



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
PROGRAMŲ SISTEMŲ INŽINERIJA

EDVINAS STUNŽĖNAS

BEVIELIO MARŠRUTIZATORIAUS SIŪSTUVO EVM
CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Magistro baigiamasis darbas

Vadovas
prof. dr. R. Damaševičius

KAUNAS, 2014



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
INFORMATIKOS FAKULTETAS
PROGRAMŲ SISTEMŲ INŽINERIJA

EDVINAS STUNŽĖNAS

BEVIELIO MARŠRUTIZATORIAUS SIŪSTUVO EVM CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Magistro baigiamasis darbas

Vadovas
prof. dr. R. Damaševičius

(data, parašas)

Recenzentas
doc. dr. A. Liutkevičius

(data, parašas)

Studentas
E. Stunžėnas

(data, parašas)

AUTENTIŠKUMO PATVIRTINIMAS

Rašant šį darbą:

- Dokumento medžiaga nėra plagijuojama bei nepažeidžia trečiųjų asmenų autorių teisių.
- Visa naudojama ir cituojama kitų autorių darbų informacija deklaruota, pateikiant nuorodas į literatūros sąrašą.
- Literatūros sąraše yra pateikiami šaltiniai, kurie buvo naudoti analizės metu ir cituoti darbo tekste.

SANTRAUKA

Pasaulyje vis populiarėja bevieliai tinklai. Kiekvienais metais atsiranda daugybė naujų produktų teikiančių šias paslaugas. Taip pat kuriami nauji duomenų perdavimo standartai leisiantys dar efektyviau išnaudoti radijo eterį, padidinsiantys duomenų perdavimo greitį ir saugumą.

Didėjant perdavimo greičiams, duomenys, perduodami bevieliu ryšiu, tampa jautresni aplinkos poveikiui, todėl didėja tikimybė, kad jie bus iškraipyti dėl signalų interferencijos arba nesklaidumų išsiuntimo metu. Interferencijos poveikį galima sumažinti vengiant dažnių, kuriuose yra didelis eterio užimtumas. Tuo tarpu nesklaidumai išsiuntimo metu atsiranda dėl varijuojančios techninės įrangos kokybės. Šio klaidų šaltinio poveikis sumažinamas atliekant radijo siųstuvo galios derinimą. Tokiu būdu siunčiami signalai tiksliau užkoduojami, o priimti signalai sėkmingai iškoduojami net jei signalas yra paveikiamas aplinkos poveikio.

Pasaulyje egzistuoja daug skirtingų metodų leidžiančių išmatuoti ir įvertinti skaitmeninio signalo kokybę. Taikant šiuos skaitmeninio signalo kokybės vertinimo metodus, atliekamas siųstuvo galios derinimas. Bevelio perdavimo standartas IEEE 802.11n nustato griežtus reikalavimus siunčiamų signalų kokybei, tačiau siųstuvo derinimo metodas nėra standartizuotas. Kadangi radijo siųstuvo derinimas yra nuo techninės įrangos priklausantis dalykas, todėl dažnas lustinių valdiklių gamintojas turi savo kuriamų produktų derinimo procedūras.

Įmonė UAB „Wilibox“, kuri yra projekto užsakovė, užsiima bevelių maršrutizatorių gamyba. Kuriant naujus produktus, naudojami skirtingų gamintojų lustinių sistemų valdikliai, todėl reikalingos kelios derinimo sistemos. Taigi, siekiant suvienodinti derinimo procedūras ir duodamus rezultatus, kuriama derinimo sistema, pritaikyta šioje įmonėje gaminamų bevelių maršrutizatorių siųstuvų derinimui. Sistemoje realizuojami baigiamojo darbo metu pasiūlyti EVM matavimo ir siųstuvo derinimo metodai. Šie metodai atlieka pagrindinį vaidmenį derinimo procese, o jų duodami rezultatai įtakoja visą matavimo proceso eigą. Siekiant užtikrinti šių metodų teisingą veikimą daromas tyrimas metodų duodamų rezultatų patikimumui ir teisingumui įvertinti.

SUMMARY

Wireless networks in world becoming more and more popular. Every year dozens of new products providing wireless access are being released. In addition to new products also new data transfer standards are created in order to exploit full radio bandwidth capabilities and improve transmission performance and security.

While data transmission speed increases, radio signals become more sensitive to environmental distortions, thus increases probability that the data will be damaged due to signal interference or transmit disruption. The impact of interference can be reduced by avoiding highly occupied frequencies. Meanwhile, transmit disruptions are the different source of signal error that arises from variable hardware quality. In order to reduce the impact of this source of error device transmitter calibration is applied. After calibration, digital signals are modulated more accurately in transmitting side and successfully received demodulated on receiving side even if signals were affected by environment factors.

There are many methods of measuring and evaluating digital signal quality in the world. These digital signal measures are applied while transmitter power calibration is performed. Wireless standard IEEE 802.11n specifies strict requirements for transmitting digital signal quality, however calibration procedure is not standardized. Since radio transmitter calibration is hardware dependent operation, most of system on the chip manufacturers have their own product calibration procedures and implementations.

Company, Wilibox engaged in the production of wireless routers. Wireless routers that are being developed in the company uses system on the chips of different manufacturers. This impose using multiple calibration systems for each system on chip. Therefore to unify calibration procedures and calibration results new transmitter calibration system is being created to suffice companies internal requirements. Implemented system uses my own suggested EVM measuring and transmitter calibration methods. These methods performs key measure functions and therefore those methods results affects whole calibration process. In order to ensure those methods correct operability the research is being done to evaluate validity and reliability of suggested methods results.

TURINYS

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Terminų ir santrumpų žodynas	11
1. Įvadas	13
1.1. Dokumento paskirtis	13
1.2. Darbo tikslas	13
1.3. Mokslinis naujumas	13
1.4. Uždaviniai	13
2. Bevielio maršrutizatoriaus EVM matavimų analizė	14
2.1. Skaitmeninės moduliacijos apžvalga	14
2.1.1. Skaitmeninė OFDM moduliacija	14
2.1.2. Fazės pasikeitimo prisitaikančios moduliacijos	14
2.1.3. Kvadratūros amplitudės prisitaikančios moduliacijos	15
2.1.4. Moduliacijų kodavimo ir iškodavimo klaidos	16
2.2. Susijusių darbų apžvalga.....	17
2.2.1. Skaitmeninio signalo EVM matavimai	17
2.2.2. Matavimo klaidų šalinimas	18
2.2.3. Siųstuvo galios ir EVM derinimas	18
2.3. Egzistuojančios sistemos.....	18
2.3.1. ATed.....	18
2.3.2. ART.....	19
2.4. Analizės išvados.....	19
2.5. Siūlomi matavimo metodai	19
2.5.1. Imtuvo signalo paieška.....	20
2.5.2. Imtuvo signalo stiprumo rėžių derinimas.....	20
2.5.3. EVM rinkimo ir matavimo strategijos	20
2.5.4. Siųstuvo derinimo procedūra	21
3. Bevielio maršrutizatoriaus RF derinimo PĮ projektas.....	23
3.1. Sistemos aprašymas	23
3.1.1. Sistemos adresatas.....	23
3.1.2. Sistemos paskirtis.....	23
3.1.3. Sistemos vartotojai	23
3.2. Funkciniai reikalavimai.....	23
3.3. Nefunkciniai reikalavimai.....	24
3.3.1. Reikalavimai sistemos išvaizdai	24
3.3.2. Reikalavimai panaudojamumui.....	24
3.3.3. Reikalavimai vykdymo charakteristikoms.....	24

3.3.4. Reikalavimai veikimo sąlygoms	24
3.3.5. Reikalavimai sistemos priežiūrai	24
3.3.6. Reikalavimai saugumui.....	24
3.4. Įgyvendinimo planai	25
3.5. Sistemos apribojimai.....	25
3.6. Naudojami programiniai paketai.....	25
3.7. Panaudojimo atvejų diagrama	26
3.8. Architektūrinis modelis.....	26
3.8.1. Sistemos išdėstymo vaizdas	27
3.8.2. Sistemos skirstymas į paketus.....	27
3.8.3. Paketas „connection“	29
3.8.4. Paketas „tools“	30
3.8.5. Paketas „device“	31
3.8.6. Paketas „litepoint“.....	32
3.8.7. Paketas „rf“	33
3.8.8. Paketas „configuration“	35
3.8.9. Paketas „interprocess“.....	36
3.8.10. Paketas „emulation“	36
3.8.11. Paketas „gui“	37
3.8.12. Modulis „io“.....	38
3.9. Matavimo metodai	39
3.9.1. Vienetinis matavimas.....	40
3.9.2. Gero signalo matavimas.....	41
3.9.3. Imtuvo režijų derinimas	41
3.9.4. EVM matavimo strategijos	42
3.9.5. Siųstuvo galios derinimo algoritmas.....	44
4. Bevielio maršrutizatoriaus EVM matavimų tyrimai.....	45
4.1. RF signalų EVM matavimai	45
4.2. RF siųstuvo galios derinimas	45
5. Bevielio maršrutizatoriaus EVM matavimų eksperimentai	46
5.1. Matavimų taikant EVM strategijas eksperimentai.....	46
5.1.1. Eksperimento eiga.....	46
5.1.2. Eksperimento rezultatai.....	46
5.2. Siųstuvo galios derinimo eksperimentai	50
5.2.1. Eksperimento eiga.....	50
5.2.2. Eksperimento rezultatai.....	51
6. Išvados	55
7. Literatūra.....	57
8. Priedai	58

8.1. priedas. EVM strategijų patikimumo rezultatai	58
8.2. EVM strategijų stabilumo rezultatai	60
8.3. Siųstuvo derinimo algoritmų rezultatai	62
Bevielio maršrutizatoriaus RF charakteristikų tyrimas.....	65

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.2-1 lentelė. Leistini EVM iškraipymai prie nustatytų moduliacijų ir kodavimo lygių, MCS susiejimas su moduliacija ir kodavimo lygiu. [10]	17
5.1-1 lentelė. Pasiūlytų EVM matavimo strategijų patikimumo charakteristikos.....	48
5.1-2 lentelė. Pasiūlytų EVM matavimo strategijų spartos charakteristikos.....	49
5.2-1 lentelė. Abiejų (pylab ir ART) sistemų duodamų rezultatų metrikų charakteristikų koreliacijos.....	52
5.2-2 lentelė. Abiejų (pylab ir ART) sistemų derinimo trukmės duomenys	53
8.1-1 lentelė. Pasiūlytų EVM strategijų patikimumo matavime naudoti radijo parametrai	58
8.1-2 lentelė. Pasiūlytų EVM strategijų patikimumo matavimų rezultatai	58
8.2-1 lentelė. Pasiūlytos „Single“ strategijos duoti EVM matavimo rezultatai	60
8.2-2 lentelė. „First-good“ strategijos duoti EVM matavimo rezultatai	61
8.2-3 lentelė. Pasiūlytos „Averaged“ strategijos duoti EVM matavimo rezultatai	61
8.3-1 lentelė. Derinimo metu naudoti radijo parametrai	62
8.3-2 lentelė. Pasiūlyto siūstovo derinimo algoritmo derinimo rezultatai.....	63
8.3-3 lentelė. Lustinių sistemų gamintojo ART sistemos derinimo algoritmo rezultatai.....	64

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1-1 pav. BPSK koduoto signalo fazės pasikeitimai [11].....	15
2.1-2 pav. BPSK ir QPSK moduliacijų žvaigždyno diagramos [1]	15
2.1-3 pav. 16-QAM ir 64-QAM moduliacijų žvaigždyno diagramos [12]	16
2.1-4 pav. Klaidos vektorius ir jo komponentės [2][4].	16
3.9-1 pav. Vienetinio matavimo veiklos diagrama.....	40
3.9-2 pav. Gero signalo išmatavimo veiklos diagrama.	41
3.9-3 pav. Imtuvo režijų derinimas tinkamo signalo paieškai veiklos diagrama.....	41
3.9-4 pav. Imtuvo režijų derinimas tinkamai signalo galiai veiklos diagrama.....	42
3.9-5 pav. EVM paieškai taikomos „vienetinės“ strategijos veiklos diagrama.....	42
3.9-6 pav. EVM paieškai taikomos „pirmas-geras“ strategijos veiklos diagrama.	43
3.9-7 pav. EVM paieškai taikomos „vidurkio“ strategijos veiklos diagrama.	43
3.9-8 pav. Bevelio maršrutizatoriaus siųstuvo derinimo veiklos diagrama.	44
5.1-1 pav. „Single“ strategijos matavimų rezultatų EVM pasiskirstymas.	47
5.1-2 pav. „First-good“ strategijos matavimo rezultatų EVM pasiskirstymas.	47
5.1-3 pav. „Averaged“ strategijos matavimo rezultatų EVM pasiskirstymas.	47
5.1-4 pav. EVM matavimo rezultatų matuojant skirtingomis strategijas skirstinys.....	48
5.1-5 pav. „Single“ matavimo strategijos duodamų rezultatų charakteristikos.....	48
5.1-6 pav. „First-good“ matavimo strategijos duodamų rezultatų charakteristikos.	49
5.1-7 pav. „Averaged“ matavimo strategijos duodamų rezultatų charakteristikos.	49
5.1-8 pav. Vieno, strategijos atliekamo, matavimo trukmė ir matavimo dedamosios. Bendra trukmė yra atliktų analizių ir rezultatų apdorojimo suma.	50
5.2-1 pav. Abejų (pylab ir ART) algoritmų RMS charakteristikų palyginimas.	51
5.2-2 pav. Abejų (pylab ir ART) algoritmų EVM charakteristikų palyginimas.....	52
5.2-3 pav. Abejų (pylab ir ART) algoritmų stiprinimo koeficiento charakteristikų palyginimas.	52
5.2-4 pav. Normalizuotų RMS galios charakteristikų palyginimas. Derinimo sistemos atitinka „pylab“ ir „ART“ kreives. Atskaitos kreivė parodo kokia galia buvo tikėtasi gauti derinimo metu. ...	53
5.2-5 pav. Normalizuotų EVM charakteristikų palyginimas. Derinimo sistemos atitinka „pylab“ ir „ART“ kreives. Atskaitos kreivė parodo maksimalią EVM ribą, už kurios EVM tampa neleistinas.	54
5.2-6 pav. Derinimo algoritmų rezultatų santykiniai nukrypimai nuo tikėtinų reikšmių.	54

TERMINŲ IR SANTRUMPŲ ŽODYNAS

- 4-QAM – kvadratūros ir amplitudės pasikeitimo moduliacija naudojanti 4 simbolio iškodavimo pozicijas.
- 16-QAM – kvadratūros ir amplitudės pasikeitimo moduliacija naudojanti 16 simbolio iškodavimo pozicijų.
- 64-QAM – kvadratūros ir amplitudės pasikeitimo moduliacija naudojanti 64 simbolio iškodavimo pozicijas.
- Adaptyvi moduliacija – tai moduliacijos tipas, kai iškoduojamo signalo reikšmė priklauso nuo taško, kurioje jis yra (fazės ir amplitudės pokyčio). Yra daug adaptyvių moduliacijų variacijų, todėl kiekviena jų koduoja informaciją skirtingai.
- Aplinkos triukšmas – bet kokia aplinkos spinduliuotė, šiluminė, radijo, šviesos ir kt.
- Apsaugos intervalas (GI) – intervalas tarp siunčiamų OFDM simbolių (angl. guard interval).
- ART – lustinių sistemų gamintojo „atheros“ maršrutizatorių RF valdymo sistema (angl. atheros radio test).
- ATAS – įmonėje naudojamas specializuotas maršrutizatorių valdymo protokolas.
- ATE – aplinka, kurioje atliekami veiksmai su išanalizuotu skaitmeniniu signalu (angl. automated test environment).
- BPSK – fazės pasikeitimo moduliacija signalo iškodavimui naudojanti 2 signalo iškodavimo pozicijas.
- CLI – programinės įrangos komandinės eilutės sąsaja (angl. command line interface).
- Dažnio klaida – siunčiamo signalo dažnio nuokrypis spektre, įvertinamas MHz.
- dBm – vienetas skirtas įvertinti signalo stiprumui. Decibelai (dB) 1 milivato (mW) atžvilgiu.
- EVM – signalo iškraipymo laipsnis (angl. error vector magnitude).
- Fazorius – gauto IQ moduliuoto skaitmeninio signalo vektorius.
- FFT – greitoji Furjė transformacija. Naudojama skaitmeninį signalą perversti iš laiko domeno į dažnių domeną.
- GTK – plačiai naudojamas grafinės vartotojo sąsajos kūrimo įrankių rinkinys.
- IEEE 802.11n – duomenų perdavimo standartas, naudojamas informacijai perduoti bevieliu ryšiu.
- Imtuvas (Rx) – bevielio maršrutizatoriaus radijo priėmimo grandinė
- IP – interneto protokolas, kuriuo duomenys perduodami iš šaltinio adreso į nurodytą adresą skirtinguose potinkliuose.
- IQ moduliacija – į-fazės ir kvadratūros moduliacija. Šioje moduliacijoje signalas yra išskaidytas į porą nepriklausomų komponentų: I (į-fazė) ir Q (kvadratūra), kurie atvaizduojami vektorių pagalba.
- Kanalo plotis (BW) – dažnių juostos plotis naudojamas duomenims perduoti bevieliu ryšiu (angl. bandwidth).
- Litepoint iqAPI – signalų generavimo ir analizavimo įrenginio programinio valdymo biblioteka.
- Litepoint IQView – signalų generavimo ir analizavimo įrenginys.
- Maksimali (peak) galia – maksimali siųstuvo išsiųsto signalo galia.
- MCS – signalo moduliacijos kodavimo lygio indeksas. Didesnis indeksas lemia didesnę duomenų užkodavimo tankį signale (angl. modulation coding scheme).
- OFDM – skaitmeninių duomenų užkodavimo metodas keliuose signalų nešėjų dažniuose, naudojamas bevielėse plačiadažnio perdavimo komunikacijose. (angl. orthogonal frequency-division multiplexing).
- PyGTK – „GTK“ grafinės posistemės bibliotekos „Python“ kalbai
- Python – programavimo kalbos interpretatorius ir kompiliatorius.
- Proxy – tarpininkas tinkle, klausantis užklausų ir jas persiunčiantis žinomam adresatui.

- PSK – fazės pasikeitimo moduliacija. Jos metu iškoduoto signalo amplitudė nekinta, o duomenys iškoduojami atsižvelgiant tik į fazės pasikeitimus (angl. phase-shift keying).
- QAM – kvadratūros amplitudės moduliacija. Fiksuoti iškodavimo taškai, pritaikyti duomenis iškoduoti, kai keičiasi signalo amplitudė ir fazė. Ši moduliacija naudojama naujesnėse kodavimo sistemos (angl. quadrature amplitude modulation).
- QPSK -- fazės pasikeitimo moduliacija signalo iškodavimui naudojanti 4 signalo iškodavimo pozicijas.
- RF – radijo dalis, signalo siųstuvas ir imtuvas (angl. radio frequency).
- RMS galia – reali vidutinė siųstuvo išsiųsto signalo galia.
- Shell – komandinės eilutės terpė, kurioje gali būti atliekamos užduotos komandos.
- Siųstuvas (Tx) – bevielio maršrutizatoriaus radijo išsiuntimo grandinė.
- Slopinimas – signalų galios slopinimas vertinamas dBm vienetais.
- SSH – saugaus prisijungimo tinkle protokolas (angl. secure shell).
- TCP – tinklo protokolas patikimam duomenų perdavimui (angl. transport control protocol).
- TTY – terminalinės eilutės sąsaja. Komunikacija su įrenginiu vykdoma per lėtą serijinę jungtį.
- UTP – neapsaugotas nuo aplinkos poveikio pintas kabelis, naudojamas tinklinėse kompiuterių komunikacijose.
- VSA – vektorinis signalo analizatorius, prima skaitmeninius signalus, juos išanalizuoja (atlieka greitąją furjė transformaciją, iškoduoja) ir pateikia signalų charakteristikas.
- VSG – vektorinis signalo generatorius, naudojantis nurodymais suformuoja skaitmeninį signalą ir jį išsiunčia.
- Žvaigždyno diagrama – diagrama, skaitmeninių duomenų perdavime naudojama atvaizduoti IQ vektoriaus komponentėms (angl. constellation diagram).

1. ĮVADAS

1.1. Dokumento paskirtis

Dokumente pateikiamas bevielio maršrutizatoriaus siūstovo EVM (angl. Error vector magnitude) matavimo ir derinimo tyrimas. Aprašoma bevieliuose maršrutizatoriuose naudojama OFDM kodavimo schema, schemoje naudojamos moduliacijos ir kiti radijo siūstovo parametrai. Pateikiama EVM samprata bei dažniausiai naudojami matavimo metodai ir procedūros. Aprašomas siūlomas EVM derinimo metodas ir matavimo strategijos. Taip pat pateikiamas sukurtos bevielio maršrutizatoriaus siūstovo derinimo ir signalų charakteristikų matavimo sistemos projektas, kuriame realizuoti siūlomi matavimo metodai. Naudojantis realizuota sistema tiriama, kaip radijo parametrai ir naudojamos moduliacijos įtakoja EVM charakteristikas. Pateikiami signalų EVM matavimų ir siūstovo derinimo rezultatai, kurie lyginami su jau egzistuojančių įrankių surinktais matavimo rezultatais.

1.2. Darbo tikslas

Ištirti bevielio maršrutizatoriaus siūstovo EVM charakteristikų patikimumą ir teisingumą, taikant siūlomas EVM signalų matavimo strategijas ir siūstovo derinimo procedūrą. Nustatyti kokiais matavimo parametru įvertiniais naudojantis gaunama tenkinanti matavimų sparta ir pakankamas rezultatų patikimumas, naudoti ją gamybos aplinkoje.

1.3. Mokslinis naujumas

1. Pasiūlytos trys EVM matavimo strategijos, skirtos padidinti rezultatų patikimumą ir paspartinti matavimo procesą.
2. Pasiūlytas bevielio maršrutizatoriaus siūstovo derinimo procesas.
3. Suprojektuota ir sukurta bevielių maršrutizatorių derinimo sistema.
4. Atlikti pasiūlyto siūstovo derinimo metodo ir EVM matavimo strategijų tyrimai. Jų metu ištirtas duodamų rezultatų patikimumas ir teisingumas, įvertintos laikinės charakteristikos.
5. Pasiūlyto derinimo metodo rezultatai palyginti su rezultatais gautais iš alternatyvių derinimo įrankių.

1.4. Uždaviniai

1. Išanalizuoti beveliame maršrutizatoriuje naudojamus perdavimo metodus.
2. Išanalizuoti EVM matavimo ir skaičiavimo procedūras.
3. Išanalizuoti egzistuojančius EVM matavimo metodus.
4. Pristatyti ir aprašyti siūlomas EVM matavimo strategijas.
5. Pristatyti ir aprašyti bevielio maršrutizatoriaus siūstovo siūlomą derinimo procedūrą.
6. Suprojektuoti ir sukurti bevielio maršrutizatoriaus siūstovo derinimo ir kokybės vertinimo programinę įrangą.
7. Ištirti pasiūlytų EVM strategijų duodamų rezultatų patikimumą ir teisingumą, įvertinti strategijas atsižvelgiant į matavimo trukmes.
8. Atlikti siūlomo derinimo proceso eksperimentus ir įvertinti duodamų rezultatų teisingumą lyginant su rezultatais gautais iš kitų šaltinių.

2. BEVIELIO MARŠRUTIZATORIAUS EVM MATAVIMŲ ANALIZĖ

2.1. Skaitmeninės moduliacijos apžvalga

2.1.1. Skaitmeninė OFDM moduliacija

Duomenys bevieliuose maršrutizatoriuose perduodami naudojantis plačiajuosčio perdavimo schema OFDM (angl. orthogonal frequency-division multiplexing). Ši schema aprašo duomenų užkodavimo ir iškodavimo metodą. Užkodavimui ir iškodavimui naudojama skaitmeninė moduliacija, vadinama IQ moduliacija.

IQ moduliacijoje signalas yra išskaidytas į du nepriklausomus komponentus: I (į-fazė) ir Q (kvadratūra). Šie IQ moduliacijos komponentai paprastai atvaizduojami vektorių pagalba dvimatėje erdvėje, vadinama žvaigždyno diagrama (angl. constellation diagram) [1]. Polinėje sistemoje šie dydžiai gali būti atvaizduojami kaip fazė ir amplitudė [8]. Signalų vektorius viršūnė žvaigždyno diagramoje vadinama žvaigždyno tašku. Taikant pritaikančias moduliacijas (angl. adaptive modulation) ši IQ vektorius viršūnė, priklausomai nuo vietos žvaigždyno diagramoje, nustato kokius duomenis bus iškoduoti. Ir atvirkščiai, priklausomai nuo siunčiamų duomenų, moduluojama signalo fazė ir amplitudė signale [7]. Siekiant užkoduoti daugiau duomenų signale naudojamos skirtingos pritaikančios moduliacijos schemas:

- BPSK (angl. binary phase-shift keying)
- QPSK (angl. quadrature phase-shift keying)
- 4QAM (angl. 4-symbol quadrature amplitude modulation)
- 16QAM (angl. 16-symbol quadrature amplitude modulation)
- 64QAM (angl. 64-symbol quadrature amplitude modulation)

Pirmos dvi išvardintos moduliacijos schemas naudoja fazės pasikeitimo kodavimą, o likusios trys – fazės ir amplitudės pasikeitimo kodavimą [1]. Taigi, duomenims koduoti šiose schemose naudojami amplitudės arba fazės būsenos pasikeitimai, todėl šių būsenų skaičius turi būti baigtinis [6]. Nuo šių būsenų skaičiaus priklauso žvaigždyno taškų skaičius.

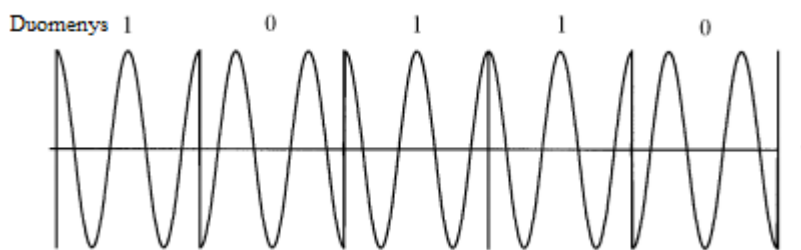
Perduodant koduotus duomenis šiomis pritaikančiomis moduliacijos schemomis priimta laikyti, kad duomenys perduodami simboliais. Vienas simbolis atstoja iškoduojamą žvaigždyno tašką, todėl jis gali nešti vieną ir daugiau bitų informacijos. Nešamų bitų skaičius priklauso nuo žvaigždyno taškų skaičiaus arba kitaip moduliacijos lygio. Koduojamų bitų skaičius apskaičiuojamas naudojantis (1) formule.

$$n = \sqrt{N} \quad (1)$$

čia N – moduliacijos lygis, n – simbolių lygiai abiejose į-fazės (I) ir kvadratūros (Q) ašyse, arba koduojamų bitų skaičius.

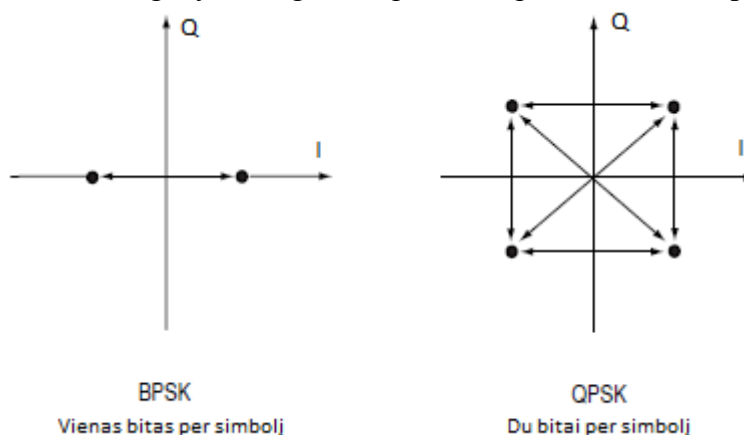
2.1.2. Fazės pasikeitimo pritaikančios moduliacijos

Fazės pasikeitimo (PSK) pritaikančios moduliacijos schemas turi daugybę atmainų, tokių kaip BPSK, QPSK, MPSK ir diferencinės šių moduliacijų versijas – DBPSK, DQPSK, DMPSK, 4-DQPSK [11]. Iš šių moduliacijos schemų bevieliuose maršrutizatoriuose palaikančiuose IEEE 802.11n standartą naudojamos tik BPSK ir QPSK. Šiose moduliacijose duomenys koduojami keičiant signalo fazę, tačiau išlaikant pastovią amplitudę ir dažnį [7]. Fazės pasikeitimai signale, koduotame BPSK moduliacijoje, atvaizduoti paveiksle (2.1-1 pav.).



2.1-1 pav. BPSK koduoto signalo fazės pasikeitimai [11]

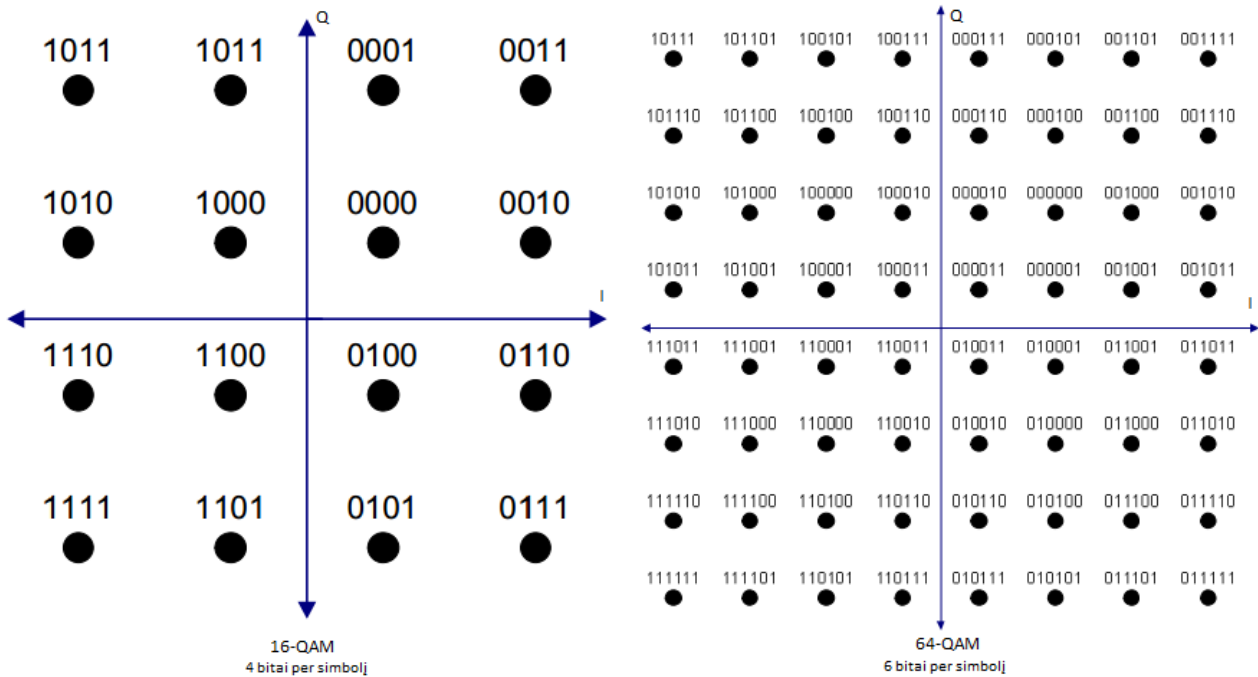
Nuo naudojamos moduliacijos tipo priklauso moduluoto signalo fazių virsmų kiekis ir signale koduojamų bitų skaičius. Pavyzdžiui BPSK moduliacijoje naudojami 2 signalo fazių virsmai: 0° ir 180° . Šiais virsmais užkoduojami 1 bito informacija (0 arba 1). QPSK moduliacijoje naudojami 4 signalo fazių virsmai: 45° , 135° , 225° , 315° . Šiais virsmais atitinkamai užkoduojami 2 bitai informacijos: 00, 01, 11, 10. Pastaroji naudojama daug dažniau duomenų perdavime, kadangi duomenys perduodami dvigubai greičiau nei BPSK moduliacijoje, o išlaikomas toks pat bitų klaidų dažnumas [11]. Fazių pasikeitimai iškoduojant duomenis taip pat gali būti atvaizduojami žvaigždyno diagramose. BPSK ir QPSK žvaigždyno diagramos pateiktos paveiksle (2.1-2 pav.)



2.1-2 pav. BPSK ir QPSK moduliacijų žvaigždyno diagramos [1]

2.1.3. Kvadratūros amplitudės prisitaikančios moduliacijos

Kvadratūros ir amplitudės moduliacija (QAM) taip pat turi daugybę atmainų, kurios rūšiuojamos į moduliacijos lygius (4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, ir t.t.). Praktiškai pasiekta 256-QAM lygio moduliacija su 8 bitų per simbolį duomenų tankiu, o šio lygio moduliacijos teorinės ribos nėra nustatytos. Nors ir egzistuoja tokios QAM moduliacijų galimybės, tačiau IEEE 802.11n standartas apriboja tik 16-QAM ir 64-QAM moduliacijos schemų naudojimą. Kitaip nei fazės pasikeitimo moduliacijose, šiose moduliacijose duomenys koduojami ir iškoduojami naudojantis fazės ir amplitudės pokyčiais. Taip pasiekiamas didesnis duomenų tankis, tačiau reikalingas ir didesnis žvaigždyno taškų skaičius, todėl didėja simbolio klaidos laipsnis. Tam reikia atlikti tikslesnius amplitudės vertinimus, kad simboliai galėtų būti atskirti vienas nuo kito [12]. 16-QAM ir 64-QAM moduliacijų žvaigždyno diagramos iliustruotos (2.1-3 pav.)



2.1-3 pav. 16-QAM ir 64-QAM moduliacijų žvaigždyno diagramos [12]

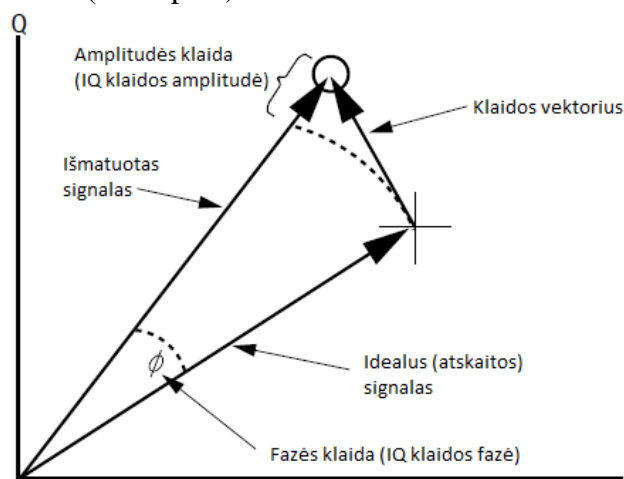
2.1.4. Moduliacijų kodavimo ir iškodavimo klaidos

Aukštesnio lygio moduliacijos gali pernešti didesnius duomenų kiekius per vieną simbolį, nes turi daugiau žvaigždyno taškų. Tačiau, dėl didelio žvaigždyno taškų tankio, signalas yra mažiau atsparus triukšmams ir iškraipymams.

Signalų triukšmai ir iškraipymai stipriau veikia aukštesnės eilės QAM sistemos moduluotus skaitmeninius signalus [1]. Taip yra dėl pritaikančios moduliacijos savybių, nes signalas turi būti tiksliau užkoduotas ir teisingai gautas (fazės ir amplitudės klaidos santykinai mažos). Taigi aukštesnių eilių moduliacijoms taikomos griežtesni reikalavimai iškoduojamo signalo kokybei [13].

Taikant moduliacijas realiomis sąlygomis, siunčiamas ir gaunamas moduluotas skaitmeninis signalas yra veikiamas aplinkos veiksnių (spinduliuote, techninės įrangos netikslumas ir kt.), todėl iškoduojamas signalas gaunamas ne tiksliai ant nustatyto žvaigždyno taško. Naudojantis prisitaikančios moduliacijos metodais jis yra koreguojamas, kad atitiktų tikėtiną žvaigždyno tašką.

