema sudaryta iš RF-band modulatoriaus, RF-band demodulatoriaus, dviejų optinių imtuvų, optinės jungties bei dviejų RF-band filtrų. RF-band filtrai dažniausiai naudojami tuo atveju, kai atsiranda poreikis laikytis radijo reglamentų. RF-band nešlys sumoduliuojamas RF-band modulatoriumi, esančiu vietiniame tinkle. Sugeneruotas RF-band ponešlio signalas moduliuoja optinį nešlį optiniame siųstuve-imtuve per E/O keitiklį. Imtuvo sugeneruotas analoginis signalas po to yra perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Nuotolinės antenos pusėje gautas RoF signalas aptinkamas optiniu būdu naudojant optinį siųstuvą-imtuvą su O/E keitikliu. Atstatytas elektrinis signalas, kuris sutampa su siųstuvo RF-band ponešlio sumoduliuotu signalu, yra imtuvo laukiamas RF signalas. Siųstuvo atžvilgiu: gautas siųstuvo RF signalas sumoduliuoja optinį nešlį panaudodamas dar vieną E/O keitiklį esantį optiniame siųstuve-imtuve. Siųstuvo sugeneruotas analoginis RoF signalas paskui perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Vietinio tinklo pusėje iš siųstuvo gautas RoF signalas yra aptinkamas optiniu būdu naudojant kitą O/E keitiklį esantį optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktas elektrinis signalas, kuris sutampa su siųstuvo RF-band ponešlio signalu, tuomet demoduliuojamas

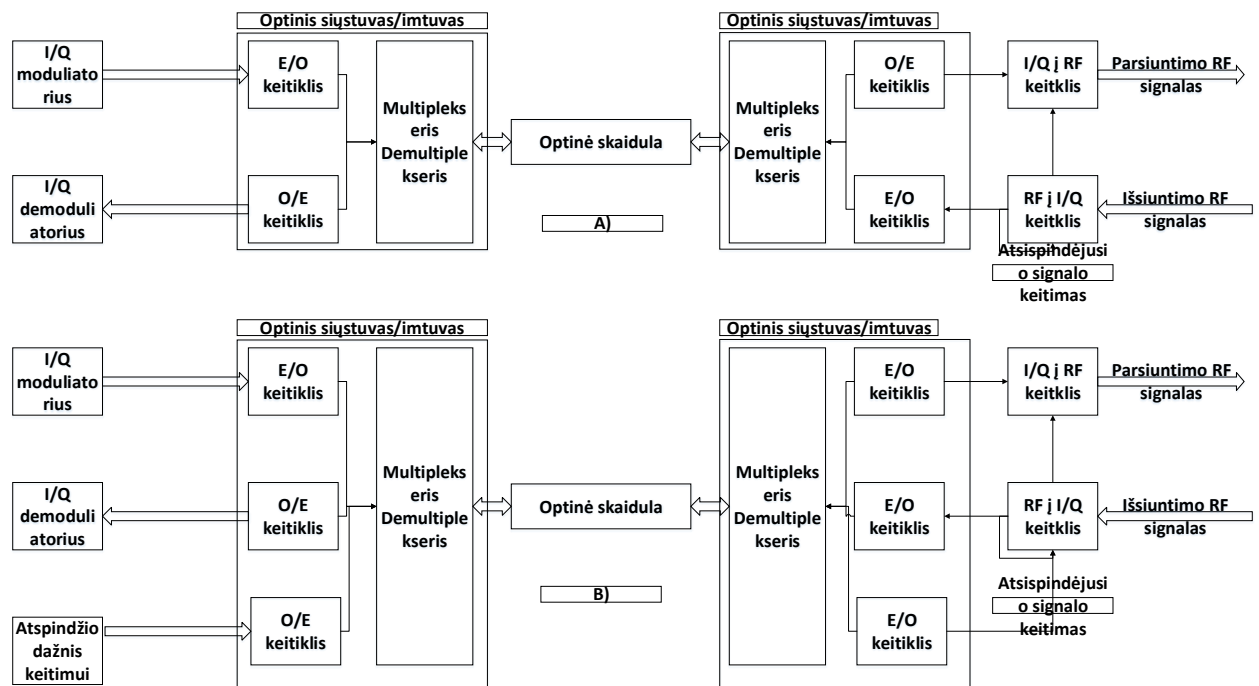
panaudojus RF-band demoduliatorių tam, kad būtų išgauti siųstuvo naudingosios apkrovos duomenys.[2]

1.1 pav. b) pavaizduota IF-band RoF perdavimo schema, jos sistema sudaryta ir IF-band modulatoriaus, IF-band demodulatoriaus, dviejų optinių siųstuvų-imtuvų, optinių skaidulų jungties, IF-to-RF aukštinančiojo dažnio keitiklio, IF-to-RF žeminančiojo dažnių keitiklio ir informacijos dažnio generatoriaus. Kadangi IF dažniausiai yra daug žemiau nei RF, IF-band RoF perdavimo schema suteikia žymiai tobulesnį optinį pralaidumą lyginant su RF-band RoF perdavimo schema. Imtuvas sumoduliuoja IF-band nešlio naudingosios apkrovos duomenis IF-band modulatoriumi vietinio ofiso pusėje. Imtuve Sugeneruotas IF-band ponešlio signalas moduliuoja optinį nešlį, esantį optiniame siųstuve-imtuve, E/O keitikliu. Imtuvo sugeneruotas analoginis signalas po to yra perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Nuotolinės antenos pusėje gautas RoF signalas aptinkamas optiniu būdu naudojant optinį siųstuvą-imtuvą su O/E keitikliu. Aptiktas elektrinis signalas, kuris sutampa su imtuvo IF-band ponešlio sumoduliuotu signalu, po to konvertuojamas į norimą RF imtuvo signalą pasinaudojus IF-to-RF aukštinantįjį dažnio keitiklį bei informacinį dažnį. Informacinio dažnio charakteristikas reikėtų suprojektuoti taip, kad veiktų su esamu imtuvo RF signalo dažnio stabilumu. Siųstuvo atžvilgiu vyksta toks procesas: gautas siųstuvo RF signalo dažnis sukonvertuojamas į IF-band ponešlio signalą pasinaudojus RF-to-IF žeminančioju dažnių keitikliu. Siųstuvo sugeneruotas IF-band ponešlio signalas moduliuoja optinį nešlį optiniame siųstuve-imtuve, E/O keitikliu. Siųstuvo sugeneruotas analoginis RoF signalas tuomet perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Vietinio tinklo pusėje iš gautas siųstuvo RoF signalas yra aptinkamas optiniu būdu naudojant kitą O/E keitiklį esantį optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktas elektrinis signalas, kuris sutampa su siųstuvo IF-band ponešlio signalu, tuomet demoduliuojamas panaudojus IF-band demoduliatorių tam, kad būtų išgauti siųstuvo naudingosios apkrovos duomenys. 1.1 pav. c) matome IF-band RoF informacinio dažnio perdavimo schemą, kuri beveik sutampa su 1.1 pav. b) schema. Skirtumas: informacinis dažnis perduodamas iš vietinio ofiso pusės į nuotolinę anteną.[3]

Kadangi pagrindinės sudedamosios radijo siųstuvo-imtovo dalys (elektroninis modulatorius bei demodulatorius) yra vietinio ofiso pusėje, įrangos konfigūracija, esanti nuotolinės antenos pusėje, tampa daug paprastesnė. Kai kuriais atvejais (pavyzdžiui, kada nėra jokių pakitimų naudojamoje dažnių juostoje) ši architektūra suteikia galimybę atnaujinti esamą radijo ryšio paslaugų struktūrą neatliekant jokių pakeitimų nuotolinių antenų zonoje. Kadangi pagrindiniai radijo ryšio siųstuvo-imtovo komponentai yra operatoriaus bazėje, sutvarkyti arba atnaujinti šį modulį yra labai paprasta. Tai atveria kelią naujiems optinės prieigos tinklams (angl. *optical access network* arba *OAN*), kurių dėka įmanoma realizuoti didesnius perdavimo greičius bei suteikti daugiagranulinius plačiajuosčio ryšio resursus, pavyzdžiui, OAN, kuri paremta statmeno dažnio

paskirstymo sutankinimu (angl. *orthogonal frequency division multiplexing* arba *OFDM*). 1.1 pav. a) ir 1.1 pav. c) vaizduojamos architektūros, kurios nenaudoja informacinio dažnio generatoriaus nuotolinės antenos pusėje, todėl galima paprastesnė nuotolinės antenos įrangos konfigūracija. 1.1 pav. b) ir 1.1 pav. c) informacinio dažnio vertę galima keisti naudojant IF-to-RF ir RF-to-IF keitiklius, kurie palaiko sub-harmoninę maišymo techniką.

**Ekvivalentinio žemo dažnio (ekvivalentinis nemoduluotas signalas) signalų perdavimas.** 1.2 pav. vaizduojamos fundamentalios architektūros, skirtos perduoti statmeno žemo dažnio (ekvivalentinis nemoduluotas signalas) signalams, pavyzdžiui, ne-dvejetainiams palaipsninės fazės bei kvadratūrinės fazės (angl. *I/Q*) nemoduluotiems signalams. Kairėje paveikslėlyje matoma optinių skaidulų jungtis yra vietinio ofiso pusėje, o dešinėje pusėje vaizduojamas nuotolinė antena. [4]



**1.2 pav.** I/Q signalo perdavimas: a) tik I/Q signalui; b) I/Q signalas su atspindžio dažniais

1.2a pav. vaizduojama I/Q nemoduluoto signalo perdavimo schema. Šią sistemą sudaro I/Q modulatorius, I/Q demodulatorius, du optiniai siųstuvai-imtuvai, optinių skaidulų jungtis, I/Q-to-RF keitiklis bei informacinio dažnio generatorius. Vietinio ofiso pusėje I/Q modulatorius sugeneruoja I/Q nemoduluotą signalą iš imtuvo naudingosios apkrovos duomenų. Imtuve sugeneruoti I/Q nemoduluotieji signalai moduluoja optinį nešlį optiniu siųstuvu-imtuvu su E/O keitikliu. Sugeneruoti daugiasluoksniai arba analoginiai nemoduluoti signalai (analoginių RoF signalų forma) perduodami per optinių skaidulų jungtį. Nuotolinės antenos pusėje gauti optiniai signalai tuomet yra aptinkami optinio siųstuvu-imtuvu su O/E keitikliu. Aptikti elektriniai signalai, kurie sutampa su I/Q nemoduluotais signalais, tuomet yra sukonvertuojami su I/Q-to-RF

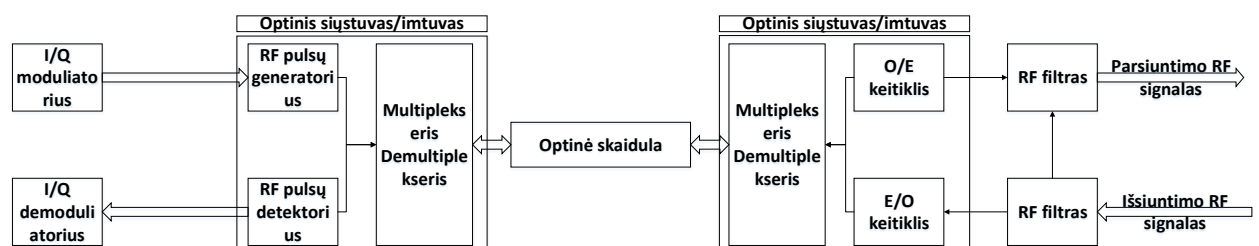
aukštinančiuoju keitikliu panaudojant informacinį dažnį į norimą imtuvo RF signalą. Informacinio dažnio charakteristikas reikėtų suprojektuoti taip, kad veiktų su esamu imtuvo RF signalo dažnio stabilumu. Siųstuvo sugeneruoti I/Q nmoduluoti signalai tuomet sumoduliuoja optinį nešlį optinio siųstuvu-imtuvu su E/O keitikliu. [5]

Sugeneruoti aukštinkrypčiai daugiasluoksniai arba analoginiai signalai tuomet perduodami optinių skaidulų jungtimi. Vietinio ofiso pusėje: gauti aukštinkrypčiai signalai aptinkami optiniu būdu pasinaudojus optinį siųstuvą-imtuvą su O/E keitikliu. Aptikti elektriniai signalai, kurie sutampa su aukštinkrypčiais I/Q sumoduliuotais signalais, tuomet yra demoduliuojami I/Q demoduliatoriumi tam, kad būtų galima gauti naudingosios apkrovos duomenis. I/Q sumoduliuotų signalų bei informacinių dažnių perdavimo schema parodyta 1.2 pav. b) beveik sutampa I/Q sumoduliuotų RoF signalų perdavimo schema (1.2 pav. a), pagrindinis skirtumas – informacinis dažnis atkeliauja iš vietinio ofiso pusės ir yra siunčiamas į nuotolines antenas. Neskaitant minėtų privalumų, reikalaujamas optinio pralaidumo dažnis, radijo bangų perdavimui yra žymiai sumažinamas. 1.2 pav. b) schemoje vaizduojama sistema, nereikalaujanti informacinio dažnio generatoriaus nuotolinės antenos pusėje, kas lemia paprastesnį nuotolinės įrangos konfigūravimą. Informacinio dažnio vertę taip pat galima sumažinti panaudojus sub-harmoninio maišymo metodą IQ-to-RF bei RF-to-I/Q keitikliuose.[6]

### 1.3. Skaitmeninis RoF

**Skaitmeninis radijo signalo perdavimas.** 1.3 pav. parodytos pagrindinės skaitmeninių radijo signalų perdavimo architektūros. RF-band impulsai, kaip ir impulsiniai radijo signalai, yra geras skaitmeninių radijo signalų pavyzdys. [7]

1.3 pav. kairėje pusėje nuo optinės jungties vaizduojama įranga esanti vietiniame ofise, dešinėje – įranga, esanti nuotolinės antenos pusėje.

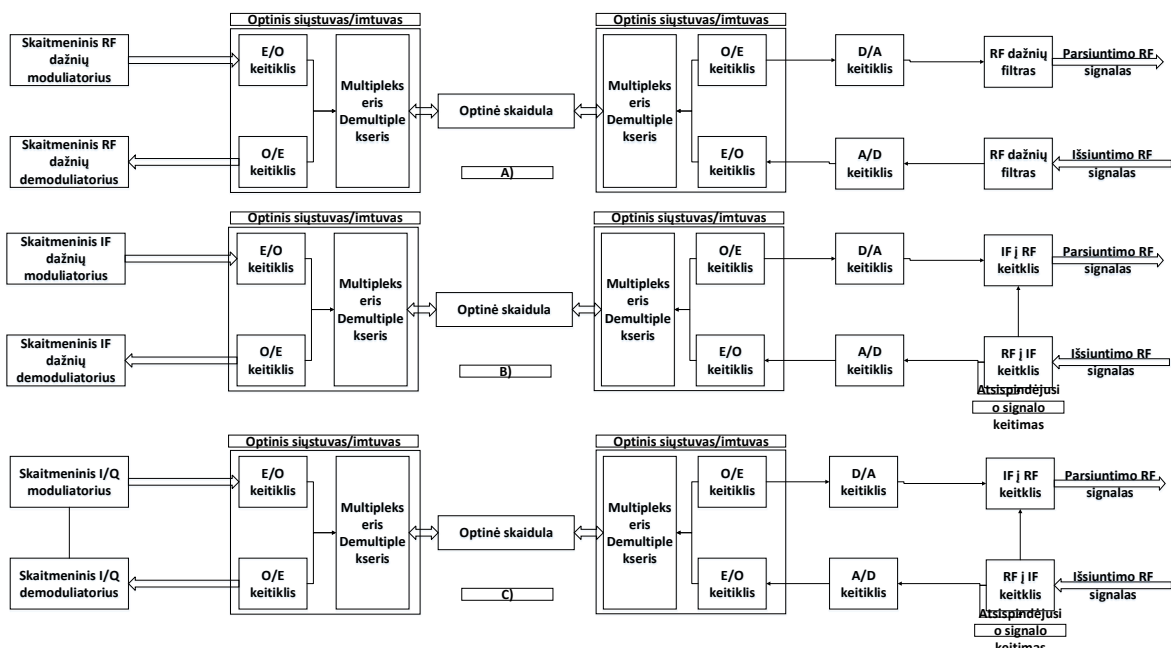


1.3 pav. RF band pulsų perdavimas

1.3 pav. pavaizduota RF-band impulsų perdavimo sistema, kuri susideda iš RF-band impulsų generatoriaus, RF-band impulsų detektoriaus, dviejų optinių siųstuvų-imtuvų, optinių skaidulų jungties ir dviejų RF-band filtrų. RF-band filtrai naudojami tuo atveju, kai reikia remtis tam tikrais radijo reglamentais. RF-band signalas sugeneruojamas panaudojus žemynkryptės naudingosios

apkrovos duomenis RF-band impulsų generatoriumi vietinio ofiso pusėje. Sugeneruotas žeminkryptis RF-band signalas sumoduliuoja optinį nešlį optiniame siųstuve-imtuve su E/O keitikliu. Tuomet žeminkryptis skaitmeninis RoF signalas perduodamas optinių skaidulų jungtimi. Reikia paminėti, kad nors ir optinė jungties sąsaja šioje sistemoje laikoma skaitmenine, sąsajos prigimtis yra analoginė. Taip yra todėl, kad optinio signalo intensyvumas gali atstoti analoginę vertę, pavyzdžiui, mono-ciklinis impulsas, dvigubas impulsas ir t.t. Nuotolinės antenos pusėje gautas žeminkryptis RoF signalas aptinkamas optiniu būdu pasinaudojus O/E keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktas elektrinis signalas, kuris sutampa su sumoduliuotu RF-band signalu, yra norimas žeminkryptis RF signalas. Gautas aukštinkryptis RF signalas, kuris atitinka aukštinkryptį RF signalą, sumoduliuoja optinį nešlį pasinaudodamas optinio siųstuvo-imtovo E/O keitikliu. Sugeneruotas aukštinkryptis RoF signalas perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Tuomet vietinio ofiso pusėje gautasis aukštinantysis RoF signalas aptinkamas optiniu būdu pasinaudojus O/E keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktas elektrinis signalas, kuris sutampa su aukštinkrypčiu RF-band signalu, demoduliuojamas RF-band signalų detektoriumi ir taip išgaunami naudingosios apkrovos duomenys

**Skaitmeninio radijo signalo perdavimas.** 1.4 pav. parodyta pagrindinė skaitmeninių radijo signalų (pavyzdžiui, suskaitmenintų RF-band ponešlių, suskaitmenintų IF-band ponešlių arba suskaitmenintų I/Q moduluotų signalų) perdavimo schema. 1.4 pav. kairėje pusėje nuo optinės jungties vaizduojama įranga esanti vietiniame ofise, dešinėje – įranga, esanti nuotolinės antenos pusėje.



1.4 pav. Skaitmeninis RoF: a) RF band perdavimas; b) IF band perdavimas; c) Reference IF band perdavimas

1.4 pav. a) pavaizduotą skaitmeninio RF-band RoF perdavimo sistemą sudaro skaitmeninis RF-band moduliatorius, skaitmeninis RF-band demoduliatorius, du optiniai siųstuvai-imtuvai, optinių skaidulų jungtis, DAC keitiklis, ADC keitiklis ir du RF-band filtrai. RF-band filtrai naudojami tuo atveju, kai reikia remtis tam tikrais radijo reglamentais. Skaitmeninis RF-band poneslis sugeneruojamas iš žemynkrypčio signalo naudingosios apkrovos duomenų pasinaudojus RF-band moduliatoriumi, esančiu vietinio ofiso pusėje. Sugeneruotas žeminkryptis skaitmeninis RF-band poneslio signalas sumoduliuoja optinį nešlį E/O keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Sugeneruotas žeminkryptis RF-band D-RoF signalas tuomet perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Nuotolinės antenos pusėje gautas žeminkryptis D-RoF signalas aptinkamas optiniu būdu O/E keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktasis elektrinis signalas, kuris sutampa su sumoduliuotu skaitmeniniu RF-band poneslio signalu, tuomet pakeičiamas iš skaitmeninio į analoginį (angl. *digital to analogue, D/A*) taip, kad generuotų norimą žeminkryptį RF signalą. Gautas aukštinkryptis RF signalas keičiamas iš analoginio į skaitmeninį (*analogue to digital, A/D*), tuomet aukštinkryptis skaitmeninis RF-band signalas sumoduliuoja optinį nešlį optiniame siųstuve-imtuve E/O keitikliu. Sugeneruotas aukštinkryptis RF-band D-RoF signalas perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Vietinio ofiso pusėje gautas aukštinkryptis D-RoF signalas aptinkamas optiniu būdu naudojant optiniame siųstuve-imtuve esantį O/E keitiklį. Aptiktas elektrinis signalas, kuris sutampa su aukštinkrypčiu RF-band poneslio signalu, yra demoduliuojamas skaitmeniniu RF-band demoduliatoriumi tam, kad būtų gauti naudingosios apkrovos duomenys.

1.4 pav. b) paveiksle pavaizduotą suskaitmeninto IF-band RoF perdavimo sistemą sudaro skaitmeninis IF-band moduliatorius, skaitmeninis IF-band demoduliatorius, du optiniai siųstuvai-imtuvai, optinių skaidulų jungtis, DAC keitiklis, ADC keitiklis, IF-to-RF aukštinantysis keitiklis, RF-to-IF žeminantysis keitiklis ir informacinio dažnio generatorius. Skaitmeninis IF-band poneslis sugeneruojamas skaitmeniniu būdu panaudojus žeminkrypčio signalo naudingosios apkrovos duomenis skaitmenio IF-band moduliatoriumi, esančiu vietinio ofiso pusėje. Sugeneruotas žeminkryptis IF-band d-RoF signalas perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Nuotolinės antenos pusėje: gautas žeminkryptis D-RoF signalas aptinkamas optiniu būdu pasinaudojus O/E keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktasis elektrinis signalas, kuris sutampa su sumoduliuotu skaitmeniu IF-band poneslio signalu, yra pakeičiamas D/A metodu taip, kad generuotų norimą žeminkryptį IF signalą. Tuomet žeminkryptis IF-band signalas pakeičiamas pasinaudojus IF-to-RF aukštinančiuoju keitikliu bei informaciniu dažniu ir gaunamas norimas žeminkryptis RF signalas. Informacinio dažnio charakteristikas reikėtų pasirinkti atsižvelgiant į žeminkrypčio RF signalo dažnio stabilumą. Gautas aukštinkryptis RF signalas pakeičiamas panaudojus RF-to-IF žeminančiuoju keitikliu į IF-band poneslio signalą.



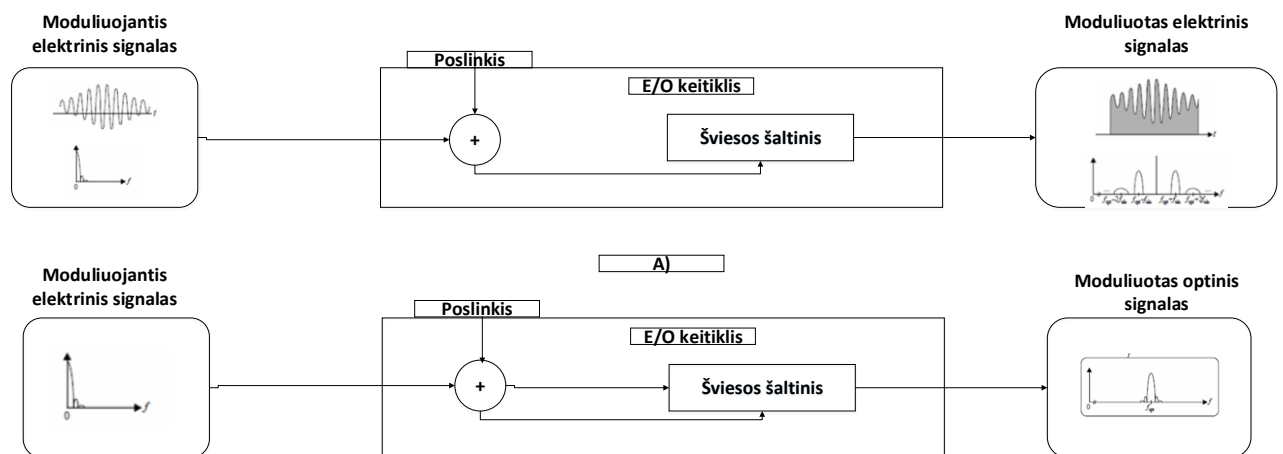
Sugeneruotas aukštinkryptis IF-band ponešlio signalas pakeičiamas A/D metodu, tuomet sugeneruotas suskaitmenintas IF-band ponešlio signalas sumoduliuoja optinį nešlį pasinaudodamas E/O keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Sugeneruotas aukštinkryptis IF-band D-RoF signalas perduodamas per optinių skaidulų jungtį. Vietinio ofiso pusėje: gautasis aukštinkryptis D-RoF signalas aptinkamas optiniu būdu panaudojus O/E keitiklį, esantį optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktasis elektrinis signalas, kuris sutampa su aukštinkrypčiu suskaitmenintu IF-band ponešlio signalu, yra demoduliuojamas skaitmeniniu būdu pasinaudojus skaitmeninio IF-band demoduliatoriumi tam, kad būtų išgauti naudingosios apkrovos duomenys.

