



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

**Edvinas Marcinkevičius**

**169 MHZ DUOMENŲ MAINŲ TINKLO MODULIO  
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

**BAIGIAMASIS MAGISTRO PROJEKTAS**

**Vadovas**  
Prof. dr. V. Deksnys

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**169 MHZ DUOMENŲ MAINŲ TINKLO MODULIO  
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Elektronikos inžinerija (621H61002)**

**Vadovas**

\_\_\_\_\_ Prof. dr. Vytautas Deksnys

\_\_\_\_\_

**Recenzentas**

\_\_\_\_\_ Doc. dr. Lina Narbutaitė

\_\_\_\_\_

**Projektą atliko**

\_\_\_\_\_ Edvinas Marcinkevičius

\_\_\_\_\_

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Edvinas Marcinkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Edvino Marcinkevičiaus** baigiamasis projektas tema „169 MHz duomenų mainų tinklo modulio projektavimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Marcinkevičius. E. 169 MHz duomenų mainų tinklo modulio projektavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Vytautas Deksnys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 91 psl.

## SANTRAUKA

Šio magistro darbo tikslas yra suprojektuoti ir ištirti mažos galios bevielio tinklo modulį, skirtą duomenų mainams 169 MHz dažnio radijo ryšiu.

Pirmoje darbo dalyje apžvelgiami bevielio duomenų perdavimo tinklai, jų architektūros, apibūdinama jų klasifikacija. Paaškinama su kokiomis problemomis susiduriama projektuojant bevielių sensorių tinklus. Toliau analizuojamas ETSI EN 300 220-1 bevielio ryšio standartas, kuris apibūdina reikalavimus radijo ryšio įtaisams pasirinktoje 169 MHz dažnio juostoje. Tam, kad geriau suprastumėm tinklo sistemų architektūrą, apžvelgiamas daugiasluoksnis OSI komunikacijų modelis pagal ISO standartą. Pateikiami duomenų perdavimo būdų bevielių jutiklių tinkluose pavyzdžiai, pagal skirtingus maršruto parinkimo protokolus.

Antroje darbo dalyje aprašomas bevielio ryšio modulio projektavimas. Atliekama pasirinkto ryšio modulio analizė, aprašoma sukurta programinė įranga, bei jos veikimas. Aprašoma ryšio modulio sandara ir pateikiama struktūrinė schema. Pateikiami radijo ryšio tyrimams ir duomenų perdavimui skirtų protokolų aprašymai.

Paskutinėje darbo dalyje pateikiami sukurtos sistemos tyrimų rezultatai. Apžvelgiami radijo ryšio parametrų teoriniai skaičiavimai, pateikiami juostos pločio matavimo rezultatai spektro analizatoriumi. Palyginami teoriniai skaičiavimai su matavimo rezultatais. Išmatuotas galios ir srovės suvartojimas pagal darbo režimus ir apskaičiuotos energijos sąnaudos. Pateikiami radijo ryšio patikimumo tyrimo rezultatai esant įvairiems atstumams ir moduliacijos parametrams.

Reikšminiai žodžiai: bevielis ryšys, RF modulis, jutiklių tinklai, maža galia.

Marcinkevičius Edvinas. Design and Research of Network Node for 169 MHz Wireless Data Transfer. Final project for Master's degree/ supervisor prof. dr. Vytautas Deksnys; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics engineering.

Kaunas, 2015. 91 p.

## **SUMMARY**

The main purpose of this work is research and development of network module for 169 MHz wireless data transfer.

In the first part of this work wireless sensor networks, their architectures and classification are reviewed. It is explained what kind of challenges are faced during development of such networks and its modules. Furthermore, the ETSI EN 300 220-1 wireless communication standard which describes requirements for our chosen 169 MHz band is examined and summarized. To better understand the structure of network systems multilayered network model ISO/OSI is reviewed. Data transfer path examples in wireless sensor networks according routing protocols are reviewed and explained.