Gautas iškoduotas signalas, žvaigždyno diagramoje vadinamas išmatuotu fazoriumi, o idealus signalas, žvaigždyno diagramoje vadinamas atskaitos fazoriumi. Iškoduotas signalas įgauna kitokias I ir Q reikšmes, todėl jis nukrypsta nuo idealaus žvaigždyno taško. Taip atsiranda fazės ir amplitudės klaidos, kurių suma nusakoma klaidos vektoriumi ir jo skaliariniu įverčiu (EVM). Taigi, EVM yra skaliarinis atstumas tarp išmatuoto ir idealaus signalo fazorių galų. Klaidos vektorius ir jo komponentės pateikti paveiksle (2.1-4 pav.).



2.1-4 pav. Klaidos vektorius ir jo komponentės [2][4].

Žvaigždyno taškas atvaizduoja vieną simbolį, kuris gali nešti keletą bitų informacijos. Perduodant duomenis realiomis sąlygomis siunčiami signalai, kuriuose užkoduota daugybė simbolių. EVM yra vieno simbolio klaidos įvertis [15]. Norint įvertinti tikrą viso duomenų paketo EVM, sumuojami keleto simbolių klaidos vektoriai ir taip gaunamas tikrasis klaidos vektorius [4]. Esant dideliems triukšmams ir interferencijai, gautas signalo vektorius nukrypsta per daug nuo idealių žvaigždyno taškų (EVM per didelis), todėl signalas nebegali būti teisingai iškoduotas ir atsiranda simbolių klaidos [1].

2.2. Susijusių darbų apžvalga

2.2.1. Skaitmeninio signalo EVM matavimai

Šiame skyriuje apžvelgti ir aprašyti skaitmeninio signalo EVM matavimo metodai (mikro matavimų lygmenyje) ir viso EVM matavimo proceso valdymo procedūros (makro matavimų lygmenyje).

Bevielio ryšio standartas IEEE 802.11 nustato daugelį standartizuotų matavimo procedūrų radijo charakteristikoms patikrinti. Išskiriamos tokios charakteristikos kaip maksimali galia, centrinio dažnio klaida, simbolio takto klaida, tačiau viena svarbiausių ir daugiausia reikalavimų keliančių techninei matavimo įrangai yra EVM matavimas [8][9].

EVM plačiai taikomas matas skaitmeninio signalo moduliacijos kokybei įvertinti [9]. Šie matavimai parodo RF netikslumus. EVM yra statistiškai varijuojantis dydis, dėl veikiamų aplinkos triukšmų, interferencijos ar perdavimo terpės netobulumo [1]. Šis išsibarstymas egzistuoja visada ir yra leistinas, kol neviršijamas gero EVM limitas. Geras EVM limitas yra nustatytas IEEE 802.11n standarto ir priklauso nuo naudojamos moduliacijos ir kodavimo lygio. Naudojantis IEEE 802.11n standarto duomenimis, leistini EVM iškraipymai prie nustatytų moduliacijų ir kodavimo lygių pateikti lentelėje (2.5-1 lentelė).

2.2-1 lentelė. Leistini EVM iškraipymai prie nustatytų moduliacijų ir kodavimo lygių, MCS susiejimas su moduliacija ir kodavimo lygiu. [10]

MCS	Moduliacija	Kodavimo lygis	Leidžiamas EVM (dBm)
0	BPSK	1/2	-5
1	QPSK	1/2	-10
2	QPSK	3/4	-13
3	16-QAM	1/2	-16
4	16-QAM	3/4	-19
5	64-QAM	2/3	-22
6	64-QAM	3/4	-25
7	64-QAM	5/6	-28

Iš lentelės duomenų galima pamatyti, kad didesni iškraipymai leidžiami žemesnio lygio moduliacijose, o mažesni – aukštesnio lygio moduliacijose. Aukštesnio lygio moduliacijose naudojama daugiau žvaigždyno taškų simboliams iškoduoti, todėl jų tankumas yra didesnis, o leidžiami EVM nukrypimai turi būti mažesni [5][9]. Taip pat, leidžiamos EVM ribos vertinime dalyvauja ir kodavimo lygis. Jis nėra tiesiogiai susijęs su EVM ir signalo savybėmis, tačiau yra svarbus gauto simbolio atkūrimui [14]. Kodavimo lygis nusako, kiek duomenų be perteklinės informacijos yra perduodama vienu simboliu. Esant mažesniam kiekiui perteklinės informacijos leidžiami mažesni EVM iškraipymai.

RF moduluotų signalų matavimuose naudojama speciali matavimo įranga – VSA (angl. vector signal analyzer). Ši įranga skirta skaitmeninio OFDM moduluoto signalo analizei. VSA realiu laiku surenka skaitmeninius signalus ir atlieka greitąją Furjė transformaciją (FFT), vykdo dažnių srities analizę ir signalo charakteristikų skaičiavimus. Prieš EVM skaičiavimą signalas yra normalizuojamas ir iškoduojamas [5]. Įranga atliekanti skaitmeninių signalų generavimo funkciją vadinama VSG (angl. vector signal generator). Ši įranga naudojama RF imtuvo matavimuose.

2.2.2. Matavimo klaidų šalinimas

Remiantis Christopher D. et al. tyrimų duomenimis svarbu turėti patikimą ir suderintą matavimo įrangą. Tai įgyvendinama pritaikant sudėtingas signalo lyginimo technikas, atliekant triukšmo ir iškraipymų santykio derinimą, fazės triukšmo slopinimą ir netikrų signalų slopinimą [8].

Dominuojantis foninis triukšmas, atsirandantis dėl mažos siųstuvo galios, bei signalo iškraipymai, atsiradę dėl vidinės interferencijos, naudojant per didelę siųstuvo galią, didina EVM reikšmę. Taigi matuojamo RF siųstuvo galia turi būti nustatoma, tokia, kad ir triukšmas, ir iškraipymai kuo mažiau paveiktų EVM. Norimai galiai gauti signalo analizatoriaus įėjime, naudojami signalų slopintuvai ir stiprintuvai. Jie nustatomi produkto gamybos metu.

Netikri, aplinkoje esantys, signalai sąveikauja su duomenimis siunčiamame signalo dažnyje. Nors jie yra silpni, tačiau tai paveikia imtuvo dinaminį jautrumo režio nustatymą. Šių netikrų signalų galima išvengti, nenaudojant tam tikro dažnių diapazono, kuriame jie egzistuoja. Taip pat naudojama kita metodika paruošiant IQ signalą su priešinga netikro signalo faze ir tokia pačia amplitude. Tokiu būdu duomenys siunčiamam signale panaikina netikrą signalą.

2.2.3. Siųstuvo galios ir EVM derinimas

Bevielio maršrutizatoriaus derinimas atliekamas iš karto po maršrutizatoriaus techninės įrangos pagaminimo. Ši procedūra svarbi, kadangi techninės įrangos komponentų kokybė varijuoja. Šie kokybės svyravimai gamybos metu įtakoja pagaminto maršrutizatoriaus galią ir tai, kaip tiksliai duomenys bus užkoduoti skaitmeniniame signale. Šiems svyravimams sumažinti naudojamas radijo derinimas. Derinimo metu, naudojantis VSA, matuojami bevielio maršrutizatoriaus siunčiami signalai ir tikrinamas EVM [16]. Matavimų metu koreguojama siųstuvo galios parametrai. Siekiama, kad EVM neviršytų maksimalios leistinos ribos, o siųstuvo galia būtų maksimali.

Remiantis JAV Christian Olgaard užregistruoto RF signalų matavimų patento informacija [3], matavimo procesas atlieka dvi užduotis: užtikrina siųstuvo kokybę ir apriboja galią pagal reguliacinius, skirtingose šalyse taikomus, reikalavimus. Atliekant siųstuvo matavimus, jo kokybę vertinama naudojantis dviem parametrais – išsiuntimo galia ir moduliacijos tikslumu (EVM). Matavimų metu siekiama išgauti didžiausią įmanomą galią su geriausiu įmanomu EVM. Išmatuotas RF signalo EVM taip pat įtraukia triukšmus ir statistines rezultatų variacijas, todėl turi būti daromi pakartotiniai matavimai ir skaičiuojamas EVM vidurkis. EVM tikrinimas daromas vertinant siųstuvo galios spaudimo lygio koreliaciją su EVM [3]. Ši koreliacija nusako tiesinę priklausomybę tarp abiejų dydžių. Atlikus matavimą ir išanalizavus duomenis gaunama papildomo kaupimo skirstinio funkcija. Ši funkcija naudojama siųstuvo spaudimo lygiui suskaičiuoti [3]. Išmatavus suspaudimo lygius nustatoma EVM reikšmė. Pagal išmatuotą EVM koreguojamas siųstuvo suspaudimo lygis ir matavimas atliekamas iš naujo. Matavimai kartojami tol, kol randama didžiausia galia su leistinu EVM. Matavimai atliekami su visais derinimo taškais dažnių rėžyje [3].

2.3. Egzistuojančios sistemos

2.3.1. ATEd

Lustinių schemų gamintojo „Ralink“ pateikiama automatizuota testavimo aplinka skirta šios įmonės technologija paremtų maršrutizatorių valdymui. Šio įrankio pagalba vartotojui leidžiama manipuluoti daugeliu bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo ir imtuvo parametru bei funkcijų.

Įrankis paremtas kliento-serverio architektūra. Serverinė dalis turi būti paleista „ralink“ lustine sistema paremtame beveliam maršrutizatoriuje. Klientinė dalis veikia kompiuteryje ir turi grafinę sąsają. Vartotojui suteikiamos bevielio maršrutizatoriaus radijo valdymo komandos – radijo parametru keitimas, signalų generavimo pradėjimas ir stabdymas, imtuvo statistikų kaupimas. Taip pat prieiga prie EEPROM atmintinės, temperatūros daviklio parodymų [17].

Įrankyje realizuotas platus bevielio maršrutizatoriaus galimybių valdymas, tačiau nėra integracijos su matavimo įrenginiais (VSA ir VSG), todėl negali būti atliekamas automatizuotas siųstuvo derinimas. Vartotojas turi rankomis atlikti matavimus ir siųstuvo derinimą [17].

2.3.2. ART

Lustinių schemų gamintojo „Atheros“ pateikiama sistema skirta siųstuvo ir imtuvo derinimui (angl. atheros radio test). Sistema suteikia abstrakčią prieigą prie bevielio maršrutizatoriaus signalų matavimo ir derinimo funkcijų.

Sistema paremta kliento-serverio architektūra. Serverinė dalis veikia „atheros“ lustine sistema paremtame bevieliame maršrutizatoriuje. Klientui suteikiama prieiga prie bevielio maršrutizatoriaus radijo resursų. Klientinė dalis veikia kompiuteryje ir turi komandinės eilutės sąsają. Sistema palaiko populiariausių matavimo įrenginių (VSA ir VSG) valdymo funkcijas, todėl yra galimybė automatizuoti matavimus ir RF derinimo procesą. Vartotojui leidžiama rašyti matavimo ir derinimo scenarijus, naudodamasis sistemos pateikiama komandų sąsaja. Vykdamas vartotojo scenarijus, sistema komunikuoja su matuojamu įrenginiu ir matavimo įrenginiais, bei atliekamas automatizuotas RF derinimas [18].

2.4. Analizės išvados

Skyriuje analizuoti darbai susiję su skaitmeninių signalų kodavimo metodais, kokybės matavimais ir siųstuvo derinimu. Išsiaiškintos bendros matavimo procedūros taikomos daugelyje analizuotų darbų: išsiųstas RF moduluotas signalas gaunamas VSA analizatoriuje, išanalizuojamas, o analizės duomenys perduodami automatizuotai testavimo aplinkai (ATE). Taip atliekant signalų analizavimą yra galimybė tas pačias matavimo procedūras pritaikyti skirtinguose matavimo kontekstuose. ATE matavimo procedūra bus pritaikoma siūlomose EVM duomenų rinkimo ir bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo derinimo metoduose.

Apžvelgtos egzistuojančios derinimo sistemos ir PĮ skirtos bevielio maršrutizatoriaus valdymui. Radijo siųstuvo derinimas yra nuo techninės įrangos priklausantis dalykas, todėl lustinių valdiklių gamintojai yra realizavę savo valdiklių valdymo ir derinimo sistemas. Šių derinimo sistemų dokumentacija nėra viešinama, todėl informacijos apie naudojamus derinimo metodus taip pat nebuvo rasta. Realizuotos lustinių valdiklių gamintojų sistemos ne visada tenkina vartotojų poreikius dėl funkcionalumo trūkumo arba rezultatų vienodumo. Kadangi vieningo metodo leidžiančio atlikti EVM matavimus ir siųstuvo derinimą nebuvo rasta, todėl naudojantis išanalizuota informacija, pasiūlyti siųstuvo matavimo ir derinimo metodai.

2.5. Siūlomi matavimo metodai

Bevielio maršrutizatoriaus RF derinimo procesas yra sudėtinė procedūra, sudaryta iš įvairių RF signalų matavimo, analizavimo ir rezultatų agregavimo. Derinimo proceso sudėtinė dalis yra EVM matavimai. Apžvelgiant kitų autorių darbus nebuvo rasta panašių atitikmenų, todėl yra siūlomi savi EVM matavimo ir derinimo metodai:

- EVM matavimo strategijos. Jų paskirtis – kaupti ir apdoroti išmatuotų RF signalų analizės rezultatus, o vėliau juos perduoti tolimesniam apdorojimui.
- Siųstuvo derinimo procedūra. Šios procedūros metu keičiami bevielio maršrutizatoriaus stiprintuvo nustatymai, taip koreguojama siųstuvo galia. Keičiant siųstuvo galią matuojamas siunčiamo signalo EVM ir siekiama rasti tokią išsiuntimo galią, su kuria signalo iškraipymai būtų leistinose ribose.

Prieš atliekant RF signalų matavimus būtina nustatyti bazinius bevielio maršrutizatoriaus ir VSA duomenų perdavimo parametrus:

- Dažnis – centrinis kanalas, kuriuo maršrutizatorius siųs RF signalus. Dažnis taip pat nustatomas ir VSA, nes šiuo dažniu jis tikėtis gauti RF signalus.
- MCS – moduliacijos kodavimo schemos indeksas. Šis indeksas naudojamas nurodyti moduliacijai ir kodavimo lygiui. Indeksų, moduliacijų ir kodavimo lygių sąryšiai pateikti lentelėje (2.2-1 lentelė).
- Kanalo plotis – radijo eterio plotis, aplink centrinį siuntimo dažnį, kuris bus naudojamas duomenims perduoti.

- Kadro formatas – IEEE 802.11n standartas numato skirtingų kadro formatų palaikymą: lygtiniai 802.11a/b/g, mišrūs 802.11an/bgn ir didelio pralaidumo 802.11n.
- Išsiuntimo galia – dėl signalo iškraipymų, naudojant dideles galias, ir triukšmo, naudojant mažas galias, siųstuvo galia turi būti parenkama tokia, kad VSA imtuve būtų apytiksliai lygi -17,5 dBm [8]. Naudojant šią galią matavimo įrangoje rezultatai gaunami tiksliausi.

2.5.1. Imtuvo signalo paieška

VSA dirba ribotame signalo galių režyje – reguliuojama priimamo signalo triukšmo riba. Jei imtuve tikimasi gauti signalą prie vienos galios, o signalas siųstuve išsiunčiamas visiškai kita galia, šis signalas nebus gautas arba jo iškodavimas nepavyks dėl triukšmų. Šiai problemai spręsti reikalinga imtuvo signalo paieška. Matuojant nesuderintus bevielius maršrutizatorius nėra žinoma jų siųstuvo kokybė ir kokia galia jis pajėgus išsiųsti signalą, todėl šis žingsnis apsaugo nuo sisteminių klaidų matavimo metu.

Signalas gali būti nerastas dėl per stipraus arba per silpno signalo lygio. Neradus RF signalo pradedama signalo paieška atliekant pakartotinius signalo matavimus ir derinant VSA imtuvo jautrumą. Jautrumas derinamas keičiant stiprintuvo jautrumo ribą nuo maksimalios iki minimalios stiprintuvo signalo reikšmės pasirinktu žingsniu. Įprastai naudojamas signalo paieškos režis nuo -40 dBm iki 40 dBm. Paieška atliekama kiekvieną matavimą didinant galią 10dBm.

2.5.2. Imtuvo signalo stiprumo rėžių derinimas

Kaip anksčiau minėta, VSA signalą gali aptikti tik nustatytame galių režyje. Imtuvo jautrumo charakteristikos nėra tiesinės, todėl išmatuotas signalas yra tiksliausias, kai imtuve nustatytas jautrumas atitinka siųstuvo išsiuntimo galią. Atlikus pradinę signalo analizę reikia patikrinti ar išmatuoto signalo maksimali galia atitinka nustatytą imtuvo galią. Jei neatitinka, turi būti atliekamas imtuvo signalo stiprumo rėžių derinimas. Atliekant šiuos veiksmus įsitikinama, kad išmatuotas signalas yra teisingas, todėl išvengiama sisteminių matavimo klaidų.

Atlikus pirmą matavimą tikrinama ar signalas yra teisingai priimtas. Teisingai priimtu laikomas signalas jei galių skirtumas tarp nustatytos imtuvo ir maksimalios išmatuoto signalo galių neviršija 6 dBm. Derinimo metu VSA stiprintuvui užduodama galia lygi išmatuoto signalo maksimaliai galiai ir taip atliekami pakartotiniai RF signalo matavimai, kol gaunamas signalas atitinkantis signalo teisingumo kriterijų (galios skirtumas neviršija 6 dBm).

2.5.3. EVM rinkimo ir matavimo strategijos

Išmatavus teisingą signalą yra taikomos EVM strategijos. Šių nepriklausomų metodų paskirtis yra kaupti ir apdoroti matavimų rezultatus, bei perduoti juos tolimesniems matavimo ir derinimo žingsniams. Kadangi, žinoma, kad EVM yra atsitiktinio pobūdžio, jo charakteristika visą laiką varijuoja. Vienas iš pagrindinių EVM strategijų tikslų yra padidinti matavimo rezultatų patikimumą, kai reikalingas didesnis matavimo duomenų tikslumas. Rezultatų patikimumas gaunamas atliekant pakartotinius signalo matavimus, tačiau mainais į patikimą gaištamas matavimų laikas. Šiai problemai spręsti siūlomos EVM strategijos:

- Single („vienetinė“)
- First-good („pirmas-geras“)
- Averaged („vidurkio“)

Vienetinė rezultatų matavimo strategija neatlieka jokių papildomų veiksmų su duomenimis. Ši strategija, duomenų patikimumo atžvilgiu, turėtų duoti santykinai nepatikimus rezultatus, tačiau turėtų būti efektyviausia laiko atžvilgiu. Ši strategija naudojama kaip atskaitos taškas kitoms strategijoms vertinti. Taip pat atsiradus idealioms aplinkos sąlygoms realiame pasaulyje, gali būti panaudota EVM matavimuose.

Pirmas-geras strategija atlieka matavimo rezultatų atranką vertinant EVM. Geras rezultatas atrenkamas naudojantis užduotą EVM limitą, kuris nustatomas pagal naudojamą moduliaciją ir kodavimo lygį (MCS). Šie duomenys pateikti lentelėje (2.2-1 lentelė). Taigi, išmatavus RF signalą ir nustačius, jog egzistuoja klaidos vektorius viršijantis normą, atliekamas permatavimas. Tokiu būdu tikimasi išmatuoti gerą signalą su leistinu EVM. Strategijos naudotojai nurodo maksimalų bandymų

skaičių, kuris pasako kiek kartų atlikti RF signalo matavimus, kol bus gautas rezultatas turintis gerą EVM. Tikimasi, kad šios strategijos pagalba išmatuoti rezultatai bus gaunami teisingesni, nei vienietinės strategijos matavimo atveju, tačiau matavimams bus sugaišta šiek tiek daugiau laiko.

Vidurkio strategija yra kaupianti matavimo rezultatus strategija. Naudojant šią strategiją atliekami pakartotiniai RF signalų matavimai, o visi išmatuoti rezultatai kaupiami. Signalų analizių skaičius yra fiksuotas ir nustatytas strategijos vartotojų. Taip sukaupus norimą skaičių matavimo rezultatų, apskaičiuojamas rezultatų vidurkis, kuris vėliau atiduodamas tolimesniam apdorojimui. Vidurkis skaičiuojamas sumuojant kiekvieną matavimo atributą, o vėliau dalinant juos iš matavimų skaičiaus. Taip gaunamas vidutinis signalo analizių rezultatas. Pakartotiniais matavimais ir vidurkio skaičiavimu tikimasi, kad bus gauti patikimesni matavimų rezultatai. Kadangi išmatuotas EVM statistiškai varijuoja visą laiką, šios variacijos traktuojamos kaip atsitiktinės matavimo klaidos, todėl atlikus pakartotinius matavimus manoma, kad išmatuotų EVM atsitiktinės klaidos kompensuos viena kitą, o rezultatai taps patikimesni. Naudojant šią strategiją tikimasi, kad matavimų trukmė pailgės tiek, kiek RF signalo analizių bus atlikta rezultatų vidurkio skaičiavimams, tačiau tai turėtų duoti patikimesnius rezultatus.

Taikant pasiūlytas matavimų strategijas RF signalų surinkti matavimo duomenys gali būti apdorojami skirtingais būdais. Numatoma, kad šie, skirtingomis strategijomis surinkti, matavimų rezultatai turi skirtingas spartos ir patikimumo charakteristikas. Šios matavimo strategijos yra realizuotos derinimo programinėje įrangoje ir pateiktos 3 skyriuje, o matavimų eksperimentų rezultatai pateikti 5 skyriuje.

2.5.4. Siųstuvo derinimo procedūra

Atlikus RF signalų matavimus ir juos apdorojus, naudojantis aukščiau aprašytais EVM matavimo strategijomis, duomenys naudojami bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo derinimo metu. Šio derinimo metu siekiama rasti maksimalią bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo stiprinimo reikšmę, kad signalo iškraipymai (EVM) būtų leistinose ribose. Dėl šio matavimo pobūdžio tai yra optimizavimo uždavinys.

Siųstuvo derinimo metu operuojama dviem išmatuotais signalų įverčiais: EVM ir vidutine išsiuntimo galia. Padidėjus siųstuvo galiai didėja ir išsiųsto signalo iškraipymai. Taigi šiai galiai rasti naudojamas toks optimalios vidutinės galios ir EVM reikšmės paieškos metodas:

- 1) Nustatyti radijo parametrai (dažnis, moduliacija, kanalo plotis, kadru formatas), parenkama įprastinė siųstuvo stiprinimo reikšmė iš nustatymų failo.
- 2) Atliktas pirmas RF signalų matavimas. Signalas išmatuotas naudojantis EVM matavimo strategijomis, taip užtikrinant, kad gauti rezultatai yra patikimi.
- 3) Tikrinama ar EVM neviršija leistinos ribos ir taip nustatoma ar siųstuvo stiprinimo reikšmė bus didinama ar mažinama. Jei EVM viršija leistiną normą, siųstuvo stiprinimo reikšmė bus mažinama, priešingu atveju didinama.
- 4) Atnaujinama stiprintuvo stiprinimo reikšmė ir tikrinama ar ji yra leistinose ribose:
 - a. Jei ši reikšmė yra maksimali, o reikalaujama didinti reikšmę, siųstuvo derinimas laikomas pavykęs ir gražinamas rezultatas.
 - b. Jei ši reikšmė yra minimali, o reikalaujama mažinti reikšmę, siųstuvo derinimas laikomas nepavykęs ir gražinama klaida.
- 5) Kartojamas matavimas kol neviršijama derinimo bandymų riba. Viršijus gražinama klaida. Matavimo metu taikomos operacijos kaip ir 1 žingsnyje.
- 6) Tikrinama ar leidžiama EVM reikšmė:
 - a. Jei reikalaujama didinti stiprinimo reikšmę ir išmatuotas signalų EVM yra geras – tęsti derinimą ir ieškoti geresnės reikšmės, didinant siųstuvo stiprinimo reikšmę.
 - b. Jei reikalaujama didinti stiprinimo reikšmę, o išmatuotas signalų EVM yra blogas – praeito matavimo rezultatas buvo geras, atstatoma siųstuvo stiprinimo reikšmė ir gražinamas ankstesnis rezultatas.
 - c. Jei reikalaujama mažinti stiprinimo reikšmę ir išmatuotas signalų EVM yra geras – rastas geras matavimo rezultatas. Rezultatas gražinamas.

d. Jei reikalaujama mažinti stiprinimo reikšmę, o išmatuotas signalų EVM yra blogas – tęsti derinimą ir ieškoti geros reikšmės, mažinant siųstuvo stiprinimo reikšmę.

7) Atnaujinama stiprintuvo stiprinimo reikšmė ir tikrinama ar ši yra leistinose ribose. Veiksmai atliekami kaip 4 punkte.

Atliekant derinimą naudojamasi fiksuotais radijo parametrais. Siųstuvo galią priklausomuo naudojamo dažnio, taigi atliekant siųstuvo derinimą, derinimai turi būti atliekami nepriklausomai įvairiuose dažniuose. Šie dažniai gali būti parenkami visame dažnių diapazone, vienodais intervalais (pvz. 20MHz), arba gali būti naudojami standartinių Wi-Fi kanalų dažniai. Kiti derinimą įtakojantys parametrai (kadro formatas, moduliacija, kanalo plotis) lemia tik leistiną EVM ribą (toleruojamus signalų iškraipymus), todėl šie parametrai turi būti parenkami tokie, kad leidžiama EVM riba būtų kuo didesnė (mažiausiai toleruotu signalų iškraipymus). Didžiausia leistina EVM riba yra naudojantis tokiais parametrais:

- 802.11n kadro formatas
- MCS7 moduliacijos ir kodavimo indeksas (64-QAM, 5/6 CR)
- 20MHz kanalo plotis

3. BEVIELIO MARŠRUTIZATORIAUS RF DERINIMO PĮ PROJEKTAS

3.1. Sistemos aprašymas

3.1.1. Sistemos adresatas

Sistema kuriama įmonei UAB „Wilibox“. Ši įmonė užsiima bevielių techninės ir programinės įrangos kūrimu. Pagaminta produkcija parduodama Lietuvoje, taip pat eksportuojama į užsienį. Sistemos kūrimo ir reikalavimų klausimai derinami su įmonėje dirbančiu projektų vadovu, kuris koordinuoja masinę gamybą fabrike. Techniniai ir dalykinės srities klausimai sprendžiami diskusijoje su radijo dalies ekspertu.

3.1.2. Sistemos paskirtis

Kuriama sistema skirta įmonėje gaminamų bevielio maršrutizatorių radijo siųstuvų derinimui, patikrinimui ir kitiems kokybės tyrimams atlikti. Taikant siūlomus matavimo metodus siekiama paspartinti egzistuojančius siųstuvo derinimo ir patikrinimo procesus. Taip pat matavimo procesą padaryti konfigūruojamą, o sistemą lengvai palaikomą. Vizualizuoti matavimų rezultatus lentelėmis ir grafikais.

3.1.3. Sistemos vartotojai

Sistema yra glaudžiai susijusi su įmonės veikla, todėl reikalingas radijo parametrų ir signalų charakteristikų išmanymas ir matavimo metodų supratimas. Sistemos naudotojai suskirstyti į dvi grupes, todėl sistema turės būti kuriama pagal abiejų šių suinteresuotų vartotojų grupių reikalavimus:

- Įmonės darbuotojai – inžinieriai, šios dalykinės srities specialistai. Šie žmonės sistemą naudos eksperimentams atlikti arba rečiau standartinių matavimų tikslais, bei analizuosiantys sistemos duodamus rezultatus. Atėjus naujokui būtinas apsimokymas. Šie vartotojai yra aukščiausio prioriteto vartotojai sistemos funkcinio atžvilgiu.
- Fabriko darbuotojai – žemo išsilavinimo žmonės, naudosiantys sistemą tik matavimams ir neatliksiantys jokio rezultatų analizavimo. Sistema turi būti pakankamai autonominė ir aiški, kad šie žmonės be didelių pastangų galėtų matuoti ir pateikti duodamus rezultatų santraukas specialistams. Šie vartotojai laikomi aukščiausio prioriteto vartotojais vartotojo sąsajos atžvilgiu

3.2. Funkciniai reikalavimai

Svarbiausios sistemos funkcijos:

- 1) *Grafinė sąsaja derinimo ir matavimų startavimui ir konfigūravimui.* Grafinėje sąsajoje yra mygtukai pradėti matavimą, nutraukti matavimą, peržiūrėti rezultatus. Taip pat vartotojui siūloma pasirinkti radijo siųstuvo parametrus. Matavimų ir derinimų eigoje pateikiami rezultatai ekrane.
- 2) *Bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo galios patikrinimas.* Patikrinama siųstuvo galia ir išmatuojamas EVM limitas su nustatytais parametrais.
- 3) *Bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo galios derinimas.* Atliekamas bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo derinimas su nustatytais parametrais.
- 4) *Galimybė pasirinkti EVM matavimo strategiją ir jų parametrus.* EVM matavimo strategija nusako kaip RF signalų matavimo duomenys bus surenkami. Tai apsprendžia matavimo spartą ir rezultatų patikimumą.
- 5) *Išvesti rezultatus į failą ir standartinę išvestį.* Vartotojas nurodo rezultatų failą, kuriame bus saugomi rezultatai. Nenurodžius failo rezultatai į failą nesaugomi. Rezultatai išvedami eilutėmis, kur stulpeliuose atvaizduojami skirtingi matavimo parametrai.
- 6) *Irašyti matavimo versiją rezultatų faile.* Atlikto matavimo rezultatų faile saugoti naudojamos sistemos versiją, matavimo įrangos versiją ir matuojamo bevielio maršrutizatoriaus versiją.

- 7) *Leisti vartotojui pridėti komentarą.* Vartotojas gali norėti pridėti matavimo komentarą, kurio pagalba būtų išsaugomas matavimo kontekstas.
- 8) *Išsaugoti matavimo parinktį nustatymų faile.* Leisti vartotojui greitai keisti matavimo parametrus keičiant nustatymų failą. Pradedant matavimą konfigūravimo parametrus išsaugoti į aktyvų nustatymų failą.
- 9) *Atvaizduoti duomenis lentele arba diagrama.* Išmatuoti duomenys apdorojami ir suformuojamas grafinis jų vaizdas vienu iš pasirinktų metodų – lentele arba diagrama. Lentelėje pateikiami visi matavimo rezultatai ir parametrai. Diagramoje vieno dydžio priklausomybė nuo kito dydžio.
- 10) *Rezultatų palyginimas su praėjusiais matavimais.* Matavimai lyginami lyginant juos grafiškai diagramų formoje. Suformuojama diagrama su to pačio dydžio charakteristikomis vienoje erdvėje.

3.3. Nefunkciniai reikalavimai

3.3.1. Reikalavimai sistemos išvaizdai

Bendri reikalavimai vartotojo sąsajai:

- Neperkrauta parametrų valdymo parametrų sąsaja
- Pagrindiniai parametrai sugrupuoti vienoje grupėje
- Papildomi parametrai laikomi atskiroje grupėje
- Jei rezultatas yra pavyko/nepavyko identifikuoti spalvinėmis priemonėmis
- Vykdamatavimus rodyti progresą

3.3.2. Reikalavimai panaudojamumui

Panaudojimo paprastumas (lengvumas), kuris gali būti vertinamas konkrečiais kriterijais:

- Derinimas dviem įrenginio antenomis neperjungiant laidų
- Paprastas ir sudėtingas matavimo režimai.

3.3.3. Reikalavimai vykdymo charakteristikoms

Sistema turi greitai ir patikimai tikrinti ir derinti įrenginius. Matavimas su vienu parametru rinkiniu turėtų trukti ne ilgiau nei 5 sekundes.

3.3.4. Reikalavimai veikimo sąlygoms

Sistema turi veikti Windows ir Linux operacinėse sistemose.

Matavimo klaidų toleravimas, apdorojimas ir būsenos atkūrimas. Sistema turi informuoti apie nekritines klaidas ir bandyti atkurti vykdymą. Nepavykus atkurti arba įvykus kritinei klaidai vartotojas turi būti informuojamas ir matavimai stabdomi.

3.3.5. Reikalavimai sistemos priežiūrai

Nauji sistemos parametrų vardai turi būti intuityvūs, tokie kad patyręs sistemos vartotojas iš pavadinimo galėtų atspėti, kam jie skirti.

Sistemos kodas paprastas ir aiškus, lengvai palaikomas. Sudėtingas vietos gali būti saugomos, tačiau koncentruotos vienoje vietoje padengtoje vienetų testais.

Teikiama pirmenybė komandinės eilutės parametrų API, nei interaktyviam komandinės eilutės parametrų įvedimui. Interaktyvus parametrų įvedimas naudotinas tik tada, kai programa yra griežtai komandinės eilutės ir būtinas vartotojo įsikišimas vykdymo metu.

3.3.6. Reikalavimai saugumui

Sistema turi užtikrinti, kad išmatuoti duomenys yra teisingi. Nesugadinti jau esamų matavimo ir derinimo rezultatų. Taip pat nepažeisti bevielio maršrutizatoriaus ar matavimo įrenginio PĮ duomenų bloką.

Sistema turi patikrinti ir neleisti vartotojui nustatyti parametrų kurie nėra suderinami su matuojamu įrenginiu ir gali pažeisti matavimo arba matuojamą įrenginį ar teikti neteisingus rezultatus.

3.4. Įgyvendinimo planai

- Sistema įgyvendinama „Python“ kalba, dėl šios paprastumo ir suprantamumo. Taip pat python kalba yra suderinama skirtingose platformose, todėl sistema galės veikti „Microsoft Windows“ „Linux“ ir „Mac OS“ operacinėse sistemose.
- Naudojama „Litepoint IQView“ matavimo įranga.
- Naudojama tinklinė komponentų komunikavimo architektūra.
- Sistema su matavimo įrenginiu komunikuoja naudodamasi tarpininku (angl. proxy).

3.5. Sistemos apribojimai

- Komunikacijai su matavimo įrenginiu būtina „Microsoft Windows“, kurioje veiks komunikacijos tarpininko PĮ.
- Vienu metu gali būti matuojamas vienas bevielis maršrutizatorius.
- Matuojamas bevielis maršrutizatorius turi būti prijungtas specialiais RF laidais prie matavimo įrenginio.

3.6. Naudojami programiniai paketai

Sistemos architektūra, kuri aprašyta žemiau, nuspręsta daryti iš dviejų nepriklausomų dalių. Viena dalis funkcionuos „Microsoft Windows“ operacinės sistemos aplinkoje. Kita sistemos dalis bus nepriklausoma nuo platformos.

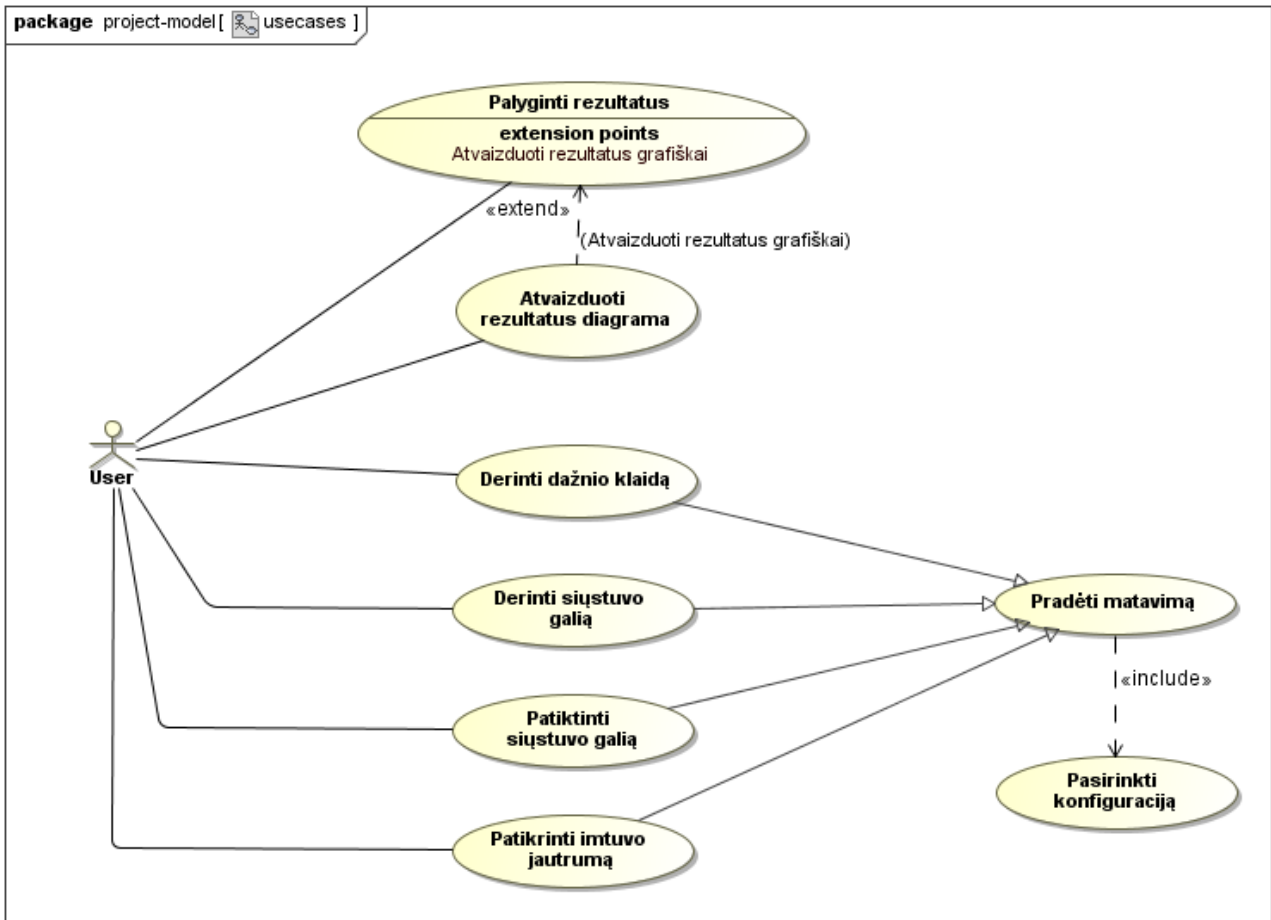
Komunikacijos tarpininkui būtinas programų paketas „Microsoft Windows“ operacinėje sistemoje:

- Litepoint iqAPI matavimo įrenginio funkcijų biblioteka.
- Matlab runtime compiler.
- Microsoft Visual C++ Runtime.