1.4 pav. c) paveiksle pavaizduotą suskaitmeninto I/Q moduliuto signalo perdavimo sistemą sudaro skaitmeninis I/Q moduliatorius, skaitmeninis I/Q demoduliatorius, du optiniai siųstuvai-imtuvai, optinių skaidulų jungtis, DAC keitiklis, ADC keitiklis, I/Q-to-RF aukštinantysis keitiklis, RF-to-I/Q žeminantysis keitiklis ir informacinio dažnio generatorius. Skaitmeninis I/Q moduliatorius sugeneruoja suskaitmenintą I/Q moduliotą signalą iš naudingosios apkrovos duomenų vietinio ofiso pusėje. Sugeneruoti žeminkrypčiai suskaitmeninti I/Q signalai sumoduliuoja optinį nešlį pasinaudojus E/O keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Sugeneruoti žeminkrypčiai moduliuoti D-RoF signalai perduodami per optinių skaidulų jungtį. Nuotolinės antenos pusėje: gauti D-RoF signalai aptinkami optiniu būdu pasinaudojus O/E keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktieji elektriniai signalai, kurie sutampa su moduliuojančiu suskaitmenintu I/Q moduliotu signalu, tuomet sukonvertuojami D/A metodu tam, kad būtų sugeneruoti norimi žeminkrypčiai I/Q moduliuoti signalai. Tuomet žeminkrypčiai I/Q moduliuoti signalai keičiami į norimą žeminkryptį RF signalą pasinaudojus I/Q-to-RF aukštinančiuoju keitikliu bei informaciniu dažniu. Informacinio dažnio charakteristikas reikėtų pasirinkti atsižvelgiant į žeminkrypčio RF signalo dažnio stabilumą. Gautas aukštinkryptis RF signalas sukonvertuojamas į I/Q moduliotą signalą pasinaudojus RF-to-I/Q žeminančiuoju keitikliu. Sugeneruoti aukštinkrypčiai I/Q moduliuoti signalai tuomet pakeičiami pasinaudojus A/D metodu, tuomet sugeneruoti I/Q signalai sumoduliuoja optinį nešlį su E/O keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Sugeneruoti aukštinkrypčiai D-RoF signalai perduodami per optinių skaidulų jungtį. Vietinio ofiso pusėje: gautieji aukštinkrypčiai optiniai signalai aptinkami optiniu būdu pasinaudojus O/E keitikliu, esančiu optiniame siųstuve-imtuve. Aptiktieji elektriniai signalai, kurie sutampa su aukštinkrypčiais suskaitmenintais I/Q moduliuotais signalais, yra skaitmeniškai demoduliuojami I/Q demoduliatoriumi tam, kad būtų išgauti naudingosios apkrovos duomenys. [8]

Tokiam suskaitmenintų radijo signalų (D-RoF) perdavimui reikalingi DAC (iš skaitmeninio į analoginį) bei ADC (iš analoginio į skaitmeninį) keitikliai.

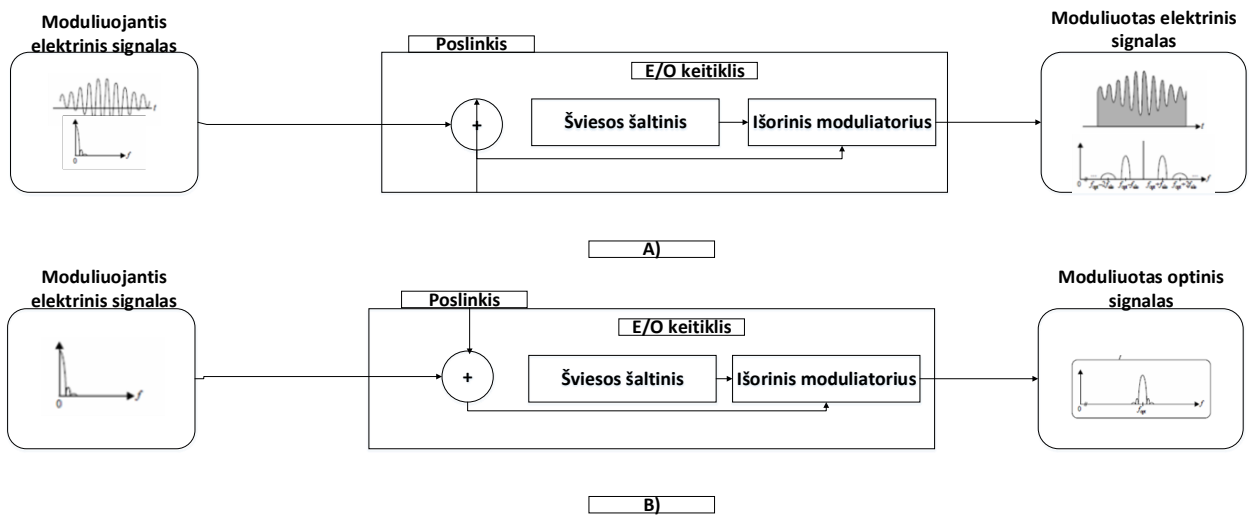
## 1.4. Signalo keitimas iš elektrinio į optinį

**Tiesioginė moduliacija.** Tiesioginė moduliacija tai optinės moduliacijos schema, kurioje šviesos šaltinį maitinanti įtampa yra moduluojama elektrinių (RoF) signalu (1.7 pav.). 1.7 pav. a) ir 1.7 pav. b) paveiksluose vaizduojamos ponešlių signalų perdavimo schemas ekvivalentiniam žemo dažnio arba skaitmeniniam signalų perdavimui pasiekti. Prireikus linijinei operacijai atlikti, elektros poslinkio srovė gali būti prijungta prie moduluojančio elektrinio signalo. 1.7 pav.  $f_{ele}$  ir  $f_{opt}$  yra pagrindiniai moduluojančių elektrinių signalų ir optinių nešlių dažniai. Daugumoje atvejų, optinio nešlio galia moduluojama proporcingai moduluojančio elektrinio signalo bangos formai. Kai kuriais atvejais galima moduluoti ir optinio nešlio dažnį. Bendrai vertinant, tiesioginė moduliacija yra pats paprasčiausias, geriausią kainos ir kokybės santykį pasiūlantis optinio signalo moduliacijos metodas, nes tam pasiekti reikalingas optinis įrenginys yra paprasčiausias lazerinis šaltinis. Tačiau kai kurios šviesos šaltiniams būdingos charakteristikos, pavyzdžiui, įvesties-išvesties santykis, ribotas pralaidumas, lazerio skambesiai ir pan., gali sukelti moduluoto optinio signalo iškraipymą. Kad užkirsti tam kelią, reikėtų pasirinkti šviesos šaltinį, atitinkantį naudojamos sistemos reikalavimus. [9]



**1.5 pav.** Tiesioginė moduliacija: a) signalų nešlių perdavimui; b) žemo dažnio skaitmeninio signalo perdavimui

**Išorinė moduliacija.** Išorine moduliacija sukuriamas norimas optinis signalas (RoF signalas) panaudojus išorinį moduliatorių kartu su nuolat veikiančiu šviesos šaltiniu (1.8 pav.). 1.8 pav. a) ir 1.8 pav. b) vaizduojamos signalų ponešlių perdavimo schemas skirtos žemo dažnio arba skaitmeninių signalų perdavimui. Kaip ir tiesioginėje moduliacijoje prireikus atlikti linijinę operaciją, elektros poslinkio srovė gali būti prijungta prie moduluojančio elektrinio signalo.

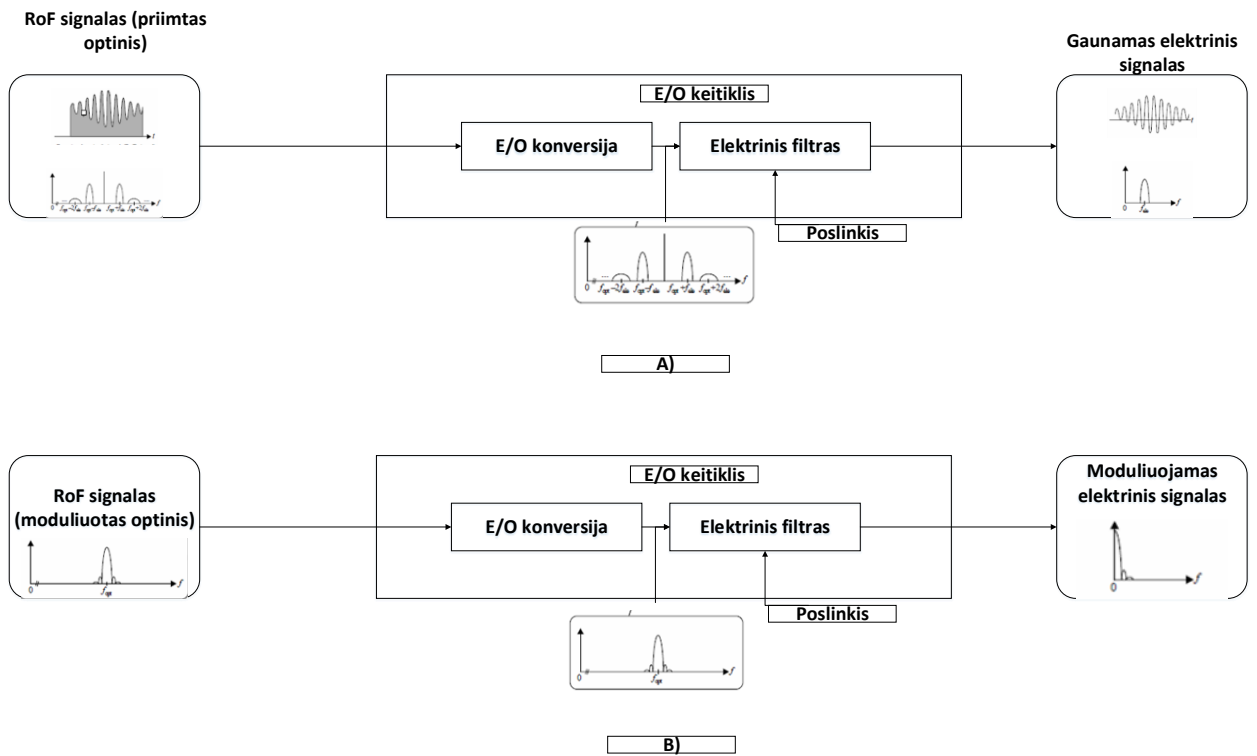


**1.6 pav.** Išorinė moduliacija: a) signalų nešlių perdavimui; b) žemo dažnio skaitmeninio signalo perdavimui

Optinio nešlio galią, fazę, dažnį bei poliarizacijos būseną galima moduluoti proporcingai moduluojamo elektrinio signalo bangos formai. Nors ši schema papildomai reikalauja išorinio modulatoriaus, sumoduluotas optinis signalas gaunamas geresnės kokybės. Taip yra todėl, kad išvengiama šviesos šaltiniui būdingų trūkumų. [10]

## 1.5. Optinio signalo keitimas į elektrinį

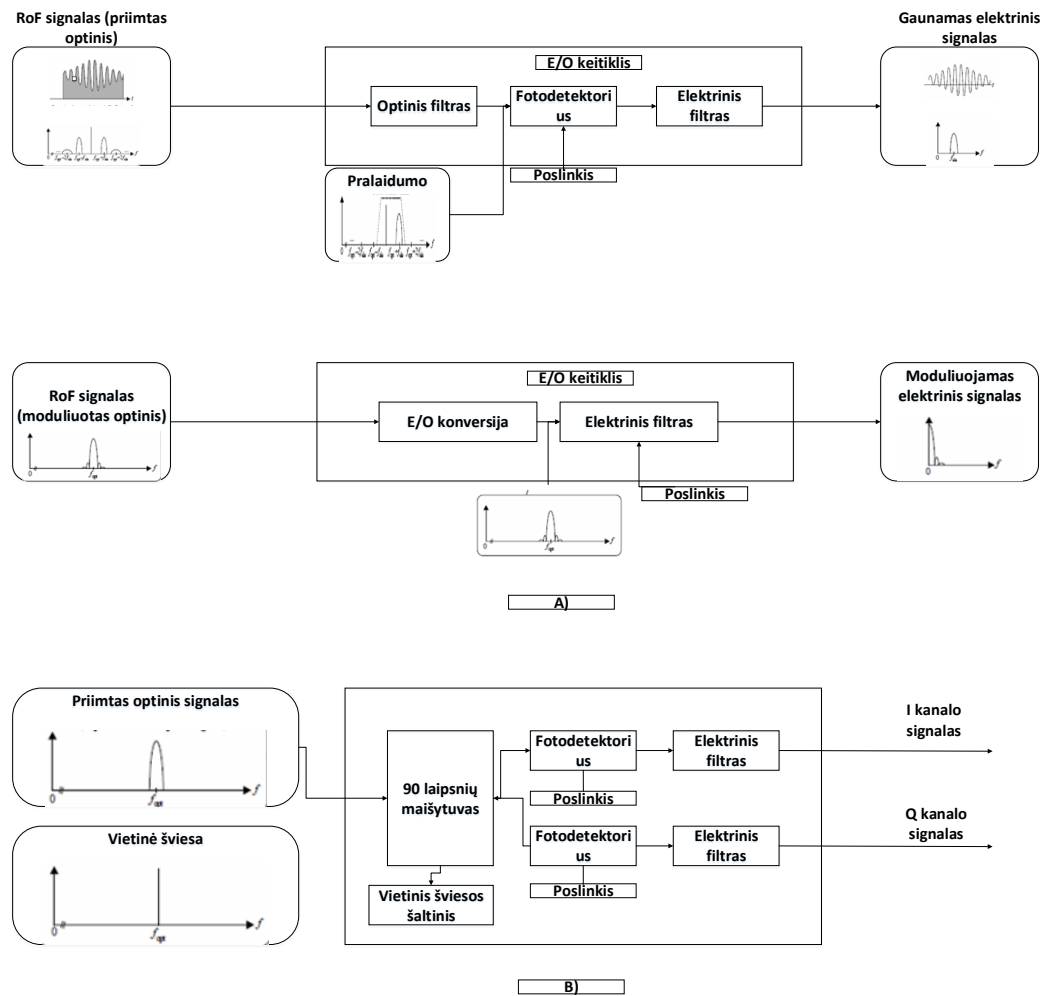
**Nekoherentinis optinis aptikimas.** Gautas optinio signalo (RoF signalo) gaubtinė, kuri atitinka optinio signalo galią, aptikti naudojama foto-detektoriaus kvadratinio dėsnio funkcija. Todėl, jeigu optinio signalo galia moduluojama proporcingai sumoduluotam signalui, tai nekoherentinis aptikimas gali sugrąžinti originalų signalą (1.7 pav.). 1.7 pav. a) ir 1.7 pav. b) vaizduojamos nekoherentinio optinio aptikimo schemos, skirtos signalų ponešlių bei skaitmeninių signalų perdavimui. Daugumoje atvejų, prireikus atlikti linijinę operaciją, prie foto-detektoriaus išvesties prievado bus prijungta poslinkio įtampa. Elektrinis filtras naudojamas tik norimo elektros signalo išgavimui. [11]



1.7 pav. Nekoherentinis aptikimas a) signalų nešlių perdavimui; b) skaitmeninio signalo perdavimui

**Koherentinis optinis aptikimas.** Koherentinis optinio aptikimo metodas naudojamas norint išmatuoti signalo elektrinio lauko vertę. Šiuo atveju foto-detektoriaus kvadratinio dėsnio maišymo funkcija naudojama dviejų arba daugiau optinių komponentų įvertinimui, kuomet vienas iš šių komponentų yra informacinis signalas, kuris gali būti tiek sumoduluotas, tiek nemoduluotas.

1.8 pav. vaizduojama nuoseklus optinio aptikimo schema. 1.8 pav. a) paveiksle vaizduojamas optinis aptikimas kuomet gautas optinis signalas (RoF signalas) yra siunčiamas į optinį filtrą, kur išgaunamas moduluotas optinis komponentas iš  $f_{opt} + f_{ele}$  bei informacinis optinis komponentas iš  $f_{opt}$ . Būtina paminėti, kad optinis O/E keitiklio filtras gali būti nepaisomas tuo atveju, kai sumoduluotas optinis komponentas bei informacinis optinis komponentas yra priimti O/E keitiklyje. Išgauti optiniai komponentai yra aptinkami foto-detektoriaus ir tuomet atkuriamas pradinis elektrinis signalas. Daugumoje atvejų, prireikus atlikti linijinei operacijai atlikti, prie foto-detektoriaus išvesties prievado bus prijungta poslinkio įtampa. Elektrinis filtras naudojamas tik norimo elektros signalo išgavimui. 1.8 pav. pavaizduotas optinio aptikimo su nepriklausomu šviesos šaltiniu metodas, kuris skirtas ekvivalentiniam žemo dažnio signalui aptikti (pavyzdys 1.8a bei 1.8b) paveiksluose). [12]



1.8 pav. Koherentinis aptikimas: a) nešlių signalų perdavimui; b) žemo dažnio skaitmeninio signalo perdavimui

## 1.6. Aukšto spektrinio-našumo perdavimas

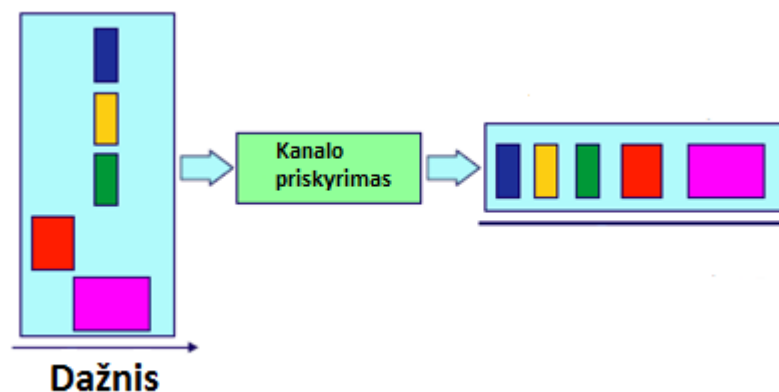
### 1.6.1. Ponešlių sutankinimas

**Analoginis sujungimas.** Ponešlių sutankinimas SCM (angl. *Signal Carrier Multiplexing*) tai elektrinio sutankinimo metodas, kuris sujungia keletą elektrinių dažnių signalų su skirtingais centriniais dažniais. Taigi, tai yra tam tikra dažnių paskirstymo sutankinimo forma (angl. *frequency division multiplexing* arba *FDM*), esanti elektriniame domene. Pirmiausia elektriniai radijo dažnių signalai su skirtingais centriniais dažniais yra sujungiami elektrinių dažnių tankintuvu MUX (angl. *Multiplexer*) ir taip sugeneruojamas SCM signalas. Tuomet SCM signalas sumoduliuoja optinį nešlį E/O keitikliu ir taip gaunamas SCM RoF signalas. Gautasis SCM RoF signalas aptinkamas foto-detektoriaus su O/E keitikliu, kad atstatytų originalų SCM signalą. Atkurtas elektrinis signalas siunčiamas į elektrinių dažnių demoduliatorių DEMUX (angl. *Demultiplexer*) ir yra išskirstomas į N moduluojančių signalų.

**Skaitmeninis sujungimas.** Analoginio RoF sujungimo principas naudojamas bevielių kanalų sujungimui nuo/iki atskirų nuotolinių radijo galvų RRH (angl. *Remote radio heads*) tam, kad signalus būtų galima perduoti vienodo optinės bangos ilgio kanalu mobile front-haul (MFH) sistema. Kadangi naudojama ta pati optinė įranga per kelis bevielius kanalus, optinės prieigos komponentų kaina reikšmingai sumažinama.

Nuotoliniame radijo vienetė (RRU) gali būti reikalingas moduluoto signalo apdorojimas tam, kad išgauti geresnį energetinį našumą. Optinis signalas, perduodamas per optinių skaidulų jungtį, gali palaikyti visus sujungtus bevielius kanalus nepakeičiant jų bitų pralaidumo. Tai reiškia, jog šis pasirinkimas gali būti pats efektyviausias optinio bitų pralaidumo požiūriu. Optinis bitų pralaidumo efektyvumas šiuo požiūriu parodo, kad perduodamas optinis signalas iš esmės gali būti laikomas analoginiu optiniu signalu, o ne dvejetainiu on-off keying (OOK) signalu, dažniausiai naudojamu Bendruose viešųjų radijo ryšio sąsajose.

1.9 paveiksle vaizduojamas kanalų sujungimo principas paslenkant centrinius bevelio įvesties kanalo dažnius ir sujungiant paslinktų dažnių kanalus. Kanalų sujungimas įgyvendinamas su sąlyginai paprastu DSP. Atvirkštinis procesas gali būti pritaikomas kanalų išskyrimui įgyvendinti.