Second part focuses on analysis and development of wireless radio module prototype. The main parameters and functions of radio modem CC1120 are explored in this part of work. Software and hardware design is also reviewed. The operation of equipment and radio test procedure is explained and pictured graphically.

Last part of this thesis contains developed system test results. Theoretical radio link and modulation parameters are calculated and compared to real measured values. Power and current consumption is measured and energy consumption is estimated afterwards. Radio link test results with different range and radio parameters are documented and analyzed.

**Keywords:** Wireless, RF module, low power, wireless sensor network.

## TURINYS

Įvadas .....	9
1 Bevieliai duomenų perdavimo tinklai .....	10
1.1 Duomenų perdavimo tinklų klasifikavimas.....	11
1.1.1 MANET tinklas .....	11
1.1.2 WMN tinklas .....	12
1.1.3 VANET tinklas .....	12
1.1.4 WSN tinklas.....	12
1.2 Bevielio jutiklių tinklo projektavimo uždaviniai ir iššūkiai .....	13
2 Europos radijo ryšio standarto ETSI EN 300 220-1 analizė .....	14
2.1 Aplinkos sąlygų kategorijos .....	14
2.2 Dažnio nuokrypis.....	14
2.3 Efektinė spinduliuojama galia .....	15
2.4 Moduliacijos gaubtinės ribos.....	15
2.5 Spektro prieigos ribojimas.....	16
2.6 Apibendrinimas .....	16
3 Daugiasluoksniu komunikacijų modelio apžvalga.....	17
3.1 Žemutinių OSI modelio sluoksnių apžvalga .....	18
3.1.1 Transportinis sluoksnis .....	18
3.1.2 Tinklo sluoksnis.....	19
3.1.3 Duomenų mainų sluoksnis.....	19
3.1.4 Fizinis sluoksnis .....	20
4 Duomenų perdavimo tinkle protokolų analizė .....	21
4.1 Pagrindinės problemos .....	21
4.2 Maršrutizavimo klasifikacija .....	22
4.2.1 Adresuotas maršrutizavimas.....	22
4.2.2 Neadresuotas maršrutizavimas .....	22

4.2.3	Vietos (geografinis) maršrutizavimas.....	23
4.2.4	Multitrajektorinis maršrutizavimas.....	24
4.2.5	Apklausa valdomas maršrutizavimas .....	25
4.2.6	Maršrutizavimo protokolų apibendrinimas .....	27
5	Texas Instruments CC430 duomenų mainų protokolas .....	28
5.1	Veikimo principas.....	29
5.2	Duomenų paketo formatas.....	30
6	Mažos galios ryšio modulio CC1120 veikimo analizė.....	31
6.1	CC1120 pagrindiniai parametrai .....	32
6.2	Registrai ir bendros paskirties prievadai .....	32
6.3	Duomenų paketo struktūra.....	33
6.4	Nuolatinės spektro dedamosios eliminavimas.....	34
6.5	Miego režimo ir imtuvo įjungimo valdymas .....	34
7	Radio ryšio modulio projektavimas .....	36
7.1	Bevielio ryšio modulio aparatinė dalis .....	36
7.2	Programinės įrangos projektavimas.....	38
7.2.1	Pagrindinės programos algoritmas .....	39
7.2.2	Duomenų buferiai ir struktūros.....	40
7.2.3	Pagrindinės duomenų perdavimo funkcijos .....	40
7.2.4	Pertraukčių aptarnavimas .....	41
7.2.5	Duomenų šifravimas.....	41
7.2.6	Mikrovaldiklio taktinio dažnio nustatymai.....	41
7.2.7	Ryšio patikimumo tyrimo aplikacijos projektavimas.....	42
8	Duomenų mainų protokolo realizavimas .....	43
8.1	Paketo struktūra .....	44
8.2	Komandinis baitas .....	45
8.3	Duomenų mainų protokolai .....	45
8.3.1	Duomenų surinkimas iš meteorologinių stotelių.....	46