Matavimo ir derinimo sistemai būtinas programų paketas:

- Python
- PyGTK
- GNUPlot

3.7. Panaudojimo atvejų diagrama



3.7-1 pav. Sistemos panaudojimo atvejų diagrama

Kuriamos derinimo sistemos vartotojai bus įmonės darbuotojai, todėl papildomo apmokymo nereikės. Renkant sistemos reikalavimus šie sistemos vartotojai teikė reikalavimus ir pasiūlymus iš kurių vėliau buvo sudaryta panaudojimo atvejų diagrama pavaizduota paveiksle (3.7-1 pav.). Visi panaudojimo atvejai susiveda į matavimo atlikimą, kuriam reikalingas nustatymų failas. Derinimo procedūra susideda iš dažnio klaidos derinimo, siųstuvo galios derinimo ir galios patikrinimo ir jautrumo patikrinimo žingsnių. Atlikus derinimą rezultatai atvaizduojami diagramomis. Vartotojas taip pat gali palyginti senesnių matavimų rezultatus.

3.8. Architektūrinis modelis

Esminiai aspektai:

- Kliento-serverio architektūra
- Nepriklausomos grafinė sąsaja ir vykdomoji programa
- Sluoksniuota kliento architektūra

Užsibrėžti sistemos kokybės kriterijai:

Išplečiamumas

Naudojant jungties tarpininką matavimo įrenginiams valdyti, atsiranda labai lengvas būdas pridėti naujų matavimo įrengimų palaikymą, kadangi visos jungties detalės paslepiamos tarpininke, o viešinamas tik bendras API tinklinės komunikacijos pagalba.

Matuojamų įrenginių palaikymas aprašytas „pylab“ funkcijų bibliotekoje, išskaidžius jungtis į kelius lygius pasiekta, kad galima jungtis prie įrenginių skirtingais protokolais ir manipuluoti jų funkcionalumu, naudojantis skirtingais įrankiais.

Moduliarumas

Sistema realizuota atskirais moduliais atliekančiomis tik jiems specifines užduotis. Šie moduliai – komandinės eilutės programos, atliekančios užduotus matavimus ir išvedančios rezultatus. Funkcijų bibliotekoje saugomi bendri moduliai ir klasės, suteikia galimybę panaudoti juos iš naujo kituose matavimo įrankiuose.

Efektyvumas

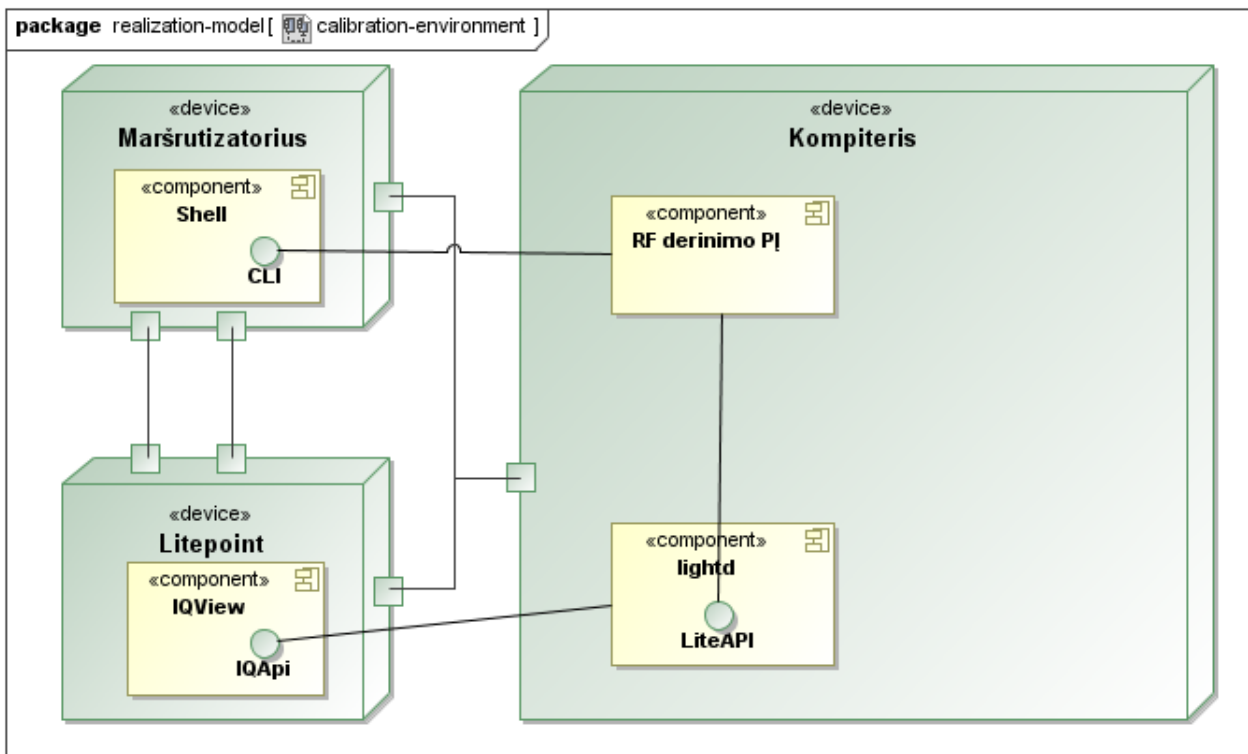
Tinklo resursų panaudojimo ir įrenginių konfigūravimo efektyvumas pasiekiamas mažinant tinklinės komunikacijos kiekį tarp įrenginių. Sutaupoma siunčiant susijusias valdymo komandas apjungiant į vieną. O matuojamo ir matuojančio įrenginių nustatymų perdavime vykdomos tik būtinos komandos, taip sumažinama laiko dalis skirta įrenginių konfigūravimui.

3.8.1. Sistemos išdėstymo vaizdas

Sistemos veikimo metu dalyvauja 3 įrenginiai:

- Kompiuteris
- Bevielis maršrutizatorius (toliau matuojamas įrenginys).
- Litepoint „IQView“ (toliau matavimo įrenginys)

Kompiuteris su matuojamu ir matavimo įrenginiu sujungti naudojantis UTP laidais. Komunikacija su šiais įrenginiais vyksta TCP/IP protokolu. Matuojamo įrenginio RF jungtys prijungtos prie matavimo įrenginio naudojantis specialiais RF kabeliais. Kompiuteryje veikia tarpininko PĮ skirta komunikacijai su matavimo įrenginiu ir RF siųstuvo derinimo sistema. Sistemos išdėstymo vaizdas pavaizduotas paveiksle (3.8-1 pav.).



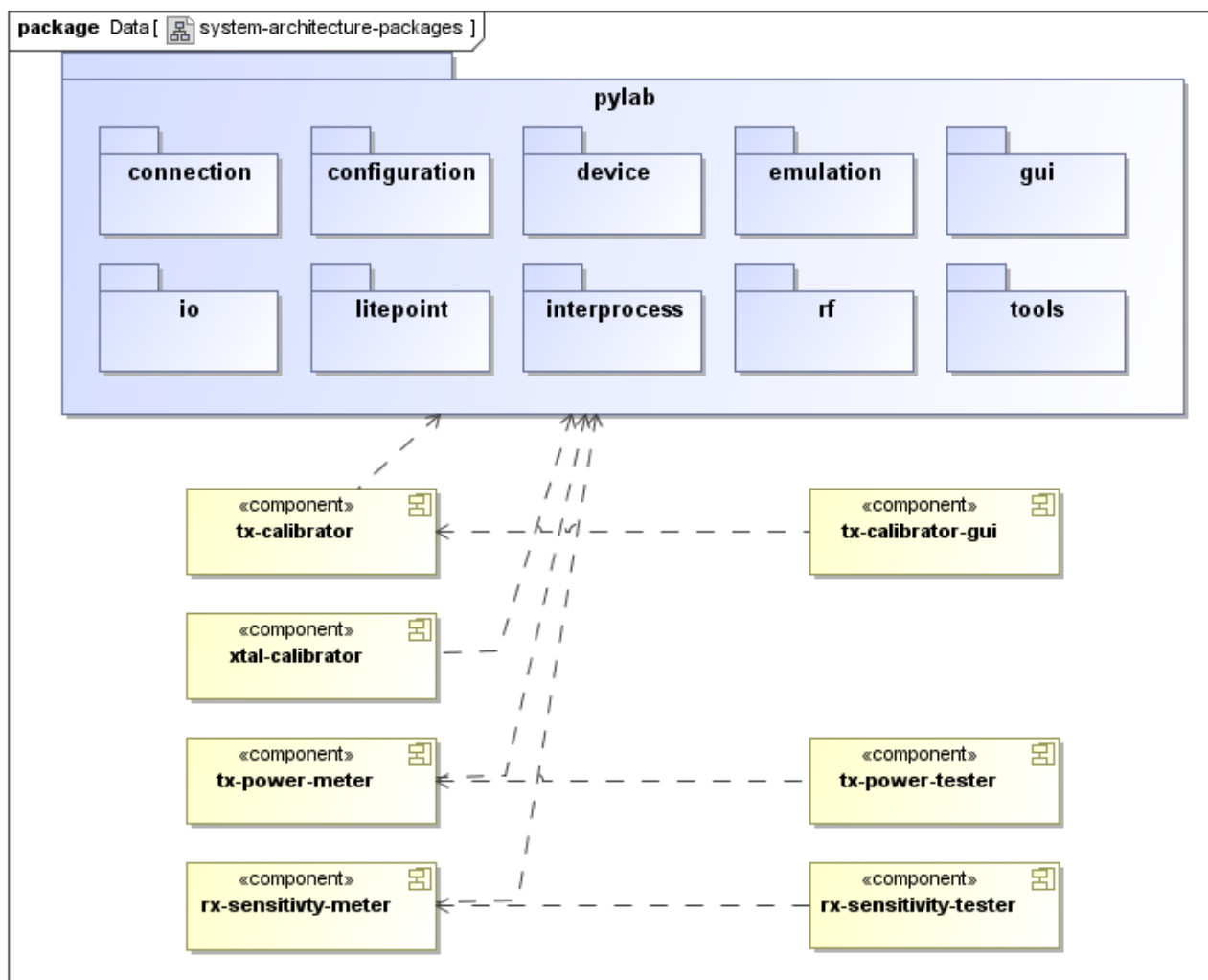
3.8-1 pav. Sistemos išdėstymo vaizdas

3.8.2. Sistemos skirstymas į paketus

Sistema išskaidyta į komponentus. Realizuojami matavimo įrankiai susideda iš dviejų dalių: komandinės eilutės programos atliekančio matavimą ir grafinės sąsajos programos. Grafinė sąsaja suteikia vartotojui matavimų valdymą ir yra atsakinga už matavimų rezultatų saugojimą ir atvaizdavimą. Bendri programų komponentai ir funkcijos saugomi funkcijų bibliotekoje „pylab“. Naudojantis šia funkcijų biblioteka realizuojami matavimo ir derinimo įrankiai. Sistemos išskaidymo paketais diagrama pateikta paveiksle (3.8-2 pav.).

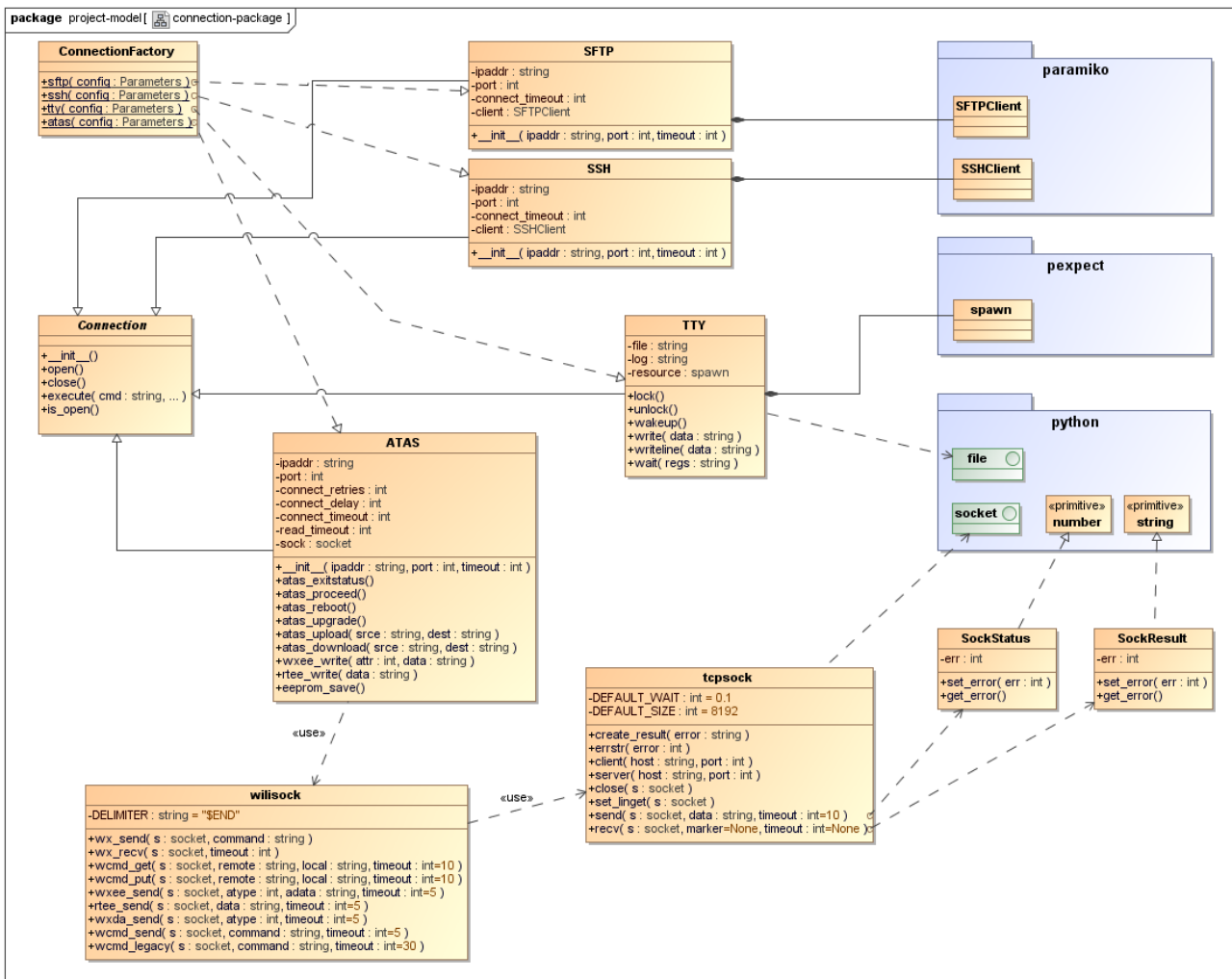
Sistemos funkcijų biblioteką sudaro 10 paketų:

- 1) *Paketas „connection“*. Šis paketas atsakingas už bazines TCP/IP jungties užmezgimo procedūras.
- 2) *Paketas „tools“*. Šis paketas saugo įrankių klases, kuriomis manipuluojama matuojamu bevieliu maršrutizatoriumi.
- 3) *Paketas „device“*. Šiame pakete laikomi metodai bevielio maršrutizatoriaus valdymui.
- 4) *Paketas „litepoint“*. Šiame pakete laikomi metodai „Litepoint IQView“ matavimo įrenginio valdymui.
- 5) *Paketas „rf“*. Šiame pakete laikomi metodai RF matavimams atlikti.
- 6) *Paketas „interprocess“*. Paketas teikia specializuotas tarp-procesinio komunikavimo paslaugas.
- 7) *Paketas „io“*. Šis paketas teikia specializuotas vartotojas įvesties ir išvesties operacijas.
- 8) *Paketas „gui“*. Šiame pakete saugomi grafinės vartotojos sąsajos komponentai.
- 9) *Paketas „configuration“*. Šis paketas atsakingas už sistemos konfigūracijos valdymą.
- 10) *Paketas „emulation“*. Pakete saugomos įrenginių imitavo klasės. Naudojamas sistemos derinimo ir testavimo metu.



3.8-2 pav. Sistemos išskaidymas į paketus

3.8.3. Paketas „connection“



3.8-3 pav. Paketo „connection“ klasių diagrama

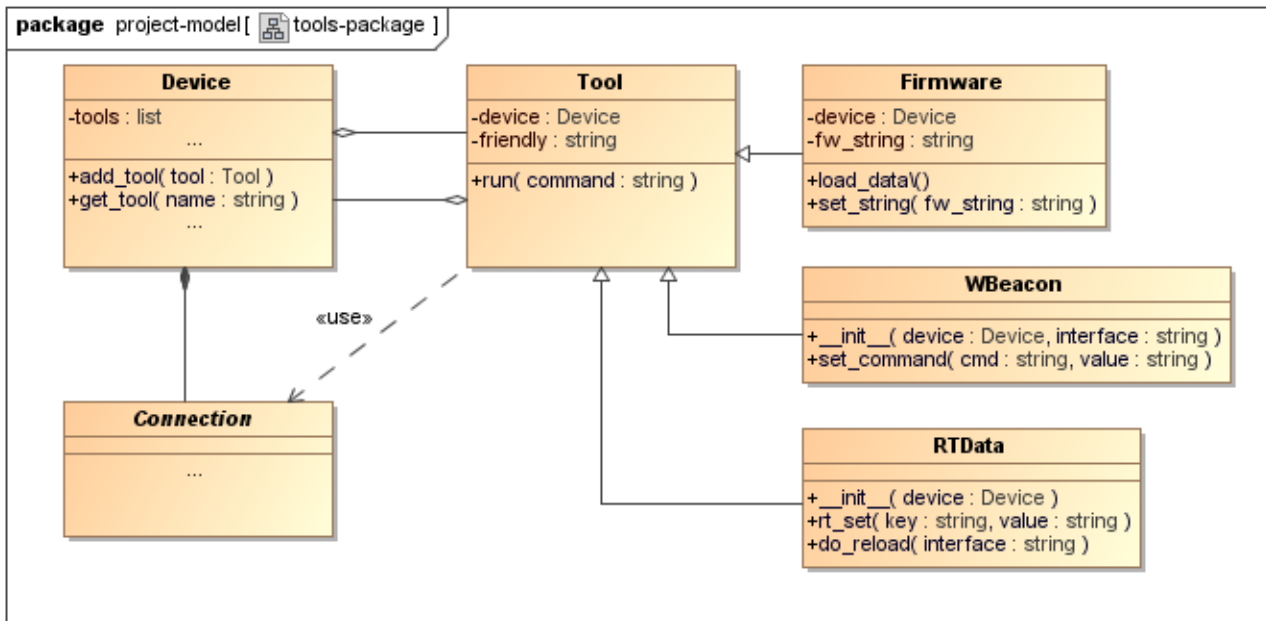
Šiame pakete realizuotos TCP/IP ir nuoseklios (simbolinės) jungties komunikavimo klasės. Pakete aprašytos operacijos veikia transporto protokolo lygmenyje ir duomenų perdavimo protokolo lygmenyje. Naudojantis šiomis operacijomis gali būti užmezgama jungtis, atliekamas jungties deskriptoriaus skaitymas ir rašymas. Skaitymo rašymo metodai yra sinchroniniai.

Fabriko tipo klasė „ConnectionFactory“, veikia kaip fasadas ir leidžia sukurti jungties objektus naudojantis sistemos nustatymų failo skyriaus duomenimis.

Abstrakti „Connection“ klasė naudojama kaip sąsaja kuriant jungties klases kituose moduluose.

Pakete naudojama hierarchinė struktūra. Žemiausiame lygmenyje yra transporto (TCP) protokolo klasė „tcpsock“. Ji suteikia abstrakčią prieigą prie sistemoje naudojamų jungčių konstravimo metodų. Sekančiame lygmenyje veikia perdavimo duomenų protokolo klasės, kurios nustato duomenų perdavimo formatą tinklu. Aukščiausiame lygmenyje yra realizuotos įrenginių valdymo komandos.

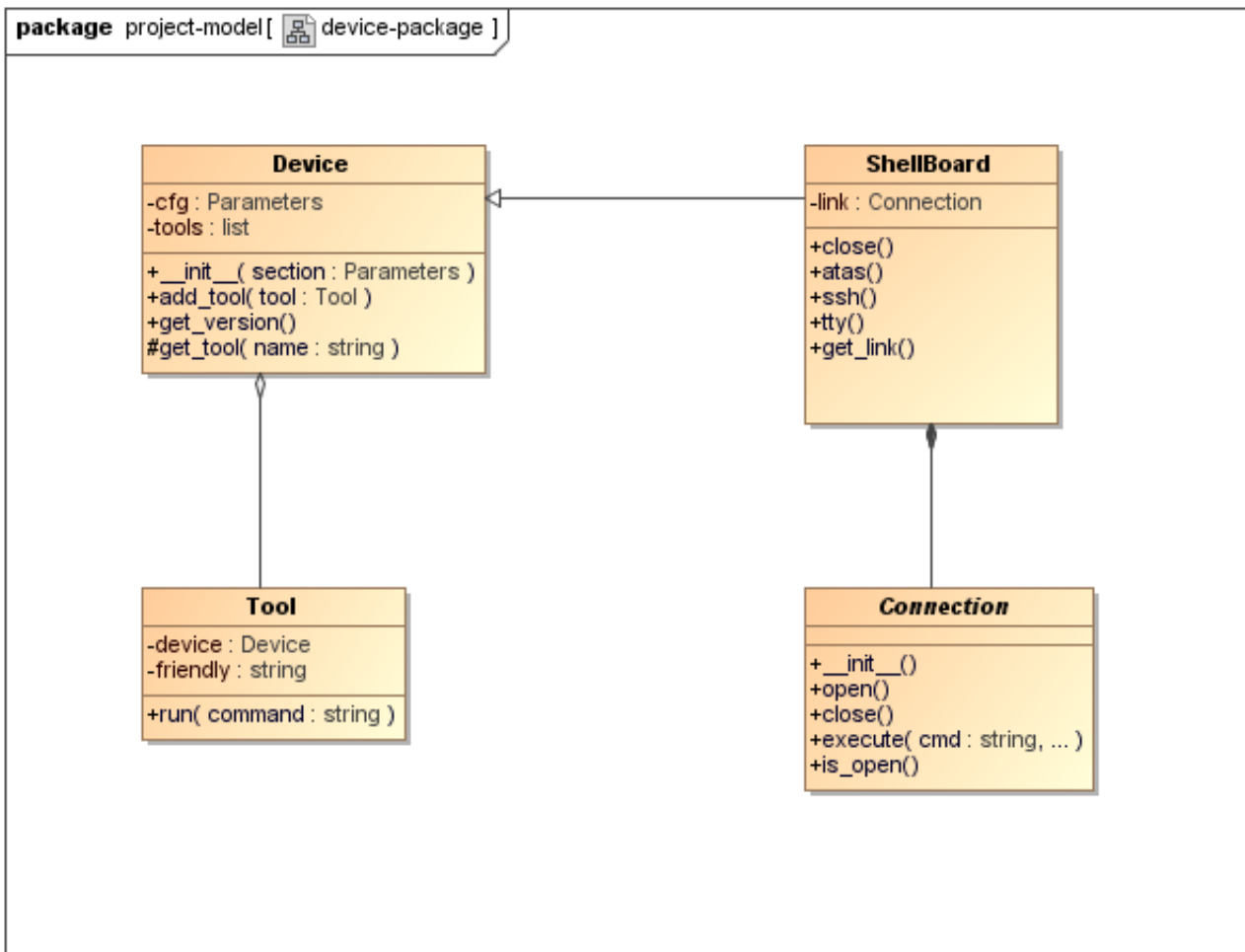
3.8.4. Paketas „tools“



3.8-4 pav. Paketo „tools“ klasių diagrama

Pakete realizuotos klasės, suteikiančios išplėstines įrenginių valdymo galimybes. Valdymas įgyvendinamas naudojantis komandinės eilutės (CLI) įrankiais. Kiekviena „tools“ modulio klasė aprašo skirtingų valdomo įrankių specifiką – duomenų formavimą ir rezultatų skaidymą, bei paslepia manipuliavimo taisykles. Modulio klasėse laikomasi politikos, kad visos įrankių klasės yra tarpusavyje nepriklausomos, o įrankio vartotojui privalu nustatyti pačiam kokius įrankius pridėti naudojimui vykdymo metu. Bendradarbiaujant su jungties ir įrenginio objektais, refleksijos pagalba, šios klasės papildo jungties objekto teikiamų funkcijų aibę.

3.8.5. Paketas „device“

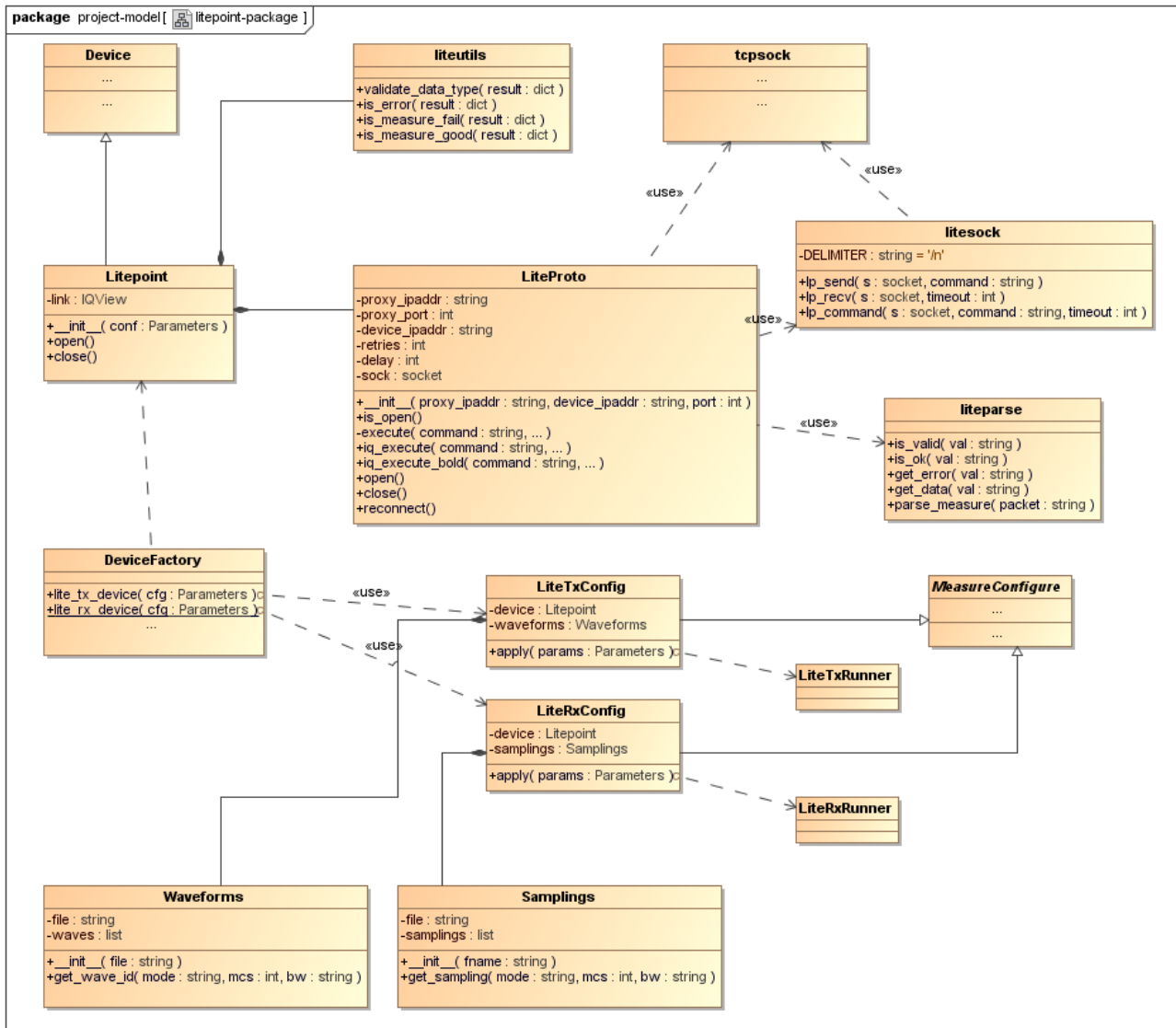


3.8-5 pav. Paketo „device“ klasių diagrama

Pakete saugoma abstraktaus įrenginio koncepcija. Įrenginys gali būti virtualus, neturintis sąsajų su išore arba gali atspindėti realų įrenginį leidžiant sudarant jungtis su šiuo įrenginiu. Ši architektūra leidžia prisidėti norimą įrenginio tipą ir realizuoti jam jungties bei įrankių klases. Įrenginio klasės yra aukštesnio komunikavimo lygio klasės, jose realizuoti metodai skirti sukurti jungties objektą į specifinį įrenginį. Taip pat apibrėžiama, kokie manipuliavimo įrankiai ar funkcijų rinkiniai bus naudojami valdant įrenginį. Naudojama įrenginių klasių kūrimo politika, kurioje atsižvelgiant į panaudojimo kontekstą (pvz. RF matavimai). Taigi žinant kontekstą, kuriama nauja įrenginio klasė su specifinėmis valdymo funkcijomis.

Įrenginio klasė turi jungties ir pridėtų įrankių objektus. Refleksijos pagalba jungties ir įrankių klasių metodai tampa tiesiogiai prieinami įrenginio klasės vartotojams.

3.8.6. Paketas „litepoint“



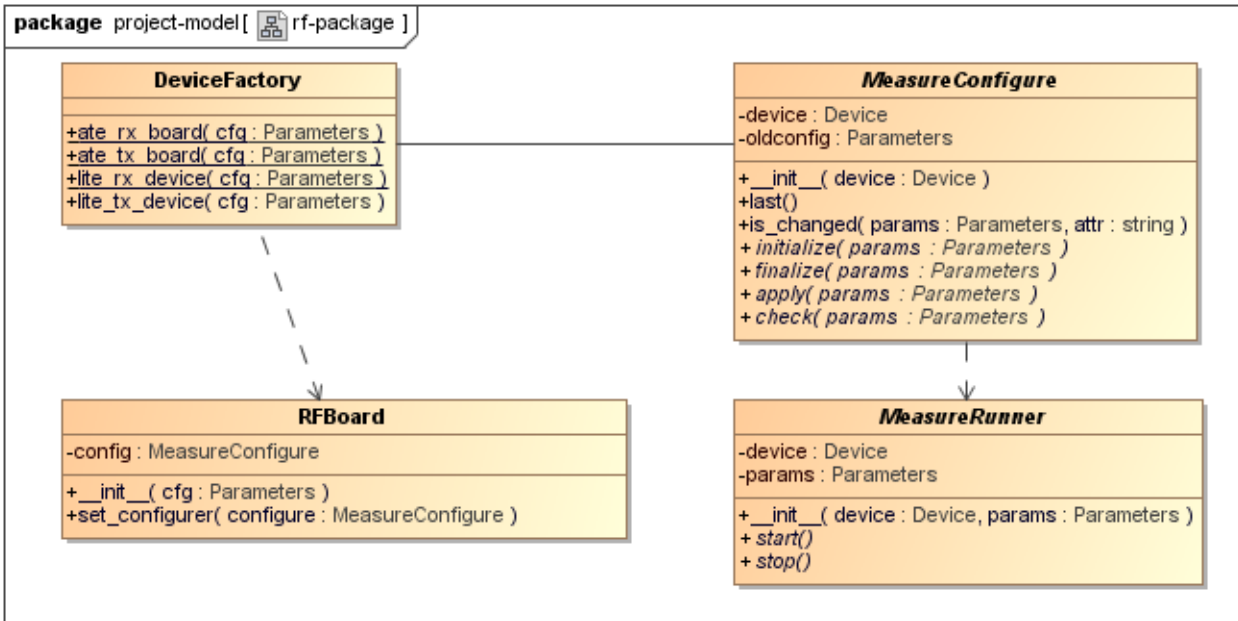
3.8-6 pav. Paketo „litepoint“ klasių diagrama

Šiame pakete realizuotas Litepoint „IQView“ matavimo įrenginio valdymas. Realizacija apima duomenų protokolą, įrenginio konfigūravimą, pagalbinės įrenginio nustatymų klases.

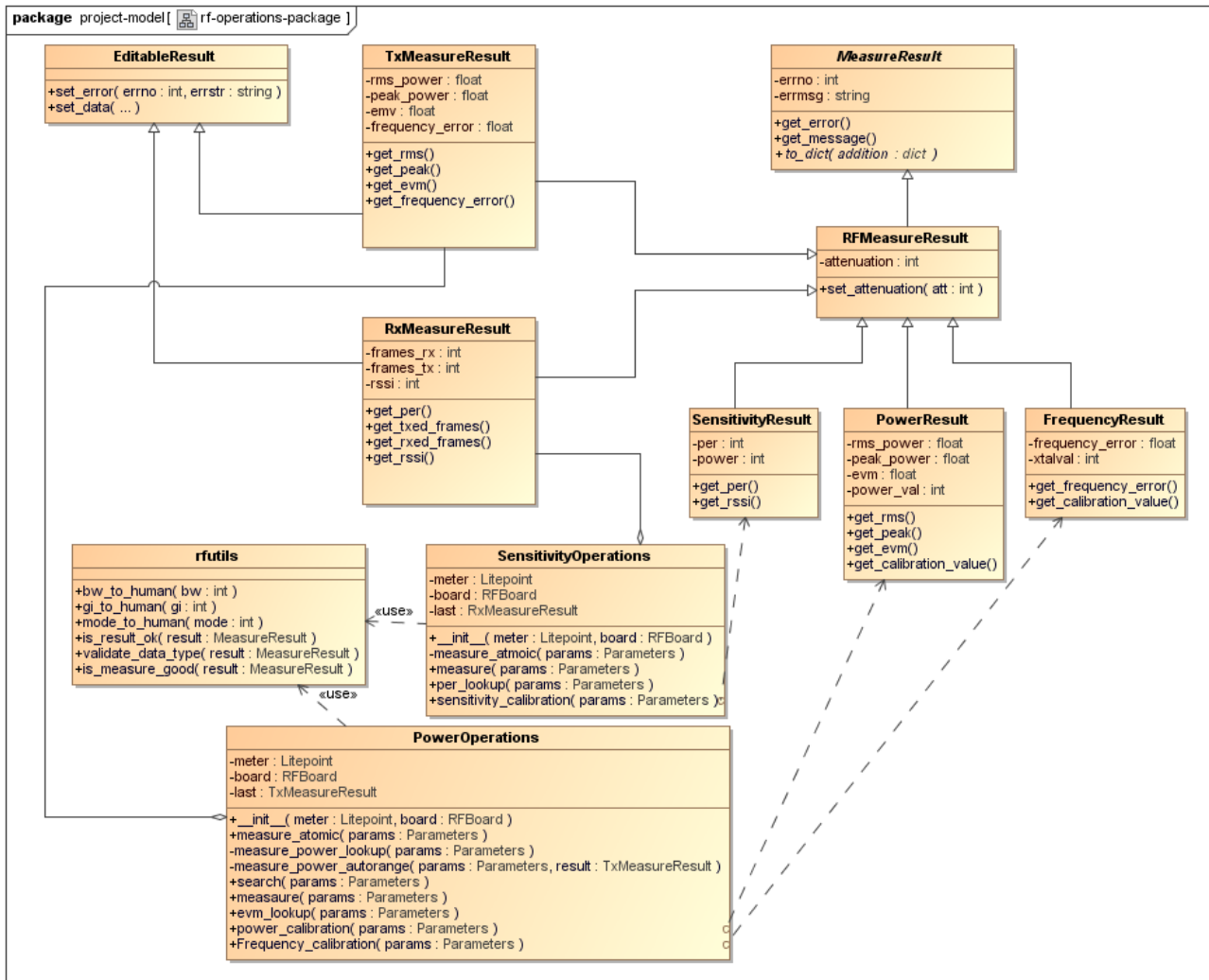
Matavimo įrenginys valdomas naudojantis komunikacijos tarpininko pagalba. Šiai komunikacijai realizuotas valdymo protokolas. Realizuotos aukštesnio lygio „Litepoint IQView“ įrenginio konfigūravimo ir valdymo klasės „LiteTxConfig“ ir „LiteRxConfig“ greitam įrenginio konfigūravimui. Pagalbinės nustatymų klasėse saugomi specifiniai matavimo parametrai:

- „Samplings“ saugo ir išrenka VSA signalo matavimo trukmes pagal naudojamus radijo parametrus.
- „Waveforms“ saugo ir išrenka VSG generuojamų signalų numerius pagal naudojamus radijo parametrus.