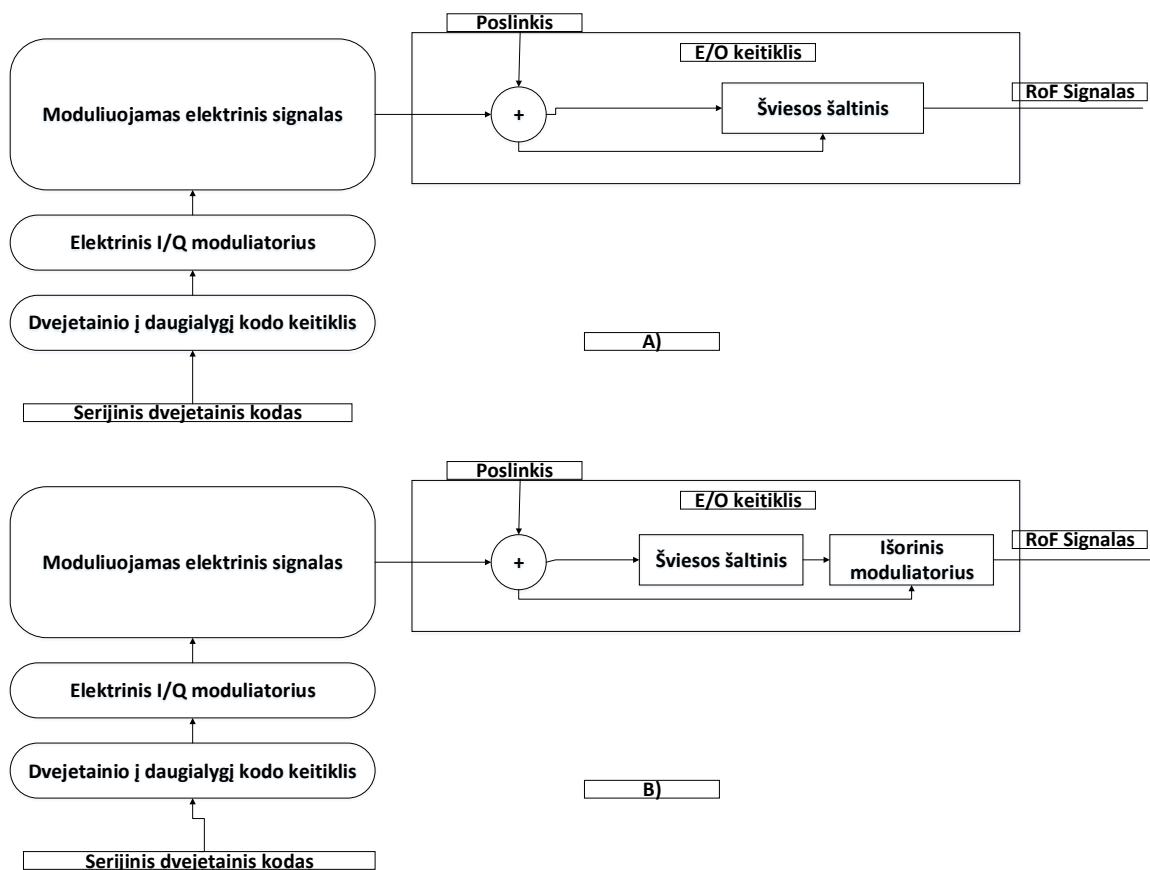
**1.9 pav.** Kanalų sujungimo principas

Bevieliai kanalai dažniausiai palaiko tiksliai nustatytus bitų perdavimo dažnius bei mėginių ėmimo normas, naudojamus E-ULTRA radijo prieigos sistemose. LTE-A standarte nešlių sujungimas (CA) yra nurodomas toks, kad bitų perdavimo našumas beveliame kanale galėtų viršyti 20 MHz (iki 100 MHz). Minėtas kanalų sujungimo metodas gali susiliesti su CA, tačiau niekada nepakeis CA bevielių kanalų iš pralaidumo bei naudingosios apkrovos duomenų pusės.[13]

### 1.6.2. Daugiasluoksnė moduliacija

Daugiasluoksnės (angl. *Multi-level*) moduliacijos schemų yra daug, pavyzdžiui, (QPSK), (M-QAM), (DMT), OFDM ir t.t. Jų paskirtis – pagerinti kanalo perdavimo pajėgumą tuo atveju, kuomet signalo - triukšmo santykis (SNR) yra pakankamai didelis. Su RoF signalais daugiasluoksnė moduliacija paprastai atliekama elektriniame domene bei optiniame domene.[14]

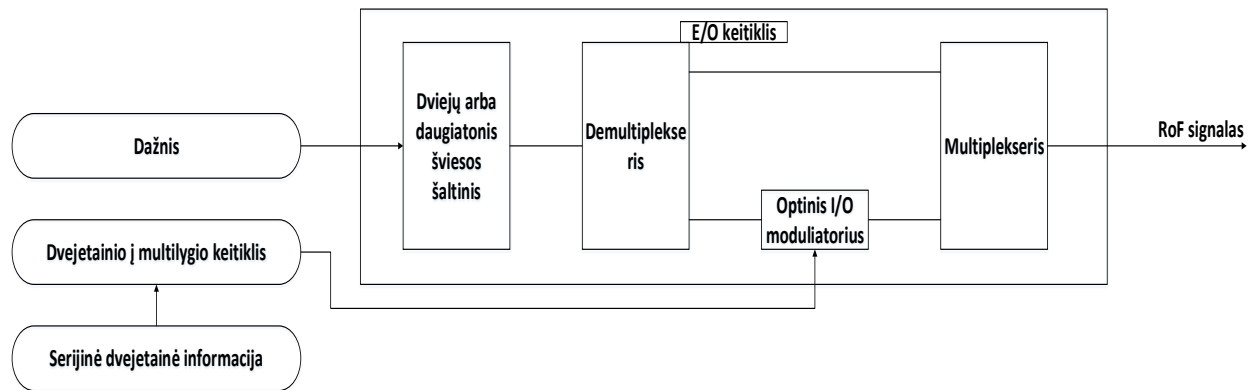
Elektrinėje schemoje daugiasluoksnė moduliacija atliekama, kuomet generuojamas moduluojantis elektrinis signalas. 1.10 pav. matomas daugiasluoksnės moduliacijos, atliekamos elektriniame domene, pavyzdys. Pirmiausia, serijiniai dvejetainiai duomenys sukonvertuojami į lygiagrečius duomenis, skirtus daugiasluoksnei moduliacijai, dvejetainiu-daugiasluoksniu keitikliu. Gauti duomenys moduluoja elektrinį nešlį  $f_{ele}$  dalyje elektriniu I/Q moduliatoriumi norint išgauti moduluojantį elektrinį signalą.



**1.10 pav.** Daugiasluoksnės moduliacijos schema: a) tiesioginė moduliacija; b) išorinė moduliacija

Optinėje schemoje daugiasluoksnė moduliacija atliekama optiniu I/Q moduliatoriumi. 1.11 paveiksle vaizduojamas daugiasluoksnės moduliacijos, atliekamos optiniame domene, pavyzdys. Pirmiausia, dvitone ar daigiatone šviesa sugeneruojama su dažniu, kurio vertė  $f_{ele}/2$ . DEMUX išgauna du optinio dažnio komponentus:  $f_{opt} - f_{ele}/2$  bei  $f_{opt} + f_{ele}/2$ , kur  $f_{opt}$  yra centrinis

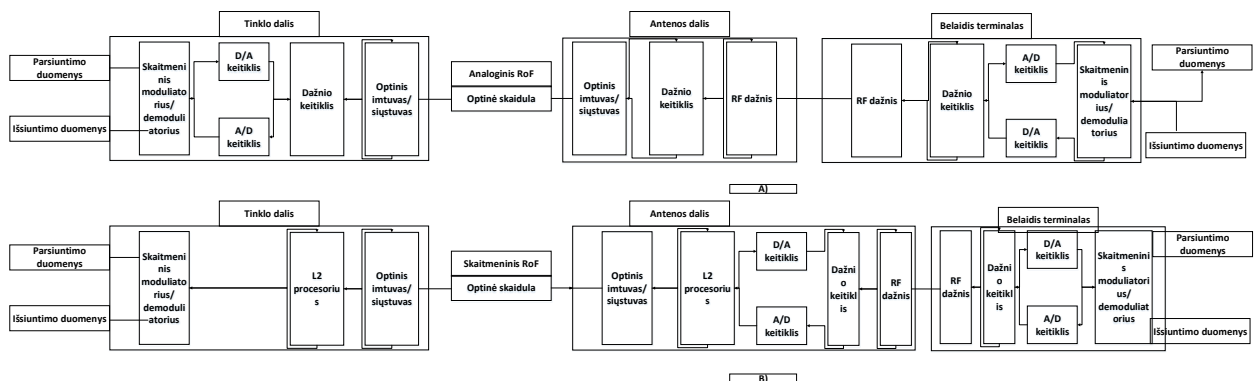
optinio nešlio dažnis. Serijiniai dvejetainiai duomenys sukonvertuojami į fazinius duomenis (I) bei kvadratūrinius fazinius (Q) duomenis, paruoštus daugiasluoksnei moduliacijai su dvejetainiu-  
daugiasluoksniu keitikliu. Sukonvertuoti duomenys moduluoja vieną optinio dažnio komponentą:  
 $f_{opt} + f_{ele}/2$  su optiniu I/Q moduliatoriumi. Sumoduliuotas optinis komponentas  $f_{opt} + f_{ele}/2$   
sujungiamas su nemoduliuotu  $f_{opt} - f_{ele}/2$  moduliatoriumi tam, kad būtų išgautas norimas RoF  
signalas. [15]



1.11pav. Daugiasluoksne moduliacija

## 1.7. Aukšto spektrinio-našumo perdavimas

1.12a bei 1.12b paveiksluose vaizduojamos analoginių RoF bei D-RoF sistemų konfigūracijos. Konvertavimui iš analoginių signalų į skaitmeninius bei atvirkščiai naudojami DAC bei ADC. Dažnių keitikliai naudojami iškilus tokiam poreikiui. RF-band, galinis procesorius bei pradinis procesorius (BEP/FEP) naudojami oro sąsajos funkcijai įgyvendinti, pavyzdžiui, radijo antena, kuri gali palaikyti papildomas funkcijas signalų iškraipymo išlyginimui (pastiprinimui), bandpass filtravimui, išlyginimui, signalų stebėjimui ir t.t. Bendroju atveju D-RoF sistema reikalauja daug aukštesnio optinio bitų pralaidumo nei analoginė RoF sistema, kurios našumas kartais pastebimai žemas naudojant optinių skaidulų jungtį. [16]



1.7. pav. Tipinės konfigūracijos: a) analoginė RoF sistema; b) skaitmeninė RoF sistema



## 1.8. Tinklų modeliai

Radijo prieigos tinkluose (RAN) makro celės paprastai naudojamos sklandžiam ryšio pasiskirstymui lauko bei iš dalies uždarų erdvių sąlygomis, mikro celės naudojamos gatvės, viešųjų prieigos taškų bei uždarų erdvių sąlygomis su paskirstytų antenų sistema. Mažosios celės naudojamos aklosiose zonose arba viešai prieinamose zonose bei vietinės reikšmės pasiskirstymui.

Kategorizuojant RAN tinklus, atsižvelgiama į bendrą RoF signalų skaičių optinio paskirstymo tinklų (ODN) optinių skaidulų tipologiją. Yra trys RAN tinklų modeliai. Makro celė, palaikanti Trečios kartos partnerystės projekto (3GPP) standartą, keletą 10s vatų galios RF išeių, keletą radijo technologijų bei keletą celių sektorių tam, kad būtų pasiektas platus ryšio pasiskirstymas.

Mikro celė, palaikanti 3GPP standartą, keletą 10s vatų galios RF išeių, keletą radijo technologijų bei vieną celės sektorių tam, kad būtų pasiektas platus ryšio pasiskirstymas.

Piko celė gali būti viena mažosios celės konfigūracijos dalimi.

Iš RoF pusės, mažoji celė palaiko 3gPP standartą, žemos galios RF perdavimus (su skirtingomis išeių galiomis nuo 0,5W iki keleto vatų), vieną arba keletą radijo technologijų bei vieną celės sektorių tam, kad būtų pasiektas specifinės vietovės ryšio pasiskirstymas.

Iš šių trijų radijo konfigūracijų matome, kad keletas RF kombinacijų gali būti pritaikytos kiekviename variante. Tam, kad jos būtų pritaikomos RoF, yra nustatyti tam tikri RoF signalų skaičiaus parametrai. Egzistuoja keturi tokie parametrai.

Radijo technologijų skaičius (NRT): tai aktualu radijo komunikacijų standartams (ypač mobiliąjam ryšiui) tokiems kaip mobiliosios komunikacijos (GSM), plačiajuosčio kodo paskirstymas daugialypei prieigai (W-CDMA) ir kt.

RF juostų, naudojančių vieną radijo technologiją (NRFB), pasiskirstymo skaičius: W-CDMA (FDD) bei LTE turi daugelį RF juostų, pavyzdžiui, juosta 1 (2 100 MHz juosta), juosta 2 (1 900 MHz juosta), juosta 5 (850 MHz juosta) bei juosta 8 (900 MHz juosta).

Radijo sektorių skaičius (NRS): šis skaičius aktualus tik celėms su sektorius antenomis.

Daugelio išvesčių daugelio įvesčių (MIMO) signalų (NMIMO) skaičius: LTE bei LTE-A sistemose MIMO technologija privalo būti palaikoma. RoF atveju, dabartinė padėtis palaiko visų MIMO signalų apdorojimą viename RoF signale (NMIMO = 1).

Šie RAN tinklų apibrėžimai naudojami ODN pritaikymo, tinklų sąsajos bei RoF signalų perdavimo mechanizmams paaiškinti.

## 1.9. Apie radijo signalą

RF siųstuvai yra esminė modernių komunikacijų dalis. RF siųstuvai, suprojektuoti bei surinkti iš esminių RF komponentų, palaiko daug skirtingų pavidalų bei pritaikymo būdų. RF siųstuvai naudojami ne tik bevieliam susisiekimui, tačiau ir kabeliniam pritaikymui, pavyzdžiui, kabelinėje televizijoje. Mobilieji telefonai, radarai, armijos komunikacija, aviacija, bevieliai tinklai, modamai, signalų generatoriai ir t.t. taip pat naudoja vieną arba keletą RF siųstuvų.

Įprasto RF siųstuvo diagrama apima nemoduliuoto signalo informaciją kondicionuojama su signalo apdirbimu, tuomet moduluojamą bei konvertuojamą į pereinamąjį dažnį prieš paskutinę konversiją į RF prieš perdavimą.

Veikimo parametrai, kaina bei projektavimo aplinkybės paveikia RF siųstuvo našumą bei RF signalo kokybę. Kokybei užtikrinti reikia pasirūpinti, kad RF siųstuvai atitiktų esminius RF komunikacijų standartus. Įvairiose RF siųstuvų diegimo situacijose taikomi standartiniai testai, skirti veikimo patikimumui užtikrinti. Yra penki esminiai kokybės užtikrinimo matavimai atliekami RF siųstuvuose.

### 1.9.1. Išvesties galia

RF galia yra dažniausias RF siųstuvo matavimas. Prieš atliekant kitus testus svarbu žinoti, kokia yra DUT išvesties galia ir tai, ar ji atitinka pagal situaciją reikalaujamus parametrus. Testavimas atsako į šiuos klausimus ir parodo kokia sistemos bendroji būklė.

RF galia matuojama įvairiais būdais, priklausomai nuo RF siųstuvo suprojektavimo bei panaudojimo tipo. RF išvestis gali būti paprasta nepertraukiama banga (CW), pulsas, analoginis sumoduliuotas signalas arba sudėtingas skaitmeniniu būdu sumoduliuotas signalas, pavyzdžiui, IQ arba statmena sutankinta (OFDM) bangos forma. Iš visų RF galios matavimo būdų, ramios būsenos CW tono RF galios matavimas yra pats paprasčiausias. Didžiausioji galia, pavyzdžiui, viršijamas RF pulsas arba IQ bangos forma, yra aukščiausia galios vertė per tam tikrą laiką. Iš galios matavimų išvedamas vidurkis per tam tikrą laiką. RF galia gali būti matuojama per dažnių juostą. Tai yra dažniausias variantas kalbant apie mobiliųjų ryšių signalus. Skaitmeniniu būdu sumoduliuoti signalai paprastai yra triukšmingi iš prigimties ir dažnai palaiko nustatytus vidutines bei aukščiausias galios vertes.

RF galios matuoklis yra vienas patikimiausių ir pigiausių įrankių, skirtų matuoti RF galias. Kadangi šis įrankis yra skaliarinis, nepritaikytas matuoti fazių, reikėtų pasirūpinti, kad būtų kuo mažiau varžų neatitikimų, kurių atspindžiai gali sukelti sąlygas netiksiems matavimo rezultatams. Galios matuokliai yra plačiajuosčiai ir neturintys galimybės nusistatyti norimą dažnį, todėl ir nenorimi signalų matavimai atspindi norimų rezultatų vidurkyje. Daugumo RF galios matuoklių diapazonas siekia nuo 50 dB iki 70 dB. Aukštos klasės galios matuokliai gali atlikti specifinius

matavimus, pavyzdžiui, juostos integruotos galios matavimus. Dėl šių priežasčių, RF galios matuokliai yra puikus pasirinkimas tuomet, kai RF aplinka gerai sukontroliuota.

Kitas dažnai RF galios matavimams atlikti naudojamas įrankis yra RF galios spektro analizatorius. Su sudėtingesniais RF instrumentais galima išmatuoti individualius spektrinius dažnių komponentus. Absolutusis galios matavimo tikslumas nėra išskirtinis, dažniausiai nuo + 0,5 dB iki + 2,0 dB. Tačiau santykinis galios išmatavimų tikslumas (arba amplitudės tiesiškumas) yra puikus. Dėl šios priežasties, kalibruojant bet kokį dažnį su žinoma galios verte, pavyzdžiui, iš signalo generatoriaus, rezultatai yra tikslūs dideliame diapazone (daugiau nei 100 dB).

Aukštos klasės RF matavimų instrumentai gali išmatuoti mąstą bei fazę, kas suteikia potencialą aukštesnio lygio klaidų taisymui bei matavimų tikslumui. Be prieš tai minėtų matavimų gali būti atliekami specialūs impulso bei kitų sudėtingų RF bangų formų matavimai, įskaitant pulso profiliavimą, kuris matuoja viso RF pulso apvalkalo galią, vidutinę bei aukščiausią RF pulso galias. Sudėtingos IQ bangos formos matuojamos triukšmingesnėse aplinkose, kur dažniausiai atliekami aukščiausių bei vidutinių galių santykių bei CCDF matavimai.

Paskutinis svarbus veiksnys RF galios matavime yra matavimo greitis. Galios matuokliai garantuoja išskirtinį tikslumą, tačiau matavimus atlieka lėčiau nei aukštosios klasės RF instrumentai. Šis tikslumo bei greičio santykis yra kompromisas iš dalies palengvinantis kalibracijos procedūras. Geras RF galios matavimų, reikalauja tikslumo bei instrumento galimybių supratimas užtikrina matavimų patikimumą.

### **1.9.2. Galia radijo dažnių juostoje**

Tam, kad pagerinti spektrinį našumą bei suteikti prieigą daugeliui vartotojų duotam spektrui, RF siųstuvai naudoja įvairias moduliavimo technikas informacijos užkodavimui bei siuntimui. Šiuolaikinėms komunikacijoms priskiriamas tam tikra spektrinio dažnio dalis (įprastai vadinama „kanalus“). Kanalo dažniausiai sudaro vienas pagrindinis valdantis organas, pavyzdžiui, Federalinė komunikacijų komisija (FCC) Jungtinėse Valstijose. Vartotojams dažniausiai aktualūs du matavimai. Pirmas – integruota viso kanalo galia, dažnai vadinama okupuotu plačiajuosčių dažniu (OBW), juostos galia arba tiesiog kanalo galia. Šiuo atveju, galia paskirstyta nuo nustatyto pradinio dažnio iki nustatyto galutinio dažnio.

Be kanalo galios matavimų svarbu įsitikinti, jog perduodama informacija nenuteka į kitus kanalus, priskirtus kitiems vartotojams, ypač kuomet nutekėjimai įvyksta į abi priskirto kanalo puses. Neskaitant trūkumo iš techninės pusės, už tai gali būti skiriamos ir baudos iš reguliuojančių agentūrų. Standartinis testas šiuo atveju būtų paleisti tęstinį signalą per nustatytą juostą ir matuoti integruotą galią prieš šalia esančių svetimų kanalų dažnį. Šis testas turi daugelį pavadinimų, bet

dažniausiai laikomas gretimų kanalų galios (ACP) matavimu. Tikslūs dažniai, integruotos galios specifikacijos bei testavimo metodai yra nustatomi pagal standartus, išskeltus kanalo savininkų.

### 1.9.3. Nepageidaujami signalai

Su nepriekaištingu RF siųstuvu, vieninteliai perduodami signalai būtų tik norimi signalai, tačiau nepageidaujami signalai yra realaus pasaulio siųstuvų dizaino kompromisų pasekmė. Kaina, našumas bei kiti reikalavimai įtakoja galutinį produktą. Šie signalai yra trijų kategorijų: harmoniniai, intermoduliacijos ir netikrieji.

Pagrindinio nešlio signalo sveikųjų skaičių kartotiniai signalai yra harmoniškai susiję. Pagrindiniai šių signalų šaltiniai yra daugikliai naudojami siųstuve. Šie signalai gali turėti pakankamai žemas amplitudes ir dėl to būti laikomi nereikšmingais arba jų dažniai gali būti pakankamai nutolę nuo priskirto kanalo dažnio, tokiu būdu jie atskiriami filtravimo proceso metu. Harmoniniai signalai yra lengvai aptinkami, nes jų dažniai būna nuspėjami. Pavyzdžiui, harmoninis 1 GHz signalo turinys gali būti aptinkamas ties 2 GHz, 3 GHz ir t.t.

Intermoduliaciniai signalai yra sugeneruojami siųstuvo komponentų netiesinių sąveikų metu, pavyzdžiui, maišytuvuose. Maišytuvas siunčia dvejų įvesties signalų dažnių sumą bei skirtumą. RF siųstuvuose, signalų išvestis filtruojama tam, kad būtų atskirta aukštesnių dažnių suma. Šiuo būdu žemo dažnio nmoduliuotų signalų informacija perduodama į galutinį RF dažnį ir paruošiama siuntimui. Tačiau maišytuvai taip pat skleidžia daugelį kitų signalų, pavyzdžiui, įvesties signalų nutekėjimą į išvestį. Intermoduliacinių signalų dažnis bei amplitudė keičiasi priklausomai nuo įvesties signalų. Kruopščios analizės dėka intermoduliaciniai signalai gali būti nuspėjami ir taip sumažinama įtaka.

Netikrieji signalai gali sutapti su bet kuriais anksčiau išvardintais signalais. Netikri signalai atsiranda naudojant bet kurį dažnį ir galios dydį signalo nutekėjimo arba elektromagnetinės interferencijos atvejais. Dėl savo nenuspėjamos prigimties, netikrieji signalai yra sunkiai aptinkami ir šalinami. Empiriniai bei analitiniai metodai, geras RF dizainas yra puikiausi įrankiai norint sumažinti netikrų signalų įtaką.

Spektriniai arba vektoriniai analizatoriai yra geri įrankiai norint sumažinti nepageidaujamų signalų kiekį. Galios matuokliai šiam procesui dažniausiai nenaudojami, nes jie yra plačiajuosčiai ir palaiko žemą dinaminį diapazoną. RF siųstuve nepageidaujami signalai eikvoja RF galią, kuri įprastai naudojama norimų signalų perdavimui. Dėl šios priežasties gali iškilti daug pasekmių, pavyzdžiui, kritęs našumas, norma viršijanti įrenginio temperatūra, sumažėjusi baterijos gyvavimo trukmė. Patikimiausias metodas norint užkirsti kelią nepageidaujamiems signalams – RF dizaino metu pasirūpinti tinkama analize tam, kad būtų lengviau nustatyti ir sumažinti nepageidaujamų signalų kiekį siųstuve.

#### 1.9.4. Fazinis triukšmas

Tikriausiai viena iš svarbiausių RF siųstuvų specifikacijų yra jo fazinis triukšmas. RF siųstuvai bei imtuvai dažniausiai atlieka keletą dažnio konvertavimų. Šie konvertavimai vykdomi tam, kad signalas aukštesniu dažnio keitikliu būtų paverčiamas į galutinį RF signalą su norimu dažniu. Tai pasiekama panaudojus keletą maišytuvų, kurie sumuoja įvesties dažnius su vietinio osciliatoriaus (LO) dažniu.

LO dažnio stabilumas yra kritiškai svarbus aukštos kokybės RF perdavimams. Bet koks trumpalaikis dažnio nestabilumas mažina perdavimų našumą. Šie trumpalaikiai nestabilumai vadinami faziniais triukšmais dar vadinami drebinimais. Esant idealioms sąlygoms, fazinis triukšmas yra lygus nuliui, tačiau gyvenimiškuose situacijose tokia situacija yra neįmanoma. Fazinį triukšmą sukelia sistemos dizaino stadijoje įvykdyti kompromisai tarp reguliavimo greičio bei fazinio triukšmo dydžio.

Fazinis triukšmas yra dažniausiai simetriškai nešlio atžvilgiu. Tai reiškia, kad fazinio triukšmo pavidalas yra toks pat aukštesnėje nešlio pusėje kaip ir žemesnėje nešlio pusėje. Pagal nutarimą fazinis triukšmas yra braižomas kartu su nešliu vertikaliajoje ašyje, o horizontalioji ašis atstoja atsvarą, galios spektrinę tankumą (PSD) matuojamą dBc/Hertz, iš nešlio pusės. Vertės, esančios šiame plote, išreiškiamos kaip amplitudės dydis, esantis žemiau nešlio su duotu dažniu, pavyzdžiui, -85 dBc/Hz su 10 kHz atsvara. Fazinio triukšmo kreivė taip pat suteikia informaciją apie grandinę, pavyzdžiui, kilpos bitų pralaidumą, mirgėjimo triukšmą.