8.3.2	Duomenų šifravimo rakto keitimo protokolas.....	46
8.3.3	Santykinio paketų klaidų skaičiaus tyrimo protokolas.....	48
8.3.4	Moduliacijos parametrų ir mainų tempo nustatymas .....	49
9	Radio ryšio parametrų analizė.....	50
9.1	Skaitmeninė dažnio manipuliacija.....	50
9.2	Pagrindiniai moduliacijos parametrai.....	51
9.3	MSK moduliacija.....	53
9.4	GFSK moduliacija .....	53
9.5	Teoriniai juostos pločio skaičiavimai .....	54
9.6	Kanalo juostos pločio matavimai spektro analizatoriumi.....	56
9.6.1	Matavimų rezultatai.....	57
9.6.2	Tyrimo rezultatų palyginimas su teoriniais skaičiavimais .....	60
9.7	Rezultatų apibendrinimas .....	60
9.8	Priimto signalo lygio indikacijos kalibravimas .....	61
10	Energijos sąnaudų tyrimai.....	62
10.1	Galios suvartojimas pagal darbo režimą.....	62
10.2	Galios suvartojimo laike tyrimas .....	63
10.3	Energijos sąnaudų įvertinimas .....	65
10.4	Paketo siuntimo laiko priklausomybė nuo moduliacijos ir mainų tempo.....	66
10.5	Galios suvartojimas pagal nustatytą siųstuvo galingumą .....	67
11	Radio ryšio patikimumo tyrimai .....	68
11.1	Testo metodas .....	68
11.2	Radio ryšio tyrimai naudojant suprojektuotą modulį .....	69
11.3	Radio ryšio patikimumo tyrimo apžvalga.....	70
	Išvados.....	71
	Literatūros sąrašas .....	72
	Priedai.....	74



## IVADAS

Bevielės komunikacijos ir tinklai yra sparčiai besivystanti ir vis plačiau naudojama sritis. Taip pat smarkiai populiarėjanti šių tinklų atmaina yra daiktų internetas (*angl. Internet of Things*), kuris leidžia bevielių prietaisų renkamą informaciją pasiekti internetu. Šie bevielieji prietaisai gali būti bevielieji jutikliai, skaitliukai, sekimo įrenginiai, meteorologinės stotelės ir panašios sistemos. Kuriamo modulio radijo ryšio dažnis yra 169 MHz, pagal Europos radijo ryšio standarto ETSI 300-220 naujai apibrėžtą dažnių juostą. Projektas vykdomas siekiant sukurtą bevielio ryšio modulį pritaikomą Europos Sąjungos žemės ūkio automatizavimo projekte „Clafis“ (*angl. Crop, Livestock and Forest Integrated system*)[1]. Pagrindinė numatyta šio įrenginio paskirtis – bevelis duomenų perdavimas tarp pagrindinės duomenų surinkimo stoties ir įvairių žemės ūkyje naudojamų įtaisų: meteorologinių stotelių, dirvos drėgmės jutiklių, traktorių, kombainų ir galvijų ūkių stebėjimo sistemų. Taip pat šis bevielių modulių tinklas gali būti pritaikomas apskaitos duomenų perdavimui, išmaniųjų namų valdymui ir parametrų stebėjimui, sekimo sistemoms, signalizacijoms ir medicininiams tikslais.

Bevelis jutiklių tinklas susideda iš nedidelių, mažos galios radijo ryšio prietaisų (taškų) su prijungtais sensoriais, stebinčiais fizikinius aplinkos ar procesų parametrus. Tai gali būti slėgis, temperatūra, drėgmė, greitis, resursų sąnaudų apskaitos duomenys ir pan. Kiekvienas tokio tinklo įrenginys savyje turi įterptines sistemas duomenų surinkimui, saugojimui ir apdorojimui, bei bevielio ryšio komunikacijai valdyti. Taip pat sąsajas su išoriniais jutikliais, ir bevielio ryšio sistemas duomenų perdavimui.