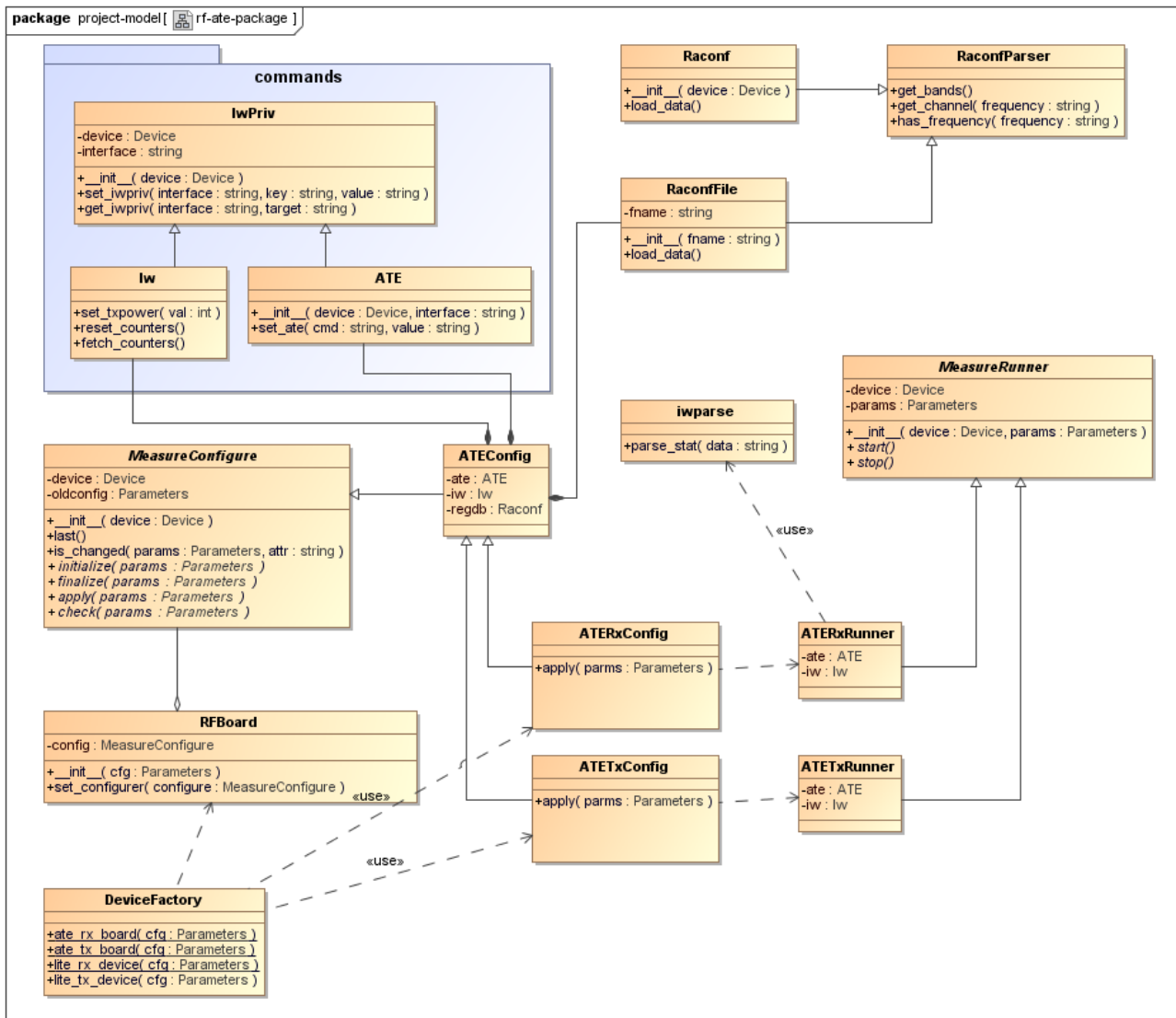
3.8.7. Paketas „rf“



3.8-7 pav. Paketo „rf“ abstrakti RF matavimo įrenginių konstravimo klasių diagrama.



3.8-8 pav. Paketo „rf“ matavimo algoritmų ir rezultatų struktūrų klasių diagrama.



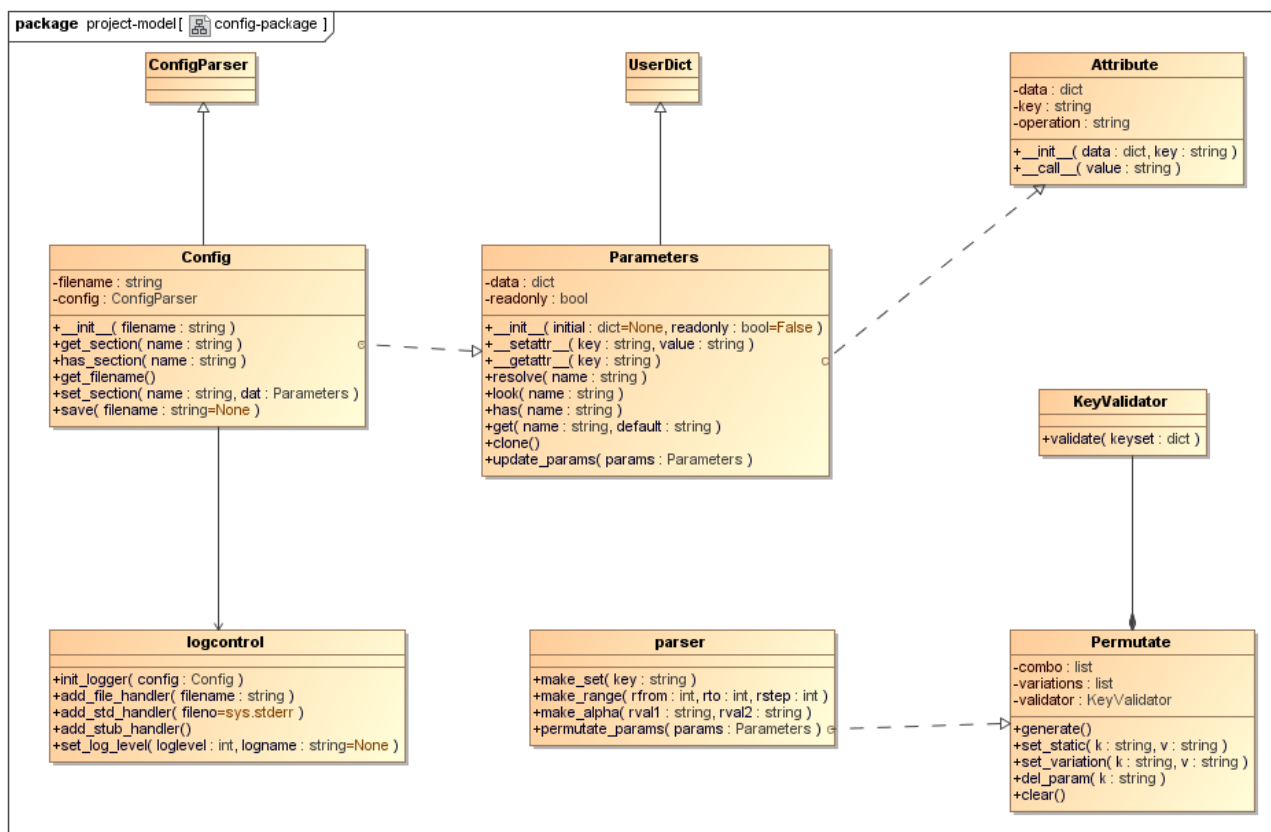
3.8-9 pav. Paketo „rf“ įrenginių naudojančių ATE valdymo sistemę klasių diagrama.

Paketas skirtas struktūrų ir metodų saugojimui susijusių su bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo ir imtuvo derinimo procesu. Realizuoti metodai suteikia prieigą prie įrenginio RF resursų, bei leidžia atlikti signalų matavimus. Siųstuvo ir imtuvo charakteristikų matavimo ir derinimo metodai realizuoti klasėse „SensitivityOperations“ ir „PowerOperations“. Kiekvieno derinimo metodo duodamas rezultatas priklauso nuo matavimo aprašymo, todėl naudojama atskiros rezultatų struktūros rezultatams saugoti. Paketas formuojamas taip, kad ateityje būtų lengviau pridėti kitų matuojamų įrenginių valdymo metodus.

Sistemoje naudojamas ATE tipo įrenginių valdymas. Šių įrenginių valdymui naudojama vidinis RF paketas, skirtas tik ATE įrenginių valdymo taisyklėms saugoti. ATE pakete aprašytas įrenginio valdymas derinimo kontekste: realizuotos įrenginio konfigūravimo klasės, pagalbinių duomenų gavimo klasės, bei bazinės valdymo procedūros.

Pavaldimos klasės naudojamos iš „connection“, „device“, „tools“ paketų. Realizuota fabriko tipo klasė, kuri naudodamasi sistemoms nustatymų duomenimis sukonstruoja naują RF įrenginio objektą.

3.8.8. Paketas „configuration“

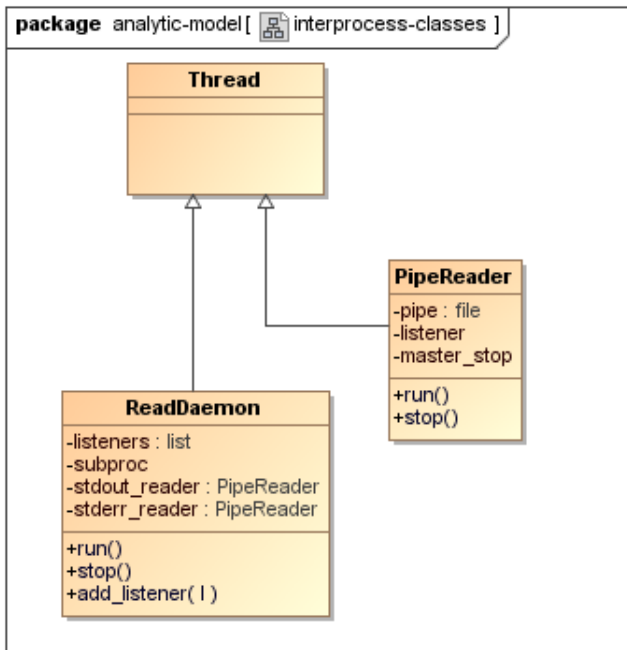


3.8-10 pav. Paketo „configuration“ klasių diagrama

Modulyje realizuotos sistemos konfigūracijos valdymo klasės. Kaip pagrindas, nustatymų failų skaitymui ir rašymui, naudotas standartinis python „ConfigParser“ modulis. Prieiga prie nustatymų failo duomenų teikiama per parametrų „Parameters“ tipo objektus. Pastarieji veikia kaip žodynai, tačiau papildomai leidžia prieiti prie duomenų, naudojantis objekto atributais. Nustatymų skyriaus duomenys gauti iš nustatymų failo yra tik skaitomi duomenys. Vartotojui suteikta prieiga prie „Parameters“ klasės, kur suteikiama galimybė kurti parametrų objektus, bei atlikti skaitymo ir rašymo operacijas su jais.

Šiame modulyje realizuoti pagalbiniai metodai eilutės skaidymui į duomenų masyvus. Skaidymas daromas naudojantis specialiomis eilutės notacijomis: išvardinimas, režiai ir žingsniai. Bendradarbiaujant su sekų generavimo klase, sukonstruojamos visos įmanomos parametrų variacijų aibės.

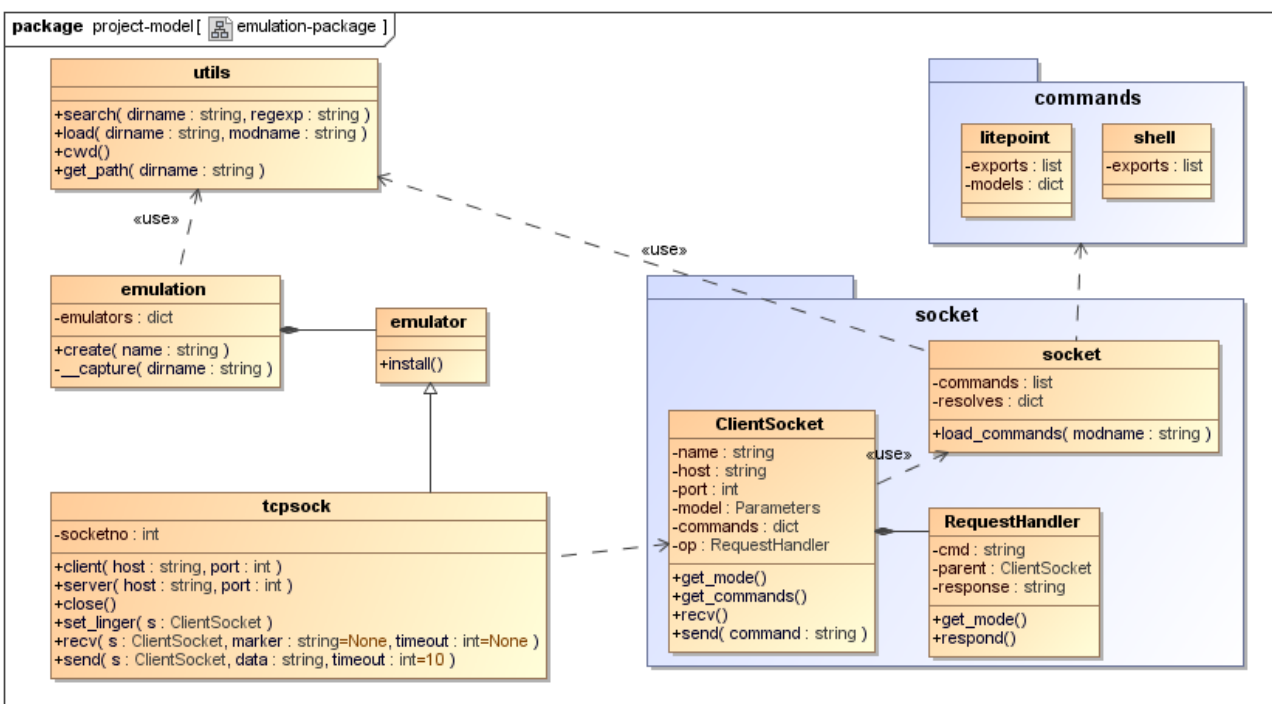
3.8.9. Paketas „interprocess“



3.8-11 pav. Paketo „interprocess“ klasių diagrama

Paketas skirtas procesų kūrimui, jų valdymui ir duomenų apsikeitimui tarp procesų. Klasės atsakingos už procesų startavimą ir duomenų nuskaitymą naudojantis vamzdžiais (angl. pipes). Duomenų skaitymas iš standartinės išvesties ir klaidos deskriptorių atliekamas naudojantis gijomis. Taip pat šiame pakete realizuojamas abstrakcijos lygis išsprendžia visas tarp platformų kylančius procesų komunikavimo skirtumus.

3.8.10. Paketas „emulation“



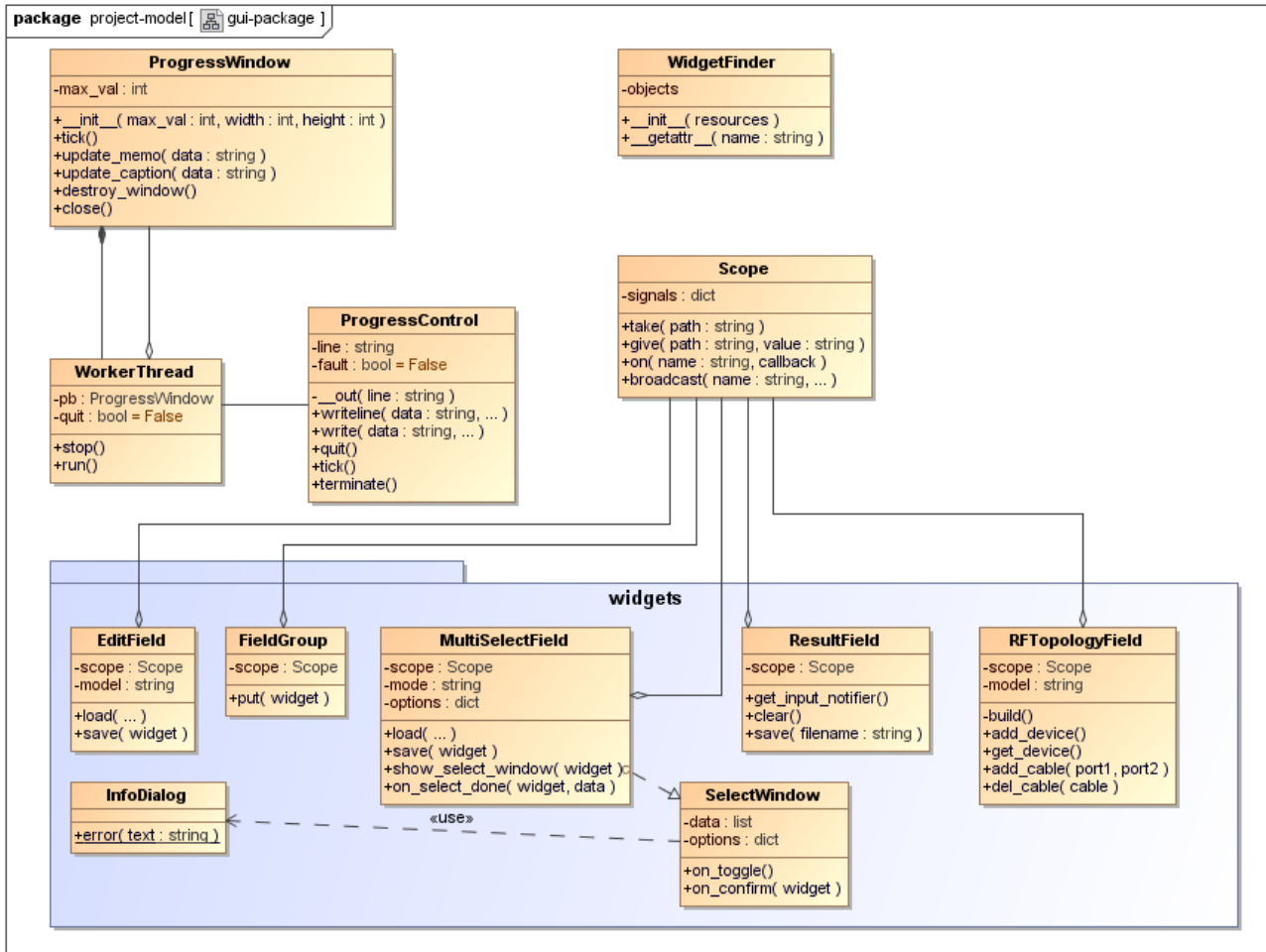
3.8-12 pav. Paketo „emulation“ klasių diagrama

Paketas skirtas savęs testavimui ir integraciniams testams. Jo tikslas yra sukurti dirbtinius metodus ir užglaistyti esamą API taip, kad PĮ galėtų dirbti be matuojamų ir matavimo įrenginių. Šiame pakete saugomi jungties lygio glaištymo metodai. Šie metodai atsižvelgia į siunčiamą komandą ir

duoda statišką atsaką. Esant poreikiui duoti dinamišką atsaką (pvz. matavimo rezultatai) naudojami rezultatų generatoriai, kurie iš surinktų eksperimentinių duomenų, gražina statistiškai teisingą rezultatą.

Vartotojui suteikiama prieiga prie emuliacijos modulių tiesiog kviečiant pagrindinio „emulation“ modulio „create()“ su norimu užglaistyti modulio vardu.

3.8.11. Paketas „gui“



3.8-13 pav. Paketo „gui“ komponentų klasių diagrama

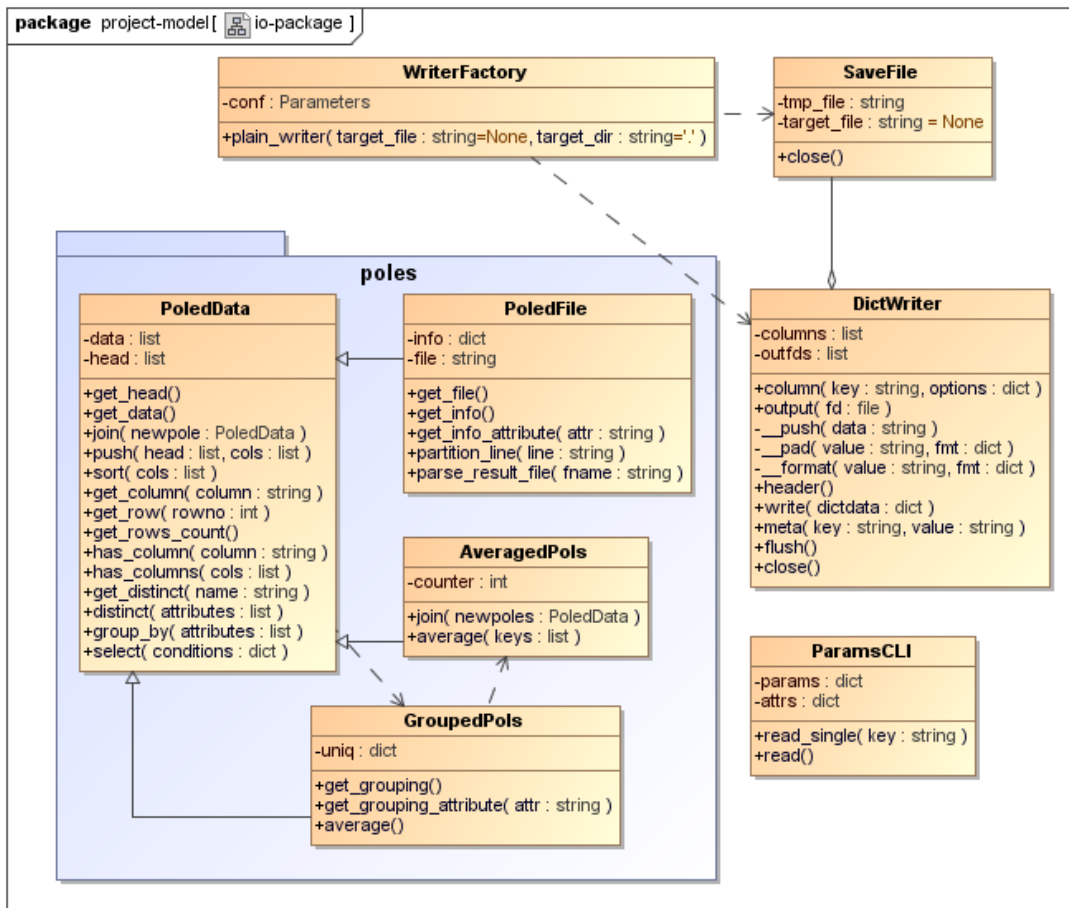
Grafinės sąsajos pakete saugomi moduliai darbu su grafine sąsaja ir grafinės sąsajos komponentai. Darbu su šiuo paketu būtina įdiegti grafinę posistemę „GTK“ su python valdymo funkcijų biblioteka „pyGTK“.

Klasėse „ProgressWindow“ ir „ProgressControl“ realizuotas langas progresui ir dalinei informacijai atvaizduoti. Progresas ir dalinė informacija atvaizduojama naudojantis komandinės eilutės rašymo operacijas.

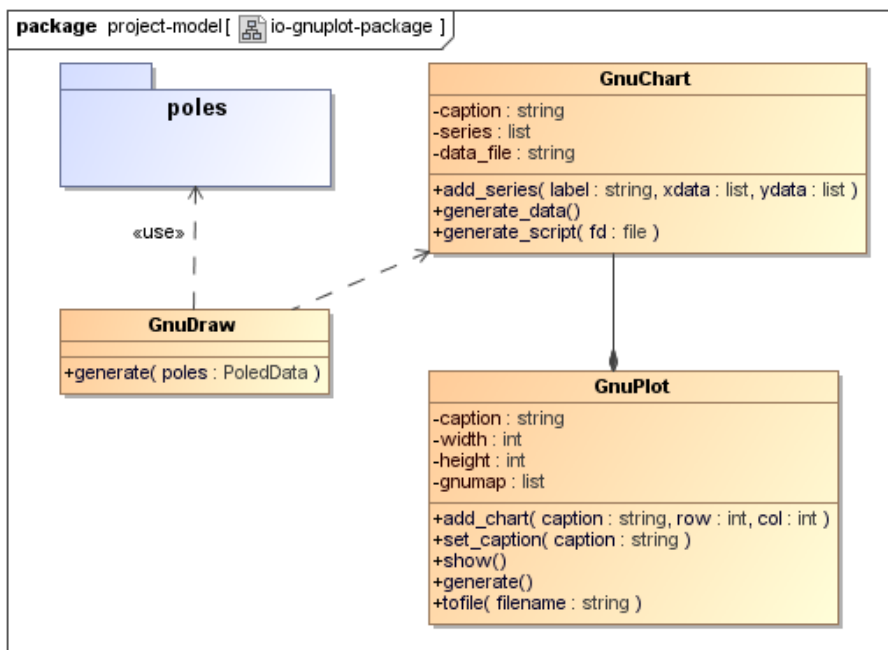
„WidgetFinder“ veikia kaip pagalbininkas ieškant ir gaunant komponentus iš GTK glade tipo failų. Prieiga prie grafinių komponentų yra per šio objekto atributus.

Realizuoti komponentai gali būti tiesiogiai pridėti į grafinę sąsają. Siekiant padaryti grafinę sąsają labiau interaktyvią pridėta „Scope“ klasė, kurioje saugomi modelio duomenys ir teikiama prieiga prie saugomų ilgų objekto atributų grandinių. Taip pat realizuotas komunikavimo mechanizmas tarp „scope“ naudojančių komponentų, pasinaudojus stebėtojo šablono idėjomis.

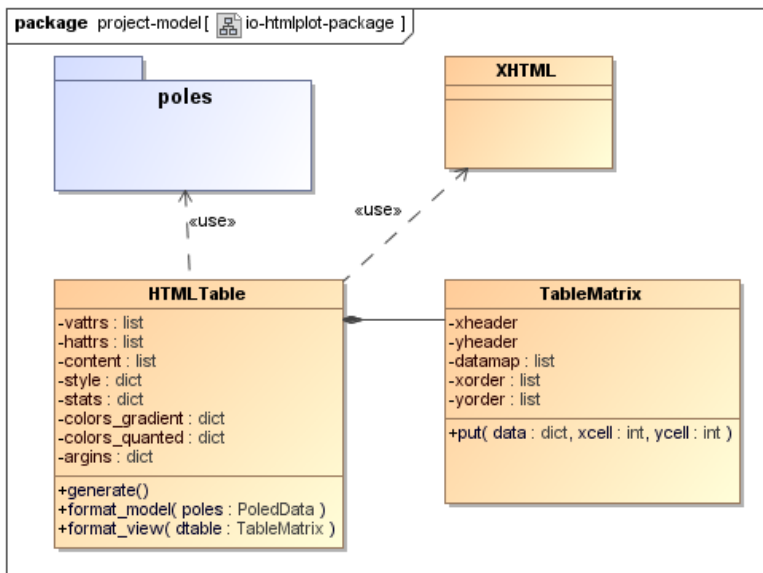
3.8.12. Modulis „io“



3.8-14 pav. Paketo „io“ failo formatavimo ir skaidymo klasių diagrama



3.8-15 pav. Paketo „io“ rezultatų išvedimo diagramomis klasių diagrama.



3.8-16 pav. Paketo „io“ rezultatų išvedimo HTML lentelėmis klasių diagrama

Pakete saugomi įvesties, išvesties, duomenų apdorojimo ir transformavimo metodai. Apdorojimo ir transformavimo klasės skirtos sistemos išvestiems tekstiniams duomenims atvaizduoti diagramų arba lentelių pavidalu.

Įvesties klasės „ParamsCLI“ tikslas – interaktyviai užklausti vartotojo įvesti trūkstantus vykdymo duomenis komandinėje eilutėje.

Išvesties klasės „DictWriter“ tikslas – suteikti konfigūruojamą sąsają rezultatų išvedimui į failą ar standartinę išvestį. Rezultatų formatas ribojamas vienu įrašu per vieną eilutę. Eilutės formatą vartotojui leidžiama koreguoti kiekvienam išvedamam atributui. Sąveikaujant su „SaveFile“ klase rezultatai automatiškai išsaugomi rezultatų faile.

Realizuotos išvestų rezultatų failų analizės klasės pavadintos „poles“. Pagrindinė „PoledData“ klasė atsakinga už duomenų skaidymą. Išskaidyti rezultatai naudojami diagramų ir HTML lentelių braižymui.

Diagramų braižymui naudojama „gnuplot“ PĮ. Ši biblioteka skirta išsibarstymo diagramų brėžimui. Ji yra programiškai valdoma – leidžiama pridėti keletą diagramų, pasirinkti diagramų išdėstymą lange, diagramose prisidėti norimą kiekį kreivių.

HTML lentelių braižymo biblioteka naudoja 3-ųjų šalių „xhtml“ turinio formavimo biblioteką. Vartotojas programiškai konfigūruoja lentelių braižymą nurodant X, Y ašių atributus, bei esminius duomenų stulpelius. Leidžiama pasirinkti lentelės langelių spalvinimo strategiją: nuosekli arba kvantuota.

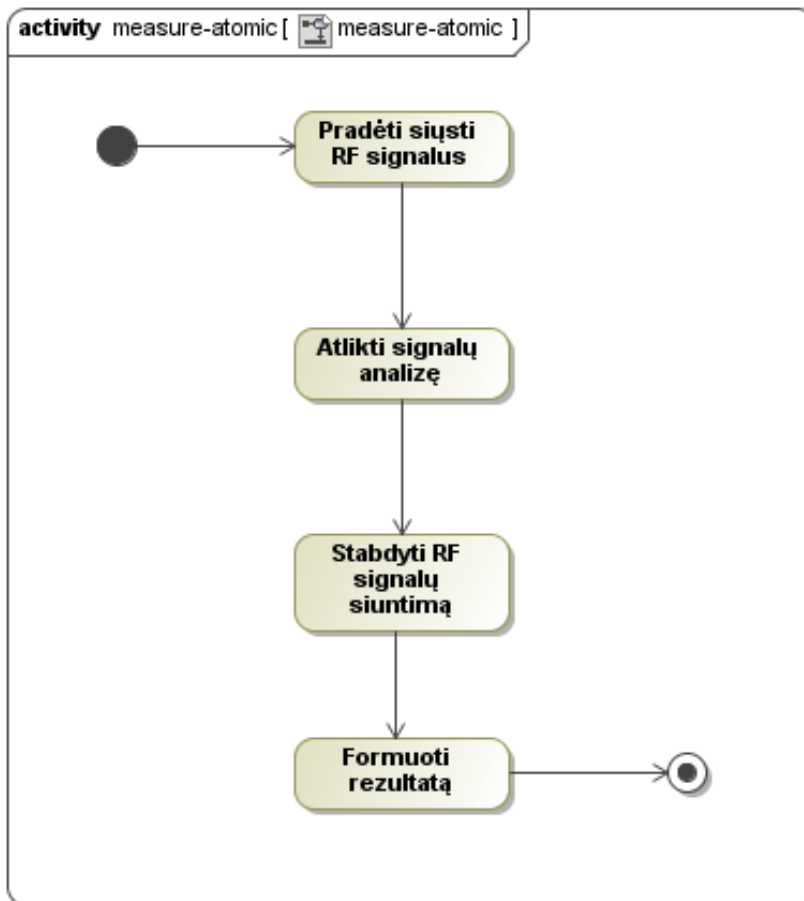
3.9. Matavimo metodai

RF signalo matavimams ir analizei atlikti nustatomas signalo siųstuvas (bevielio maršrutizatoriaus radijo siųstuvas). Siųstuvas sukonfigūruojamas siūsti nustatytą simbolių kiekį, o tuo metu atliekami RF signalo matavimai VSA įrenginiu (Litepoint „IQ View“). Atlikti matavimai duoda signalo analizės rezultatą, kuriame įvertinamos kelios signalo charakteristikos:

- EVM – signalo iškraipymai (klaidos vektoriaus ilgis).
- RMS galia – vidutinė gautų signalų galia.
- Maksimali galia – maksimali gautų signalų galia.
- Dažnio klaida – dažnio nuokrypis nuo nustatyto dažnio.

Atliekant EVM matavimo ar siųstuvo derinimo veiksmus atliekama serija signalo analizių, kurios apima imtuvo signalo paieškos, imtuvo signalo stiprumo derinimo operacijas, EVM matavimo strategijų taikymą ieškant gero išmatuoto signalo ir siųstuvo derinimo operacijas. Detalus matavimo ir derinimo metodų aprašai pateikti 2.3 skyriuje. Žemiau pateiktose veiklos diagramose (3.9-1 – 3.9-8 pav.) pateikiama kiekvienos aprašytos operacijos vykdymo schemas.

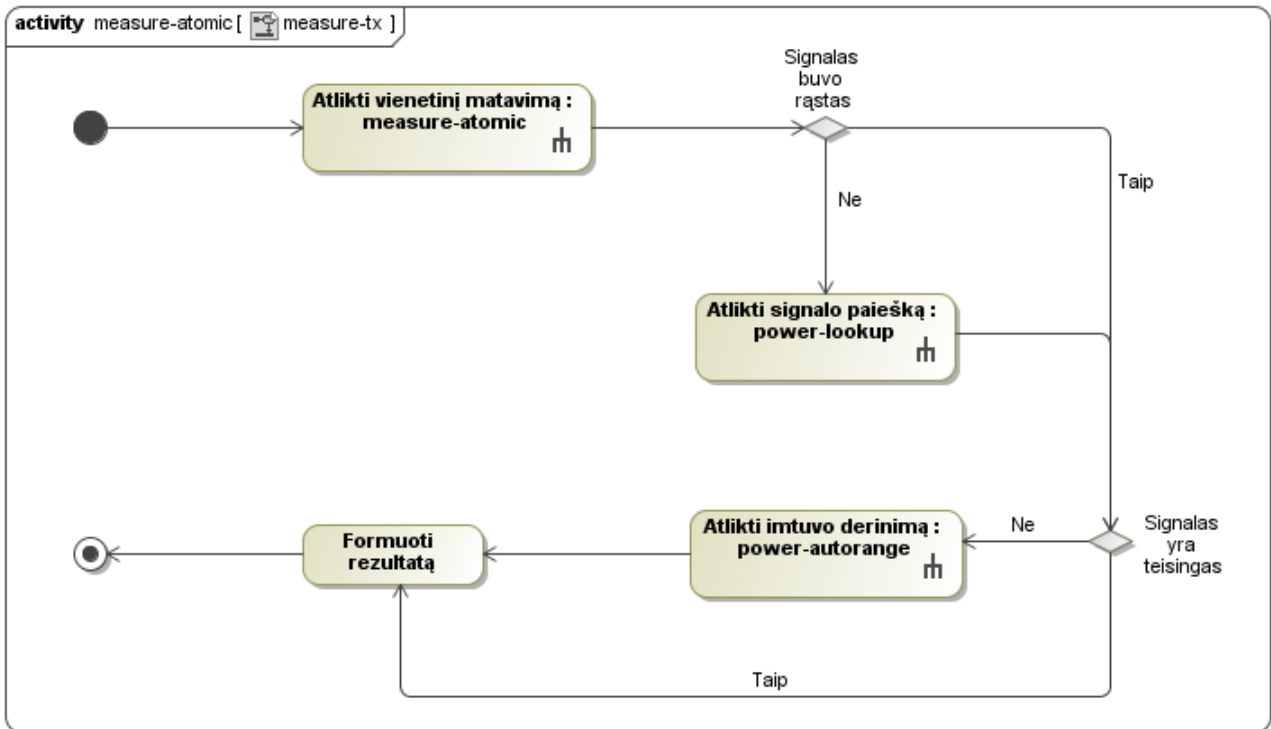
3.9.1. Vienetinis matavimas



3.9-1 pav. Vienetinio matavimo veiklos diagrama.