Tiesioginis metodas yra dažniausiai vartojamas fazinio triukšmo matavimo būdas. Testavimui naudojami instrumentai kaip spektrinis analizatorius su aukštesniu faziniu triukšmu nei testuojamas įrenginys (DUT). Spektrinis analizatorius jungiamas tiesiai į DUT, kur tuomet paskirsto fazinį triukšmą testavimui skirta programa. Dėl aukštesnio našumo fazinio triukšmo matavimų DUT fazinis triukšmas lyginamas su vienu arba keliais stabiliais, žemo fazinio triukšmo šaltiniais. Du testavimo pavyzdžiai: linijos vėlavimo metodas ir kryžminės koreliacijos metodas. Sumažinti matavimo triukšmą naudojami vidurkių išvedimai.

#### 1.9.5. Moduliacijos kokybė

RF siųstuvai koduoja informaciją viename arba keliuose CW nešliuose moduliacijos metu. Sumoduliuoto signalo kokybės vertinimas suteikia informaciją apie viso RF siųstuvų gyvybinę būseną. Kai kurie testai yra skirti specifinėms moduliacijos schemoms, tačiau naudojami ir kiti testai, skirti platesniam testavimui. Pavyzdžiui, AM ir FM moduliacijos testavimo metu matuojami moduliacijos indeksai ir gylis.

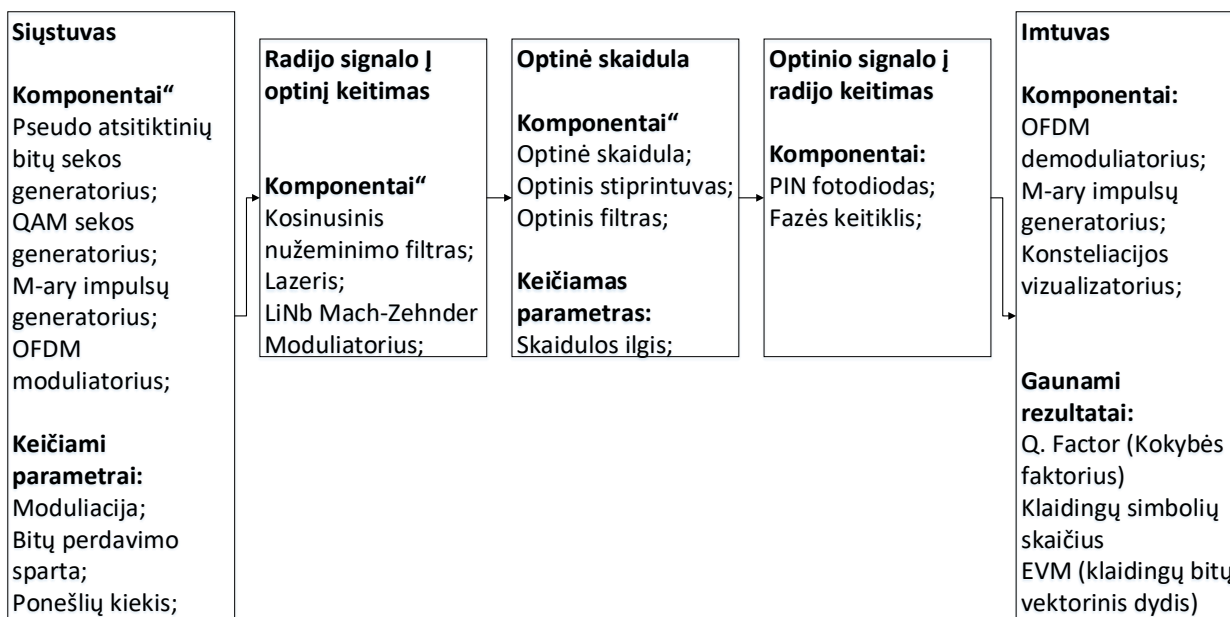
Skaitmeninių IQ bangos formų testavime matuojamas klaidos vektorius dydis (EVM). Priklausomai nuo pasirinkto standarto, EVM parodo moduliacijos kokybę. Bangos formos fazė

bei dydis yra nustatomi bei perduodami su kiekvienu siųstuvo simboliniu laiko ciklu. Signalų fazės bei dydžio matavimams naudojamas vektorinis signalo analizatorius su atitinkamai besielgiančiomis IQ bangomis. Perduodamos bangos formos fazė bei dydis matuojami ir konvertuojami į IQ komponentus ir lyginami su laukiamomis (idealiomis) vertėmis kiekvieno ciklo metu. Idealioms vertėms pasirenkamos pagal atitinkamus standartus ir brėžiamos IQ diagramoje (dar vadinama konsteliacijos diagrama). Skirtumas tarp esamų dydžių ir iš matavimų gautų dydžių yra vadinamas paklaida ir išreiškiamas procentais. Tam, kad būtų patikimai ištestuota daugelis IQ būsenų, skaičiuojamas kelių šimtų EVM matavimų, paimtų iš konsteliacijos diagramos, vidurkis.

## 2. ROF SIGNALO KOKYBĖS TYRIMAS

### 2.1. RoF tyrimo modelis

Atlikti modeliavimo darbams pasirinkta Optisystem programinė įranga. Matlab variantas atlikus galimybių analizę atmestas, kadangi nerasta realių pavyzdžių, kuriuose būtų naudojamas informacijos perdavimas optiniais kanalais. 2.1 paveiksle pateikiamas apibendrintas darbo modelis su modeliavimui aktualiais parametrais.

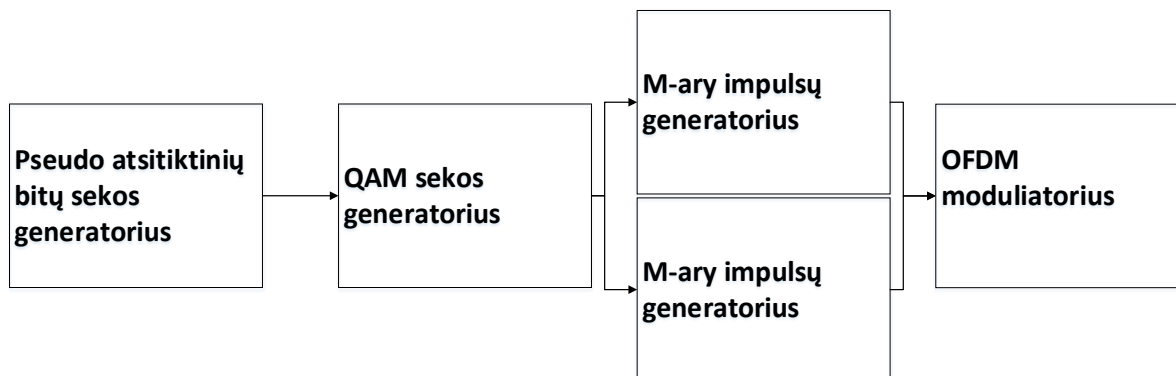


2.1 pav. Apibendrinta modeliavimo schema

Kiekvieną iš 2.1 paveiksle pavaizduotų blokų sudaro skirtingi komponentai, kurių parametrai keičiami atliekant tyrimą.

### 2.2. Siųstuvas

2.1 paveiksle paminėti komponentai, kurie sudaro siųstuvą. 2.2 paveiksle pateikiama principinė siųstuvo schema.



2.2 pav. Principinė siųstuvo schema

**Pseudo atsitiktinių bitų sekos generatorius.** Šis generatorius sugeneruoja atsitiktinį dvejetainį kodą, kuris skirtas atkartoti kintamai informacijai. Komponentas turi vieną išėjimą skirtą perduoti dvejetainiam kodui į QAM sekos generatorių.

**QAM sekos generatorius.** Šis generatorius generuoja dvi lygiagrečias M-ary simbolių sekas iš dviejų komponentų naudojančių kvadratinę amplitudinę moduliaciją. Komponentas turi du išėjimus ir vieną įėjimą. Išėjimai skirti M-ary signalui perduoti, o įėjimas dvejetainiam kodui priimti. Pagrindinis naudojamas komponento parametras yra bitų skaičius norint perduoti vieną simbolį. Šiame darbe naudojamos reikšmės yra 2 ir 4 bitai per simbolį. Naudojant QAM sekos generatorių bitų seka yra padalinama į dvi lygiagrečias subsekas, kiekviena iš jų gali būti perduota per du kvadratinės nešlius kai statomas QAM modulatorius. Tai pasiekama naudojant serijinę į lygiagrečią konversiją. Perduodant informaciją galima varijuoti signalo amplitudę pagal šaltinio simbolius. Kiekvienam išėjimui amplitudę paima vieną reikšmę iš amplitudžių rinkinio.

$$a_i = (2i-1-M), i = 1, 2, \dots, M$$

Čia M reiškia galima dvejetainių skaičių seką paskaičiuotą pagal:

$$M = 2^{h/2}$$

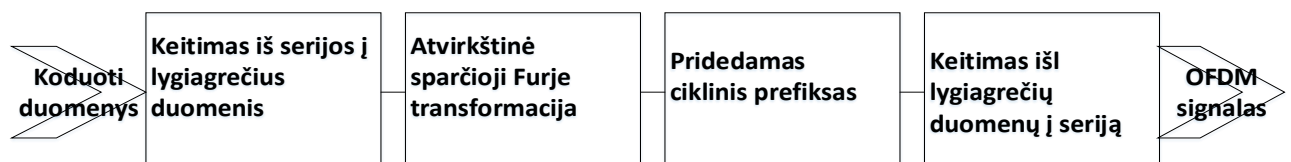
Čia h reiškia bitų per simbolį skaičių. Ekvivalentus QAM rinkinys pagal šaknį iš M reikšmės. Tai reiškia, kad:

- $h = 2, M = 2$  – tuomet naudojama 4QAM moduliacija
- $h = 4, M = 4$  – tuomet naudojama 16QAM moduliacija

**M-ary impulsų generatorius.** Komponentas reikalingas sugeneruoti daugiapakopius M-ary signalo impulsus. Komponento įėjime priimamas M-ary tipo signalas iš QAM sekos generatoriaus, o sugeneruoti M-ary impulsai elektriniu signalu perduodami į OFDM modulatorių.

**OFDM modulatorius.** OFDM modulatorius sumoduliuoja skaitmeninį signalą į daugybę ponešlių. Komponentas turi 2 įėjimus ir 2 išėjimus. Įėjimai skirti M-ary tipo signalo impulsams priimti, o išėjimai perduoti elektrinį signalą tolimesniam apdorojimui. Pagrindinis šio komponento naudojamas ir tyrime keičiamas parametras yra ponešlių kiekis, kuris tyrimo atveju buvo 128, 256 ir 512.

OFDM yra technika paremta perduoti informacijai naudojant ponešlius. Spektras yra padalinamas į nešlius, kurių kiekvienas yra moduluojamas mažos spartos duomenų srautu. 2.3 pav. atvaizduota apibendrinta OFDM modulatoriaus schema.





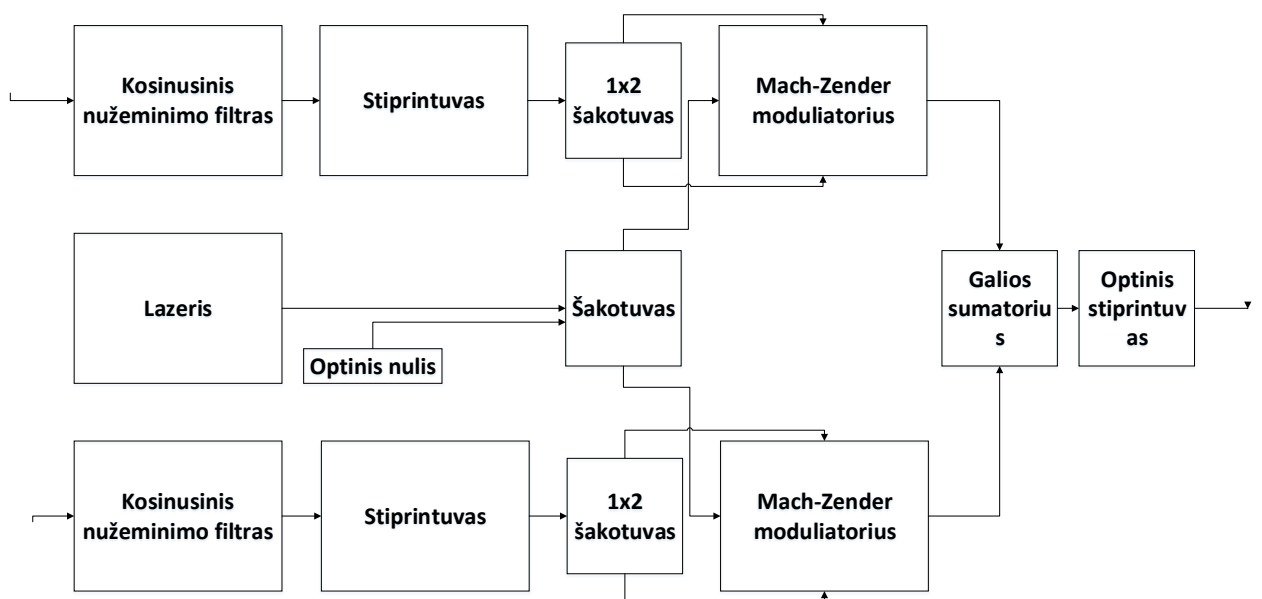
### 2.3 pav. Apibendrinta modulatoriaus schema.

Duomenys įėjime gali būti skirtingų moduliacijos tipų, pavyzdžiui BPSK, QPSK, QAM ir t.t. Įeinanti serijinė duomenų seka yra pakeičiama į lygiagretų formatą. Duomenys yra perduodami lygiagrečiai priskiriant kiekvienam simboliui po nešlį.

Po spektro sudėliojimo vykdoma atvirkštinė Furje transformacija rasti atitinkamo laiko bangai. Apsaugos periodas gali būti pridodamas prie kiekvieno simbolio. Skirtingi interpoliacijos tipai (žingsninis, linijinis ir kubinis) gali būti panaudoti skaitmeninio į analoginį signalo konvertavimui. Po duomenų konvertavimo lygiagretus duomenų srautas yra pakeičiamas atgal į simbolių serijos transmisiją.

### 2.3. Radijo signalo į optinį keitimas

Signalas perduodamas iš OFDM modulatoriaus šakojasi į dvi atšakas. Prieš perduodant signalą į Mach-Zender moduliatorių jis yra nufiltruojamas naudojant žemos galios kosinuinį nužeminimo filtrą ir sustiprinamas. Principinė radijo signalo keitimo į optinį schema pateikiama 2.4 paveiksle.

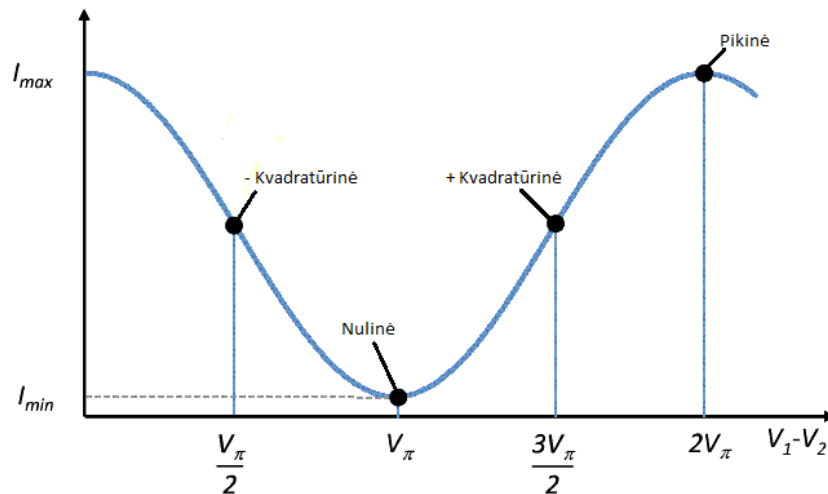


2.4 pav. Principinė radijo signalo keitimo į optinį schema.

**Mach-Zender moduliatorius.** Mach-Zender moduliatorius turi 3 įėjimus ir vieną išėjimą. 2 įėjimai skirti elektriniam signalui, kuris yra nufotruotas ir sustiprintas bei perduotas iš OFDM modulatoriaus. 3 įėjimas skirtas optiniam signalui perduodamam iš lazerio. Pagrindiniai šio komponento parametrai yra gesinimo santykis [dB], poslinkio perjungimo įtampa [V], radijo dažnio perjungimo įtampa [V] ir įterpties nuostoliai [dB]

Mach-Zender modulatoriaus struktūra susideda iš optinių atšakų, kurios išskirsto atėjusį optinį signalą į dvi atšakas. Elektrinio signalo perdavimas į vieną ar dvi iš atšakų leidžia kontroliuoti interferencijos laipsnį modulatoriaus išėjime taip valdant išėjimo intensyvumą.

Mach-Zender modulatorius įprastai veikia trimis poslinkio taškais: pikiniu, nuliniu ir kvadratūriniu. Skirtingiems taškams galioja šie nustatymai pateikti 2.5 paveiksle:



2.5 pav. Skirtingų taškų nustatymai.

- Nulinei konfigūracijai:  $v_1 - v_2$  turėtų būti nustatyta  $v_\pi$
- Pikinei konfigūracijai:  $v_1 - v_2$  turėtų būti nustatyta 0
- Kvadratūrinei konfigūracijai:  $v_1 - v_2$  turėtų būti nustatyta  $0.5v_\pi$  arba  $1.5 v_\pi$  atitinkamai

Taigi, priimant, kad  $v_\pi$  yra 4V galima nadudoti šiuos parametrus.

2.1 lentelė. Tipiniai nustatymai

Parametras	Nulinė	Pikinė	Kvadratūrinė
Perjungimo poslinkio įtampa	4	4	4
Perjungimo radijo dažnio įtampa	4	4	4
Poslinkio įtampa1	-2	0	1
Poslinkio įtampa2	2	0	-1

**Lazeris.** Šis komponentas generuoja optinį signalą. Turi vieną išėjimą skirtą optiniam signalui perduoti. Pagrindiniai lazerio parametrai yra dažnis [THz] bei galia [dBm]. Šie parametrai yra nustatomi rankiniu būdu. Lazerio fazinis triukšmas yra modeliuojamas su tikimybine funkcija:

$$f(\Delta\varphi) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\Delta f dt}} * e^{-\frac{\Delta\varphi^2}{4\pi\Delta f dt}}.$$

Čia  $\Delta\varphi$  yra fazių skirtumas tarp dviejų sėkmingų laiko instancijų, o  $dt$  yra laiko diskretizavimas.

$2\pi\sqrt{\Delta f}$  yra naudojamas su  $\Delta f$  kaip lazerio juostos plotis

Išėjimas yra dauginamas su kompleksiniu vektoriu atsižvelgiant į poliarizacijos statusą.

$$\begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_Y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-k} \\ \sqrt{k}e^{j\theta} \end{pmatrix} * \sqrt{P(t)}.$$

Čia galios išskaidymas  $k$  fazės skirtumas  $\theta$  yra priklausomi nuo parametrų azimuto  $\alpha$  ir elipsės  $\varepsilon$

$$\tan(t\alpha) = \frac{2\sqrt{k(1-k)}\cos\theta}{1-2k};$$

$$\sin(2\varepsilon) = 2\sqrt{k(1-k)}\sin(\theta).$$

## 2.4. Optinė skaidula

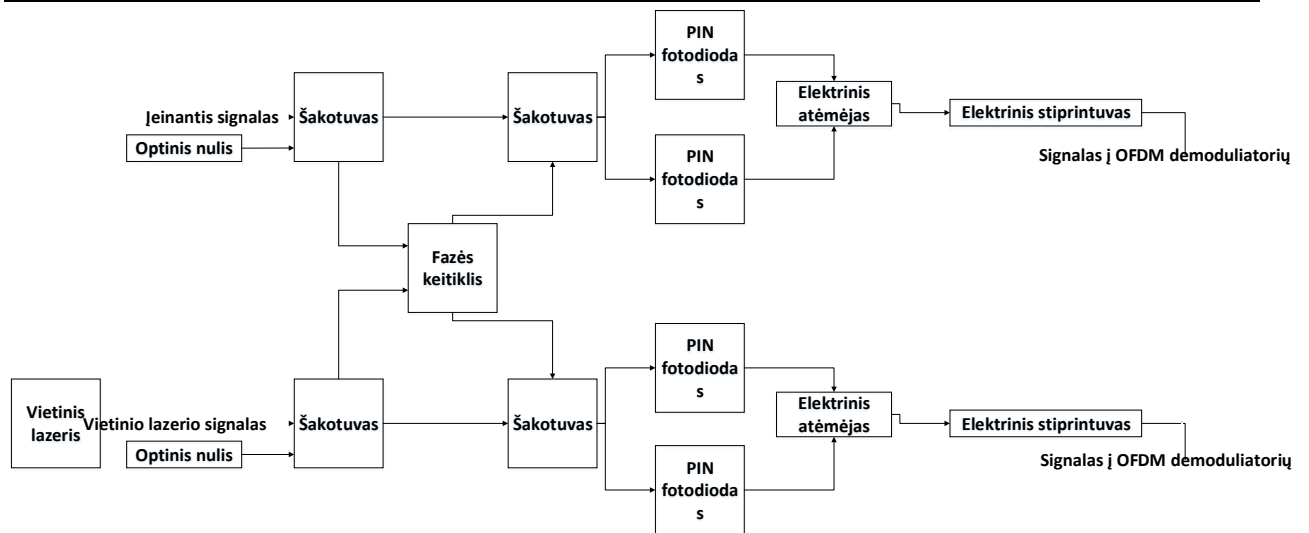
Optinė skaidula tyrime naudojama kiekvieno matavimo atveju. Skaidulos ilgis keičiamas nuo 0 iki 200km naudojant 4 km žingsnį. Pagrindiniai skaidulos parametrai yra bangos ilgis, kuris tyrimo atveju yra 1550 nm, skaidulos ilgis, kuris yra keičiamas bei silpninimas, kuris tyrimo atveju yra 0,2 dB/km.

Signalas perduotas per optinę skaidulą yra sustiprinamas optiniu stiprintuvu. Pagrindinis optinio stiprintuvo naudotas parametras yra signalo stiprinimas, kuris tyrimo atveju yra 10 dB.

Sustiprinus signalą naudojamas Gausinis optinis filtras. Filtro dažnis suderintas su lazerio spinduliavimo dažniu, kas yra 193,1 THz. Filtro juostos plotis tyrimo atveju nustatytas 15 GHz.

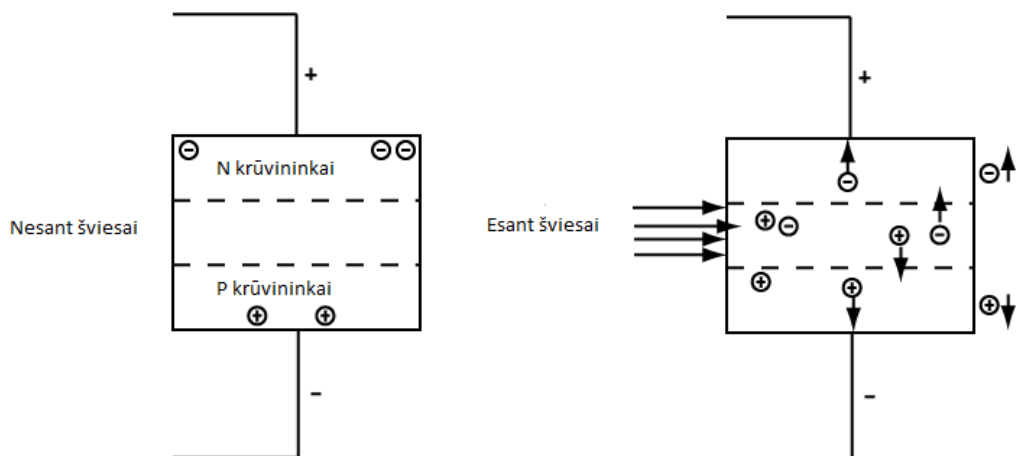
## 2.5. Optinio signalo į radijo keitimas

Optinio signalo į radijo keitimas vykdomas naudojant koherentinę detekciją. Tam naudojami fotodetektoriai. 2.6 paveiksle pateikiama principinė keitiklio schema.



2.6 pav. Optinio signalo į RF keitimo schema

**PIN fotodiodas.** Šis komponentas naudojamas pakeisti optinį signalą į elektrinį. Komponentas turi jėgimą optiniam signalui ir išėjimą elektriniam. 2.7 paveiksle pavaizduojama kaip vykdomas signalo konvertavimas.

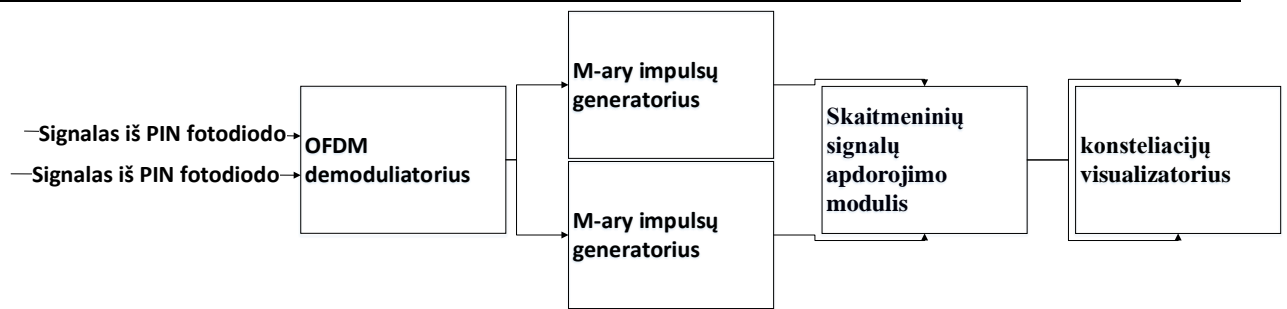


2.7 pav. PIN fotodetektoriaus veikimas.

Signalai gauti iš PIN fotodiodų yra sudedami ir sustiprinami elektriniu stiprintuvu, tyrimo metu stiprintuvo stiprinimas nustatomas 20 dB.

## 2.6. Imtuvas

Pagrindiniai imtuvą sudarantys komponentai yra OFDM demoduliatorius, M-ary impulsų generatorius, skaitmeninių signalų apdorojimo modulis bei konsteliacijų vizualizatorius. Iš paskutiniojo komponento gaunami rezultatai pateikti naudojami parametrai (klaidingų simbolių skaičius, kokybės faktorius bei klaidingų bitų vektorinis dydis). Principinė imtuvo komponentų schema pateikiama 2.8 paveiksle.



2.8 pav. PIN fotodetektoriaus veikimas.

**OFDM demoduliuojantis.** Šis komponentas demoduliuoja OFDM signalą į skaitmeninį signalą. Komponente yra 2 įėjimai ir 2 išėjimai. Įėjimai skirti elektriniam signalui priimti, o išėjimai perduoti M-ary tipo signalui į M-ary impulsų generatorių. Tyrimo metu svarbiausias šio komponento parametras yra ponešlių kiekis, kuris privalo sutapti su moduliatoriuje esančiu kiekiu. Šiuo atveju 128, 256 ir 512 ponešlių skirtingais matavimų atvejais. Atliekama funkcija yra identiška aprašytai OFDM moduliatoriuje, tačiau šiame komponente išimtas apsaugos periodas.

**M-ary impulsų generatorius.** Kaip ir OFDM demoduliuojantis šis komponentas veikia atvirkščiai nei siųstuvo atveju.

**Skaitmeninių signalų apdorojimo modulis.** Šis komponentas yra reikalinga jungtis prieš konsteliacijų vizualizatorių. Jis atlieka universalų verčių kompensavimą siekiant sugrąžinti gaunamus perdavimo signalus po koherentinio aptikimo. Tyrimo metu komponente reikalinga pasirinkti tinkamus parametrus. Pirmas parametras, abiem modeliavimo atvejais pasirenkamas vienodas, tai vienos poliarizacijos tipas. Antras parametras yra moduliacija, priklausomai nuo modelio pasirenkama QPSK (4QAM) arba 16 QAM. Trečias parametras yra konsteliacijos tipas. Tyrimo metu naudotas kvadratinis atvaizdavimas.

**Konsteliacijų vizualizatorius.** Komponentas atvaizduoja elektrinius signalus konsteliacijos diagramoje, turi 2 įėjimus elektriniams signalams. Stebint rezultatus galima pasirinkti skirtingus atvaizdavimo tipus: Signalas, triukšmas bei signalas + triukšmas. Toliau apibūdinami komponento rezultatai.

- Klaidingų simbolių skaičius. Šis parametras skaičiuojamas pagal formulę:

$$P_e = \sum_{k=1}^M P_m[k] \left[ \sum_{l=1, l \neq k}^M \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q_{kl}}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

Čia  $M$  yra iš viso gautų simbolių skaičius,  $P_m[k]$  yra  $k$  simbolio įvykio tikimybė, kuri patenka į nustatytą simbolio  $k$  ribą, padalintą iš viso gauto simbolių skaičiaus  $M$ .  $Q_{kl}$  yra skaičiuojamas pagal formulę:

$$Q_{kl} = \frac{d_{kl}}{\sigma_{kl} + \sigma_{lk}}$$

Šioje formulėje:

$$d_{kl} = \sqrt{[I_{av}, Q_{av}]_k^2 + [I_{av}, Q_{av}]_l^2}; \quad 1.$$

$$\sigma_{kl} = \sqrt{[SD(I)]_k^2 + [SD(Q)]_l^2}; \quad 2.$$

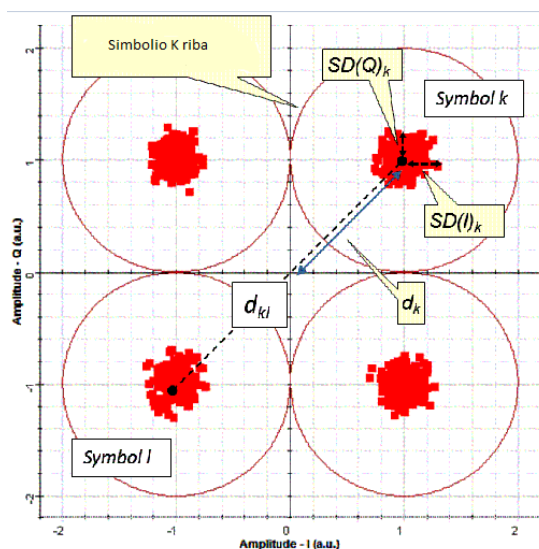
$$\sigma_{lk} = \sqrt{[SD(I)]_l^2 + [SD(Q)]_k^2}. \quad 3.$$

Čia  $I_{av}$  ir  $Q_{av}$  representuoja vidutines priimtų I ir Q amplitudes, kurios patenka į nustatytą ribą duotam simboliui.  $SD$  reprezentuoja standartinį nukrypimą nuo I ir Q amplitudes ir skaičiuojama pagal šias formules:

$$SD(I) = \sqrt{(I - I_{av})^2}; \quad 4.$$

$$SD(Q) = \sqrt{(Q - Q_{av})^2}. \quad 5.$$

2.9 pav. paaiškinamos  $d_k$ ;  $d_{kl}$ ;  $\sigma_{kl}$  ir  $\sigma_{lk}$  reikšmės.



2.9 pav. Kintamųjų, naudojamų klaidingų bitų tikimybei apskaičiuoti, paaiškinimas

- Klaidingų bitų vektorinis dydis.

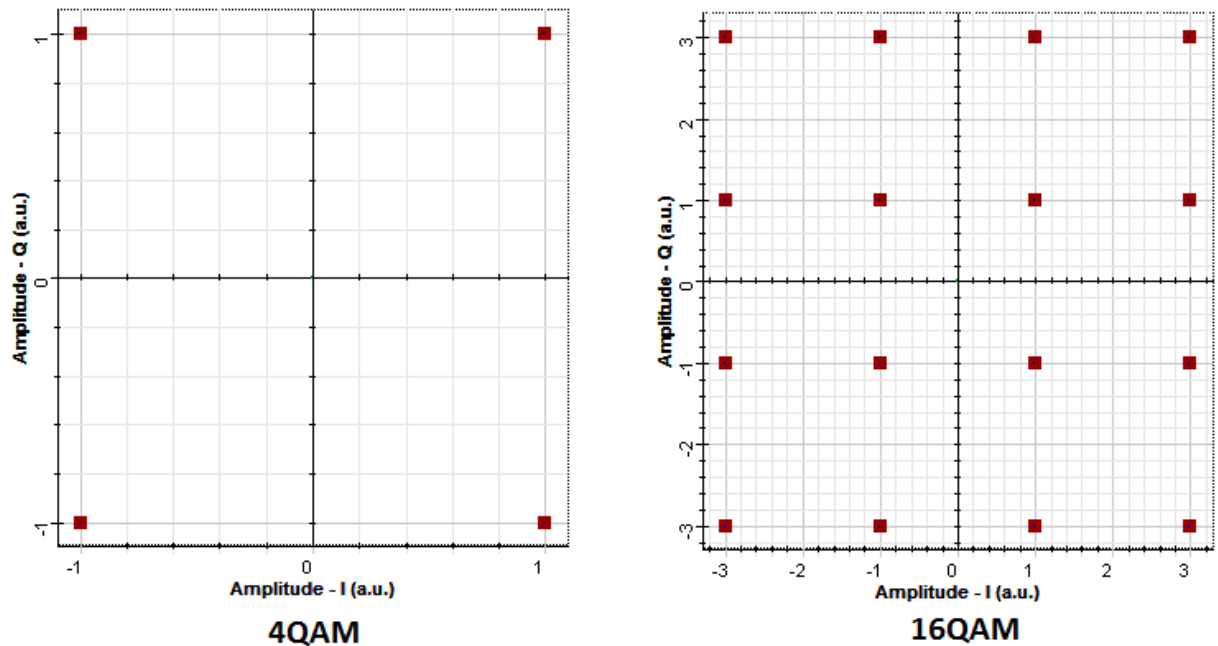
EVM yra parametras, kuris parodo kaip tiksliai signalas yra perduodamas savo konsteliacijoje. Idealiu atveju siųstuvas turėtų sugeneruoti duomenis taip, kad jie kuo mažiau nuklystų nuo pradinių taškų. Esant triukšmas, didėjant atstumui duomenys nėra perduodami tiksliai. Parametras skaičiuojamas pagal formulę:

$$EVM = \left( \frac{\sum_{l=1, l \neq k}^M d_{kl}^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^M d_k^2} \right)^2.$$

Čia  $d_k$  yra atstumas pažymėtas 2.7 pav. kaip atstumas nuo centrinio taško iki K simbolio.

## 2.7. Modeliavimas

Naudojami 2 modeliai, kurie yra paremti tuo pačiu pagrindu. Vienas iš modelių skirtas analizuoti 4QAM arba kitaip vadinamai QPSK moduliacijai, kitas 16QAM moduliacijai. Pagrindinis skirtumas tarp dviejų moduliacijų yra bitų naudojamų perduoti simboliui skaičius. QPSK atveju 2 ir 16QAM atveju 4 bitai kaip pavaizduota 2.10 pav. Tyrimas naudojant abi moduliacijas atliekamas identišškai, keičiant tuos pačius parametrus ir stebint tuos pačius rezultatus.

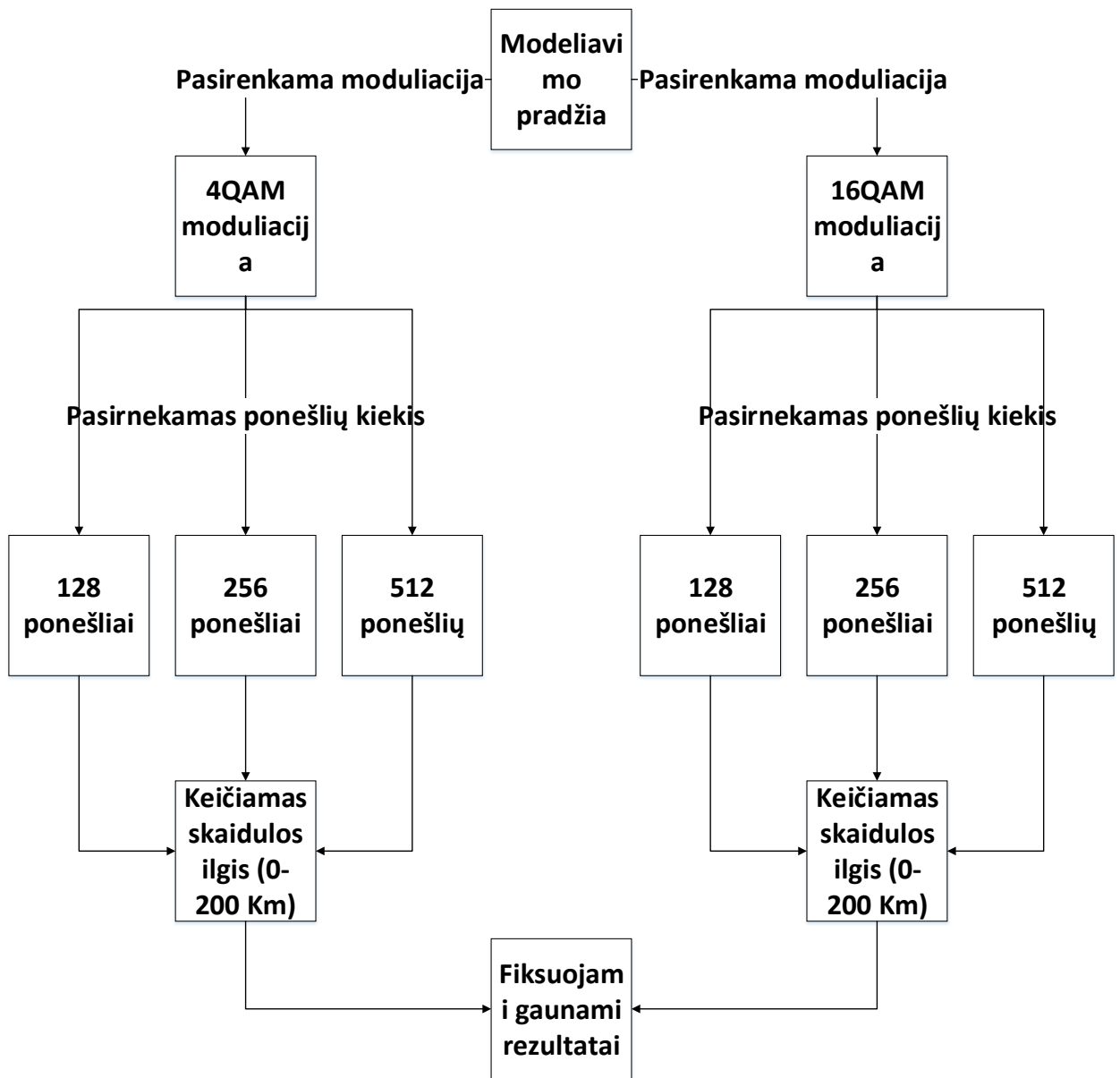


2.10 pav. Pradiniai signalai skirtingų moduliacijų atveju

Tyrimo metu analizuojama skaidulos ilgio bei ponešlių kiekio esant skirtingai bitų perdavimo spartai poveikis. Tyrimas atliekamas kartojant matavimus keičiant šiuos parametrus:

- 1 Gbit/s, 5Gbit/s, 10Gbit/s, 20 Gbit/s ir 40Gbit/s duomenų perdavimo sparta;
- 128, 256 ir 512 ponešliai;
- Skaidulos ilgis nuo 0 iki 200 km.

2.11 pav. pavaizduotas tyrimo vykdymo algoritmas.



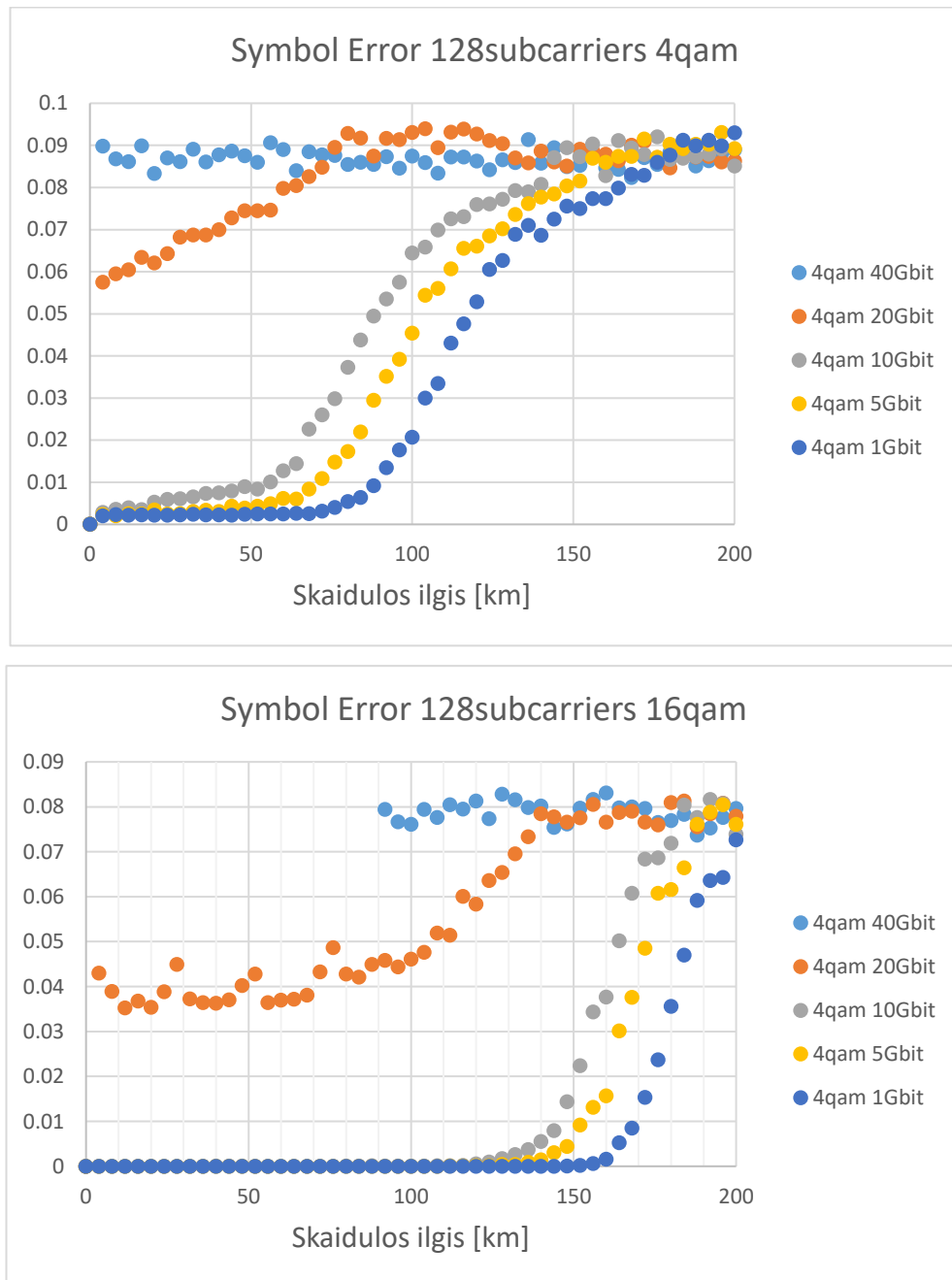
2.11 pav. Tyrimo atlikimo algoritmas



### 3. GAUNAMI REZULTATAI

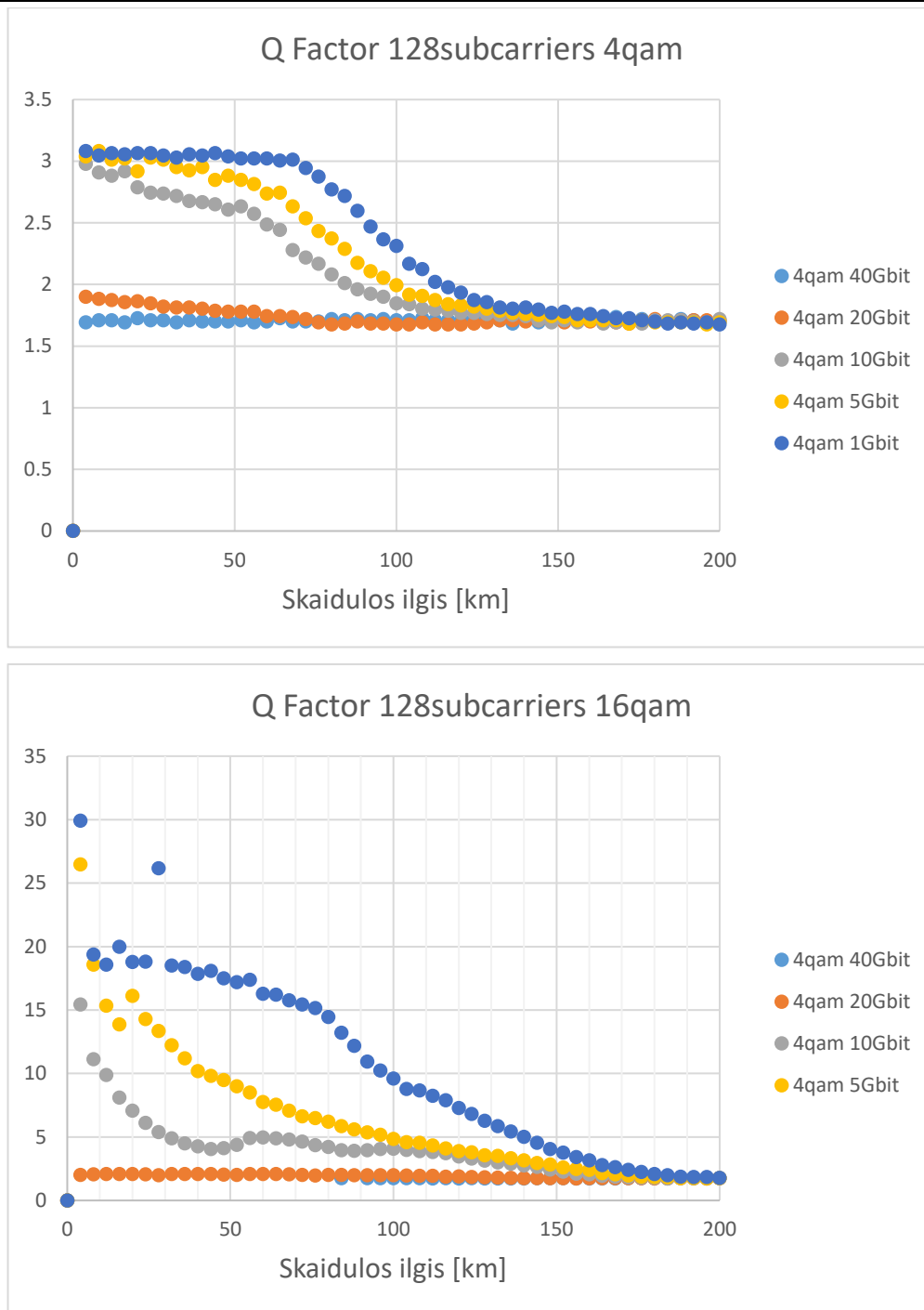
#### 3.1. 128 ponešlių tyrimas

Pirminiu variantu matavimai atliekami nustatant modulatoriaus ir demodulatoriaus ponešlių kiekį į 128 ponešlius. 3.1, 3.2 ir 3.3 paveiksluose pateikiama kaip keičiasi perduodamo signalo kokybė naudojant skirtingas moduliacijas ir perdavinėjant skirtingas spartas.