Vienetinio matavimo metu atliekama viena signalų analizė. Bevielio maršrutizatoriaus siųstuvui pradėjus siųsti signalus atliekamas signalų kaupimas ir jų analizė VSA įrenginyje. Išanalizuoti duomenys gražinami į derinimo sistemą ir stabdomas signalų siuntimas. Suformuojama rezultatų struktūra ir atiduodama tolimesniam apdorojimui. Veiklos diagrama pateikta paveiksle (3.9-1 pav.).

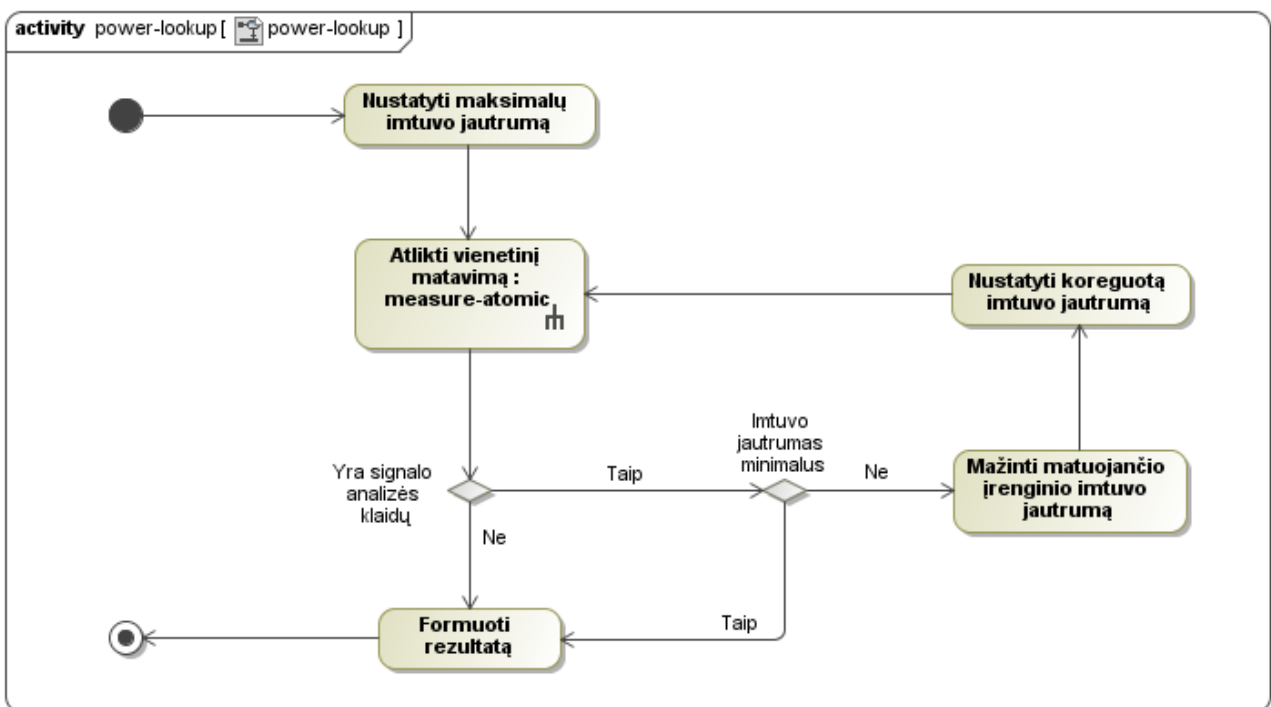
3.9.2. Gero signalo matavimas



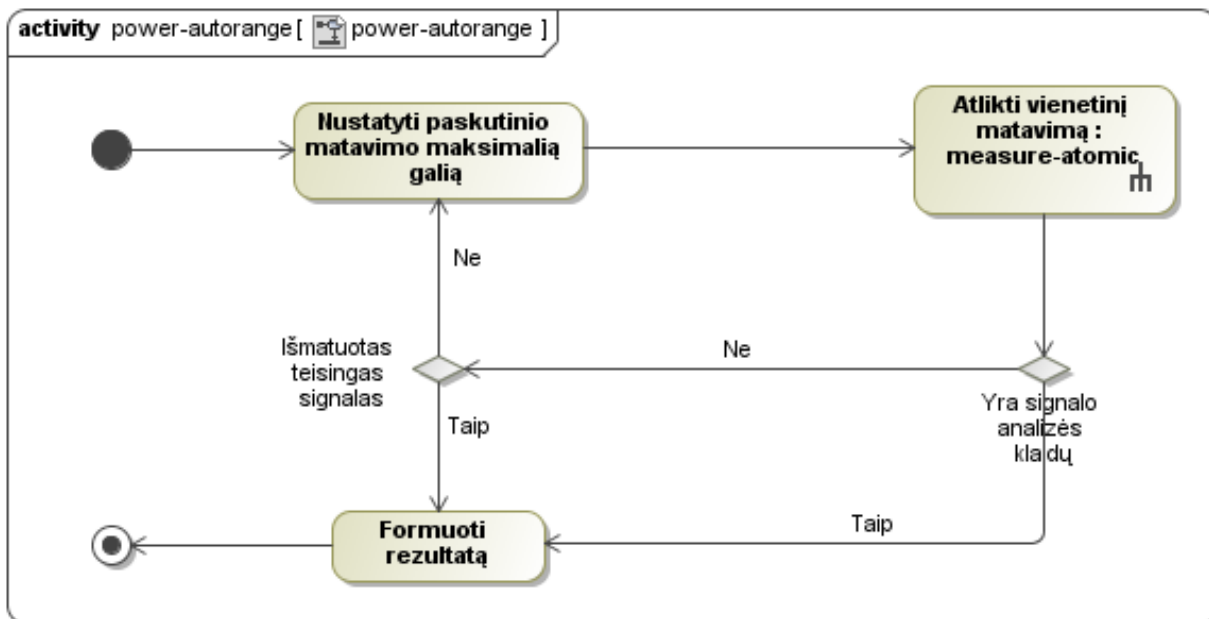
3.9-2 pav. Gero signalo išmatavimo veiklos diagrama.

Atlikus signalo matavimą, šis gali būti nerastas arba išmatuotas neteisingai. Pirmo vienetinio matavimo rezultatai analizuojami ir jei signalas nėra rastas atliekamas imtuvo rėžių derinimas signalo paieškai. Kai signalas randamas, tikrinama ar signalas yra tiksliai išmatuojamas. Jei nustatoma, kad signalas išmatuojamas netiksliai, vykdoma pakartotinė signalų analizė su koreguotais imtuvo galios rėžiais. Gero signalo matavimo veiklos diagrama pateikta paveiksle (3.9-2 pav.).

3.9.3. Imtuvo rėžių derinimas



3.9-3 pav. Imtuvo rėžių derinimas tinkamo signalo paieškai veiklos diagrama.

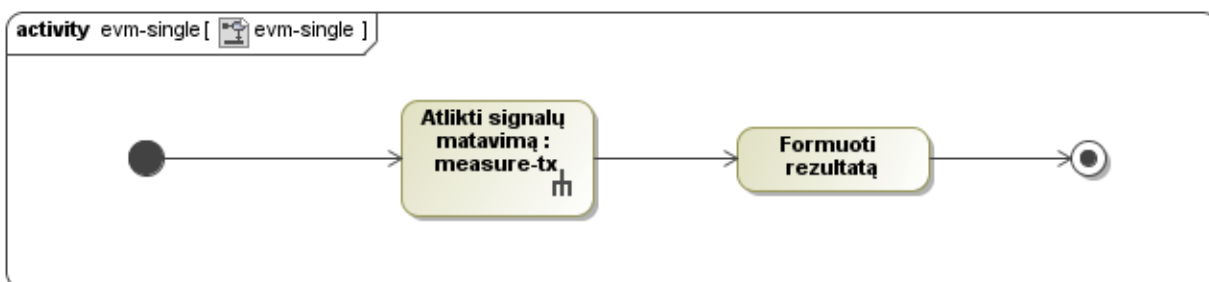


3.9-4 pav. Imtuvo rėžių derinimas tinkamai signalo galiai veiklos diagrama.

Imtuvo rėžių derinimas tinkamo signalo paieškai pateiktas paveiksle (3.9-3 pav.). Šioje grandinėje atliekami pakartotiniai signalo matavimai ir bandoma rasti signalą tinkamą apdorojimui. Patekus į šią grandį, iš karto pradedama signalo paieška – nustatoma maksimali imtuvo galia, atliekamas vienetinis matavimas, ir mažinama galia iki nustatytos ribos tol, kol randamas signalas. Radus signalą suformuojama rezultatų struktūra ir ši gražinama tolimesniam apdorojimui.

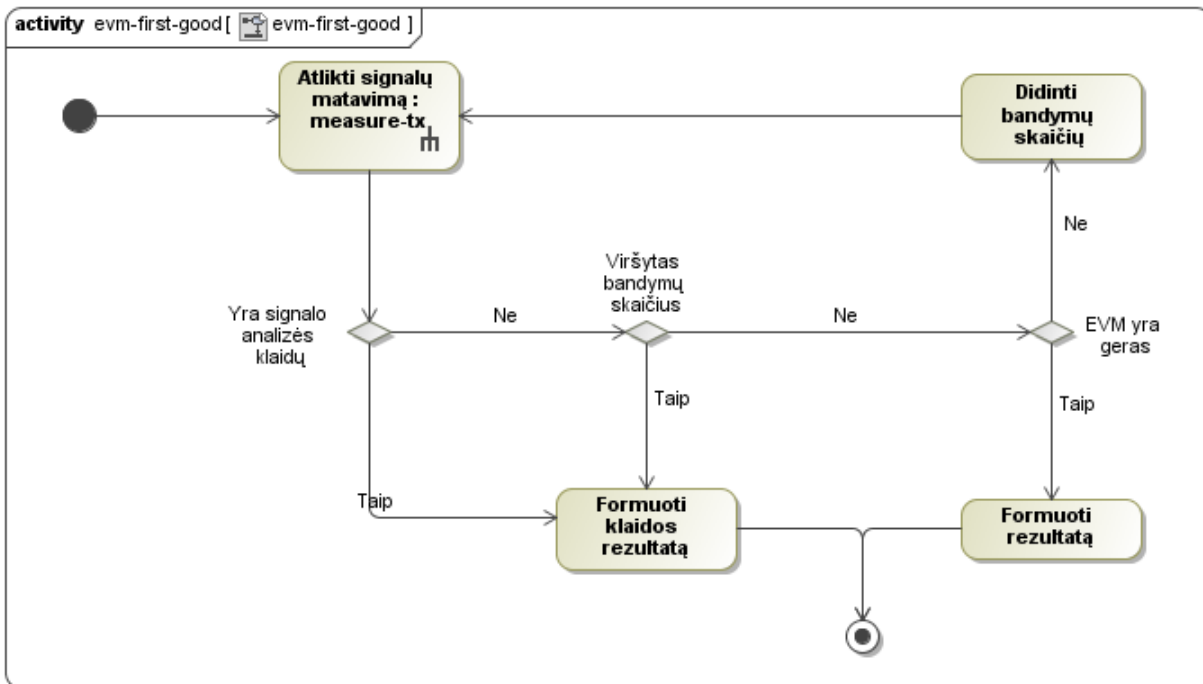
Imtuvo rėžių derinimas tinkamai signalo galiai rasti pateiktas paveiksle (3.9-4 pav.). Šioje grandinėje atliekami pakartotiniai signalo matavimai, kol nustatoma, kad rasta signalo galio yra tinkama apdorojimui. Patekus į šią grandinę iš karto pradedamas siųstuvo rėžių derinimas – nustatoma paskutinio matavimo metu gauta maksimali galia ir atliekami signalų matavimai tol, kol signalo galia tampa tenkinama. Radus tokią galią suformuojamas rezultatas ir atiduodamas tolimesniam apdorojimui.

3.9.4. EVM matavimo strategijos



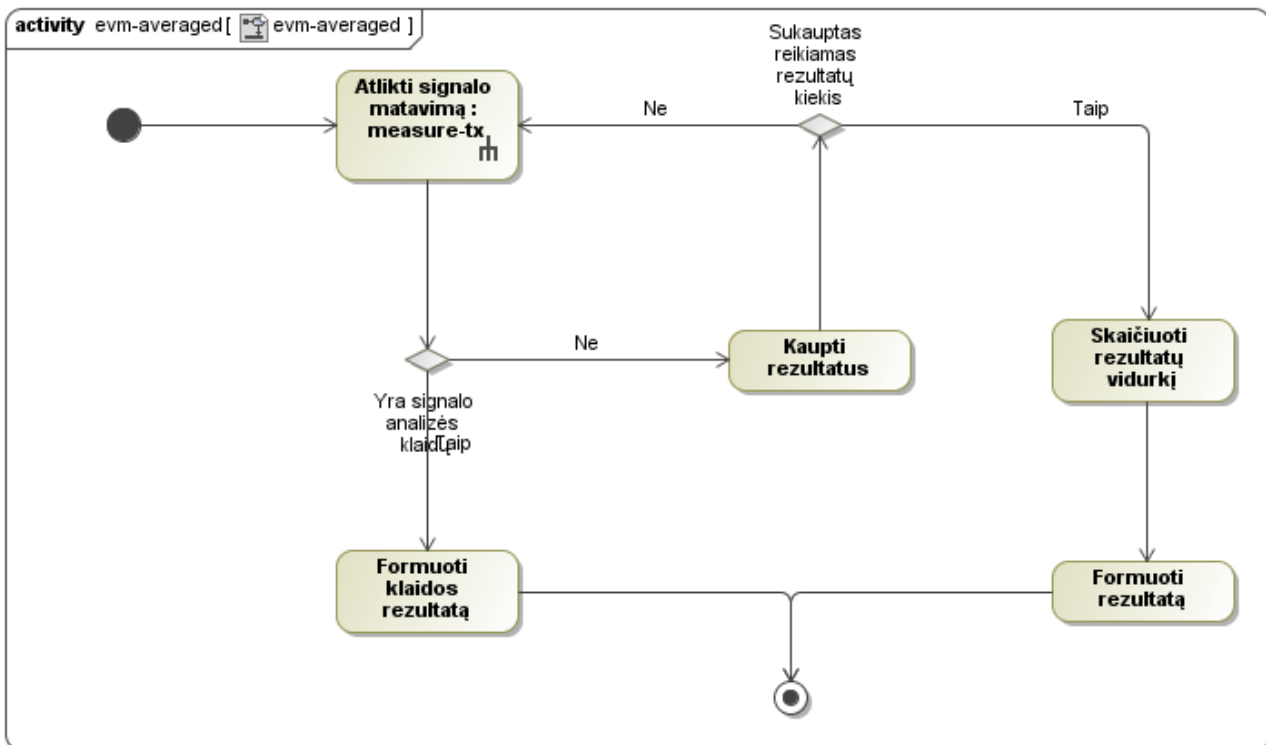
3.9-5 pav. EVM paieškai taikomos „vienetinės“ strategijos veiklos diagrama.

Matavimo strategijos „single“ veiklos diagrama pateikta paveiksle (3.9-4 pav.). Naudojant šia strategiją atliekama viena signalų analizė. Tikrinamas signalo teisingumas ir, jei reikia, vykdomas imtuvo rėžių derinimas. Atlikus matavimą suformuotas EVM matavimo rezultatų objektas atiduodamas tolimesniam apdorojimui.



3.9-6 pav. EVM paieškai taikomos „pirmas-geras“ strategijos veiklos diagrama.

Matavimo strategijos „first-good“ veiklos diagrama pateikta paveiksle (3.9-6 pav.). Naudojant šią strategiją atliekamos pakartotinės signalų analizės, kol randamas rezultatas, tenkinantis užduotą EVM ribą. Išmatavus tinkamą signalą, formuojamas EVM matavimo rezultatų objektas ir šis atiduodamas tolimesniam apdorojimui. Jei geras EVM signalas nerandamas per nustatytą skaičių bandymų, formuojamas ir gražinamas klaidos rezultatas.

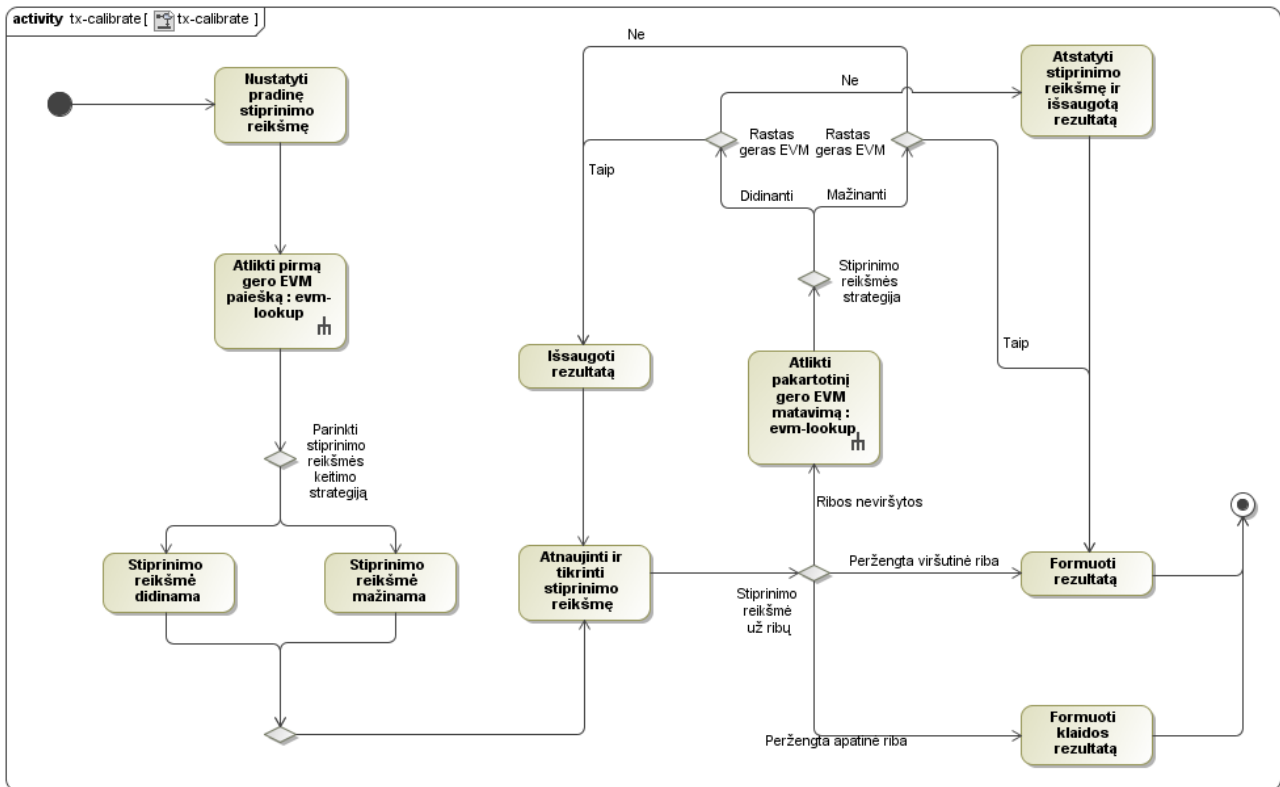


3.9-7 pav. EVM paieškai taikomos „vidurkio“ strategijos veiklos diagrama.

Matavimo strategijos „averaged“ veiklos diagrama pateikta paveiksle (3.9-7 pav.). Naudojant šią strategiją atliekamas nustatytas skaičius pakartotinių signalų analizių. Atliekant pakartotines signalo analizes rezultatai kaupiami. Surinkus nustatytą skaičių signalo analizės rezultatų, skaičiuojamas

vidurkis ir formuojami EVM matavimo rezultatų objektas, kuris perduodamas tolimesniam apdorojimui. Jei matavimo metu įvyksta matavimo klaida, formuojamas ir gražinamas klaidos rezultatas.

3.9.5. Siųstuvo galios derinimo algoritmas



3.9-8 pav. Bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo derinimo veiklos diagrama.

Derinimo algoritmo veiklos diagrama pateikta paveiksle (3.9-8 pav.). Veikla pradeda įstatant pradinę stiprinimo reikšmę. Atliekamas pirmas signalo pamatavimas naudojantis viena iš EVM strategijų, taip nustatoma stiprinimo reikšmės keitimo kryptis (didinant ar mažinant). Toliau atliekami pakartotiniai signalų matavimai ir tikrinama ar išmatuotas EVM yra leistinose ribose. Jei nustatoma, kad EVM pasiekia gera reikšmę (stiprinimo reikšmės mažinimo atveju) derinimas stabdomas ir formuojamas rezultatas. Jei išmatuojamas blogas EVM (stiprinimo reikšmės didinimo atveju), formuojamas rezultatas iš paskutinio gero matavimo reikšmės. Visais kitais atvejais tęsiamas derinimas keičiant stiprinimo reikšmę nustatyta kryptimi. Jei yra signalo analizės klaidų, formuojamas ir gražinamas klaidos rezultatas.

4. BEVIELIO MARŠRUTIZATORIAUS EVM MATAVIMŲ TYRIMAI

4.1. RF signalų EVM matavimai

Išanalizuoto RF signalo EVM yra varijuojantis dydis. Šioms variacijoms sumažinti, matavimų metu taikomos siūlomos EVM matavimo strategijos. Tyrimo tikslas yra nustatyti EVM matavimo strategijų efektyvumą ir patikimumą.

Efektyvumo tyrime gilinamasi į matavimo strategijų laikines charakteristikas. Signalų matavimų metu papildomai renkami duomenys apie matavimų vykdymo trukmę: bendra visų matavimų trukmę, vidutinė vieno matavimo trukmė, vidutinė vienos signalo analizės trukmė. Vertinant išmatuotas vykdymo trukmes privaloma atsižvelgti į kitus algoritmo žingsnius įtakojančius šį dydį: signalo analizę matavimo įrenginyje, signalo paieška, imtuvo jautrumo derinimą ir EVM matavimo strategijos algoritmą. Tiriama matavimo algoritmo ir signalo analizės įtaką bendrai matavimo trukmei.

Patikimumo matavimuose siekiama patikrinti EVM strategijų duodamų rezultatų stabilumą ir korektiškumą. EVM yra smarkiai įtakojamas nuo siūstovo galios, kuri priklauso nuo naudojamo dažnio, todėl reikia atlikti matavimus įvairiuose dažniuose. Statistiškai varijuojantis EVM yra susijęs su atsitiktinėmis matavimų klaidomis. Šių klaidų aptikimui ir vertinimui yra naudojamos standartinio nuokrypio ir koreliacijos skaičiavimo operacijos. Stabilumui įvertinti sudaromas EVM skirstinys, kuris parodys EVM variacijas pakartotiniuose matavimuose.

Atlikus RF signalų matavimus su kiekviena EVM matavimo strategija, gauti rezultatai padės įvertinti kiekvienos matavimo strategijos charakteristikas ir leis šias strategijas palyginti. Matavimo strategijų veikimo charakteristikoms sudaryti atliekami koreliacijos ir standartinio nuokrypio skaičiavimai, vertinant išmatuoto signalo EVM.

4.2. RF siūstovo galios derinimas

Bevielio maršrutizatoriaus siūstovo galios derinimo procesas yra optimizavimo uždavinys. Jo metu ieškoma didžiausios siūstovo galios su didžiausiais leistiniais signalo iškraipymais (atsižvelgiant į naudojamą MCS indeksą). Tyrimo metu siekiama patikrinti pasiūlyto bevielio maršrutizatoriaus siūstovo galios derinimo algoritmo duodamų rezultatų teisingumą ir patikimumą, taip pat patikrinti derinimo trukmes. Naudojantis atliktų EVM matavimo strategijų tyrimo duomenimis, išrenkama ir naudojama patikimiausius rezultatus duodanti EVM matavimo strategija, taip užtikrinamos minimalios EVM variacijos.

Derinimo metu renkami duomenys apie kiekvieno derinimo trukmę ir išsaugomi matavimo rezultatai (siūstovo galią ir EVM). Siūstovo derinimas vykdomas nustatytuose dažniuose. Atlikus matavimus gaunamos siūstovo galios ir EVM derinimo charakteristikos dažnių ašyje. Surinkti duomenys naudojami koreliacijos skaičiavime siekiant nustatyti rezultatų stabilumą, tikslumą. Vėliau matavimai atliekami naudojantis lustinės sistemos gamintojo pateikiama programine įranga. Šios sistemos derinimo procesas yra kitokio pobūdžio nei mano siūlomas. Derinimas vykdomas dviem žingsniais: derinama siūstovo galia – ieškoma stiprinimo konstanta tokia, kad siūstovo galia būtų kuo arčiau reikalaujamos. Antru žingsniu tikrinami signalo iškraipymai su jau suderinta maksimalia galia. Derinimai atliekami dažnių ašyje.

Siūstovo derinimai naudojantis abiem PĮ buvo atlikti tokiomis pačiomis sąlygomis (naudojamas tas pats bevielis maršrutizatorius, matavimo įranga, radijo parametrai), panaši aplinkos temperatūra. Kadangi derinimo sistemos matavimo pobūdi skiriasi – siūloma sistema ieško geriausio galios ir iškraipymų santykio –, o gamintojo sistema atlieka derinimą nustatyta galia, todėl turi būti atliekamas rezultatų suvienodinimas. Atlikus suvienodinimą rezultatų charakteristikos gali būti palyginamos. Lyginama maksimali išmatuota siūstovo galia, atsižvelgiant į signalo iškraipymus. Kaip esminis atskaitos taškas charakteristikų vertinime naudojamas siūstovo stiprinimo reikšmė. Ši reikšmė pasako, kad išmatuota galia ir signalo iškraipymai tame pačiame dažnyje turi būti vienodi arba labai panašūs nepriklausomai nuo naudojamos derinimo PĮ.

5. BEVIELIO MARŠRUTIZATORIAUS EVM MATAVIMŲ EKSPERIMENTAI

5.1. Matavimų taikant EVM strategijas eksperimentai

Šiame skyriuje bus pristatyti realizuotų EVM matavimo strategijų rezultatai, patikrintas duodamų rezultatų patikimumas, o matavimo strategijos palygintos tarpusavyje. Matavimams atlikti buvo naudotas kompiuteris, matavimo įrenginys „Litepoint IQView“ ir „Deliberant APC 5M“ bevielis maršrutizatorius. Matavimų rezultatams saugoti ir analizuoti naudota „Microsoft Excel“ programa.

5.1.1. Eksperimento eiga

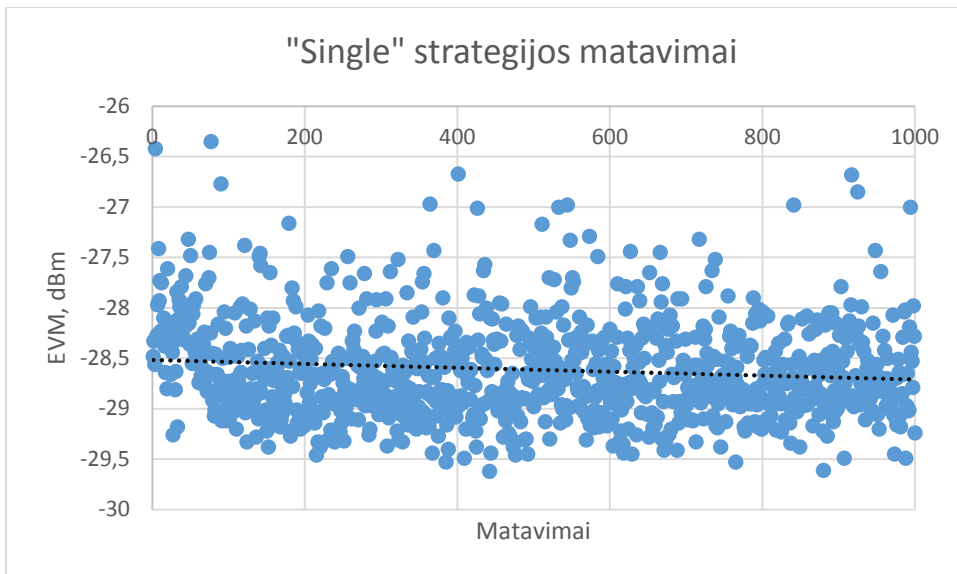
Siekiant patikrinti aprašytas EVM matavimo strategijas buvo atlikta keletas matavimų, keičiant matavimo parametrus. Siekiant, kad SNR būtų aukštas, naudojama maksimali maršrutizatoriaus radijo spinduliuojama galia. Matuojamas jau suderintas maršrutizatorius, todėl naudojantis leistinių EVM lentele (žr. 2.2-1 lentelę), nustatoma EVM viršutinė riba. Didžiausi reikalavimai taikomi aukštesnio lygio moduliacijoms, todėl nuspręsta apsiriboti tokiais matavimo parametrais:

- Matuojamas dažnių diapazonas 5GHz
- Moduliacija MCS7 (64-QAM, 5/6 CR)
- Signalo kanalo plotis 20MHz
- Apsaugos intervalas 400ns
- Kadro formatas 802.11n

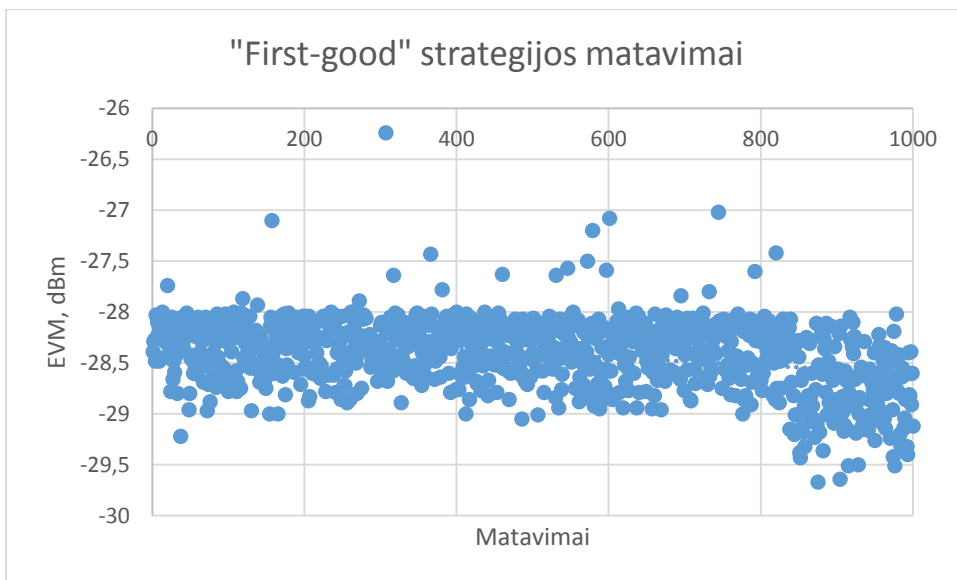
Naudojantis šiais radijo parametrai nustatyta gero EVM riba – -28 dBm. Taikant „First-good“ strategiją naudojamas 3 nesėkmingų bandymų limitas, o taikant „Averaged“ strategiją ir atliekant vidurkio skaičiavimus naudojama 10 RF signalo analizės rezultatų. Taigi, siekiant patikrinti matavimų patikimumą, rezultatų stabilumą ir palyginti matavimo strategijas, matavimai buvo išskirti į dvi grupes. Pirmoji matavimų grupė tyrė rezultatų patikimumą viename dažnyje (pasirinktas 5180 MHz dažnis). Jos metu buvo atliekama po 1000 matavimų su „Single“ ir „First-good“ strategijomis, o „Averaged“ strategijos metu buvo daroma 100 matavimų. Antroji matavimų grupė tyrė, kaip stabiliai išmatuojamos EVM charakteristikos dažnių ašyje, atliekant matavimus po 5 kartus su kiekviena strategija. Šiais matavimais siekiama patikrinti kaip stabiliai atsikartoja matavimų rezultatai realiomis sąlygomis, o renkant vykdymo trukmės charakteristikas įvertinti algoritmo efektyvumą.

5.1.2. Eksperimento rezultatai

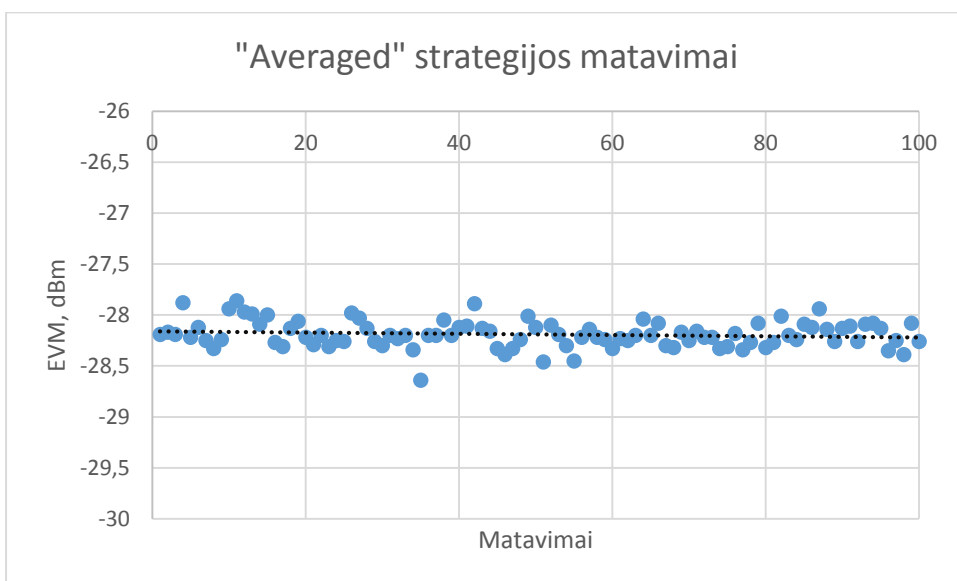
Atlikus RF signalų matavimus ir išanalizavus rezultatus, pastebėta, kad rezultatai tokie kokių ir buvo tikimasi. Matavimų rezultatai pateikti paveiksluose (5.1-1 pav., 5.1-2 pav., 5.1-3 pav.). „Single“ strategija duoda rezultatus, kurie yra labiausiai išsibarstę, o „First-good“ šiek tiek geresni. „Averaged“ strategija matuoti rezultatai turėjo mažiausią išsibarstymą. Vėliau apskaičiuotos minimalios, maksimalios reikšmės ir standartinis nuokrypis, kurie pateikti lentelėje (5.1-1 lentelė), leido patvirtinti, padarytą prielaidą. Taip pat pastebėta, kad atliktų signalų analizių skaičius per matavimą koreliuoja su standartiniu nuokrypiu. Iš to padaryta išvada, kad rezultatų patikimumas yra atvirkščiai proporcingas atliktų RF signalo analizių skaičiui per vieną matavimą. Apskaičiavus santykinį EVM rezultatų pasiskirstymą, buvo sudarytas EVM skirstinys, kuriame galima pamatyti, kad „Averaged“ strategijos rezultatai yra statistiškai išsidėstę aplink teorinę, nustatytą, EVM reikšmę (-28 dBm). Skirtingomis kreivėmis pavaizduoti skirtingų matavimo strategijų skirstiniai pateikti paveiksle (5.1-4 pav.).



5.1-1 pav. „Single“ strategijos matavimų rezultatų EVM pasiskirstymas.