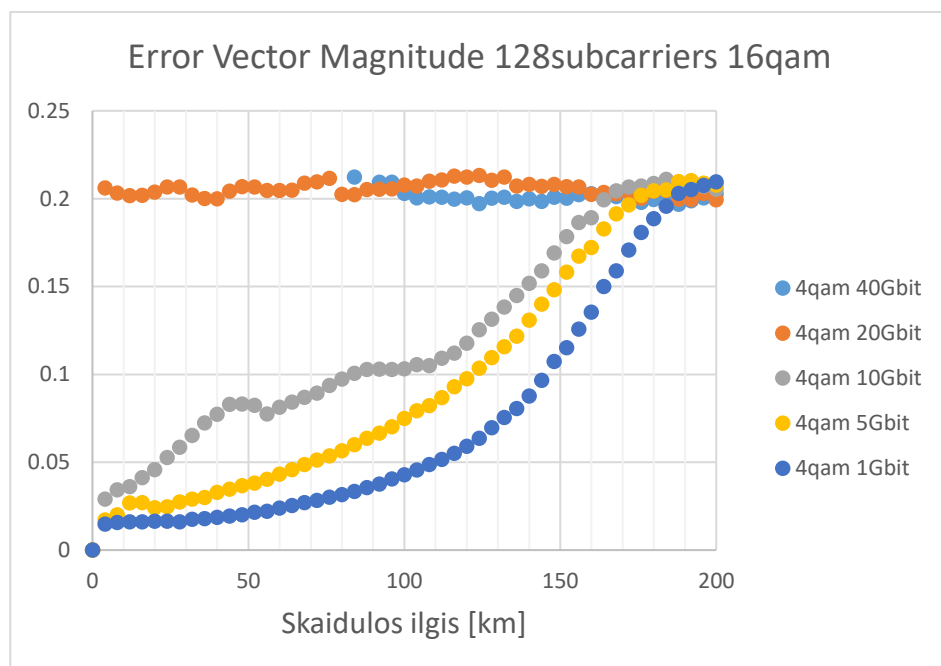
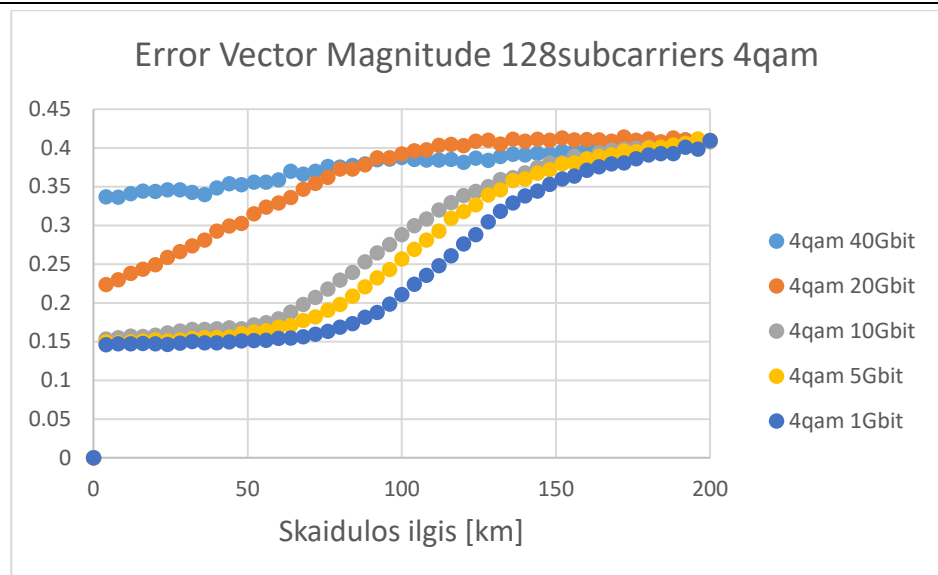
**3.1 pav.** Klaidingų simbolių rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

Iš rezultatų galima nustatyti, kad naudojant 16QAM moduliaciją klaidingų simbolių skaičius savo pikinę reikšmę pasiekia kur kas vėliau nei naudojant 4QAM moduliaciją



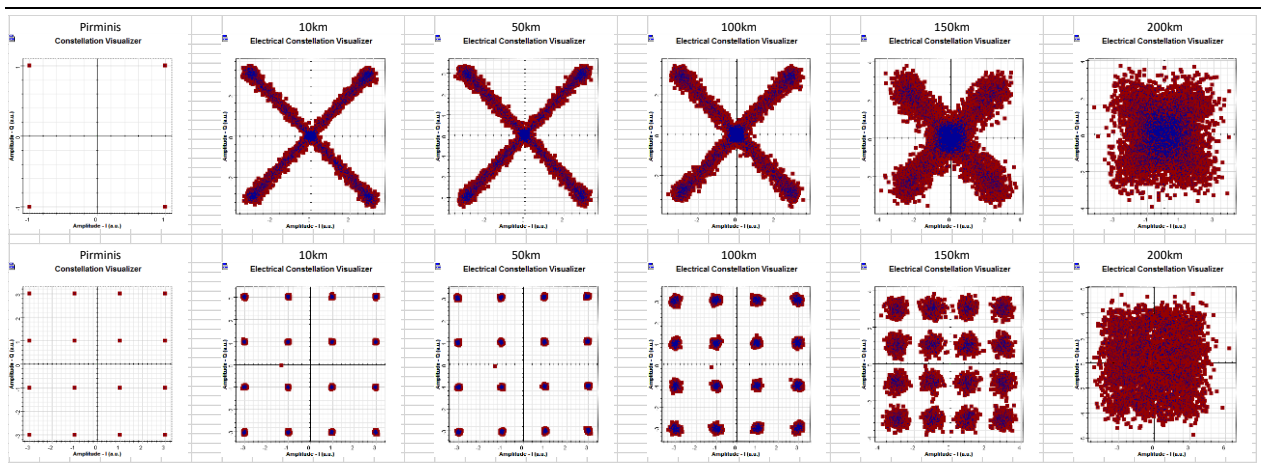
**3.2 pav.** Kokybės faktorius rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

Kokybės faktorius naudojant 4QAM moduliaciją per žemas tinkamai naudoti. 16QAM moduliacijos atveju naudojant 128 ponešlius kokybės tinkamas 1, 5 ir 10Gbit perdavimui, 20 ir 40 Gbit/s kaip ir 4QAM moduliacijos atveju reikšmės netenkinamos. Kokybės faktorius didėjant atstumui sparčiai krenta ir pasiekia kritinę ribą ties 100 km riba.

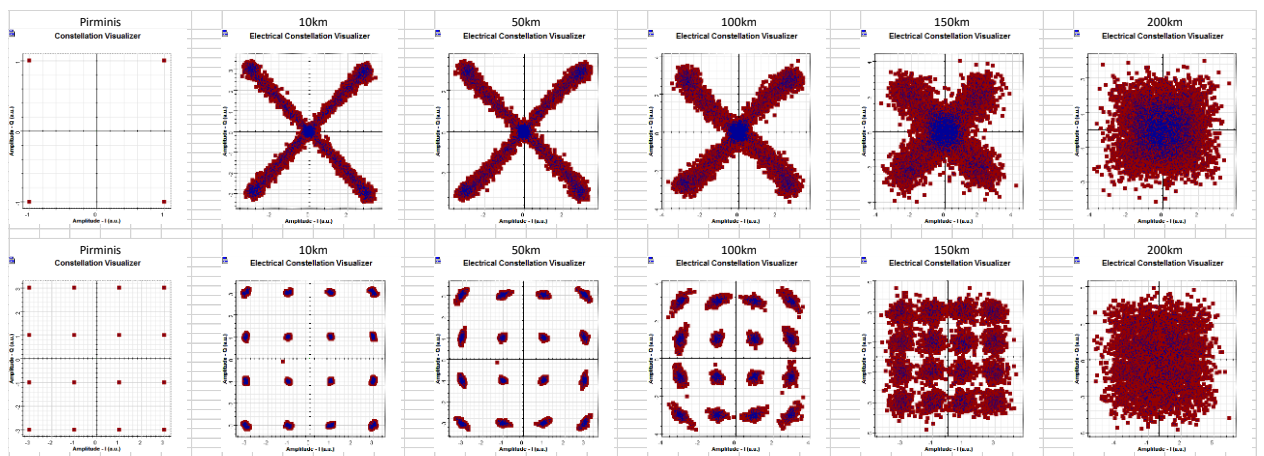


**3.3 pav.** Kokybės faktoriaus rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

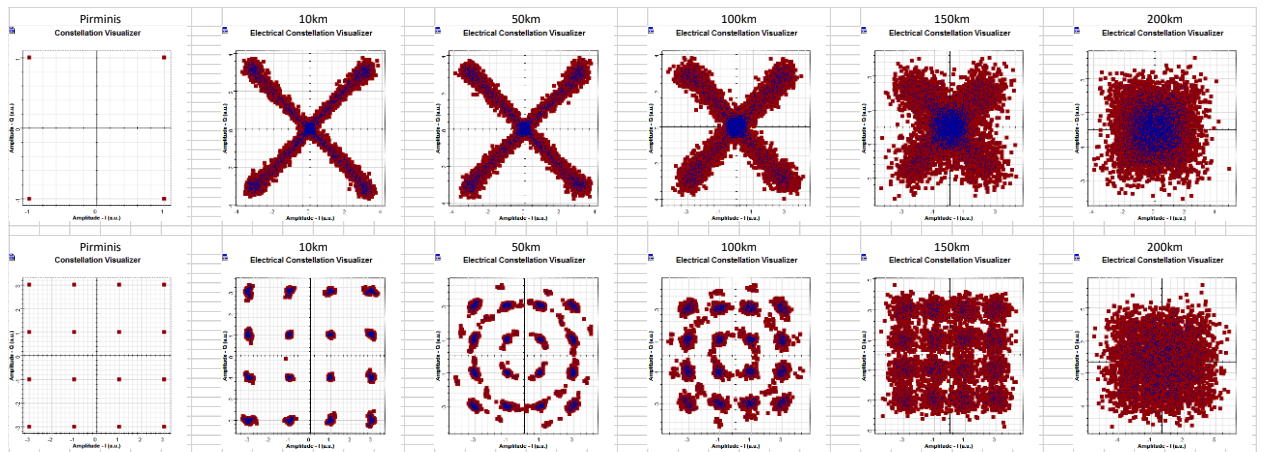
Stebint klaidingų nuokrypių rezultatus galima nustatyti, kad esant 20 ir 40 Gbit/s spartai matomas didelis nuokrypis nuo pradinių reikšmių ir tokios spartos perdavimas negalimas. Klaidingų nuokrypių rezultatus galima aiškiai matyti konsteliacijų diagramose, kurios pateikiamos prie visų skirtingų spartų fiksuojant grafikus ties 10, 50, 100, 150 ir 200 km. Atitinkamai 3.4 – 3.8 paveiksluose galima stebėti kaip keičiasi konsteliacijų grafikai keičiantis parametrams



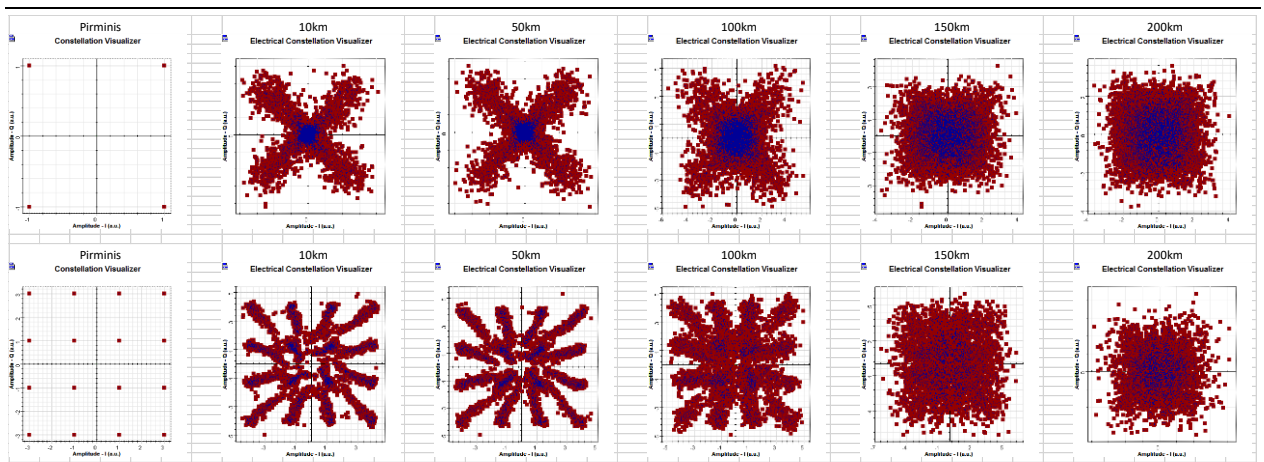
3.4 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 1Gbit/s



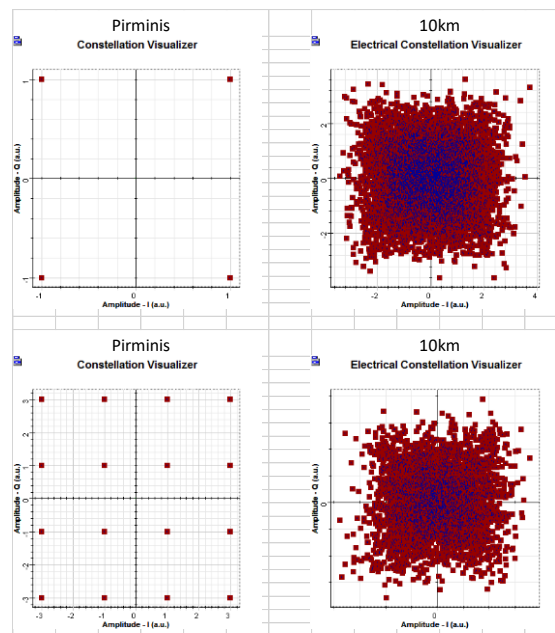
3.5 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 5Gbit/s



3.6 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 10Gbit/s



3.7 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 20Gbit/s

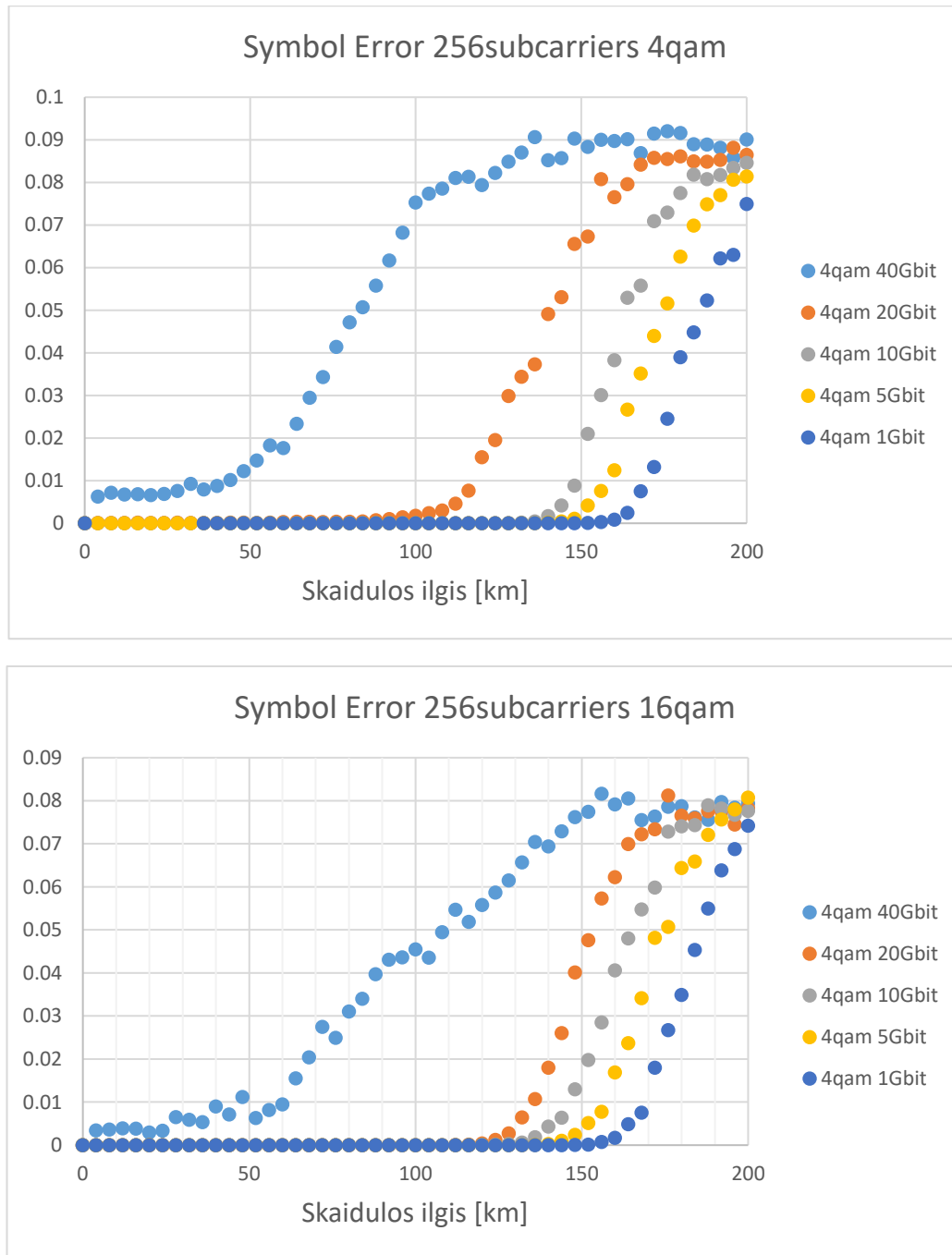


3.8 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 40Gbit/s

Esant 40 Gbit/s perdavimo spartai konsteliacijų rezultatai nebefiksuoja daugiau nei 10 km, kadangi iš visų gautų rezultatų galima spręsti, kad tokiais parametrais perdavimas negalimas.

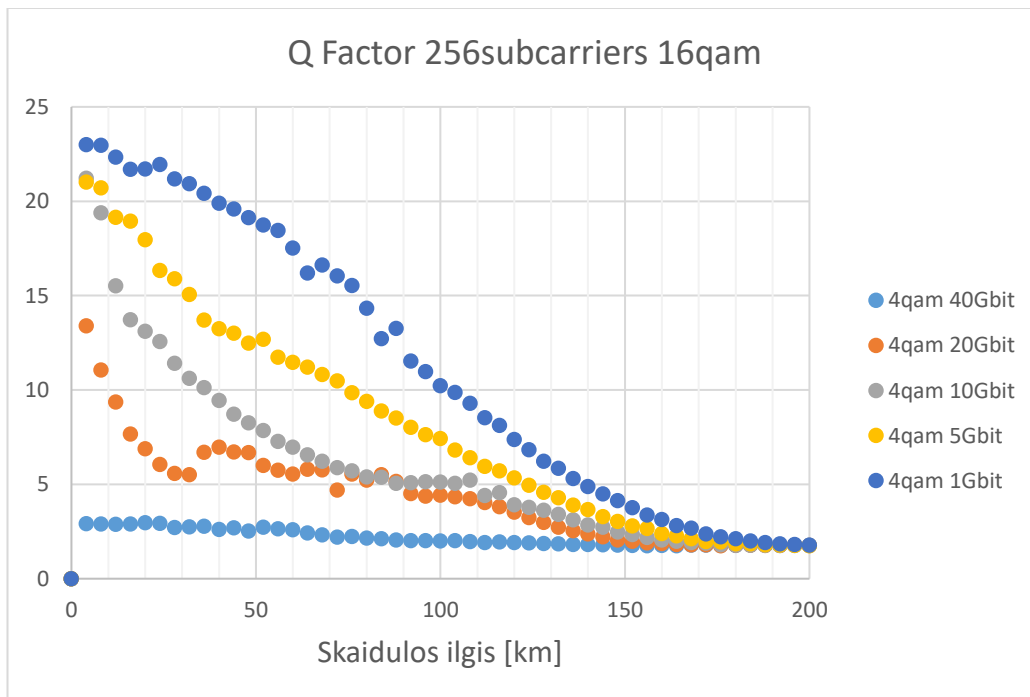
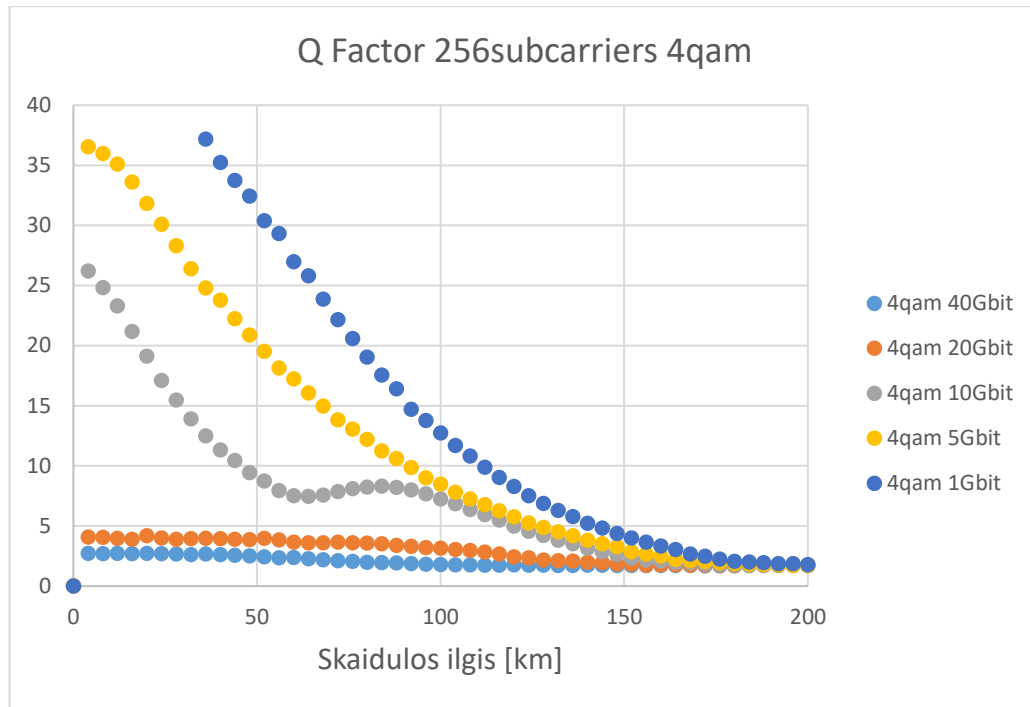
### 3.2. 256 ponešlių tyrimas

Antrą kartą matavimai atliekami nustatant modulatoriaus ir demodulatoriaus ponešlių kiekį į 256 ponešlius. 3.9, 3.10 ir 3.11 paveiksluose pateikiama kaip keičiasi perduodamo signalo kokybė naudojant skirtingas moduliacijas ir perdavinėjant skirtingas spartas.



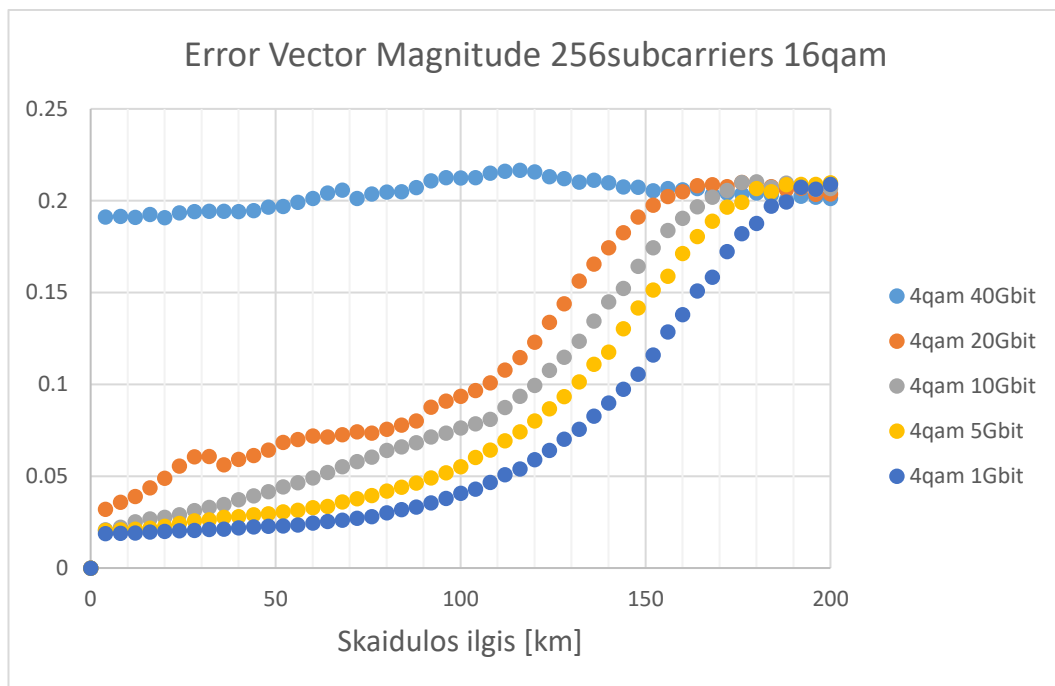
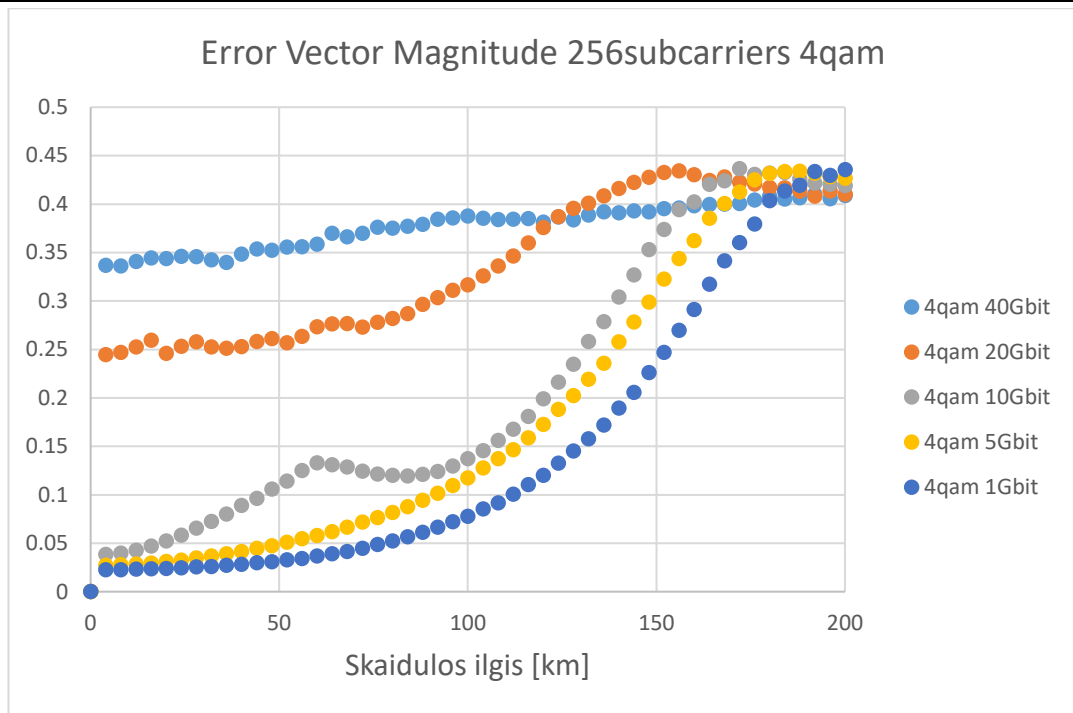
**3.9 pav.** Klaidingų simbolių rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

Matoma, kad naudojant 16QAM moduliaciją klaidingų simbolių skaičius savo pikinę reikšmę kaip ir naudojant 128 ponešlius pasiekia kur kas vėliau nei naudojant 4QAM moduliaciją, šiuo atveju atstumo skirtumas siekia 20 km.



**3.10 pav.** Kokybės faktoriaus rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

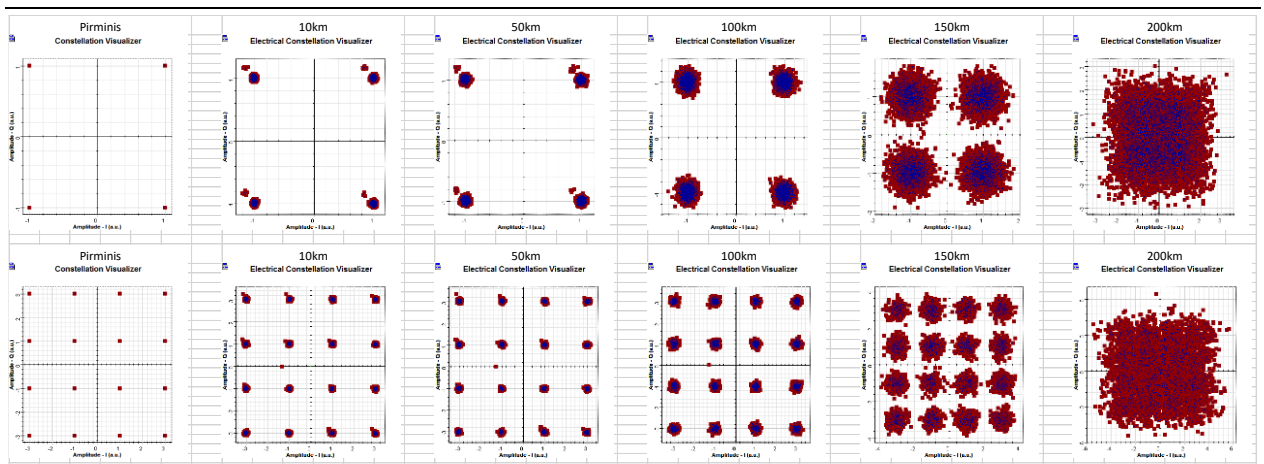
Kokybės faktorius priešingai nei naudojant 4QAM moduliaciją nebėra per žemas tinkamai naudoti. Kokybės faktoriaus parametrai naudojant 16QAM moduliaciją yra geresni bei mažiau įtakojami atstumo. Kaip ir iš klaidingų simbolių skaičiaus galima matyti, kad atstumas naudojant 16QAM moduliaciją prie 256 ponešlių padidėja ~20km, tačiau mažais atstumais, kurių dydis yra iki 50km ir naudojant iki 10Gbit perdavimo spartą 4QAM moduliacijos atveju rezultatai gaunami tolygesni ir kokybiškesni.



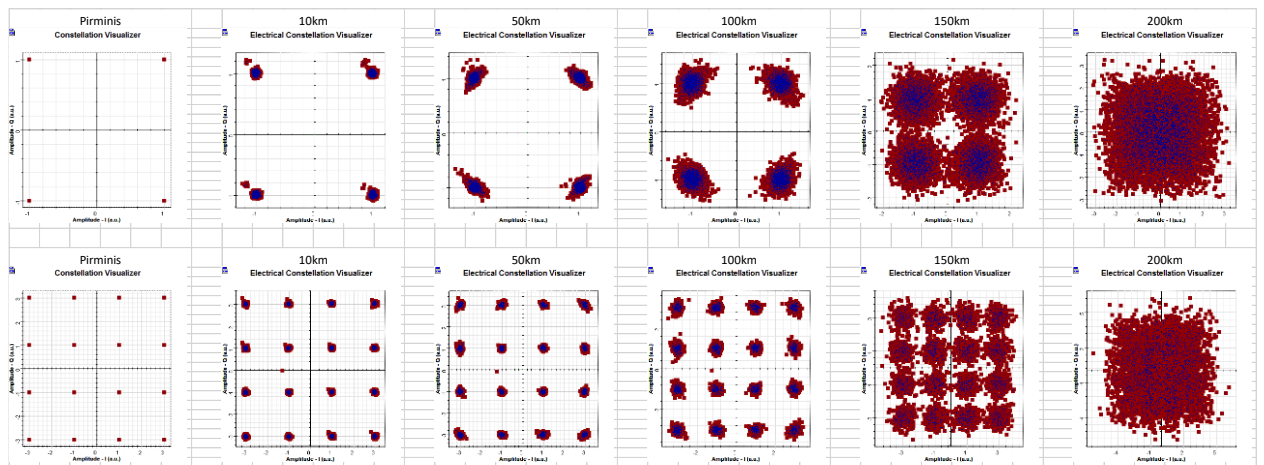
**3.11 pav.** Kokybės faktoriaus rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

Stebint klaidingų nuokrypių rezultatus galima nustatyti, kad naudojant 4QAM moduliaciją ir esant 20 ir 40 Gbit/s spartai matomas didelis nuokrypis nuo pradinių reikšmių ir tokios spartos perdavimas negalimas. Klaidingų nuokrypių rezultatus galima aiškiai matyti konsteliacijų diagramose, kurios pateikiamos prie visų skirtingų spartų fiksuojant grafikus ties 10, 50, 100, 150 ir 200 km. Atitinkamai 3.12 – 3.16 paveiksluose galima stebėti kaip keičiasi konsteliacijų grafikai keičiantis parametrams

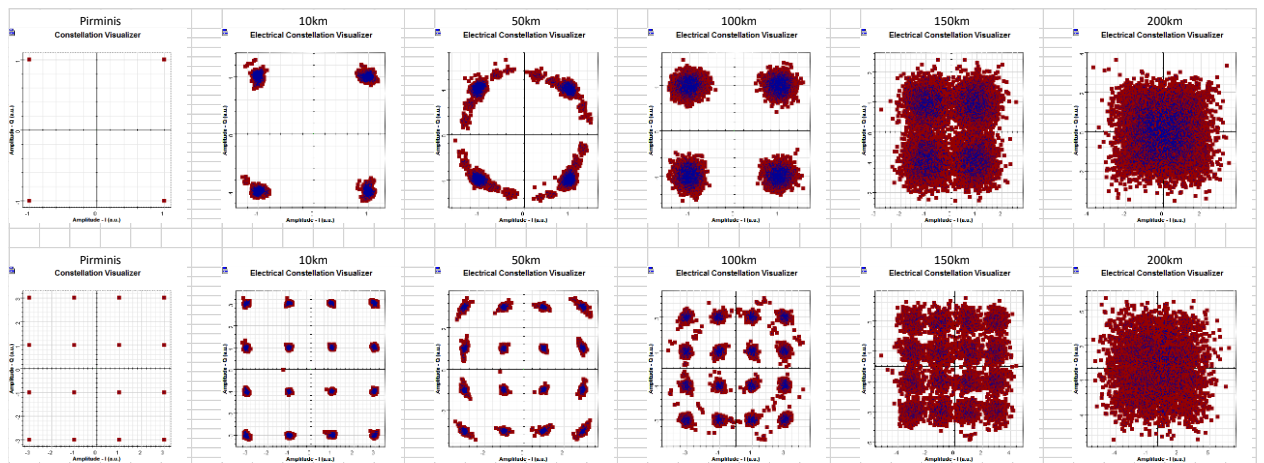




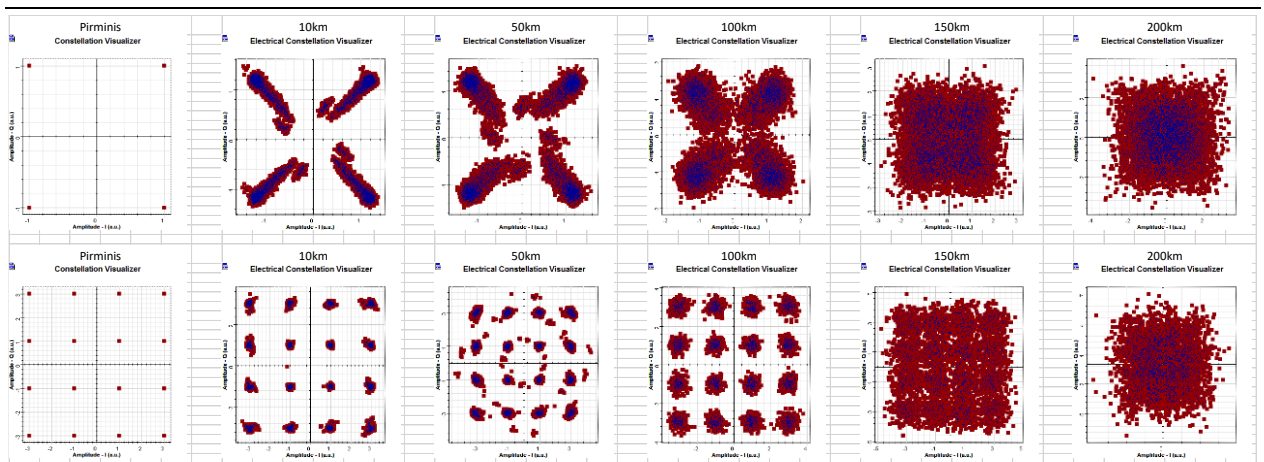
3.12 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 1Gbit/s



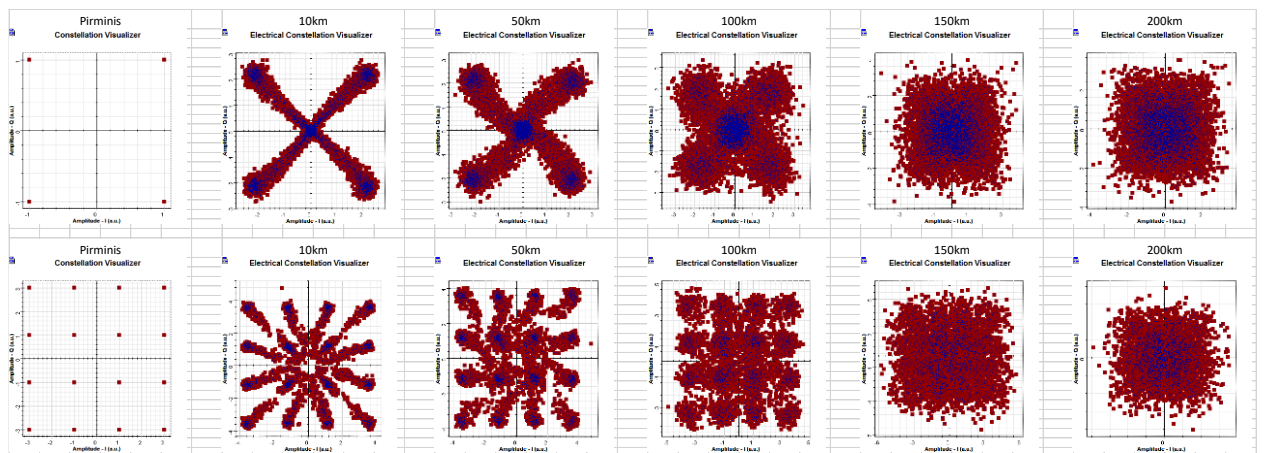
3.13 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 5Gbit/s



3.14 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 10Gbit/s



3.15 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 20Gbit/s

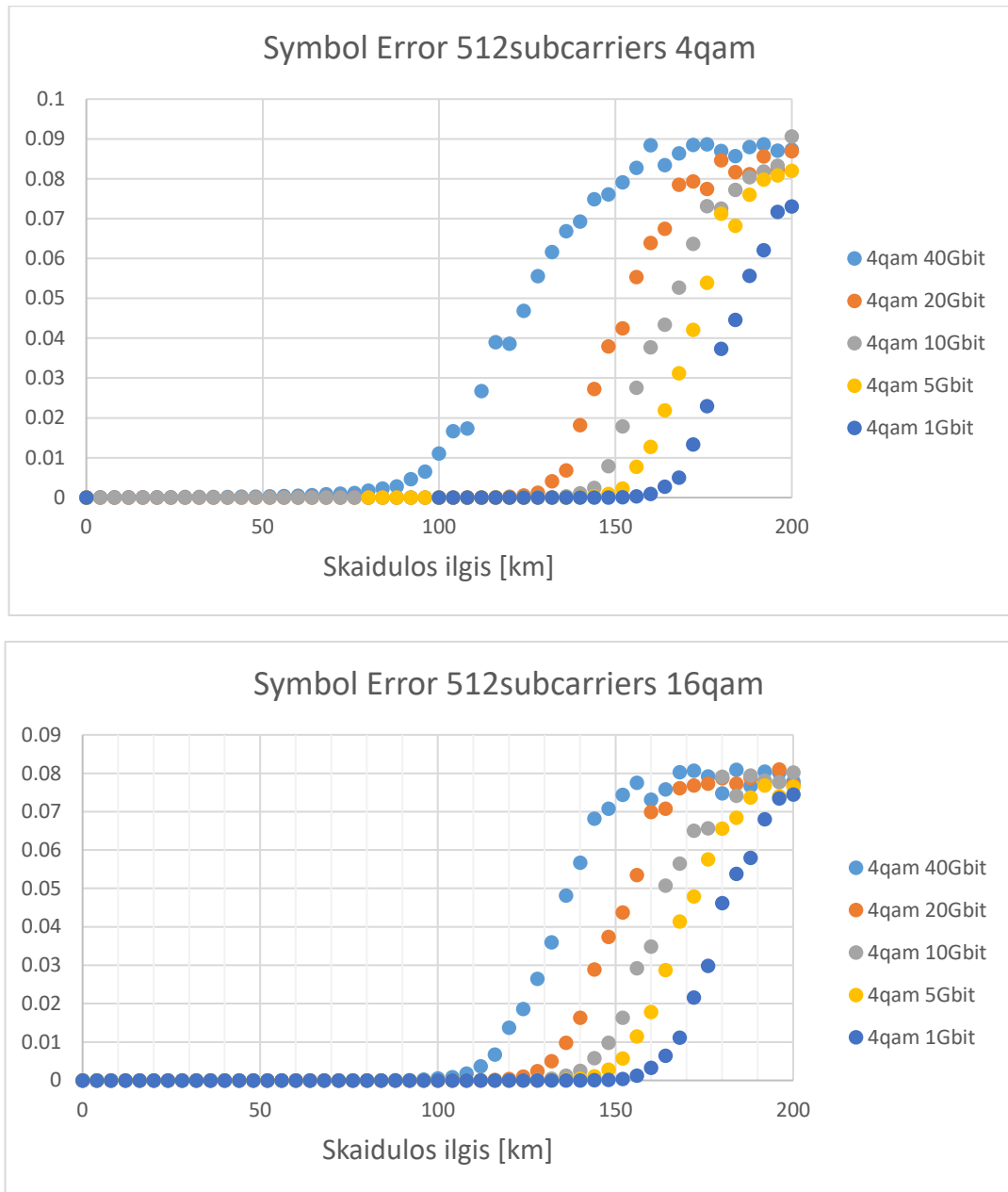


3.16 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 40Gbit/s

Lyginant su 128 ponešlių rezultatais galima teigti, kad prie visų perdavimo spartų naudojant 256 ponešlius rezultatai gaunami geresni, padidėja perdavimo atstumai bei kokybė.

### 3.3. 512 ponešlių tyrimas

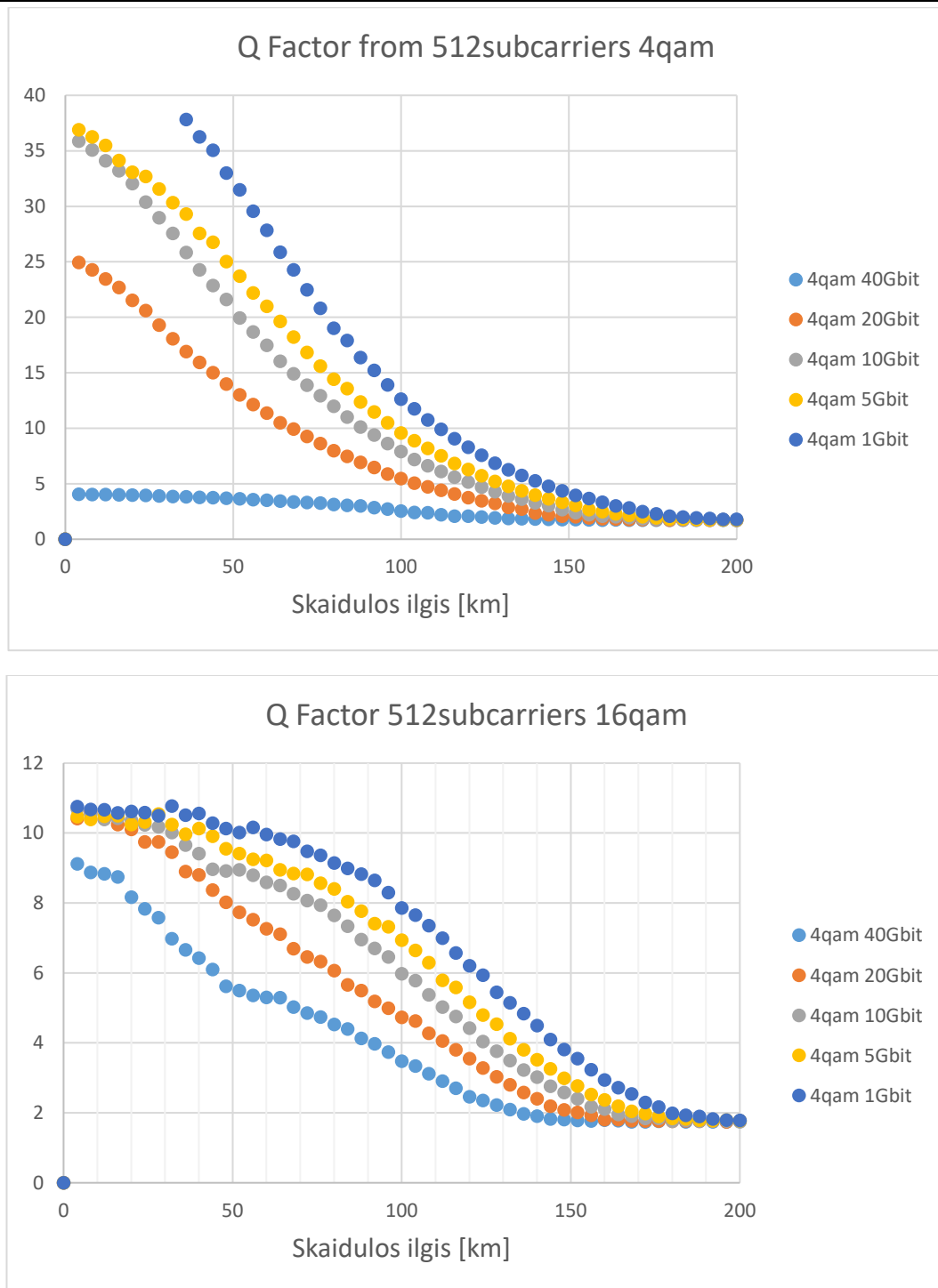
Trečią kartą matavimai atliekami nustatant modulatoriaus ir demodulatoriaus ponešlių kiekį į 512 ponešlius. 3.17, 3.18 ir 3.19 paveiksluose pateikiama kaip keičiasi perduodamo signalo kokybė naudojant skirtingas moduliacijas ir perdavinėjant skirtingas spartas.