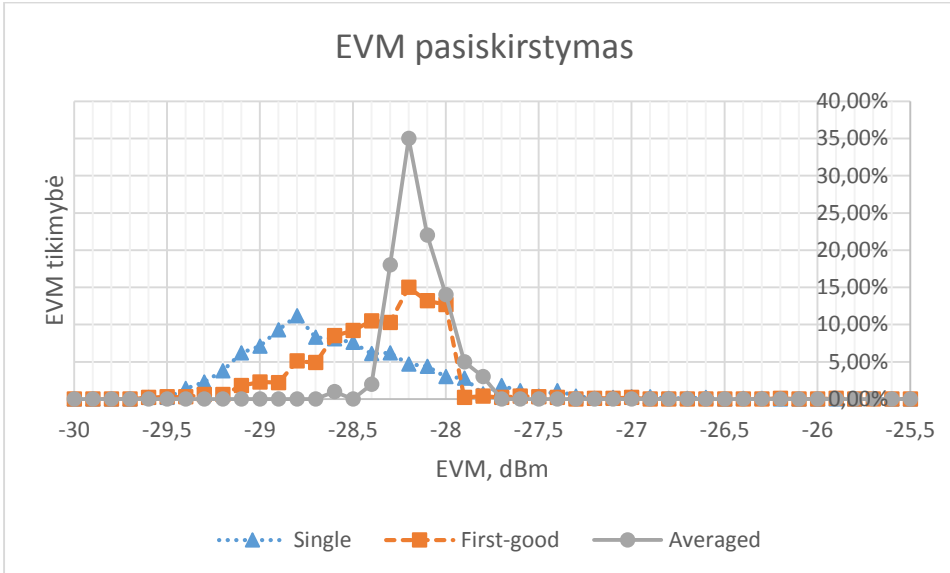
5.1-2 pav. „First-good“ strategijos matavimo rezultatų EVM pasiskirstymas.



5.1-3 pav. „Averaged“ strategijos matavimo rezultatų EVM pasiskirstymas.

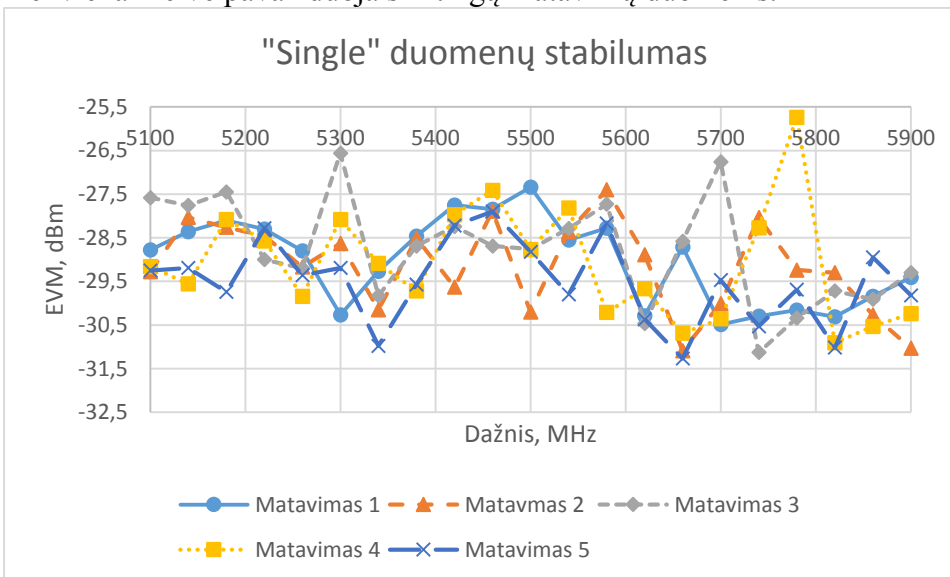
5.1-1 lentelė. Pasiūlytų EVM matavimo strategijų patikimumo charakteristikos

Strategija	Minimali EVM (dBm)	Maksimali EVM (dBm)	Standartinis nuokrypis	Analizės matavimą per
Single	-29,62	-25,72	0,492	1
First-good	-29,67	-25,97	0,351	1,55
Averaged	-28,64	-27,86	0,130	10

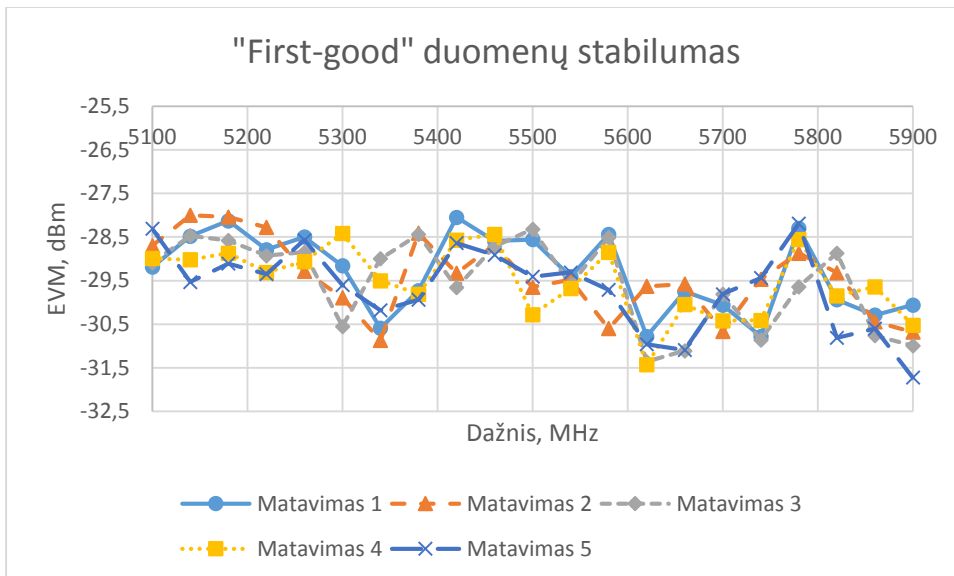


5.1-4 pav. EVM matavimo rezultatų matuojant skirtingomis strategijomis skirstinys.

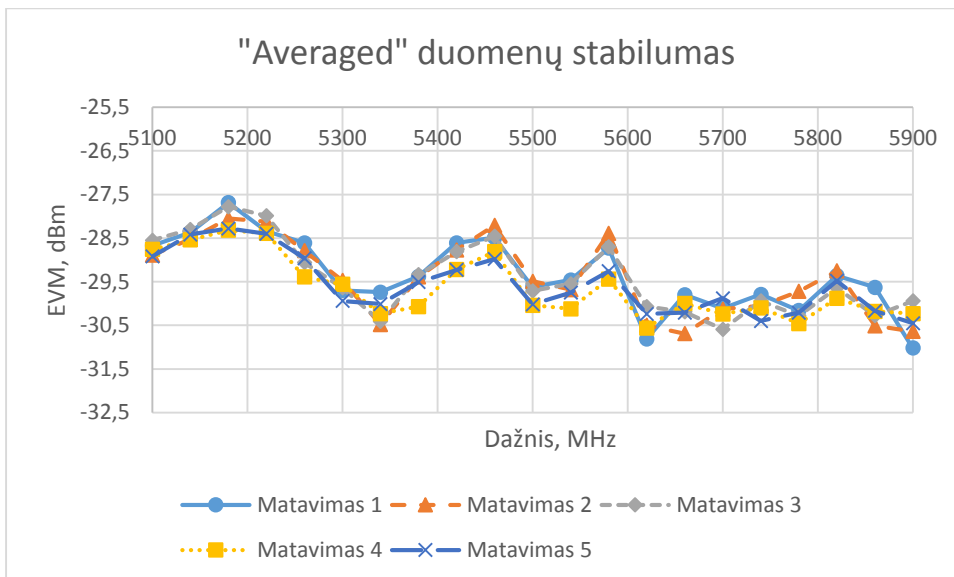
Antroje matavimų grupėje buvo atliekami RF signalai matavimai dažnių ašyje. Su kiekviena matavimo strategija atlikti 5 matavimai. Matavimų metu buvo keičiamas dažnis nuo 5100MHz iki 5900MHz, 40MHz žingsniu. Matavimų rezultatai suvesti į „Microsoft Excel“ dokumentą ir apskaičiuoti kiekvienos strategijos duotų rezultatų koreliacijos koeficientai (pateikti 3 lentelėje). Gauti rezultatai patvirtino prieš tai padarytas prielaidas ir papildė patikimumo rezultatus. „Averaged“ strategijos duoti rezultatai yra stabiliausi, o „Single“ strategijos duoti rezultatai yra labiausiai chaotiški ir neprognozuojami. Matavimų rezultatai pateikti paveiksluose (5.1-5 pav., 5.1-6 pav., 5.1-7 pav.), kur kiekviena kreivė pavaizduoja skirtingų matavimų duomenis.



5.1-5 pav. „Single“ matavimo strategijos duotų rezultatų charakteristikos.



5.1-6 pav. „First-good“ matavimo strategijos duodamų rezultatų charakteristikos.

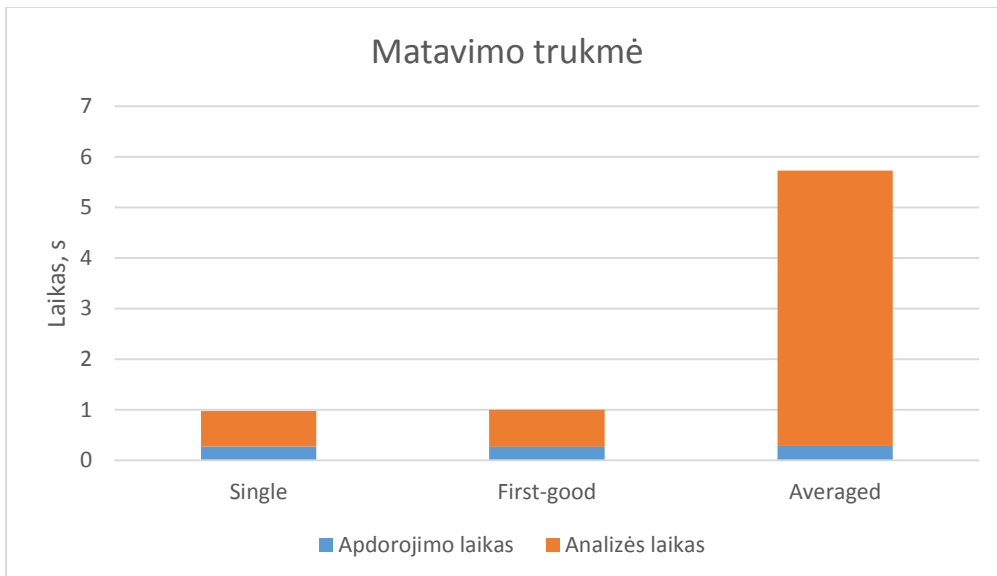


5.1-7 pav. „Averaged“ matavimo strategijos duodamų rezultatų charakteristikos.

Šiais matavimais buvo gautos ir matavimo strategijų laikinės charakteristikos, o lentelėje (5.1-2 lentelė) pateikiami strategijų efektyvumo vertinimai. Efektyvumas vertintas apskaičiavus, kiek kiekviena matavimo strategija užtrunka laiko vidiniams skaičiavimams atlikti. Strategijų laikinės charakteristikos pateiktos paveikslo (5.1-8 pav.) diagramoje. Šioje diagramoje duomenų stulpeliai atspindi naudotą strategiją, o stulpelio dedamosios dalys nurodo RF signalo analizės ir duomenų apdorojimo trukmes. Pastarojoje diagramoje pavaizduotos vidutinės strategijų matavimo trukmės, kur kiekvienas pamatavimas nuo strategijos specifikos gali turėti keletą signalo analizių. Iš rezultatų matyti, kad vykdymo laikui įtakos turi tik atliktų signalo analizių skaičius, o rezultatų apdorojimui kompiuteryje sugaištamas vienodas laikas.

5.1-2 lentelė. Pasiūlytų EVM matavimo strategijų spartos charakteristikos

Strategija	Matavimo bandymų koreliacija	Vieno matavimo trukmė (sek.)	Signalų analizės trukmė (sek.)	Rezultatų apdorojimo trukmė (sek.)
Single	0,659	0,979	0,703	0,276
First-good	0,755	1,000	0,732	0,269
Averaged	0,958	5,725	0,544	0,285



5.1-8 pav. Vieno, strategijos atliekamo, matavimo trukmė ir matavimo dedamosios. Bendra trukmė yra atliktų analizių ir rezultatų apdorojimo suma.

5.2. Siųstuvo galios derinimo eksperimentai

5.2.1. Eksperimento eiga

Pasiūlytas siųstuvo derinimo algoritmas atlieka optimizavimo užduotį – ieškoma maksimali galia, kuri neviršytų maksimalios EVM reikšmės. Kadangi EVM yra smarkiai įtakojamas aplinkos veiksnių, algoritmo duodami rezultatai tampa labai sunkiai prognozuojami, todėl sudėtingą patikrinti jo teisingą veikimą.

Supaprastinant užduotį pasirinktas jau seniau suderintas maršrutizatorius. Jo derinimo duomenys yra ištrinti, todėl derinama iš naujo ir žinoma, kad tyrime naudojama gera techninė įranga. Vadovaujantis IEEE 802.11n standartu siųstuvo derinimas turi būti atliekamas su aukščiausio lygio moduliacija, todėl radijo derinimo parametrai ir EVM riba (žr. 2.2-1 lentelę) pasirinkti tokie:

- Matuojamas dažnių diapazonas 5GHz
- Moduliacija MCS7 (64-QAM, 5/6 CR)
- Signalų kanalo plotis 20MHz
- Apsaugos intervalas 800ns
- Kadro formatas 802.11n
- EVM riba -28dBm

Siųstuvo derinimo algoritmo kokybę vertinama naudojantis derinimų metu surinktais rezultatais. Vertinime naudojamos pagrindinės matavimo metrikos, kuriomis operuoja derinimo algoritmas:

- RMS galia – reali siųstuvo galia
- EVM – klaidos vektoriaus dydis
- PCDAC – siųstuvo stiprinimo reikšmė

Pirmiausiai buvo atliekami duodamų derinimo rezultatų stabilumo tyrimai, naudojantis pasiūlytu derinimo algoritmu „pylab“. Atlikti penki siųstuvo derinimai. Kiekvienos derinimo sesijos metu buvo atliekami derinimai keliuose dažniuose. Pasirinktas dažnių režis atitinkantis EVM strategijų tyrimo režį – nuo 5100MHz iki 5900MHz, 40MHz žingsniu. Derinimų metu renkamos matavimų laikinės charakteristikos. Naudojantis surinktais derinimo rezultatais skaičiuojama kiekvienos metrikos koreliacija. Apskaičiuotas EVM vidurkis ir tikrinama, kaip tiksliai pasiekama užsibrėžta EVM riba.

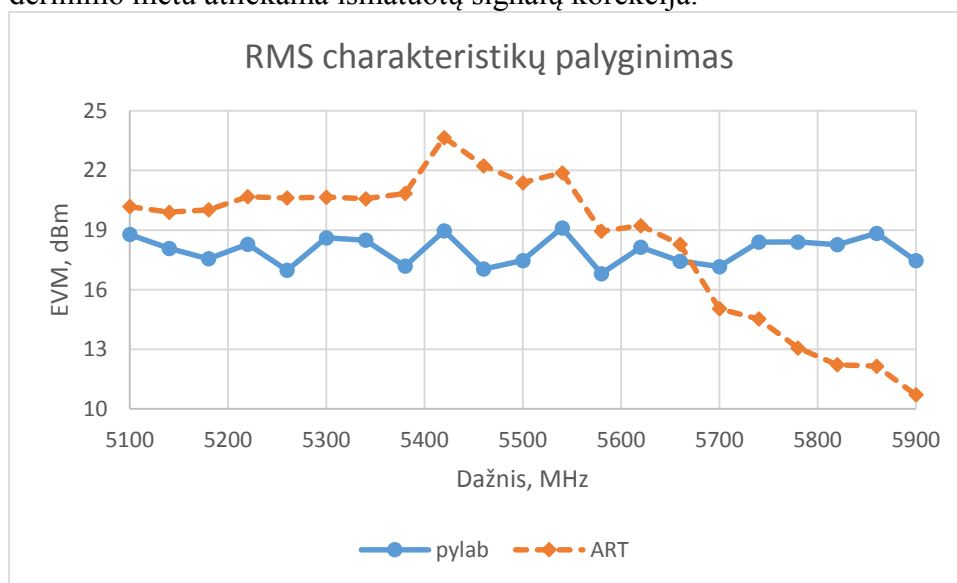
Atliktų siųsto derinimo algoritmo stabilumo matavimų nepakanka įvertinti rezultatų teisingumo. Teisingumui įvertinti turi būti daromas rezultatų palyginimas. Šiam tikslui naudojama lustinės sistemos gamintojo pateikiama derinimo PĮ „ART“ (angl. atheros radio test). Šios sistemos derinimo metodas nėra žinomas, todėl buvo atlikta derinimo procedūros analizė iš algoritmo duotų rezultatų.

Atlikus analizę nustatyta, kad derinimo algoritmo veikimas yra kitoks nei siūlomoje PĮ. Šis algoritmas vykdomas dviem žingsniais: galios priderinimu prie norimos reikšmės (20,5 dBm) ir EVM patikrinimu. Taigi mano pasiūlytas algoritmas derina siųstuvo galią naudodamasis EVM riba, o ART algoritmas atlieka galios derinimą iki nustatytos reikšmės, neatsižvelgiant į EVM, o vėliau tikrina EVM. Šiems skirtumams panaikinti atliekamas mano algoritmo rezultatų normalizavimas, naudojantis proporcija. Normalizuoti rezultatai gali būti vėliau palyginti.

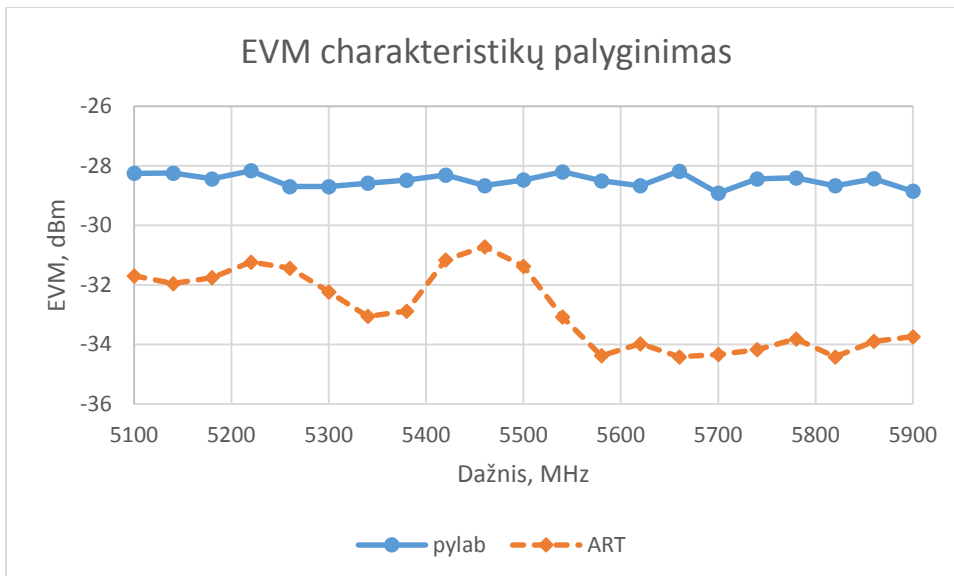
Naudojantis ART siųstuvo derinimo PĮ atlikti 5 matavimai. Renkamos pagrindinės derinimo rezultatų metrikos ir matavimų trukmė. Skaičiuojama pagrindinių rezultatų metrikų koreliacijos, kurios vėliau lyginamos su pasiūlytos PĮ matavimų koreliacijomis. Paskaičiuojamas siųstuvo RMS galios vidurkis ir tikrinama, kaip tiksliai pasiekama užsibrėžta RMS galios riba.

5.2.2. Eksperimento rezultatai

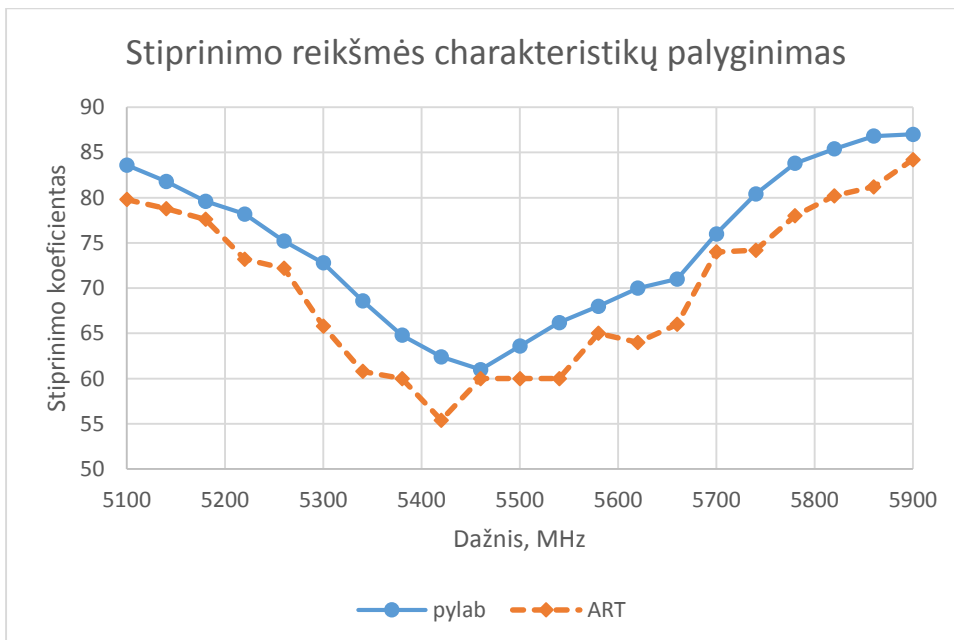
Atlikti 5 siųstuvo derinimo bandymai su pasiūlytu „pylab“ algoritmu ir 5 bandymai su „ART“ PĮ algoritmu. Suskaičiuota EVM, RMS galios, PCDAC (stiprinimo reikšmė) charakteristikų vidurkis kiekvienai sistemai. Abiejų algoritmų derinimų rezultatų lyginami paveiksluose: RMS charakteristikų (5.2-1 pav.), EVM charakteristikų (5.2-2 pav.), stiprinimo reikšmės (5.2-3 pav.). Paveiksluose matyti, kad ART algoritmu išmatuota galia yra šiek tiek didesnė, o EVM yra mažesnis, nei pylab algoritmo rezultatų. Tačiau pylab algoritmu gautų rezultatų charakteristikos mažiau svyruoja. Nors egzistuoja ryškūs EVM ir RMS charakteristikų skirtumai, stiprinimo reikšmės charakteristikos labai panašios, todėl galima preliminariai teigti, kad „pylab“ derinimo algoritmas teikia panašius rezultatus. Gauta stiprinimo reikšmės charakteristika nepaaiškina EVM ir RMS charakteristikų – su didesniais stiprinimo koeficiento įverčiais „pylab“ algoritmu išmatuojama RMS galia yra mažesnė, o EVM didesnis. Tai gali būti dėl sisteminių klaidų „pylab“ signalų analizės metode, arba ART algoritme derinimo metu atliekama išmatuotų signalų korekcija.



5.2-1 pav. Abejų (pylab ir ART) algoritmų RMS charakteristikų palyginimas.



5.2-2 pav. Abejų (pylab ir ART) algoritmų EVM charakteristikų palyginimas.



5.2-3 pav. Abejų (pylab ir ART) algoritmų stiprinimo koeficiento charakteristikų palyginimas.

Suskaičiuotos abiejų algoritmų duodamų rezultatų metrikų charakteristikų koreliacijos pateiktos lentelėje (5.2-1 lentelė). Koreliacijos rezultatai (~1) parodė, kad abu derinimo algoritmai derinimą (stiprinimo reikšmės paiešką) atlieka vienodai stabiliai, tačiau „pylab“ derinimo metodo EVM koreliacija gauta smarkiai mažesnė (~0.6) nei tikėtasi. Išanalizavus rezultatus ir peržvelgus derinimo algoritmą padaryta išvada, kad toks rezultatų nestabilumas atsiranda, dėl didelio kiekio pakartotinių EVM matavimų kiekviename dažnyje. Atliekant didelį kiekį matavimų, matavimo paklaidos smarkiau įtakoja rezultatus ir šie tampa mažiau tikslūs. Tuo tarpu ART algoritmas atlieka EVM matavimus tikrinimo metu, o tai yra tik po vieną matavimą kiekviename dažnyje, todėl rezultatų variavimo tikimybė sumažėja.

5.2-1 lentelė. Abejų (pylab ir ART) sistemų duodamų rezultatų metrikų charakteristikų koreliacijos.

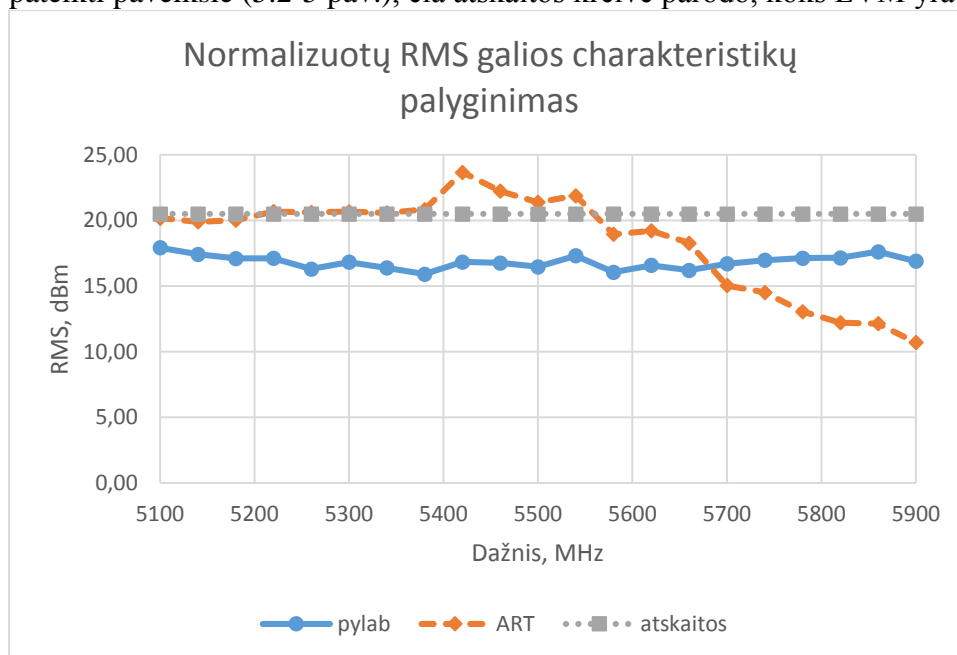
Derinimo algoritmas	EVM koreliacija	RMS koreliacija	PCDAC koreliacija
pylab	0,573	0,980	0,999
ART	0,986	0,999	0,998

Algoritmų vykdymo metu rinkti derinimo trukmės ir bandymų skaičiaus duomenys pateikti lentelėje (5.2-2 lentelė). Iš lentelės rezultatų matyti, kad pasiūlyto pylab algoritmo duomenų apdorojimo trukmė (~0,2 sek.) yra nykstamai maža lyginant su vieno derinimo trukme. Derinimas trunka labai ilgai (~22,8 sek.), dėl didelio kiekio atliktų signalo analizių. Didelis signalo analizių skaičius atsiranda, dėl naudojamos „averaged“ EVM matavimo strategijos. Jos metu atliekama po 10 signalo analizių. Ši strategija pasirinkta dėl didelio duodamų rezultatų patikimumo. „ART“ algoritmo vykdymo trukmės charakteristikos yra netikslios dėl duomenų trūkumo, todėl algoritmų palyginimas laiko atžvilgiu yra ribotas. Surinkti duomenys parodė, kad pasiūlytas derinimo algoritmas atlieka daugiau signalo analizių (908) ir todėl derinimo trukmė yra ilgesnė (~22,8 sek.) už ART PĮ algoritmo (~1,06 sek.), kurioje atliekama ~62 signalo analizės.

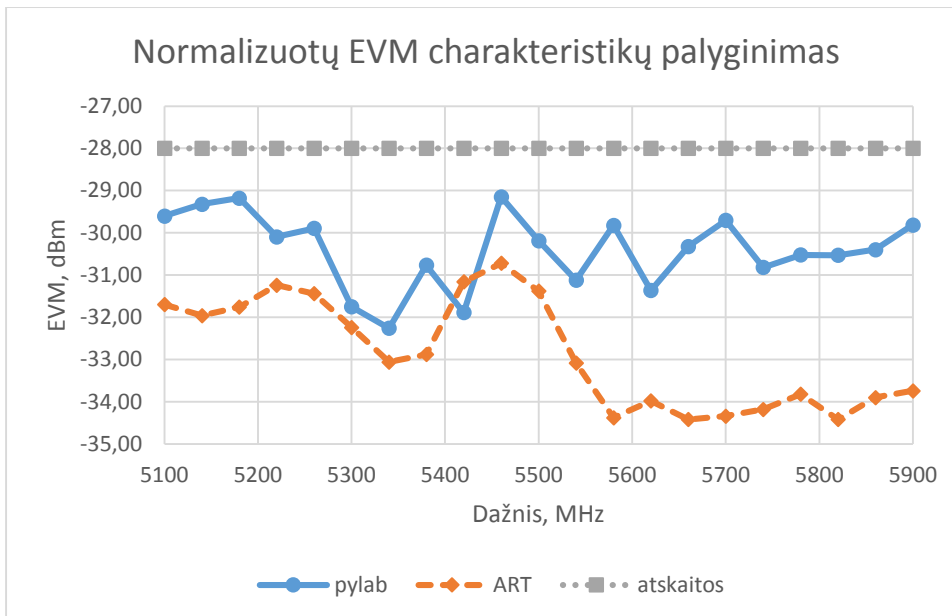
5.2-2 lentelė. Abiejų (pylab ir ART) sistemų derinimo trukmės duomenys

Derinimo sistema	Viso atliktų analizių skaičius	Vieno derinimo trukmė (sek.)	Signalų analizės trukmė (sek.)	Duomenų apdorojimo trukmė (sek.)
pylab	908	22,819	0,521	0,251
ART	62	1,060	0,774	-

Derinimo algoritmų rezultatams palyginti suskaičiuota pasiūlyto derinimo algoritmo derinimo rezultatų korekcija atsižvelgiant į siūstovo stiprinimo koeficientą, kadangi šis išlieka visuomet pastovus. Taip gaunamos preliminarios charakteristikos, kurios gali būti palygintos tarpusavyje, tačiau tokia rezultatų korekcija neatspindi tikslių EVM ir RMS dydžių verčių. Normalizuoti RMS galios charakteristikų palyginimai pateikiami paveiksle (5.2-4 pav.), čia atskaitos kreivė parodo reikalautą RMS galią, kurios buvo siekiama derinimo metu. Normalizuoti EVM charakteristikų palyginimai pateikti paveiksle (5.2-5 pav.), čia atskaitos kreivė parodo, koks EVM yra maksimalus leistinas.



5.2-4 pav. Normalizuotų RMS galios charakteristikų palyginimas. Derinimo sistemos atitinka „pylab“ ir „ART“ kreives. Atskaitos kreivė parodo kokia galia buvo tikėtasi gauti derinimo metu.



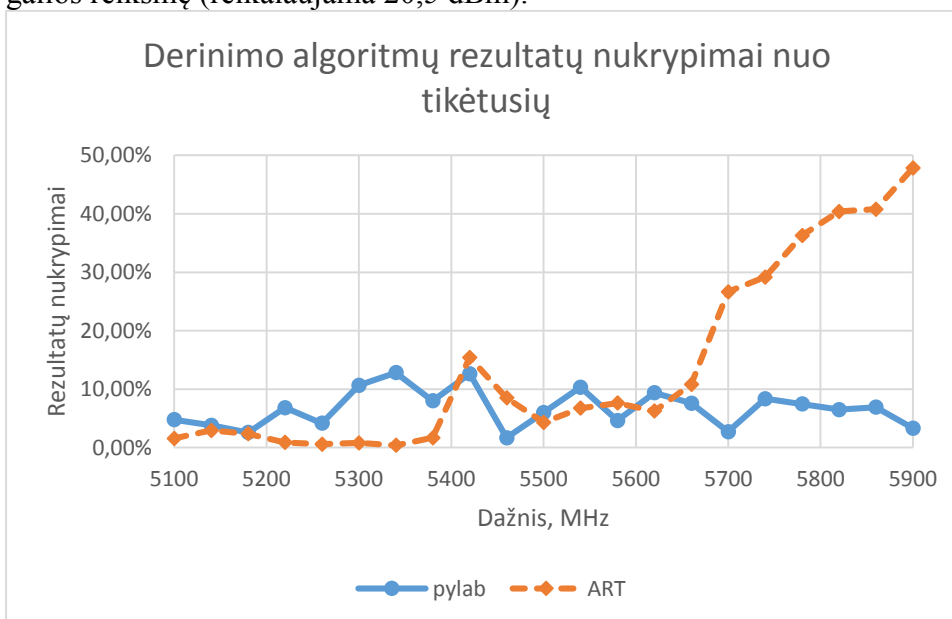
5.2-5 pav. Normalizuotų EVM charakteristikų palyginimas. Derinimo sistemos atitinka „pylab“ ir „ART“ kreives. Atskaitos kreivė parodo maksimalią EVM ribą, už kurios EVM tampa neleistinas.

Atlikus skaičiavimus, kaip tiksliai buvo suderintas siųstuvus su abiem derinimo algoritmais nustatyta, kad pasiūlytas derinimo algoritmas pateikė tikslesnius rezultatus nei ART algoritmas. Nors ART derinimo rezultatų nukrypimai iš pradžių buvo ~0%, tačiau vykdymo pabaigoje skyrėsi ~50% nuo tikėtusi. Pasiūlyto derinimo algoritmo rezultatų nukrypimai buvo ~10%. Algoritmų duodamų rezultatų nukrypimai nuo reikalaujamų atvaizduoti paveiksle (5.2-6 pav.). Čia Y ašyje pavaizduotas santykinis rezultatų nukrypimas, kur prie 0% nukrypimų nėra. Derinimo algoritmo nukrypimai skaičiuoti naudojantis (1) formule.

$$C(x) = \left| 1 - \left(\frac{x}{R_x} \right) \right| * 100\% \quad (1)$$

čia $C(x)$ – dydžio nukrypimas procentais, x – ieškomo dydžio įvertis, R_x – reikalaujama dydžio reikšmė.

Pasiūlyto „pylab“ derinimo algoritmo rezultatų tikslumas vertintas atsižvelgiant į EVM reikšmę (reikalaujama -28 dBm). ART derinimo algoritmo rezultatų tikslumas vertintas atsižvelgiant į RMS galios reikšmę (reikalaujama 20,5 dBm).



5.2-6 pav. Derinimo algoritmų rezultatų santykiniai nukrypimai nuo tikėtinų reikšmių.