**3.17 pav.** Klaidingų simbolių rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

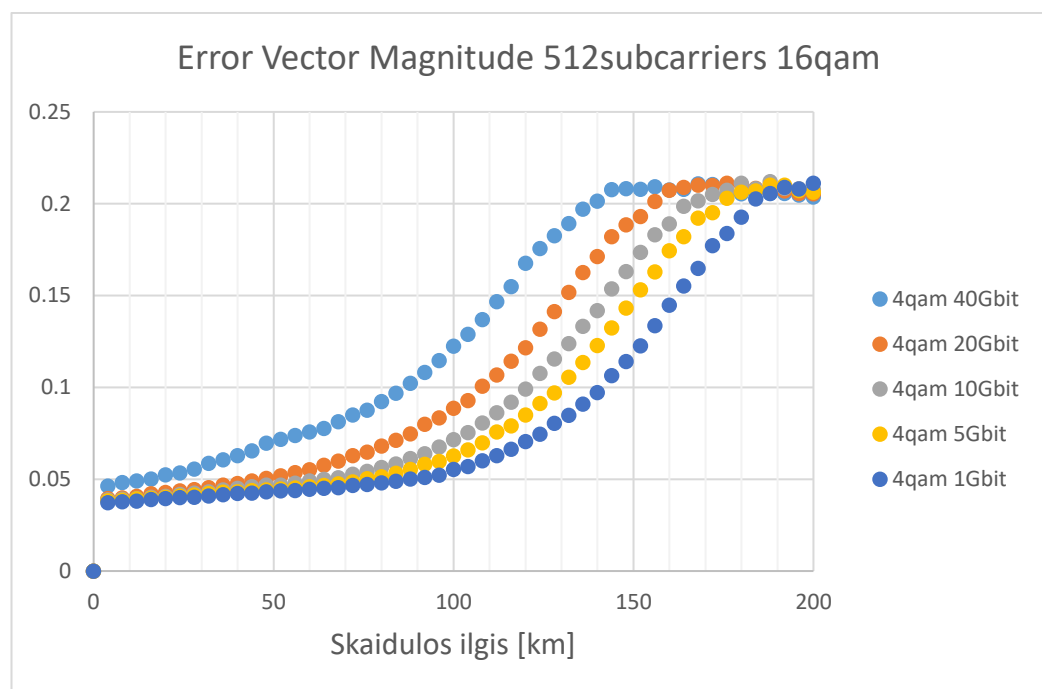
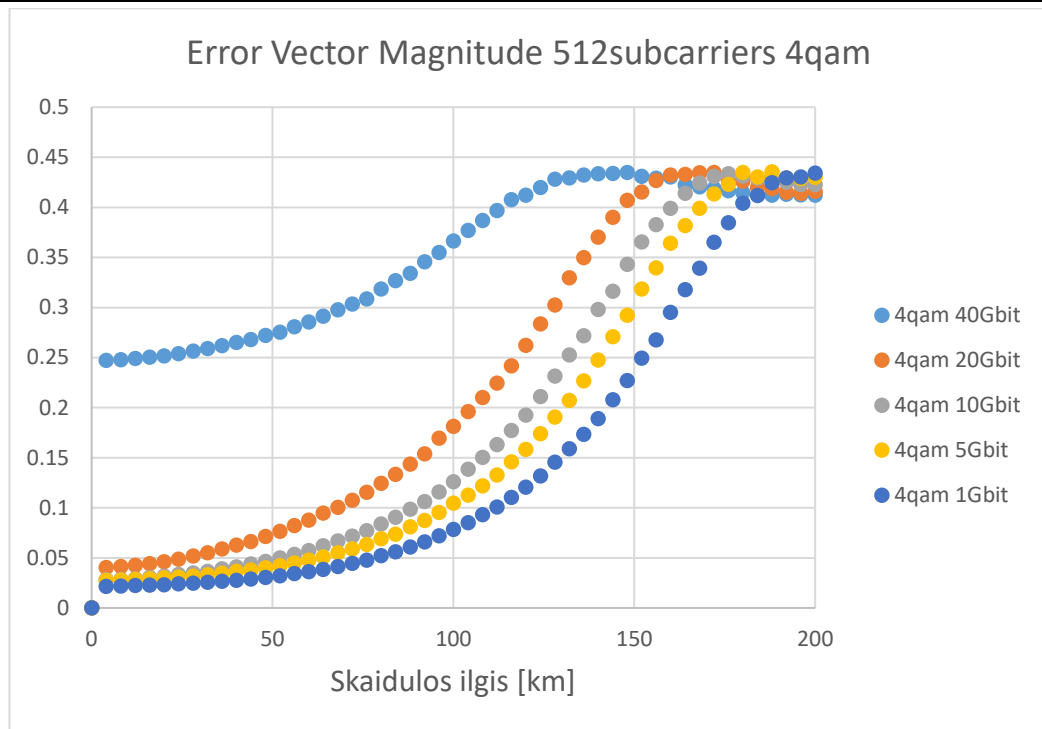
Iš gautų rezultatų galima spręsti, kad naudojant 512 ponešlių abiejų moduliacijų metu gaunami perduodamų simbolių klaidų rezultatai yra ganėtinai panašūs, tačiau atstumas nuo kurio prasideda klaidos šiek tiek didesnis nei kitais atvejais bei rezultatai tolygiau išsidėstę.

Apibendrinant rezultatus matoma, kad 16QAM moduliacija yra pranašesnė esant 128 ponešliams, tačiau kitais atvejais 4QAM moduliacija parodo geresnius rezultatus, ypač esant mažesniems nei 50km atstumams.



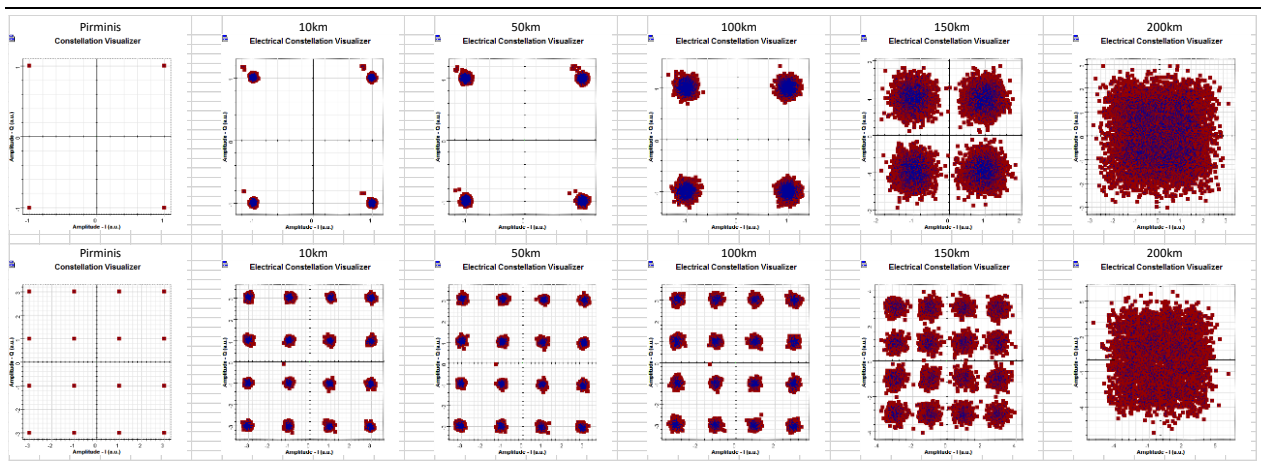
**3.18 pav.** Kokybės faktorius rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

Kokybės faktorius naudojant 16QAM moduliaciją keičiasi priešingai nei naudojant 4QAM. Nors ir esant mažiems atstumams 4QAM moduliacija gerokai lenkia 16QAM didėjant atstumui jos pokytis yra didesnis kas reiškia greitesnį kokybės kritimą. Abiem variantais maksimalus atstumas siekia iki 120km, tačiau jeigu reikia signalą perdavinėti trumpesniais atstumais geriau naudoti 4QAM moduliaciją.

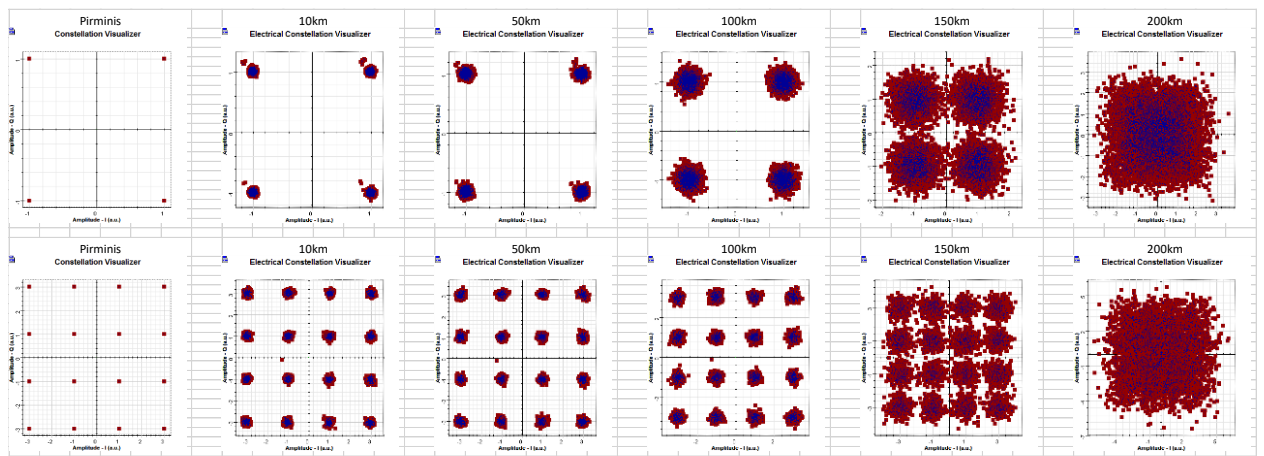


**3.19 pav.** Kokybės faktoriaus rezultatai naudojant skirtingas moduliacijas

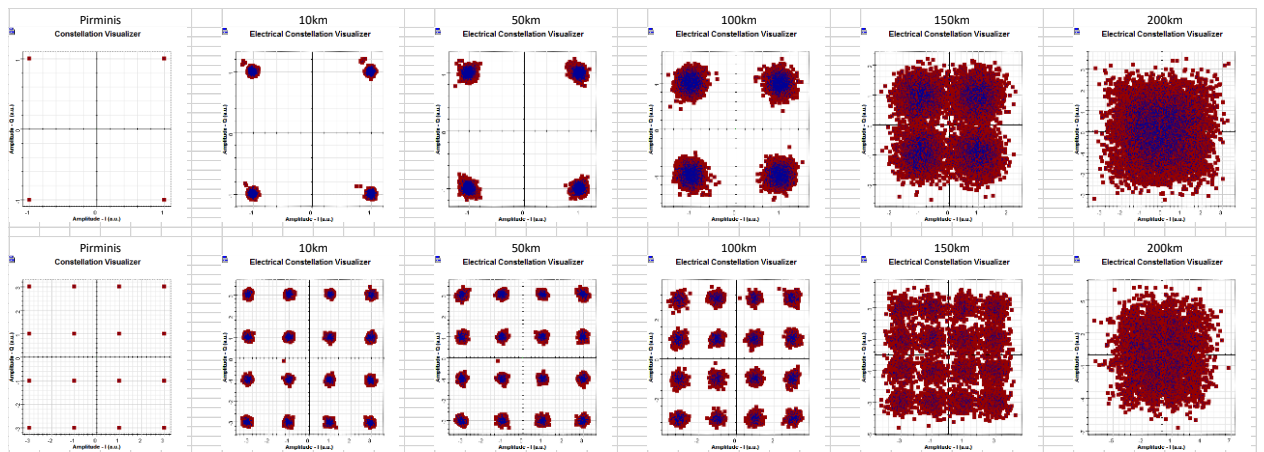
Stebint klaidingų nuokrypių rezultatus galima nustatyti, kad naudojant 4QAM moduliaciją ir esant 40 Gbit/s spartai matomas didesnis nuokrypis nuo pradinių reikšmių nei naudojant 16QAM moduliaciją. Klaidingų nuokrypių rezultatus galima aiškiai matyti konsteliacijų diagramose, kurios pateikiamos prie visų skirtingų spartų fiksuojant grafikus ties 10, 50, 100, 150 ir 200 km. Atitinkamai 3.20 – 3.24 paveiksluose galima stebėti kaip keičiasi konsteliacijų grafikai keičiantis parametrams.



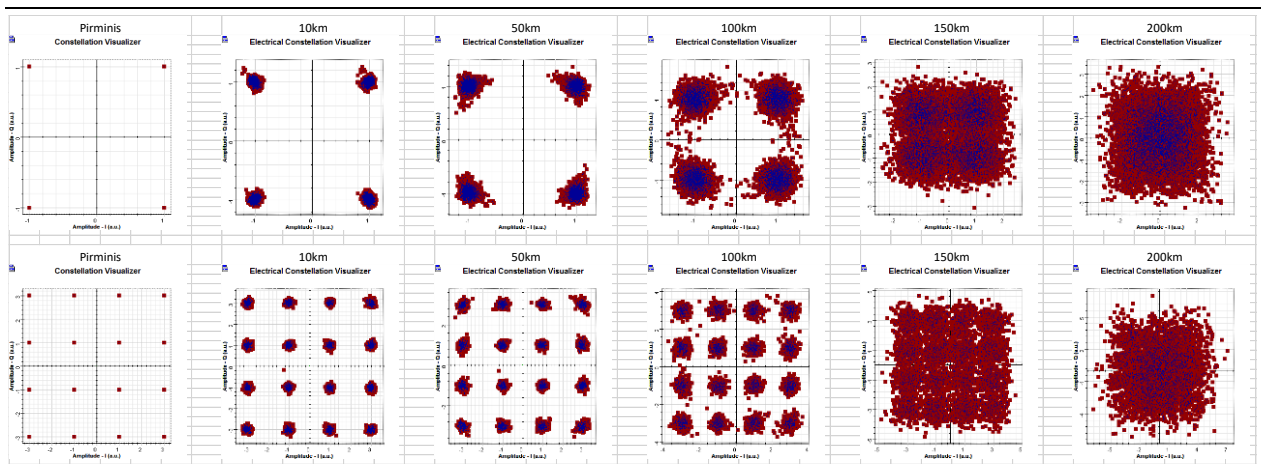
3.20 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 1Gbit/s



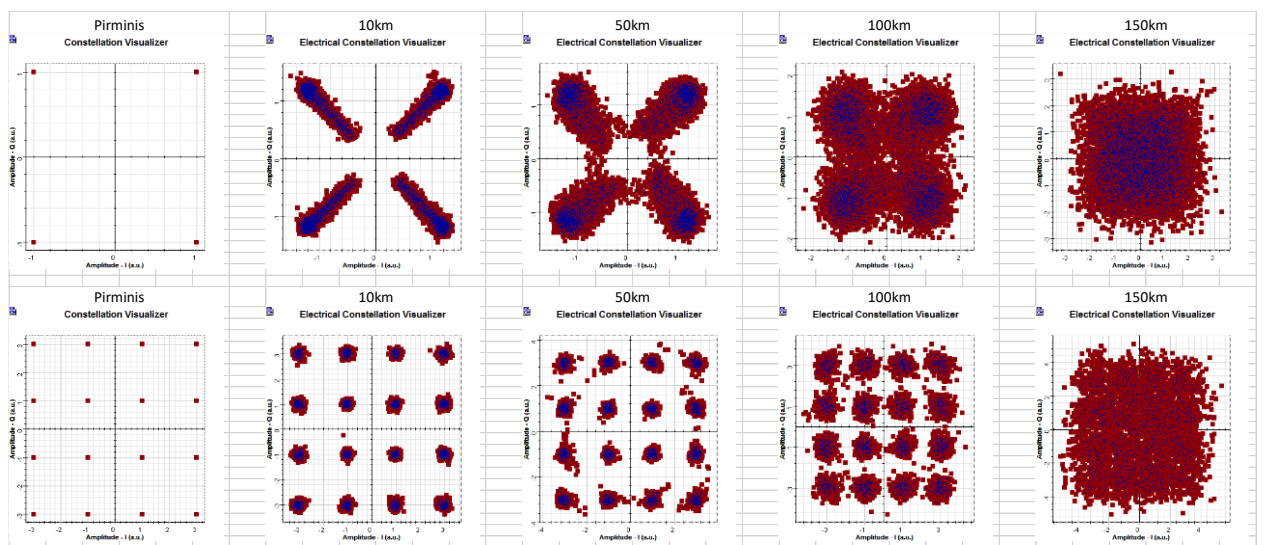
3.21 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 5Gbit/s



3.22 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 10Gbit/s



3.23 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 20Gbit/s



3.24 pav. Konsteliacijų grafikai kai perdavimo sparta 40Gbit/s

Lyginant su 128 ir 256 ponešlių rezultatais galima teigti, kad prie visų perdavimo spartų naudojant 512 ponešlius rezultatai gaunami geresni, padidėja perdavimo atstumai bei kokybė.

### 3.4. RoF taikymo galimybių įvertinimas

128 ponešlių tyrimo metu nustatyta, kad 4QAM moduliacija yra netinkama naudoti. Naudojant 16QAM moduliaciją ir esant 1Gbit/s duomenų spartai perdavimo atstumas siekia 120 km. Atitinkamai 5Gbit/s perdavimo atstumas siekia iki 76 km, 10Gbit/s perdavimo atstumas siekia iki 22 km.

256 ponešlių tyrimo metu nustatyta, kad naudojant 4QAM moduliaciją perdavinėti 1Gbit/s spartai pastarosios kokybiniai parametrai yra geresni nei naudojant 16QAM ir esant atstumams mažesniems nei 50km ši moduliacija tinkamesnė. Kokybiniai parametrai nuo 50km suvienodėja. 4QAM tinkamas atstumas siekia 128 km, o 16QAM 124 km. Esant 5Gbit/s perdavimo spartai kaip ir pirmu atveju geriau pasirodo 4QAM moduliacija. Perdavimo atstumas 4QAM atveju sumažėja

iki 112 km, o 16QAM iki 100 km. Esant 10Gbit/s spartai nebelieka ryškaus 4QAM moduliacijos pranašumo prie atstumų iki 50 km, tačiau kokybiniai parametrai stabilesni esant didesniems atstumams. 4QAM moduliacijos atveju maksimalus skaidulos atstumas siekia 104km kai 16QAM atveju pasiekiamas tik 64km atstumas. Esant 20 Gbit/s perdavimo spartai 4QAM moduliacija netinkama, o 16QAM moduliacijos atveju pasiekiamas 16km atstumas. 40 Gbit/s perdavimui naudojant 256 ponešlius netinkama nei viena iš tyrinėtų moduliacijų.

512 ponešlių tyrimo metu nustatyta, kad kaip ir 256 ponešlių atveju 4QAM moduliacija 1Gbit/s perdavimui yra labiau tinkama, jos perdavimo atstumas siekia 128 km kai tuo tarpu 16QAM moduliacijos atveju pasiekiamas 112 km. Panašūs rezultatai gaunami ir perdavinėjant 5Gbit/s spartą, 4QAM pasiekiamas atstumas 112 km, o 16QAM 96 km. Perdavinėjant 10 Gbit/s spartą 4QAM moduliacija siekia iki 100km, 16QAM 88km. Esant 20Gbit/s spartai ir naudojant 512 ponešlių jau tinkama ir 4QAM moduliacija, kuria galima perdavinėti duomenis iki 80 km, o 16QAM atveju iki 64 km. 16QAM moduliacijos pranašumas pasirodo prie 40 Gbit/s perdavimo spartos, kadangi kaip ir 256 ponešlių atveju 4QAM moduliacija yra netinkama perduoti tokiai spartai, o 16QAM metu galime pasiekti 36 km atstumą.

3.25 paveiksle pateikiama RAIN tinklo infrastruktūra su optinių skaidulų išdėstymu.



3.25 pav. RAIN tinklo infrastruktūra



Atsižvelgiant į gautus rezultatus galima teigti, kad optimalus atstumas perdavinėjant 10 Gbit/s spartą siekia 110km kas atsižvelgiant į 3.25 paveiksle pateiktą žemėlapi leidžia teigti, jog turint bazinę stotį savivaldybių centrinėse vietovėse galima šią spartą užtikrinti savivaldybių ribose ir plačiau priklausomai nuo savivaldybės dydžio. Naudojant 512 ponešlių pačiuose miestuose galima užtikrinti ir 20 bei 40 Gbit/s perdavimo spartą.

## IŠVADOS

1. Atlikus RoF technologijų analizę ir signalo perdavimo kokybės rodiklių apžvalgą, nustatyta, kad technologiją galima pritaikyti šalies optinio tinklo infrastruktūrai.
2. Sudarytas signalo perdavimo per RoF sistemas tiriamasis modelis naudojant optisystem programinę įrangą, testams automatizuoti parašytas kodas leidžiantis gauti rezultatus rezultatus ties nustatytais parametrais.
3. Atliktas RoF signalo kokybės priklausomybių įvertinimas ir nustatyta, kad 4QAM moduliacija esant mažesniems atstumams yra pranašesnė, nuo 55 km kokybiniai parametrai supanašėja su 16QAM, tačiau kai naudojama 128 ponešliai 4QAM moduliacija netinkama. Taip pat esant 40 Gbit/s perdavimo spartai reikalinga naudoti 16QAM moduliaciją bei atstumai neturi būti didesni nei 16 ir 36 km atitinkamai kai naudojama 256 ir 512 ponešlių.
4. Taikant RoF technologiją ir naudojantis šalyje esančia RAIN optinio tinklo infrastruktūra galima padengti visą šalies plotą naudojant bazines stotis esančias savivaldybių centruose.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Anthony Ng'oma. Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems <http://alexandria.tue.nl/extra2/200512106.pdf> (tekstas verstas autoriaus)
2. BRAC University, Dhaka, Bangladesh. Radio over fiber transmission by sub carrier multiplexing <http://dSPACE.bracu.ac.bd:8080/xmlui/bitstream/handle/10361/697/RADIO%20OVER%20FIBER%20TRANSMISSION.pdf;sequence=1> (tekstas verstas autoriaus)
3. Ferdian Yunazar. Modeling and performance analysis of the OFDM scheme for radio over fiber system. <http://eprints.utm.my/12536/1/FerdianYunazarMFKE2009.pdf> (tekstas verstas autoriaus)
4. Kamilo Feher. Equivalence of low-pass and bandpass channel models. <http://www.globalspec.com/reference/58642/203279/4-2-equivalence-of-low-pass-and-bandpass-channel-models> (tekstas verstas autoriaus)
5. I/Q modulation [http://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/IQ\\_Modulation.htm?&cc=LT&lc=eng](http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/IQ_Modulation.htm?&cc=LT&lc=eng) (tekstas verstas autoriaus)
6. I/Q Modulation 2 [http://muhendislik.istanbul.edu.tr/elektrikelektronik/wp-content/uploads/2013/12/iletisim\\_qpsk\\_qam.pdf](http://muhendislik.istanbul.edu.tr/elektrikelektronik/wp-content/uploads/2013/12/iletisim_qpsk_qam.pdf) (tekstas verstas autoriaus)
7. H.S. Al-Raweshidy. Digital Radio over Fibre for Future Broadband Wireless Access Network Solution <https://core.ac.uk/download/pdf/337967.pdf> (tekstas verstas autoriaus)
8. ITU-T Series G telecommunications standartization sector of Supplement 55 [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup55-201507-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup55-201507-I!!PDF-E&type=items) (tekstas verstas autoriaus)
9. Christophe Peucheret. Direct and External Modulation of Light [http://web-files.ait.dtu.dk/cpeu/download/34129\\_E2009\\_CPEU\\_DML\\_EML.pdf](http://web-files.ait.dtu.dk/cpeu/download/34129_E2009_CPEU_DML_EML.pdf) (tekstas verstas autoriaus)
10. Stavros Iezekiel. Electrical-to-optical conversion: modulators [http://www.ece.ucy.ac.cy/courses/ece645/docs/08\\_modulators\\_2015.pdf](http://www.ece.ucy.ac.cy/courses/ece645/docs/08_modulators_2015.pdf)
11. J.H Franz. Incoherent detection <https://goo.gl/nOUgTw> (tekstas verstas autoriaus)
12. Dany-Sebastien Ly-Gagnon. Coherent detection <https://www.ece.jhu.edu/~cooper/SPOT/Reference/SPE/Coherent%20Detection%20of%20Optical%20Quadrature%20psk.pdf> (tekstas verstas autoriaus)
13. Yuanyuan Zhang. Subcarrier multiplexing <https://pdfs.semanticscholar.org/9b3c/f513a9a770aaf8075f3f2256842829b7f0f0.pdf> (tekstas verstas autoriaus)

14. Multilevel modulation 1

[http://www.cs.man.ac.uk/~barry/mydocs/CS3282/Notes/DC06\\_9.pdf](http://www.cs.man.ac.uk/~barry/mydocs/CS3282/Notes/DC06_9.pdf) (tekstas verstas autoriaus)

15. University of Manchester. School of Computer Science Multilevel modulation 2

[http://www.inue.uni-stuttgart.de/forschung/veroeffentlichungen/pub\\_2006/ohm\\_dissertation.pdf](http://www.inue.uni-stuttgart.de/forschung/veroeffentlichungen/pub_2006/ohm_dissertation.pdf)  
(tekstas verstas autoriaus)

16. Al Fiad. Digital signal processing <https://pure.tue.nl/ws/files/3314285/712656.pdf> (tekstas verstas autoriaus)

17. Network models <http://www.radio->

[electronics.com/info/cellulartelecomms/cellular\\_concepts/mobile-basics-concepts.php](http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/cellular_concepts/mobile-basics-concepts.php) (tekstas verstas autoriaus)