6. IŠVADOS

Darbo pabaigoje padarytos išvados:

1. Kuriant bevielio maršrutizatoriaus siųstuvo derinimo sistemą, kartu buvo realizuota maršrutizatoriaus valdymo funkcijų biblioteka „pylab“. Ši funkcijų biblioteka gali būti pritaikyta ir kituose veiklos kontekstuose (testavime, pralaidumo matavimuose, centralizuoto valdymo sistemose), todėl tikimasi, kad jos integracija įmonėje (UAB „Wilibox“) supaprastins vykstančius procesus.
2. Pristatytos, aprašytos ir ištirtos 3 matavimo strategijos: „single“, „first-good“, „averaged“. Šios EVM matavimo strategijos nusako kaip bus surinkti ir apdoroti RF signalo analizės duomenys, todėl kiekvienos jų rezultatai pasižymi skirtingomis patikimumo ir spartos savybėmis.
3. Atlikti matavimo strategijų eksperimentai parodė, kad rezultatų apdorojimo trukmė kompiuteryje nepriklauso nuo naudojamos strategijos (~0.2 sek. per matavimą). Matavimo metu daugiausiai laiko užtrunka (~0,6 sek. per matavimą) RF signalų analizės, kurių skaičius priklauso nuo naudojamos matavimo strategijos.
4. Vienos reikšmės („single“) matavimo strategijos rezultatai nėra stabilūs (koreliacija 0,659), pasižymi santykinai dideliu išsibarstymu (standartinis nuokrypis 0,942). Šios matavimo strategijos privalumas – labai mažos laiko sąnaudos (~0,9 sek. per matavimą).
5. Pirmo gero („first-good“) matavimo strategija kartoja signalų analizės, kol išmatuojamas geras signalas (EVM -28dBm). Šios strategijos duodamų rezultatų koreliacija didesnė (0,755), o standartinis nuokrypis mažesnis (0,351) už „single“ strategijos. Laiko atžvilgiu, matavimo trukmė šiek tiek didesnė (~1,0 sek. per matavimą), nei „single“ strategijos.
6. Vidurkio („averaged“) matavimo strategija kartoja signalų analizės ir atlieka jų vidurkio skaičiavimą. Matavimų trukmė, naudojant 10 signalų vidurkio skaičiavimą, yra ilga (~5,7 sek. per matavimą). Tačiau šiuo metodu pasiekiamas didelis rezultatų stabilumas – didelė atliktų matavimų koreliacija (0,958) ir mažas standartinis nuokrypis (0,130).
7. Atlikti eksperimentai parodė, kad tiksliausi matavimų rezultatai gaunami, tačiau matavimų trukmė yra ilgiausia, taikant „averaged“ matavimo strategiją. „Single“ strategija, realiomis matavimų sąlygomis, duoda nepatikimus rezultatus. „First-good“ strategija sugaišta šiek tiek daugiau laiko (0,02 sek. daugiau), nei „single“ strategija, ir duoda patikimesnius rezultatus.
8. Pristatytas siųstuvo derinimo algoritmas, skirtas stiprinimo reikšmės paieškai, tokiai, kad siųstuvo galia būtų didžiausia, o signalų iškraipymai dar leistinose ribose. Algoritmas, taikomas kiekviename dažnyje, suformuoja siųstuvo kokybės charakteristikas, kurios išsaugomos ir naudojamos maršrutizatoriaus darbo metu.
9. Pasiūlyto derinimo algoritmo rezultatai lyginti su lustinių sistemų gamintojo „Atheros“ derinimo sistemos „ART“ rezultatais. „ART“ vieno dažnio derinimą daro greičiau (~1 sek.), o iš viso atliekama 64 signalų analizės. Tuo tarpu pasiūlytas derinimo algoritmas, vieno dažnio derinimui užtrunka daugiau (~22 sek.) ir iš viso atlieka 908 signalų analizės.
10. Palygintos abiejų sistemų RMS, EVM charakteristikos. Pasiūlyto algoritmo išmatuotos RMS ($\sigma = 0,7$) ir EVM ($\sigma = 0,21$) charakteristikos yra stabilesnės nei pastarosios išmatuotos „ART“ sistema: RMS ($\sigma = 3,72$), EVM ($\sigma = 1,26$).
11. Apskaičiuotos abiejų sistemų gautų RMS, EVM ir stiprinimo reikšmės charakteristikų koreliacijos. Stiprinimo reikšmės ir RMS galios charakteristikų koreliacija yra panaši (~1), tačiau pasiūlytu derinimo algoritmu išmatuotų EVM charakteristikų koreliacija yra mažesnė (~0,57), nei ART sistema (~0,98). Manoma, kad tai yra dėl didesnio kiekio (908) atliktų signalų analizių.
12. Derinimo rezultatai parodė, kad užsibrėžtos EVM (-28 dBm) ir RMS galios (20,5 dBm) ribos nebuvo viršytos, tačiau didesni (iki ~48%) nukrypimai nuo tikėtinų rezultatų buvo fiksuoti ART algoritme, o pasiūlyto derinimo algoritmo nukrypimai mažesni (iki ~13%).
13. Iš atliktų eksperimentų ir gautų rezultatų padaryta išvada, kad lustinių sistemų gamintojo teikiama derinimo programinė įranga (ART) atlieka derinimo darbą greičiau (~64 sek.),

todėl yra labiau tinkama naudojimui masinėje gamyboje. Darbo metu pristatytas derinimo algoritmas ir sukurta derinimo sistema teikia stabilesnius rezultatus ($\sigma = 0,7$), todėl yra labiau tinkama tiriamiesiems darbams ir eksperimentams atlikti.

7. LITERATŪRA

- [1] Agilent Technologies. Digital Modulation in Communications Systems – An Introduction. Application Note 1298. JAV. 2001.
- [2] Agilent Technologies. Using Error Modulation Analysis in the Integration, Troubleshooting, and Design of Digital RF Communication Systems. Product Note 89400-8. JAV. 2000
- [3] Christian Olgaard, LitePoint Corp. Method for efficient calibration of EVM using compression characteristics. United States Patent Olgaard. 2005.
- [4] Osvaldo Mendoza. Measurement of EVM (Error Vector Magnitude) for 3G Receivers. Master's thesis. P 6-14. 2002.
- [5] Michael D. McKinley, Kate A. Remley, Maciej Myslinski, J.Stevenson Kenney, Dominique Schreurs, Bart Nauwelaers.EVM Calculation for Broadband Modulated Signals. 64th ARFTG Conf. Dig., Orlando, FL, pp. 45-52, 2004.
- [6] Lydi Smaini. RF Analog Impairments Modeling for Communication System Simulation: Application to OFDM-based Transceivers. First Edition. T1. P1-36. 2012
- [7] Algimantas Kežionis. Paskaitų kurso „Telekomunikacijų pagrindai“ medžiaga. Lietuva. p. 65-71 2004.
- [8] Christopher D. Ziomek and Matthew T. Hunter. Extending the Useable Range of Error Vector Magnitude (EVM) Testing. ZTEC Instruments, Inc. Albuquerque, New Mexico, USA. 2012.
- [9] Erkan Acar and Sule Ozev, Kevin B. Redmond. Enhanced Error Vector Magnitude (EVM) Measurements for Testing WLAN Transceivers. USA. 2006
- [10] IEEE 802.11 Working Group of the 802 Committee. IEEE 802.11n Standard. USA. 2009
- [11] Fugin Xiong. Digital Modulation Techniques, Second Edition (Artech House Telecommunications Library). ISBN 978-1580538633. C4, P1-72. JAV. 2006.
- [12] Sampo Pitkänen. Optimal reception of 64 Quadrature Amplitude Modulation in HighSpeed Downlink Packet Access. Magistro baigiamasis darbas. Helsinki University Of Technology. Department of Electrical and Communications Engineering. Suomija. 2008.
- [13] L. Hanzo, S.X. Ng, T. Keller, W.T. Webb. Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. ISBN: 978-0-470-09468-6, 1036 psl., JAV. 2004.
- [14] IQview, Litepoint IQView datasheet, [žiūrėta 2012-01-16], prieiga per internetą: <http://www2.litepoint.com/node/4801>
- [15] National Instruments, Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM) tutorial, publikuota 2012-03-02, prieiga per internetą: <http://sine.ni.com/nipdfgenerator/nipdfgenerator?pageURL=http://www.ni.com/white-paper/3652/en&clientAppName=dz&dotsPerPixel=&dotsPerPoint=>
- [16] Sao-Jie Chen, Yong-Hsiang Hsieh. IQ Calibration Techniques for CMOS Radio Tranceivers. ISBN 978-1-4020-5083-1. P, 40-55, Olandija. 2006.
- [17] Ralink QA Tool Introduction. Skaidrės. [žiūrėta 2014-05-18], prieiga per internetą: <http://wenku.baidu.com/view/7b2a8d35eefdc8d376ee3215.html>
- [18] Atheros calibration. Skaidrės [žiūrėta 2014-05-18], prieiga per internetą: <http://wenku.baidu.com/view/955077d7360cba1aa811da26.html>

8. PRIEDAI

8.1. priedas. EVM strategijų patikimumo rezultatai

8.1-1 lentelė. Pasiūlytų EVM strategijų patikimumo matavime naudoti radijo parametrai

Strategija	Analizės	Matavimai	Trukmė	Dažnis	MCS	BW	GI	Kadro formatas
Single	1000	1000	0,500	5180	7	20	400 ns	11n
First-good	1550	1000	0,752	5180	7	20	400 ns	11n
Averaged	1000	100	4,823	5180	7	20	400 ns	11n

8.1-2 lentelė. Pasiūlytų EVM strategijų patikimumo matavimų rezultatai

Single				First good				Averaged			
RMS	Peak	EVM	FE	RMS	Peak	EVM	FE	RMS	Peak	EVM	FE
20,33	28,86	-28,48	0,92	20,56	29,25	-28,39	0,49	19,97	28,73	-28,19	1,1
20,09	28,81	-28,33	0,76	20,31	28,88	-28,29	0,37	20,23	28,64	-28,17	0,63
20,04	28,66	-28,56	0,69	20,26	29,64	-28,27	0,26	20,08	28,6	-28,19	0,21
19,99	28,49	-26,42	0,68	20,07	28,34	-28,48	0,2	19,96	28,56	-27,88	-0,1
19,97	28,51	-28,29	0,61	20,55	29,66	-28,03	0,07	19,91	28,75	-28,22	-0,32
19,82	28,49	-28,27	0,58	20,5	29,08	-28,44	-0,05	19,86	28,57	-28,12	-0,53
19,84	28,92	-27,97	0,5	20,38	29,32	-28,1	-0,12	19,81	28,46	-28,25	-0,69
19,79	28,28	-27,41	0,42	20,44	29,34	-28,21	-0,14	19,77	28,51	-28,33	-0,8
19,73	28,2	-27,93	0,41	20,47	29,03	-28,48	-0,17	19,73	28,76	-28,24	-0,9
19,74	28,52	-27,73	0,4	20,38	29,18	-28,15	-0,21	19,71	28,54	-27,94	-0,98
20,28	29,22	-28,23	0,36	20,35	28,93	-28,24	-0,3	19,68	28,62	-27,86	-1,06
20,27	28,57	-27,75	0,25	20,32	28,62	-28,16	-0,37	19,71	28,51	-27,97	-1,11
20,2	28,48	-28,31	0,22	20,34	29,53	-28	-0,42	20,07	28,92	-27,99	-1,18
20,14	29,58	-28,33	0,16	20,26	29,18	-28,19	-0,43	19,87	28,65	-28,09	-1,27
20,16	29,17	-28,1	0,16	20,28	28,87	-28,26	-0,42	19,86	28,63	-28	-1,35
20,13	28,98	-28,38	0,11	20,29	28,73	-28,05	-0,53	20,07	28,58	-28,27	-1,37
20,1	28,58	-28,64	0,06	20,25	29,56	-28,16	-0,53	19,92	28,4	-28,31	-1,38
20,12	28,41	-28,33	0	20,27	28,3	-28,07	-0,68	19,92	28,3	-28,13	-1,43
20,12	28,54	-28,8	-0,02	20,31	28,53	-28,31	-0,64	20,03	28,7	-28,06	-1,48
20,08	28,04	-27,61	-0,06	20,24	28,99	-27,74	-0,73	20,08	28,65	-28,22	-1,5
20,06	28,75	-28,29	-0,07	20,15	28,6	-28,3	-0,81	20,05	28,6	-28,29	-1,54
20,04	29,37	-28,14	-0,16	20,19	29,1	-28,27	-0,82	20,03	28,55	-28,2	-1,53
20,07	28,98	-28,26	-0,13	20,17	28,44	-28,39	-0,86	20,04	28,65	-28,31	-1,56
19,98	28,72	-28,66	-0,22	20,16	28,85	-28,78	-1,01	20,08	28,79	-28,25	-1,58
20,02	28,6	-28,23	-0,24	20,14	29,18	-28,46	-0,91	20,04	28,72	-28,26	-1,61
19,97	28,3	-28,44	-0,26	20,1	28,95	-28,05	-0,93	20,03	28,72	-27,98	-1,63
20,02	29,4	-29,26	-0,29	20,11	29,52	-28,66	-1,12	20,04	28,53	-28,03	-1,63
19,99	28,59	-28,28	-0,36	20,1	28,68	-28,48	-1,14	20,02	28,91	-28,13	-1,64
19,97	27,97	-28,33	-0,43	20,1	29,27	-28,59	-1,09	20,03	28,86	-28,26	-1,64
19,95	28,24	-28,81	-0,41	20,04	28,78	-28,29	-1,2	20,03	28,54	-28,3	-1,66
19,9	28,59	-28,63	-0,48	20,08	28,08	-28,28	-1,19	20,02	28,56	-28,2	-1,67
19,97	28,67	-27,84	-0,44	20,06	28,81	-28,42	-1,17	20	28,78	-28,23	-1,71
19,92	29,2	-29,18	-0,5	20,08	29,03	-28,8	-1,19	20	28,73	-28,2	-1,7
19,93	28,96	-28,11	-0,55	20,07	29,08	-28,23	-1,24	20	28,61	-28,34	-1,75

19,94	28,72	-27,92	-0,53	20,01	27,97	-28,16	-1,24	19,99	28,68	-28,64	-1,77
19,89	28,08	-27,99	-0,52	20,03	28,55	-28,24	-1,28	20,01	28,68	-28,2	-1,75
19,89	29,1	-27,96	-0,55	20,05	29,05	-29,22	-1,27	20,01	28,5	-28,2	-1,72
19,89	28,84	-27,79	-0,64	20,01	29,37	-28,07	-1,33	20	28,8	-28,05	-1,71
19,89	28,94	-28,09	-0,64	20,03	28,39	-28,05	-1,36	20,01	28,57	-28,2	-1,71
19,83	27,79	-28,28	-0,63	19,99	28,51	-28,3	-1,38	20	28,46	-28,12	-1,67
19,87	28,48	-28,16	-0,68	19,97	28,77	-28,23	-1,39	20,01	28,63	-28,11	-1,65
19,86	28,69	-28,32	-0,7	19,98	29,26	-28,37	-1,46	20,02	28,57	-27,89	-1,66
19,84	28,24	-28,04	-0,71	19,96	29,2	-28,2	-1,43	20,03	28,8	-28,13	-1,61
19,88	28,01	-27,68	-0,73	20	29,04	-28,24	-1,43	19,97	28,39	-28,16	-1,65
19,83	28,36	-28,17	-0,78	20,01	29,46	-28,01	-1,48	20	28,86	-28,33	-1,66
19,85	28,06	-28,1	-0,79	19,99	28,54	-28,06	-1,49	20,02	28,8	-28,39	-1,66
19,85	28,2	-27,32	-0,79	19,96	28	-28,2	-1,56	20,01	28,78	-28,33	-1,65
19,84	27,89	-28,15	-0,8	20,51	28,96	-28,96	-1,55	19,99	28,54	-28,24	-1,66
19,87	28,2	-28,36	-0,87	19,98	28,87	-28,8	-1,54	19,99	28,64	-28,01	-1,65
19,91	27,87	-27,48	-0,85	19,94	29,42	-28,07	-1,6	20,01	28,64	-28,12	-1,68
19,82	28,4	-27,96	-0,83	19,96	28,25	-28,46	-1,64	20,01	28,58	-28,46	-1,66
19,82	28,76	-28,55	-0,89	19,98	29,25	-28,19	-1,61	19,99	28,68	-28,1	-1,71
19,84	28,93	-28,06	-0,85	20,47	29,14	-28,09	-1,61	20	28,72	-28,19	-1,71
19,84	27,91	-27,97	-0,88	19,94	28,93	-28,6	-1,68	19,99	28,72	-28,3	-1,68
19,81	29,1	-28,55	-0,98	19,95	29,55	-28,5	-1,65	20	28,55	-28,45	-1,62
19,85	28,43	-28,44	-0,97	19,9	29,35	-28,6	-1,67	20	28,72	-28,22	-1,65
19,87	28,64	-27,91	-0,96	20,38	28,59	-28,24	-1,7	20	28,78	-28,14	-1,69
19,82	28,63	-28,44	-0,94	20,4	29,08	-28,42	-1,74	20,02	28,79	-28,22	-1,71
19,82	28,13	-28,31	-0,95	20,4	29,17	-28,61	-1,75	20,02	28,67	-28,24	-1,68
19,84	28,73	-28,39	-1,01	20,36	28,17	-28,05	-1,76	20,02	28,74	-28,33	-1,68
19,83	28,57	-28,74	-1,02	20,41	29,31	-28,13	-1,78	20	28,7	-28,23	-1,67
19,81	29,08	-28,56	-1,03	20,43	28,27	-28,5	-1,81	20,01	28,78	-28,25	-1,66
19,78	28,14	-28,55	-1,07	20,43	28,21	-28,4	-1,82	20,02	28,82	-28,2	-1,66
19,79	28,93	-28,67	-1,03	20,42	28,86	-28,52	-1,81	20,01	28,7	-28,04	-1,63
19,75	27,95	-28,34	-1,1	20,41	29,34	-28,29	-1,79	20,01	28,61	-28,2	-1,61
19,82	27,8	-28,35	-1,11	19,84	28,76	-28,16	-1,81	20,02	28,57	-28,08	-1,61
19,82	29,01	-28,36	-1,06	20,36	29,82	-28,69	-1,86	20,01	28,69	-28,3	-1,62
19,79	28,24	-28,24	-1,03	19,89	28,75	-28,13	-1,81	20,01	28,71	-28,32	-1,67
19,76	28,51	-28,77	-1,1	19,86	29,28	-28,53	-1,85	19,95	28,75	-28,17	-1,66
19,83	28,88	-27,76	-1,05	20,39	29,98	-28,05	-1,86	19,99	28,6	-28,25	-1,67
19,82	28,23	-28,63	-1,09	20,38	28,34	-28,21	-1,91	19,98	28,78	-28,16	-1,7
19,77	27,87	-28,83	-1,16	20,41	30,05	-28,97	-1,93	19,99	28,61	-28,22	-1,69
19,72	28,31	-28,45	-1,17	20,4	28,34	-28,25	-1,89	20	28,74	-28,22	-1,73
19,76	28,25	-27,7	-1,16	20,38	28,62	-28,71	-1,85	20,01	28,65	-28,33	-1,69
19,74	29,23	-27,45	-1,23	20,33	29,36	-28,2	-1,9	20,02	28,72	-28,31	-1,7
19,75	27,94	-28,25	-1,23	20,37	29,35	-28,88	-1,93	20	28,73	-28,18	-1,64
19,74	28,31	-26,35	-1,22	20,38	29,22	-28,45	-1,88	20,03	28,77	-28,34	-1,64
19,74	28,17	-28,45	-1,23	20,32	29,18	-28,48	-1,98	20,02	28,87	-28,27	-1,6
19,82	28,43	-28,92	-1,21	20,3	29,37	-28,41	-1,97	20,03	28,57	-28,08	-1,59
19,85	28,73	-28,66	-1,23	20,38	29,27	-28,63	-2,02	20,02	28,64	-28,32	-1,6
19,79	28,11	-29,07	-1,28	20,37	28,7	-28,2	-1,99	20,01	28,86	-28,27	-1,57

19,81	28,85	-29,01	-1,27	20,31	28,88	-28,08	-1,83	20,02	28,7	-28,01	-1,6
19,78	29,2	-28,46	-1,32	20,3	28,36	-28,31	-1,92	20,02	28,63	-28,2	-1,59
19,81	28,37	-28,67	-1,34	20,32	29,5	-28,74	-1,8	20,01	28,54	-28,24	-1,59
19,79	28,83	-28,66	-1,3	20,37	28,56	-28,02	-1,86	20,02	28,62	-28,09	-1,56
19,84	28,88	-28,16	-1,34	20,34	28,34	-28,44	-1,94	20	28,71	-28,12	-1,62
19,82	29,36	-28,8	-1,33	20,34	29,08	-28,08	-2,05	19,99	28,61	-27,94	-1,65
19,75	28,14	-29,03	-1,34	20,34	29,17	-28,61	-1,93	19,98	28,68	-28,14	-1,66
19,77	28,31	-28,71	-1,33	20,39	28,69	-28,59	-2	19,98	28,71	-28,26	-1,65
19,79	28,04	-26,77	-1,33	20,29	28,22	-28,52	-1,98	19,99	28,52	-28,13	-1,64
19,8	28,52	-29,12	-1,36	20,33	28,72	-28,08	-1,99	20,02	28,68	-28,11	-1,59
19,84	28,65	-28,5	-1,33	20,32	29,38	-28,65	-2	20,01	28,75	-28,26	-1,59
19,81	28,28	-28,83	-1,4	20,34	29,04	-28,22	-2	20	28,57	-28,09	-1,59
19,73	28,16	-28,04	-1,4	20,29	29,88	-28,55	-2	20,01	28,63	-28,08	-1,6
19,79	28,6	-28,88	-1,43	20,25	29,29	-28,25	-2,12	19,99	28,7	-28,13	-1,59
19,79	28,77	-28,2	-1,37	20,33	29,16	-28,02	-2,06	20	28,77	-28,35	-1,61
19,81	28,23	-29,12	-1,44	19,84	28,61	-28,25	-1,99	19,99	28,93	-28,25	-1,6
19,79	28,65	-28,99	-1,37	20,27	28,67	-28,61	-2,01	20	28,65	-28,39	-1,63
19,76	27,75	-28,73	-1,5	20,29	29,27	-28,3	-1,98	19,99	28,83	-28,08	-1,6
19,75	28,88	-28,49	-1,47	20,26	29,21	-28,78	-1,94	19,99	28,79	-28,26	-1,61

8.2. EVM strategijų stabilumo rezultatai

8.2-1 lentelė. Pasiūlytos „Single“ strategijos duoti EVM matavimo rezultatai

Matavimo numeris	1	2	3	4	5
Analizių skaičius	22	22	22	22	22
Analizės trukmė	0,673	0,652	0,659	0,691	0,680
Matavimų skaičius	21	21	21	21	21
Matavimo trukmė	0,913	0,886	0,890	1,130	1,078
MCS	7	7	7	7	7
BW	20	20	20	20	20
GI	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns
Kadro formatas	11n	11n	11n	11n	11n
Dažnis	EVM	EVM	EVM	EVM	EVM
5100	-28,78	-29,28	-27,58	-29,16	-29,25
5140	-28,36	-28,03	-27,76	-29,56	-29,19
5180	-28,1	-28,26	-27,45	-28,08	-29,74
5220	-28,3	-28,46	-29	-28,57	-28,28
5260	-28,8	-29,17	-29,2	-29,84	-29,36
5300	-30,27	-28,63	-26,56	-28,08	-29,19
5340	-29,27	-30,15	-29,83	-29,09	-30,98
5380	-28,46	-28,51	-28,69	-29,72	-29,57
5420	-27,75	-29,63	-28,24	-27,97	-28,22
5460	-27,85	-27,89	-28,69	-27,41	-27,9
5500	-27,34	-30,2	-28,76	-28,77	-28,82
5540	-28,55	-28,36	-28,29	-27,82	-29,8
5580	-28,28	-27,4	-27,73	-30,21	-28,17
5620	-30,29	-28,89	-30,47	-29,67	-30,37

5660	-28,71	-31,09	-28,58	-30,69	-31,27
5700	-30,49	-30,01	-26,76	-30,36	-29,47
5740	-30,3	-28,04	-31,13	-28,27	-30,53
5780	-30,16	-29,24	-30,34	-25,74	-29,69
5820	-30,31	-29,3	-29,72	-30,91	-31,02
5860	-29,84	-30,27	-29,91	-30,53	-28,95
5900	-29,41	-31,03	-29,3	-30,24	-29,82

8.2-2 lentelė. „First-good“ strategijos duoti EVM matavimo rezultatai

Matavimo numeris	1	2	3	4	5
Analizių skaičius	24	23	24	21	25
Analizės trukmė	0,648	0,654	0,647	0,678	0,659
Matavimų skaičius	21	21	21	21	21
Matavimo trukmė	0,916	0,902	0,933	1,073	1,182
MCS	7	7	7	7	7
BW	20	20	20	20	20
GI	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns
Kadro formatas	11n	11n	11n	11n	11n
Dažnis	EVM	EVM	EVM	EVM	EVM
5100	-29,19	-28,7	-29,09	-28,99	-28,31
5140	-28,48	-28	-28,47	-29,02	-29,53
5180	-28,13	-28,04	-28,58	-28,87	-29,11
5220	-28,79	-28,28	-28,93	-29,31	-29,35
5260	-28,5	-29,28	-28,85	-29,06	-28,57
5300	-29,16	-29,89	-30,55	-28,42	-29,6
5340	-30,59	-30,87	-29	-29,5	-30,18
5380	-29,73	-28,41	-28,44	-29,81	-29,94
5420	-28,05	-29,33	-29,66	-28,57	-28,64
5460	-28,59	-28,68	-28,72	-28,44	-28,91
5500	-28,56	-29,65	-28,32	-30,28	-29,41
5540	-29,41	-29,48	-29,59	-29,68	-29,31
5580	-28,44	-30,6	-28,51	-28,85	-29,71
5620	-30,78	-29,63	-31,36	-31,43	-30,96
5660	-29,75	-29,58	-31,11	-30,05	-31,09
5700	-30,06	-30,66	-29,81	-30,42	-29,81
5740	-30,78	-29,47	-30,86	-30,41	-29,44
5780	-28,3	-28,87	-29,64	-28,56	-28,19
5820	-29,94	-29,32	-28,87	-29,85	-30,81
5860	-30,29	-30,44	-30,76	-29,64	-30,6
5900	-30,06	-30,68	-30,99	-30,52	-31,72

8.2-3 lentelė. Pasiūlytos „Averaged“ strategijos duoti EVM matavimo rezultatai

Matavimo numeris	1	2	3	4	5
Analizių skaičius	211	211	211	211	211
Analizės trukmė	0,529	0,538	0,536	0,552	0,552
Matavimų skaičius	21	21	21	21	21
Matavimo trukmė	5,509	5,618	5,589	5,955	5,956

MCS	7	7	7	7	7
BW	20	20	20	20	20
GI	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns
Kadro formatas	11n	11n	11n	11n	11n
Dažnis	EVM	EVM	EVM	EVM	EVM
5100	-28,67	-28,89	-28,55	-28,76	-28,92
5140	-28,37	-28,53	-28,3	-28,54	-28,42
5180	-27,69	-28,05	-27,78	-28,32	-28,28
5220	-28,34	-28,12	-27,99	-28,39	-28,4
5260	-28,61	-28,79	-29,06	-29,39	-28,96
5300	-29,7	-29,47	-29,64	-29,56	-29,94
5340	-29,74	-30,48	-30,41	-30,23	-30,01
5380	-29,38	-29,39	-29,34	-30,07	-29,51
5420	-28,61	-28,77	-28,81	-29,22	-29,23
5460	-28,49	-28,21	-28,46	-28,81	-28,98
5500	-29,62	-29,49	-29,71	-30,04	-30,02
5540	-29,46	-29,68	-29,55	-30,12	-29,75
5580	-28,73	-28,39	-28,7	-29,44	-29,26
5620	-30,81	-30,5	-30,07	-30,56	-30,24
5660	-29,8	-30,69	-30,19	-30	-30,21
5700	-30,11	-30,13	-30,59	-30,24	-29,88
5740	-29,79	-30,05	-29,94	-30,1	-30,4
5780	-30,16	-29,72	-30,28	-30,46	-30,21
5820	-29,36	-29,25	-29,64	-29,88	-29,48
5860	-29,63	-30,51	-30,28	-30,18	-30,17
5900	-31,02	-30,64	-29,94	-30,23	-30,45

8.3. Siųstuvo derinimo algoritmų rezultatai

8.3-1 lentelė. Derinimo metu naudoti radijo parametrai

Matavimo numeris	1	2	3	4	5
MCS	7	7	7	7	7
BW	20	20	20	20	20
GI	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns	800 ns
Kadro formatas	11n	11n	11n	11n	11n

8.3-2 lentelė. Pasiūlyto siūstovo derinimo algoritmo derinimo rezultatai

Matavimas	1			2			3			4			5		
	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM
5100	84	19,09	-28,07	84	18,95	-28,12	83	18,42	-28,68	84	19,00	-28,06	83	18,42	-28,35
5140	81	17,83	-28,61	82	18,20	-28,34	82	18,14	-28,06	82	18,13	-28,05	82	18,10	-28,18
5180	80	17,88	-28,29	80	17,72	-28,39	79	17,23	-28,56	80	17,73	-28,41	79	17,19	-28,57
5220	77	17,82	-28,22	77	17,67	-28,25	79	18,65	-28,24	79	18,64	-28,01	79	18,66	-28,13
5260	75	16,94	-28,84	75	16,84	-29,03	75	16,80	-28,71	76	17,50	-28,03	75	16,79	-28,90
5300	73	18,84	-28,39	73	18,70	-28,66	73	18,68	-28,76	73	18,69	-28,46	72	18,15	-29,23
5340	68	18,29	-28,69	69	18,69	-28,53	69	18,66	-28,29	68	18,16	-28,87	69	18,65	-28,57
5380	65	17,40	-28,20	65	17,31	-28,55	65	17,24	-28,18	64	16,75	-28,93	65	17,23	-28,57
5420	62	19,01	-28,37	62	18,98	-28,45	63	18,99	-28,04	63	18,98	-28,38	62	18,85	-28,32
5460	61	17,09	-28,75	61	17,09	-28,64	61	17,00	-28,95	61	17,00	-28,88	61	17,02	-28,13
5500	64	17,71	-28,06	63	17,17	-29,03	64	17,62	-28,00	63	17,20	-28,94	64	17,61	-28,36
5540	67	19,23	-28,03	66	19,07	-28,62	66	19,08	-28,08	66	19,09	-28,11	66	19,06	-28,19
5580	68	16,82	-28,98	68	16,79	-28,58	68	16,80	-28,28	68	16,82	-28,12	68	16,78	-28,58
5620	70	18,20	-28,75	70	18,11	-29,16	70	18,10	-28,40	70	18,16	-28,64	70	18,12	-28,43
5660	70	17,00	-28,06	69	16,36	-28,29	73	18,42	-28,27	70	16,94	-28,08	73	18,45	-28,23
5700	76	17,22	-28,66	76	17,15	-28,98	76	17,10	-28,95	76	17,18	-28,75	76	17,15	-29,27
5740	80	18,23	-28,93	81	18,67	-28,33	80	18,18	-28,57	81	18,69	-28,17	80	18,18	-28,22
5780	83	18,27	-28,65	85	18,83	-28,00	84	18,35	-28,27	84	18,35	-28,47	83	18,21	-28,66
5820	85	18,12	-28,79	86	18,61	-28,33	86	18,53	-28,12	85	18,02	-28,89	85	18,03	-29,23
5860	87	18,94	-28,54	87	18,95	-28,01	87	18,93	-28,12	86	18,44	-29,21	87	18,91	-28,30
5900	87	17,57	-28,10	87	17,5	-29,2	87	17,43	-28,36	87	17,41	-29,15	87	17,38	-29,47

8.3-3 lentelė. Lustinių sistemų gamintojo ART sistemos derinimo algoritmo rezultatai

Matavimas	1			2			3			4			5		
	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM	PCDAC	RMS	EVM
5100	79	19,6	-32	80	20,3	-31,6	80	20,2	-31,7	80	20,7	-31,5	80	20,1	-31,7
5140	78	20	-32,2	79	19,9	-32	79	20,1	-31,7	79	19,8	-31,9	79	19,7	-32
5180	77	19,9	-31,9	77	19,9	-31,7	78	19,7	-31,9	78	20,3	-31,7	78	20,3	-31,6
5220	73	20,5	-31,1	73	20,8	-31,5	73	20,7	-31,2	74	20,7	-31,4	73	20,7	-31
5260	72	20,3	-31,5	72	20,8	-31,5	72	20,7	-31,4	73	20,6	-31,4	72	20,7	-31,4
5300	65	20,8	-32,5	66	20,7	-32,3	66	20,7	-32	66	20,5	-32,1	66	20,6	-32,3
5340	60	20,7	-33	60	20,6	-32,6	60	20,6	-33,5	62	20,5	-33,2	62	20,5	-33
5380	60	20,7	-32,8	60	20,6	-33,5	60	21	-32,5	60	21	-33,2	60	20,9	-32,4
5420	55	23,5	-31,4	55	23,4	-32	56	23,8	-30,8	56	23,8	-31	55	23,8	-30,6
5460	60	22,1	-30,9	60	22	-31,4	60	22,4	-30,3	60	22,3	-30,5	60	22,4	-30,5
5500	60	21,3	-31,9	60	21,1	-32,1	60	21,5	-30,9	60	21,4	-31,3	60	21,6	-30,7
5540	60	21,8	-33,2	60	21,6	-33,5	60	22,1	-32,9	60	21,9	-32,9	60	22	-32,9
5580	64	18,8	-34,4	66	18,7	-34	65	19,1	-34,5	65	19	-34,6	65	19,1	-34,4
5620	64	19,1	-34,1	64	19	-34,2	64	19,4	-33,7	64	19,3	-33,9	64	19,3	-34
5660	66	18,1	-34,4	66	18	-34,3	66	18,5	-34,4	66	18,4	-34,5	66	18,4	-34,5
5700	74	14,9	-34,2	73	14,8	-34,8	73	15,2	-34,4	75	15,1	-34,1	75	15,2	-34,2
5740	75	14,4	-34,8	74	14,3	-33,8	74	14,7	-34,8	74	14,6	-33,6	74	14,6	-33,9
5780	78	12,9	-33,8	79	12,8	-33,8	77	13,2	-33,8	79	13,2	-34	77	13,2	-33,7
5820	80	12,1	-34,4	80	12	-34,1	80	12,4	-34,4	81	12,3	-35,1	80	12,3	-34,1
5860	80	12	-33,3	81	11,9	-33,5	81	12,3	-34,4	82	12,2	-34,4	82	12,3	-33,9
5900	84	10,5	-33,9	84	10,4	-33,8	84	10,9	-33,3	84	10,8	-34,2	85	10,9	-33,5

Bevielio maršrutizatoriaus RF charakteristikų tyrimas

E. Stunžėnas

Kauno Technologijos Universitetas, Informatikos fakultetas, Kaunas

Anotacija—Straipsnyje nagrinėjama bevielio maršrutizatoriaus radijo EVM (angl. Error vector magnitude) matavimo procedūra. Ši procedūra yra RF derinimo proceso sudedamoji dalis, todėl ji yra svarbi užtikrinant bevielio maršrutizatoriaus radijo kokybę. Siūlomos trys EVM matavimo strategijos: vienos reikšmės, pirmo-gero, vidutinio skaičiavimo. Įvertinamos matavimo strategijos charakteristikos ir nagrinėjamas kiekvienos strategijos duodamų rezultatų patikimumas. Taip pat apžvelgiamos kaip kiti radijo nustatymai daro įtaką EVM ir nagrinėjamas matavimo strategijas.

Raktiniai žodžiai—Wifi, maršrutizatorius, Tx, EVM, OFDM.

I. ĮVADAS

Bevieliai maršrutizatoriai yra viena iš esminių kompiuterių tinklų sudedamųjų dalių. Naudojami tiek mažuose, tiek dideliuose tinkluose jie paskirsto interneto srautus kompiuterių grupėms bei teikia kitas tinklo paslaugas. Didėjant bevielio ryšio paklausai, auga ir jo pasiūla, todėl tobulėjant kuriamai technikai didėjo ir perdavimo greičiai, buvo tobulinami duomenų perdavimo standartai ir metodai. Taip dabar turime didelio pralaidumo bevelius (802.11ac standarto) tinklus gebančius siųsti ir gauti duomenis iki 6,77 Gb/s greičiu.

Duomenims perduoti maksimaliais greičiais būtinos tinkamos oro sąlygos, reljefas, maršrutizatorių radijo (toliau RF) parametrų suderinimas. Gerų oro sąlygų ir reljefo užtikrinti neįmanoma kiekvienam naudotojui, tačiau galima užtikrinti maršrutizatoriaus RF kokybę, suderinant ją taip, kad duomenys būtų išsiųsti ir gauti nepažeisti. Bevielio maršrutizatoriaus programinė ir techninė įranga (visų komponentų išskyrus radijo) yra laikoma kokybiška ir veikianti be nesklandumų.

II. SKAITMENINĖS MODULIACIJOS APŽVALGA

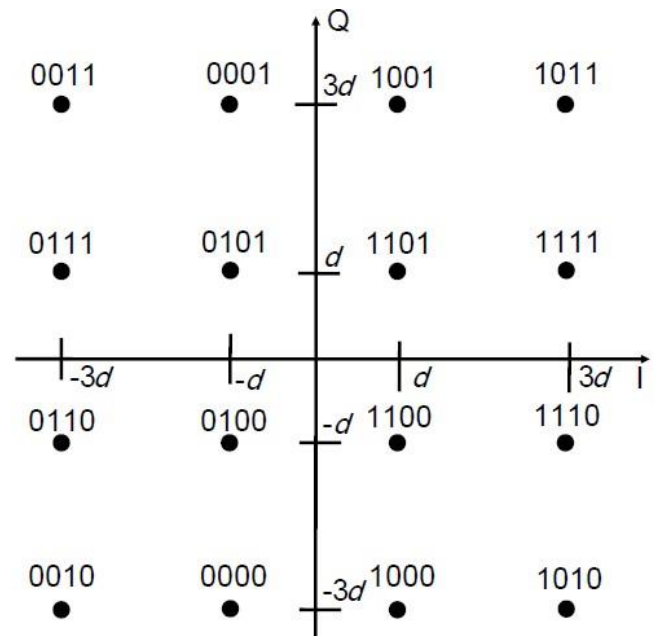
Duomenys beveliuose maršrutizatoriuose perduodami naudojantis plačiąjuosčio perdavimo schema vadinama OFDM (angl. orthogonal frequency-division multiplexing). Ši schema aprašo metodą, kaip duomenys yra užkoduojami ir iškoduojami. Užkodavimui ir iškodavimui naudojama skaitmeninė moduliacija, vadinama IQ moduliacija.

IQ moduliacijoje signalas yra išskaidytas į porą nepriklausomų komponentų: I (į-fazė) ir Q (kvadratura). Šie IQ moduliacijos komponentai paprastai atvaizduojami vektorių pagalba dvimatėje erdvėje, vadinama žvaigždyno diagrama (angl. constellation diagram) [1]. O polinėje sistemoje šie I ir Q dydžiai gali būti atvaizduojami kaip fazė ir amplitudė [8]. Signalų vektorius viršūnė žvaigždyno diagramoje vadinama žvaigždyno tašku. Taikant pritaikančias moduliacijas (angl. adaptive modulation) ši IQ vektorius viršūnė, priklausomai nuo vietos žvaigždyno diagramoje, nustato kokius duomenis bus iškoduoti. Taip pat ir atvirkščiai, priklausomai nuo siunčiamų duomenų

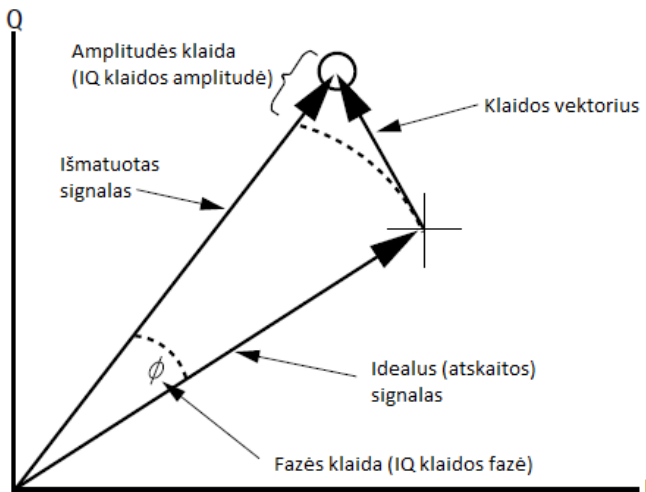
moduliuojama signalo fazė ir amplitudė signale [7]. Siekiant užkoduoti daugiau duomenų signale naudojamos kelios skirtingos moduliacijos schemos:

- BPSK (angl. binary phase-shift keying)
- QPSK (angl. quadrature phase-shift keying)
- 4QAM (angl. 4-symbol quadrature amplitude modulation)
- 16QAM (angl. 16-symbol quadrature amplitude modulation)
- 64QAM (angl. 64-symbol quadrature amplitude modulation)

Pirmos dvi išvardintos moduliacijos schemos naudoja fazės pasikeitimo kodavimą, o paskutinės trys naudoja fazės ir amplitudės pasikeitimo [1]. OFDM perdavime plačiai naudojamos šios schemos, tačiau yra ir kitų jų variacijų, kurios šiame straipsnyje neapžvelgiamos. Taigi, duomenims koduoti šiose schemose naudojami amplitudės arba fazės būsenos pasikeitimai, todėl šių būsenų skaičius turi būti baigtinis [6]. Nuo šių būsenų skaičiaus priklauso žvaigždyno taškų skaičius.



1 pav. 16QAM moduliacijos žvaigždyno diagrama [5]



2 pav. Klaidos vektorius ir jo komponentės [2][4]. Vektoriai atvaizduojami IQ koordinatinių sistemoje, kur I yra i -fazė, Q yra kvadratura.

Kiekviena moduliacija turi jai specifinį žvaigždyno taškų skaičių ir jų tankį. Tokiu būdu pasiekiami skirtingi duomenų kodavimo lygiai ir užkoduojami didesni kiekiai informacijos viename duomenų signalo simboliuje. Mainais į didesnę duomenų tankį signale, signalas turi būti tiksliau užkoduotas ir teisingai gautas (fazės ir amplitudės klaidos santykinai mažos). Taip yra dėl pritaikančios moduliacijos savybių. Didėjant žvaigždyno taškų skaičiui, taip pat didėja ir jų tankis bei mažėja tarpai tarp žvaigždyno taškų, todėl signalo triukšmai ir iškraipymai stipriau veikia aukštesnės eilės QAM sistemos moduluotus skaitmeninius signalus [1].

Dėl triukšmų ir iškraipymų gautas skaitmeninis signalas (žvaigždyno diagramoje vadinamas išmatuotu fazoriumi), įgauna šiek tiek kitokias I ir Q reikšmes, nei idealus signalas (žvaigždyno diagramoje vadinamas atskaitos fazoriumi), todėl jis nukrypsta nuo idealaus žvaigždyno taško. Ideali 16QAM moduliacijos žvaigždyno diagrama pateikta pirmame paveiksle (1 pav.). Taip atsiranda fazės ir amplitudės klaidos, kurios išreiškiamos klaidos vektoriumi ir jo skaliariniu įverčiu (EVM). Kitaip išreiškus, tai yra skaliarinis atstumas tarp išmatuoto ir idealaus signalo fazorių galų. Klaidos vektorius ir jo komponentės pateikti antrame paveiksle (2 pav.). Realiuose EVM skaičiavimuose sumuojami keleto simbolių klaidos vektoriai ir taip gaunamas tikrasis klaidos vektorius [4]. Esant dideliems triukšmams ir interferencijai, signalo vektorius dėl EVM nukrypsta per daug nuo idealių žvaigždyno taškų, todėl signalas nebegalį būti teisingai iškoduotas ir atsiranda simbolių klaidos [1].

III. SUSIJUSIŲ DARBŲ APŽVALGA

Šiame skyriuje bus apžvelgti kitų mokslininkų darbai EVM matavimų srityje. Peržiūrint jau atliktus darbus pastebėta, kad EVM matavimai dažnai taikomi radijo kokybės vertinime, o visų autorių darbuose pateikiami metodai kaip šiuos matavimus optimizuoti, padaryti patikimesniais ir teisingesniais. Darbuose aprašyti RF signalo matavimo metodai (mikro matavimų lygmenyje) ir viso matavimo proceso valdymo procedūros (makro matavimų lygmenyje).

Bevielio ryšio standartas IEEE 802.11 nustato daugelį standartizuotų matavimo procedūrų radijo charakteristikoms patikrinti, tokių kaip maksimali galia, centrinio dažnio klaida, simbolio takto klaida, tačiau vieni svarbiausių ir

daugiausia reikalavimų keliančių techninei matavimo įrangai yra EVM matavimai [8][9].

EVM plačiai taikomas matas skaitmeninio signalo moduliacijos kokybei įvertinti [9]. Jo matavimai parodo bet kokius RF netikslumus. EVM statistiškai varijuojantis dydis, dėl veikiamų aplinkos triukšmų, interferencijos ar perdavimo terpės netobulumo [1]. Šis išsibarstymas egzistuoja visada ir yra leistinas, kol neviršijamas gero EVM limitas. Geras EVM limitas yra nustatytas IEEE 802.11n standarto ir priklauso nuo naudojamos moduliacijos ir kodavimo lygio. Naudojantis IEEE 802.11n standarto duomenimis, leistini EVM iškraipymai prie nustatytų moduliacijų ir kodavimo lygių pateikti pirmoje lentelėje.

4 lentelė. Leistini EVM iškraipymai prie nustatytų moduliacijų ir kodavimo lygių, MCS susiejimas su moduliacija ir kodavimo lygiu. [10]

MCS	Moduliacija	Kodavimo lygis	Leidžiamas EVM (dB)
0	BPSK	1/2	-5
1	QPSK	1/2	-10
2	QPSK	3/4	-13
3	16-QAM	1/2	-16
4	16-QAM	3/4	-19
5	64-QAM	2/3	-22
6	64-QAM	3/4	-25
7	64-QAM	5/6	-28

Iš pirmos lentelės duomenų matyti, kad didesni iškraipymai leidžiami mažesnio duomenų perdavimo lygio moduliacijose, o mažesni - didelio duomenų perdavimo lygio moduliacijose. Didesnis duomenų perdavimo lygis reikalauja, kad būtų tankesnė moduliacija. Tokiu būdu žvaigždyno taškų skaičius išauga, o leidžiami EVM nukrypimai yra mažesni [5][9]. Kodavimo lygis nusako, kiek duomenų be perteklinės informacijos yra perduodama vienu simboliu, esant mažiau perteklinės informacijos leidžiami mažesnis EVM iškraipymai.

Remiantis Christopher D. et al. tyrimų duomenimis svarbu turėti patikimą ir suderintą matavimo įrangą. Tai įgyvendinama pritaikant sudėtingas signalo lyginimo technikas, atliekant triukšmo ir iškraipymų santykio derinimą, fazės triukšmo slopinimą ir netikrų signalų slopinimą.

Dominuojantis foninis triukšmas, atsirandantis dėl mažos siųstuvo galios, bei signalo iškraipymai, atsiradę dėl vidinės interferencijos, naudojant per didelę siųstuvo galią, blogina EVM. Taigi matuojamo RF siųstuvo galia turi būti nustatoma, tokia, kad ir triukšmas, ir iškraipymai kuo mažiau paveiktų EVM. Norimai galiai gauti analizatoriaus įėjime, naudojami signalų slopintuvai ir stiprintuvai. Jie nustatomi fabriko derinimo procedūromis.

Fazės triukšmas daro žymią įtaką EVM, kuris gali pablogėti net iki 2dB. Taip pat didėjant dažniui fazės triukšmo įtaka EVM tampa dar didesnė. Ši įtaka sumažinama prijungus vietinį osciliatorių (LO), kuris šį fazės triukšmą dalinai panaikina ir tai pagerina EVM apytiksliai per 1dB.

Netikri signalai sąveikauja su duomenimis siunčiamame signalo dažnyje. Nors jie yra silpni, tačiau tai paveikia dinaminio režimo nustatymą. Šių netikrų signalų galima išvengti, nenaudojant to dažnių diapazono, kuriame jie egzistuoja. Taip pat naudojama kita metodika paruošiant IQ signalą su priešinga netikro signalo faze ir tokia pačia amplitude. Tokiu būdu duomenys siunčiamam signale panaikina netikrą signalą.

RF moduluotų signalų matavimuose naudojama speciali matavimo įranga – VSA (angl. vector signal analyzer) ir VSG (angl. vector signal generator) prietaisai. Šie prietaisai skirti skaitmeninio OFDM moduluoto signalo analizei ir generavimui. Matavimo įranga pasirenkama pagal matavimo tikslus. Pavyzdžiui siųstuvo matavimų metu reikalinga analizės įranga, išsaugo gautą signalą ir atlieka dažnio srities analizę [5]. Tuo tarpu imtuvo matavimo metu reikalinga generavimo įranga, kuri generuoja išsaugotus signalus.

Remiantis JAV Christian Olgaard užregistruoto RF signalų matavimų patento informacija [3], matavimo procesas atlieka dvi užduotis: užtikrina siųstuvo kokybę ir apriboja galią pagal reguliacinius, šalyse taikomus, reikalavimus. Atliekant siųstuvo matavimus, jo kokybę vertinama naudojantis dviem parametrais – išsiuntimo galia ir moduliacijos tikslumu (EVM). Matavimų metu siekiama išgauti didžiausią įmanomą galią su geriausiu įmanomu EVM. Išmatuotas RF signalo EVM taip pat įtraukia ir triukšmus ir statistines rezultatų variacijas, todėl turi būti daromi pakartotiniai matavimai ir skaičiuojamas EVM vidurkis. EVM vertinimas daromas vertinant siųstuvo spaudimo lygio koreliaciją su EVM. Ši koreliacija nusako tiesinę priklausomybę tarp abiejų dydžių. Atlikus matavimą ir išanalizavus duomenis gaunama papildomo kaupimo skirstinio funkcija. Ši funkcija naudojama siųstuvo spaudimo lygiui suskaičiuoti. Išmatavus suspaudimo lygius nustatoma EVM reikšmė. Pagal išmatuotą EVM koreguojamas siųstuvo suspaudimo lygis ir matavimas atliekamas iš naujo. Matavimai kartojami tol, kol randama didžiausia galia su leistinu EVM. Matavimai atliekami su visais derinimo taškais dažnių rėžyje.

Naudojantis peržvelgtų straipsnių informacija atsirado galimybė realizuoti EVM matavimo metodus, juos pritaikyti, ir atliktais bandymais juos pagerinti. Taip pat buvo pastebėtos bendros matavimo procedūros taikomos daugelyje peržiūrėtų darbų: išsiųstas RF moduluotas signalas gaunamas VSA analizatoriuje, išanalizuojamas, o analizės duomenys perduodami automatizuotai testavimo aplinkai (ATE).

IV. SIŪLAMOS EVM MATAVIMO STRATEGIJOS

Bevielio maršrutizatoriaus RF derinimo procesas yra sudėtinė procedūra, sudaryta iš įvairių RF signalų matavimų, analizavimų ir rezultatų agregavimų. Šio derinimo proceso sudėtinė dalis yra EVM matavimai. Apžvelgiant kitų autorių darbus nebuvo rasta panašių atitikmenų, todėl yra siūlomos ir aprašomos savos EVM matavimo strategijos. Matavimo strategijų paskirtis – kaupti ir apdoroti išmatuotų RF signalų analizės rezultatus, o vėliau juos perduoti tolimesniam apdorojimui.

Prieš atliekant RF signalų matavimus būtina nustatyti fundamentalius bevielio maršrutizatoriaus ir VSA duomenų perdavimo parametrus:

- Dažnis – centrinis kanalas, kuriuo maršrutizatorius siųs RF signalus. Dažnis taip pat nustatomas ir VSA, nes šiuo dažniu jis tikėsis gauti RF signalus.
- MCS – moduliacijos kodavimo schemos indeksas. Šis indeksas naudojamas bendrai nurodyti naudojamai moduliacijai ir kodavimo lygiui. Indeksai, moduliacijos ir kodavimo lygiai pateikti pirmoje lentelėje.

- Kanalo plotis – nustato, koks eterio plotis aplink centrinį siuntimo dažnį bus naudojamas duomenims perduoti.
- Išsiuntimo galia – dėl signalo iškraipymų naudojant dideles galias ir triukšmo, naudojant mažas galias, siųstuvo galia turi būti parenkama tokia, kad VSA imtuve būtų apytiksliai lygi -17,5 dBm [8]. Naudojant šią galią matavimo įrangoje rezultatai gaunami tiksliausi.

RF signalo matavimams ir analizei atlikti nustatomas signalo siųstuvas (bevielio maršrutizatoriaus radijo siųstuvas). Siųstuvas sukonfigūruojamas siųsti nustatytą simbolių kiekį, o tuo metu atliekami RF signalo matavimai VSA įrenginiu. Atlikti matavimai duoda signalo analizės rezultatą, kuriame įvertinamos kelios signalo charakteristikos:

- EVM – signalo iškraipimai (klaidos vektoriaus ilgis).
- RMS galia – vidutinė gautų signalo simbolių galia.
- Maksimali galia – maksimali gautų signalo simbolių galia.
- Dažnio klaida – dažnio nuokrypis nuo nustatyto dažnio.

Prieš pritaikant siūlomas EVM matavimo strategijas būtina įsitikinti, kad signalas tikrai rastas, o pats signalas aptiktas teisingai. Tai atliekama pasinaudojus išmatuotomis signalo charakteristikomis ir darant pakartotinius RF signalų matavimus.

Taigi, atlikus pirmą matavimą turi būti tikrinama ar signalas yra rastas. Signalas gali būti nerastas dėl per stipraus arba per silpno signalo lygio. Taip yra dėl VSA analizatoriaus stiprintuvo savybių. Šis gali aptikti signalą tik siaurame stiprinimo ruože, todėl neradus RF signalo pradeda signalo paiešką atliekant pakartotinius signalo matavimus ir derinant VSA analizatoriaus stiprintuvo jautrumą. Jautrumas derinamas keičiant stiprintuvo jautrumo ribą nuo maksimalios iki minimalios stiprintuvo signalo reikšmės pasirinktu žingsniu.

Aptikus signalą turi būti patikrinama ar šis signalas yra teisingas. Išmatuotas signalas gali būti neteisingas dėl VSA stiprintuvo charakteristikų. Šios charakteristikos nėra tiesinės, todėl atliekami papildomi matavimai derinant VSA stiprintuvo jautrumą. Šio derinimo metu VSA stiprintuvui užduodama galia lygi išmatuoto signalo maksimaliai galiai ir taip atliekami pakartotiniai RF signalo matavimai, kol randama teisinga signalo galia. Signalas laikomas neteisingai išmatuotu jei skirtumas tarp nustatytos ir išmatuoto signalo galių yra didesnis, nei 6 dBm. Tačiau jei skirtumas mažesnis – signalas laikomas teisingu.

Išmatavus teisingą signalą yra taikomos EVM strategijos. Šių nepriklausomų metodų paskirtis yra kaupti ir apdoroti matavimų rezultatus, bei perduoti juos tolimesniems matavimo ir derinimo žingsniams. Kadangi, žinoma, kad EVM yra atsitiktinio pobūdžio, jo charakteristika visą laiką varijuoja. Vienas iš pagrindinių EVM strategijų tikslų yra padidinti matavimo rezultatų patikimumą, kai reikalingas didesnis matavimo duomenų tikslumas. Rezultatų patikimumas gaunamas atliekant pakartotinius signalo matavimus. tačiau mainais į patikimą gaišamas matavimų laikas. Šiai problemai spręsti siūlomos EVM strategijos:

- Single („vienetinė“)
- First-good („pirmas-geras“)
- Averaged („vidurkio“)

Vienetinė rezultatų matavimo strategija neatlieka jokių papildomų veiksmų su duomenimis. Ši strategija duomenų patikimumo atžvilgiu turėtų duoti santykinai nepatikimus rezultatus, tačiau turėtų būti efektyviausia laiko atžvilgiu. Ši strategija naudojama kaip atskaitos taškas kitoms strategijoms vertinti. Taip pat atsiradus idealioms aplinkos sąlygoms realiame pasaulyje, gali būti panaudota EVM matavimuose.

Pirmas-geras strategija atlieka matavimo rezultatų atranką vertinant EVM. Geras rezultatas atrenkamas naudojantis užduotą EVM limitą, kuris nustatomas pagal naudojamą moduliaciją ir kodavimo lygį (MCS). Šie duomenys pateikti pirmoje lentelėje. Taigi, išmatavus RF signalą ir nustatčius, jog egzistuoja klaidos vektorius viršijantis normą, atliekamas permatavimas. Tokiu būdu tikimasi išmatuoti gerą signalą su leistinu EVM. Strategijos naudotojai nurodo maksimalų bandymų skaičių, kuris pasako kiek kartų atlikti RF signalo matavimus, kol bus gautas rezultatas turintis gerą EVM. Tikimasi, kad šios strategijos pagalba išmatuoti rezultatai bus gausni teisingesni, nei vienetinės strategijos matavimo atveju, tačiau matavimams bus sugaišta šiek tiek daugiau laiko.

Vidurkio strategija yra kaupianti matavimo rezultatus strategija. Naudojant šią strategiją atliekami pakartotiniai RF signalų matavimai, o visi išmatuoti rezultatai kaupiami. Signalų analizių skaičius yra fiksuotas ir nustatytas strategijos vartotojų. Taip sukaupus norimą skaičių matavimo rezultatų, apskaičiuojamas rezultatų vidurkis, kuris vėliau atiduodamas tolimesniam apdorojimui. Vidurkis skaičiuojamas sumuojant visus matavimo atributus su kitų matavimų atributais, o vėliau dalinant juos iš matavimų skaičiaus. Taip gaunamas vidutinis signalo analizių rezultatas. Pakartotiniais matavimais ir vidurkio skaičiavimu tikimasi, kad taip bus gauti patikimesni matavimų rezultatai. Taip yra todėl, kad išmatuotas EVM statistiškai visą laiką varijuoja. Šios variacijos traktuojamos kaip atsitiktinės matavimo klaidos, todėl atlikus pakartotinius matavimus manoma, kad išmatuotų EVM atsitiktinės klaidos kompensuos viena kitą, o rezultatai taps patikimesni. Naudojant šią strategiją tikimasi, kad matavimų trukmė pailgės tiek, kiek RF signalo analizių bus atlikta skaičiuojant rezultatų vidurkį, tačiau tai turėtų duoti patikimesnius rezultatus.

Taikant pasiūlytas matavimų strategijas RF signalų surinkti matavimo duomenys gali būti apdorjami skirtingais būdais. Numatoma, kad šie, skirtingomis strategijomis surinkti, matavimų rezultatai turi skirtingas spartos ir patikimumo charakteristikas. Šių strategijų matavimų eksperimentai pateikti 5 skyriuje.

V. MATAVIMŲ EKSPERIMENTAI

Šiame skyriuje bus pristatyti realizuotų EVM matavimo strategijų rezultatai, patikrintas duodamų rezultatų patikimumas, o strategijos palygintos tarpusavyje. Matavimams atlikti buvo naudojamas kompiuteris, matavimo įrenginys „Litepoint IQView“ ir „Deliberant APC 5M“ bevielis maršrutizatorius. Matavimų rezultatams saugoti ir analizuoti naudota „Microsoft Excel“ programa.

Siekiant patikrinti aprašytas EVM matavimo strategijas buvo atlikta keletas matavimų keičiant matavimo parametrus. Siekiant, kad SNR būtų aukštas, naudojama maksimali maršrutizatoriaus radijo spinduliuojama galia. Matuojamas jau suderintas maršrutizatorius, todėl naudojantis leistinu EVM lentele (žr. 1 lentelę), galima nustatyti kokia turi būti EVM viršutinė riba. Didžiausi reikalavimai taikomi aukštesnio lygio moduliacijoms, todėl nuspręsta apsiriboti tokiais matavimo parametrais:

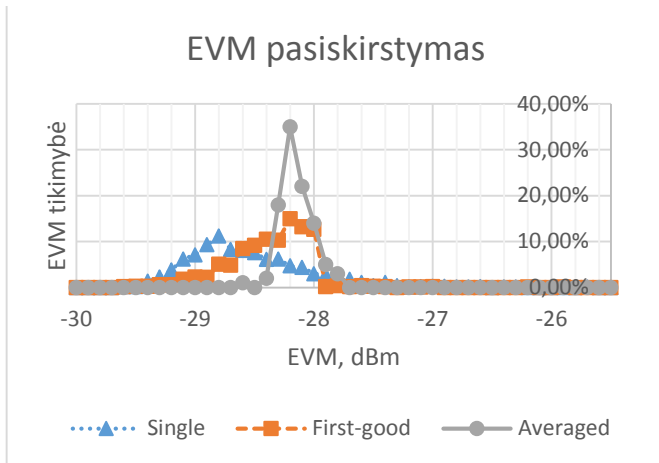
- Matuojamas dažnių diapazonas 5GHz
- Moduliacija MCS7 (64-QAM, 5/6 CR)
- Signalo kanalo plotis 20MHz
- Apsaugos intervalas 400ns
- Kadro formatas 802.11n

Nustačius šiuos matavimo parametrus gauta, kad gero EVM riba yra -28 dBm. Taikant „First-good“ strategiją buvo nustatytas 3 nesėkmingų bandymų limitas, o taikant „Averaged“ strategiją ir atliekant vidurkio skaičiavimus, buvo naudota 10 RF signalo analizės rezultatų. Taigi, siekiant patikrinti matavimų patikimumą, rezultatų stabilumą ir palyginti matavimo strategijas, matavimai buvo išskirti į dvi grupes. Pirmoji matavimų grupė tyrė rezultatų patikimumą viename dažnyje (pasirinktas 5180MHz dažnis). Jos metu buvo atliekama po 1000 matavimų su „Single“ ir „First-good“ strategijomis, o „Averaged“ strategijos metu buvo daroma 100 matavimų. Antroji matavimų grupė tyrė, kaip stabiliai išmatuojamos EVM charakteristikos dažnių ašyje, atliekant matavimus po 5 kartus su kiekviena strategija. Šiais matavimais siekiama patikrinti kaip stabiliai atsikartoja matavimų rezultatai realiomis sąlygomis, ir renkant laikines vykdymo charakteristikas įvertinti algoritmo efektyvumą.

Atlikus RF signalų matavimus ir išanalizavus rezultatus, pastebėta, kad rezultatai tokie kokių ir buvo tikimasi. „Single“ strategija duoda rezultatus, kurie yra labiausiai išsibarstę, o „First-good“ šiek tiek geresni. „Averaged“ strategija matuoti rezultatai turėjo mažiausią išsibarstymą. Vėliau apskaičiuotos minimalios, maksimalios reikšmės ir standartinis nuokrypis, kurie pateikti 2 lentelėje, leido patvirtinti, padarytą prielaidą. O apskaičiavus atliktų signalo analizių skaičių per matavimą koreliaciją su standartiniu nuokrypiu matyti, kad rezultatų patikimumas yra atvirkščiai proporcingas signalo atliktų RF signalo analizavimų skaičiui per vieną matavimą. Apskaičiavus santykinę EVM rezultatų pasiskirstymą, buvo sudarytas EVM skirstinys, kuriame galima pamatyti, kad „Averaged“ strategijos rezultatai yra statistiškai išsidėstę aplink teorinę, nustatytą, EVM reikšmę (-28 dBm). Skirtingomis kreivėmis pavaizduoti skirtingų matavimo strategijų skirstiniai pateikti 3 paveiksle.

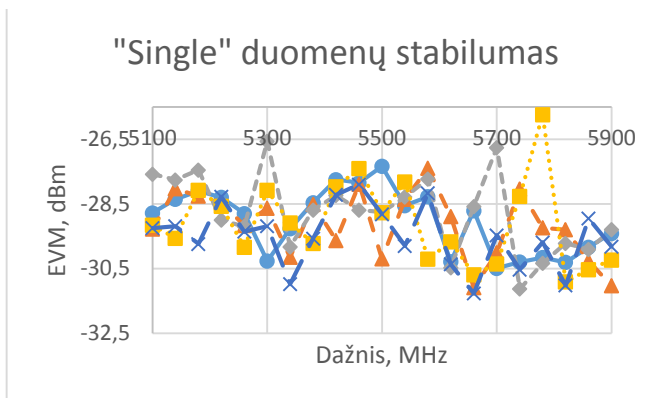
5 lentelė. Siūlomų matavimo strategijų patikimumo charakteristikos

Strategija	Minimali EVM (dBm)	Maksimali EVM (dBm)	Standartinis nuokrypis	Analizės per matavimą
Single	-29,62	-25,72	0,492	1
First-good	-29,67	-25,97	0,351	1,55
Averaged	-28,64	-27,86	0,130	10

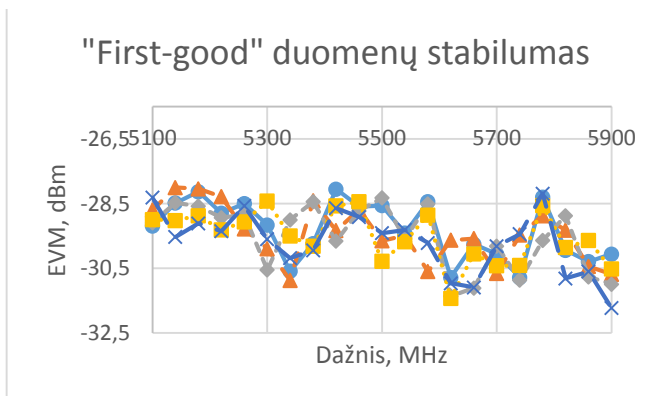


3 pav. EVM matavimo rezultatų pasiskirstymas per matavimo strategijas

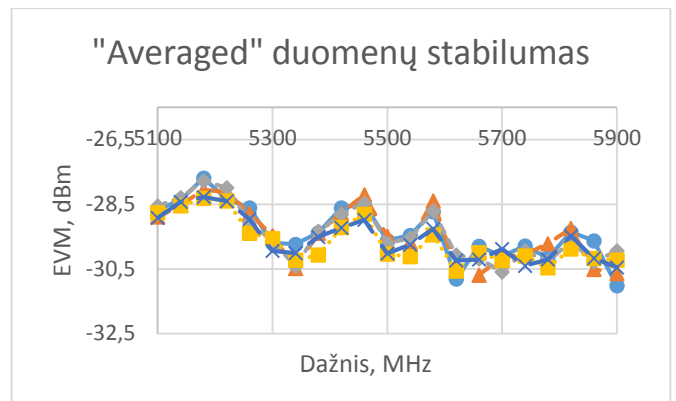
Antroje matavimų grupėje buvo atliekami RF signalai matavimai dažnių ašyje. Su kiekviena matavimo strategija atlikti 5 matavimai. Matavimų metu buvo keičiamas dažnis nuo 5100MHz iki 5900MHz, 40MHz žingsniu. Matavimų rezultatai suvesti į „Microsoft Excel“ dokumentą ir apskaičiuoti kiekvienos strategijos duotų rezultatų koreliacijos koeficientai (pateikti 3 lentelėje). Gauti rezultatai patvirtino prieš tai padarytas prielaidas ir papildė patikimumo rezultatus, kad „Averaged“ strategijos duoti rezultatai yra stabiliausi, o „Single“ strategijos duoti rezultatai yra labiausiai chaotiški ir neprognozuojami. Matavimų rezultatai pateikti paveiksluose 4 („Single“ strategija), 5 („First-good“ strategija), 6 („Averaged“ strategija), kur kiekviena kreivė pavaizduoja skirtingų matavimų duomenis.



4 pav. Vienos reikšmės matavimo strategijos duodami rezultatai



5 pav. Pirmas-geras matavimo strategijos duodami rezultatai



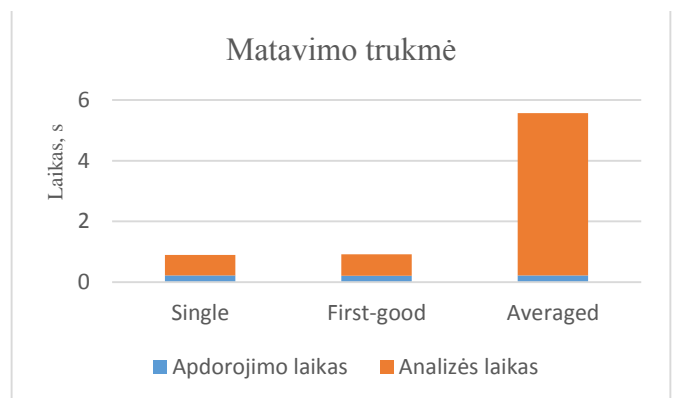
6 pav. Vidurkio matavimo strategijos duodami rezultatai



Šiais matavimais buvo gautos ir matavimo strategijų laikinės charakteristikos, o 3 lentelėje pateikiami kiekvienos strategijos efektyvumo vertinimai. Efektyvumas vertintas apskaičiavus, kiek kiekviena matavimo strategija užtrunka laiko vidiniams skaičiavimams atlikti. Strategijų laikinės charakteristikos pateiktos 7 paveikslu diagramoje. Šioje diagramoje duomenų stulpeliai atspindi naudotą strategiją, o stulpelio dedamosios dalys nurodo RF signalo analizės ir duomenų apdorojimo trukmes. Pastarojoje diagramoje pavaizduotos vidutinės strategijų matavimo trukmės, kur kiekvienas pamatavimas nuo strategijos specifikos gali turėti keletą signalo analizių. Iš rezultatų matyti, kad vykdymo laikui įtakos turi tik atliktų signalo analizių skaičius, o rezultatų apdorojimui kompiuteryje sugaištamą vienodas laikas.

6 lentelė. Siūlomų matavimo strategijų spartos charakteristikos

Strategija	Matavimo bandymų koreliacija	Vieno matavimo trukmė (sek.)	Signalų analizės trukmė (sek.)	Rezultatų apdorojimo trukmė (sek.)
Single	0,659	0,979	0,703	0,276
First-good	0,755	1,000	0,732	0,269
Averaged	0,958	5,725	0,544	0,285



7 pav. Vieno strategijos atliekamo matavimo trukmė ir matavimo dedamosios. Bendra trukmė yra atliktų analizių ir rezultatų apdorojimo suma.

VI. IŠVADOS

Straipsnyje pristatytos, aprašytos ir ištirtos 3 matavimo strategijos: „single“, „first-good“, „averaged“. Šios EVM matavimo strategijos nusako kaip bus surinkti ir apdoroti RF signalo analizės duomenys, todėl kiekvienos jų rezultatai pasižymi skirtingomis savybėmis. Atlikti matavimo strategijų eksperimentai parodė, kad rezultatų apdorojimo trukmė kompiuteryje nepriklauso nuo naudojamos strategijos (~0,2 sek. per matavimą). Matavimo metu daugiausiai laiko užtrunka (~0,6 sek. per matavimą) RF signalų analizės, kurių skaičius priklauso nuo naudojamos matavimo strategijos.

Vienos reikšmės („single“) matavimo strategijos rezultatai nėra stabilūs (koreliacija 0,659), pasižymi santykinai dideliu išsibarstymu (standartinis nuokrypis 0,942). Šios matavimo strategijos privalumas, kad yra labai mažos laiko sąnaudos (~0,9 sek. per matavimą).

Pirmo gero („first-good“) matavimo strategija kartoja signalų analizes, kol išmatuojamas geras signalas (EVM - 28dBm) taikant MCS7 moduliacijos indeksą. Šios strategijos duodamų rezultatų koreliacija didesnė (0,755), taip pat ir standartinis nuokrypis mažesnis (0,351). Laiko atžvilgiu, matavimo trukmė šiek tiek didesnė (~1,0 sek. per matavimą), nei „single“ strategijos.

Vidurkio („averaged“) matavimo strategija kartoja signalų analizes ir atlieka jų vidurkio skaičiavimą. Matavimų trukmė labai ilga (~5,7 sek. per matavimą), naudojant 10 signalų vidurkio skaičiavimą. Tačiau šiuo metodu pasiekiamas didelis rezultatų stabilumas – atliktų matavimų koreliacija (0,958) ir mažas standartinis nuokrypis (0,130).

Atlikti eksperimentai parodė, kad tiksliausi matavimų rezultatai gaunami, tačiau ilgiausia matavimų trukmė,

taikant „averaged“ matavimo strategija. „Single“ strategija duoda nepatikimus rezultatus realiomis matavimų sąlygomis. „First-good“ strategija sugaišta šiek tiek daugiau laiko (0,02 sek.), nei „single“ strategija, ir duoda šiek tiek patikimesnius rezultatus.

LITERATŪRA

- [1] Agilent Technologies. Digital Modulation in Communications Systems – An Introduction. Application Note 1298. JAV. 2001.
- [2] Agilent Technologies. Using Error Modulation Analysis in the Integration, Troubleshooting, and Design of Digital RF Communication Systems. Product Note 89400-8. JAV. 2000
- [3] Christian Olgaard, LitePoint Corp. Method for efficient calibration of EVM using compression characteristics. United States Patent Olgaard. 2005.
- [4] Osvaldo Mendoza. Measurement of EVM (Error Vector Magnitude) for 3G Receivers. Master's thesis. P 6-14. 2002.
- [5] Michael D. McKinley, Kate A. Remley, Maciej Myslinski, J.Stevenson Kenney, Dominique Schreurs, Bart Nauwelaers.EVM Calculation for Broadband Modulated Signals. 64th ARFTG Conf. Dig., Orlando, FL, pp. 45-52, 2004.
- [6] Lydi Smaini. RF Analog Impairments Modeling for Communication System Simulation: Application to OFDM-based Transceivers. First Edition. T1. P1-36. 2012
- [7] Algimantas Kežionis. Paskaitų kurso „Telekomunikacijų pagrindai“ medžiaga. Lietuva. p. 65-71 2004.
- [8] Christopher D. Ziomek and Matthew T. Hunter. Extending the Useable Range of Error Vector Magnitude (EVM) Testing. ZTEC Instruments, Inc. Albuquerque, New Mexico, USA. 2012.
- [9] Erkan Acar and Sule Ozev, Kevin B. Redmond. Enhanced Error Vector Magnitude (EVM) Measurements for Testing WLAN Transceivers. USA. 2006
- [10] IEEE 802.11 Working Group of the 802 Committee. IEEE 802.11n Standard. USA. 2009

PADĖKA

Dėkoju, magistrinio darbo vadovui, prof. Robertui Damaševičiui už pagalbą ir patarimus rašant šį straipsnį.