Pagrindinė šių bevielių įtaisų ir jų tinklų paskirtis – duomenų perdavimo palengvinimas ir automatizavimas nenaudojant kur kas brangesnių laidinių perdavimo linijų. Mažos galios bevielio ryšio tinkluose svarbu užtikrinti mažą galios suvartojimą neprarandant ryšio patikimumo, pakankamos greitaveikos ir reikiamo perdavimo atstumo. Tačiau šių savybių užtikrinimas yra pagrindinė problema, pasitaikanti projektuojant mažos galios bevielio ryšio sistemas.

Darbo užduotys:

- Susijusios literatūros ir standarto ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 analizė;
- Programinės įrangos architektūros, jungiančios fizinį, duomenų mainų ir tinkle sluoksnius, sudarymas;
- Radijo ryšio įrenginio veikimo principo analizė ir konfigūracijos parinkimas;
- Tinklo lygmens (*angl. Network Layer*) protokolų algoritmų sudarymas ir programavimas, duomenų šifravimo realizavimas;
- Energijos sąnaudų optimizacija.
- Radijo ryšio atstumo ir patikimumo, bei energijos sąnaudų tyrimas;

# 1 BEVELIAI DUOMENŲ PERDAVIMO TINKLAI

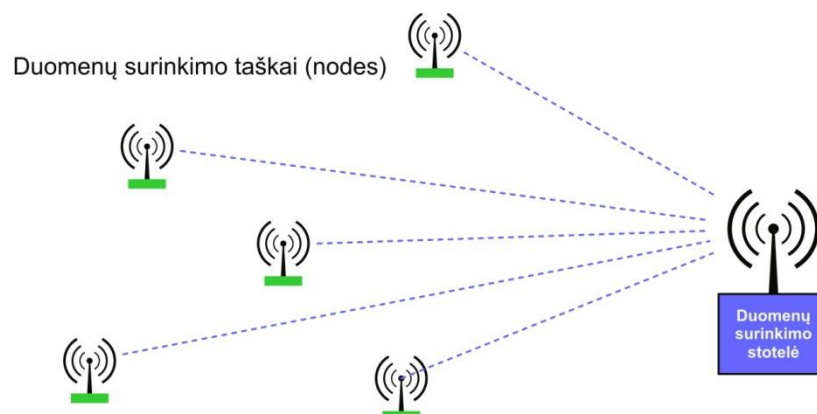
Darbo objekto bevelis ryšys apibūdinamas kaip komunikacija tarp dviejų įtaisų turinčių bevielę sąsają duomenų siuntimui ir priėmimui. Nuo pat bevelio ryšio atsiradimo jis laikomas revoliucija telekomunikacijų srityje, kadangi lyginant su laidinėm komunikacijom šis turi daug pranašumų:

- Mobilumas;
- Patogumas naudoti;
- Mažesnė kaina, esant dideliame ryšio nuotoliui.

Dėl šių savybių bevelis ryšys plačiai naudojamas jutiklių tinkluose įvairių parametrų stebėjimams, duomenų surinkimui ir procesų automatizavimui. Be minėtų pranašumų neišvengiamai yra ir trūkumų:

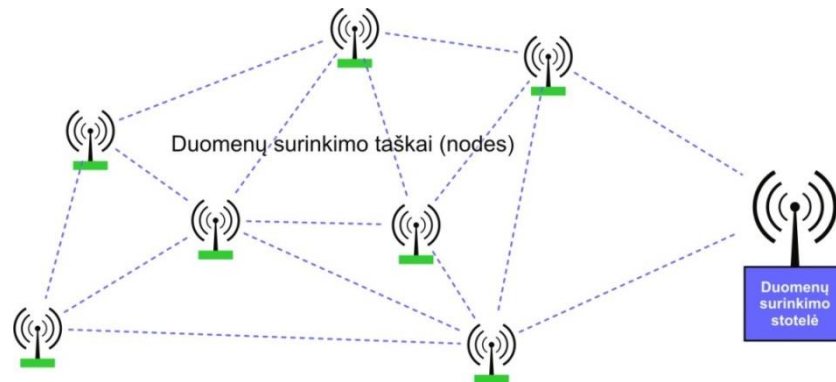
- Interferencija ir trikdžiai;
- Siauresnis juostos plotis ir mažesnė duomenų perdavimo sparta;
- Kintančios aplinkos sąlygos;
- Signalų slopinimas dėl kliūčių ir ilgo nuotolio;
- Tų pačių ar gretimų dažnių naudojimas.

Pagrindinis trūkumas yra perdavimo atstumo ribojimas dėl aplinkos sąlygų, bei ribotų siųstuvo ir imtuvo galimybių. Bevelio ryšio taškai/stotelės (*angl. nodes*) gali perduoti duomenis vienas kitam tik savo aprėpiamoje ryšio zonoje [2]. Pagal duomenų perdavimo maršruto tipą beveliai tinklai gali būti skirstomas į galas-galas (*angl. end-to-end*) arba šuolis po šuolio (*angl. Hop-by-Hop*) tipus. Tipas „end-to-end“ yra klasikinis bevelio ryšio perdavimo modelis, kuomet ryšys duomenų perdavimui užmezgamas tiesiogiai tarp siųstuvo ir imtuvo, kaip parodyta pav. 1.1.



**Pav. 1.1** Bevelio ryšio „end-to-end“ duomenų perdavimo tipas

Nors tai paprasčiausias būdas tinklo konfigūracijos ir protokolų realizavimo prasme, tačiau esant dideliems atstumams šis būdas turi trūkumų. Panaudojant šuolinį (*angl. hop-by-hop*) duomenų perdavimo būdą pasiekiamas geresnis energijos suvartojimas, kadangi nereikia duomenų perduoti radijo ryšiu dideliu atstumu, kas reikalauja didesnės siųstuvo galios. Tokiu būdu duomenys perduodami pagal tinklo sluoksnio protokolų parinktus maršrutus nuo vienos stotelės iki kitos nedideliais atstumais, kol galiausiai pasiekia reikiamą tašką tinkle. Grafiškai tokia tinklo struktūra pavaizduota 1.2 paveikslėlyje.



**Pav. 1.2** Duomenų perdavimo „hop-by-hop“ grafinis pavyzdys bevielių jutiklių tinkle

Tačiau tokio tinklo realizavimas yra gerokai sudėtingesnis, lyginant su klasikiniu taškas – taškas duomenų perdavimo būdu.

## 1.1 Duomenų perdavimo tinklų klasifikavimas

Kalbant apie bevielius duomenų perdavimo tinklus, juos galima suskirstyti į keturis tipus. Šie bevielio tinklo tipai apibūdinami taip:

- Mobilūs „Ad-Hoc“ tinklai - MANETs;
- Bevielių sensorių tinklai - WSN;
- Beveliai tinklai - WMN;
- Transporto priemonių „Ad-Hoc“ tinklai - VANETs.

### 1.1.1 MANET tinklas

Mobilus „Ad-Hoc“ tinklas dar vadinamas MANET yra rinkinys mobilių tinklo įrenginių, kurie sukuria laikiną tinklą be papildomos infrastruktūros ar centrinio protokolo. Tokio tinklo įrenginiais gali būti nešiojamieji ar delniniai kompiuteriai, ar kiti mobilūs įrenginiai. Tokio tinklo įrenginiai yra autonominiai ir savi-organizuojantys (*angl. self organizing*) ir duomenis perduoda daugiašuočiu „multi-hop“ būdu [3].

### 1.1.2 WMN tinklas

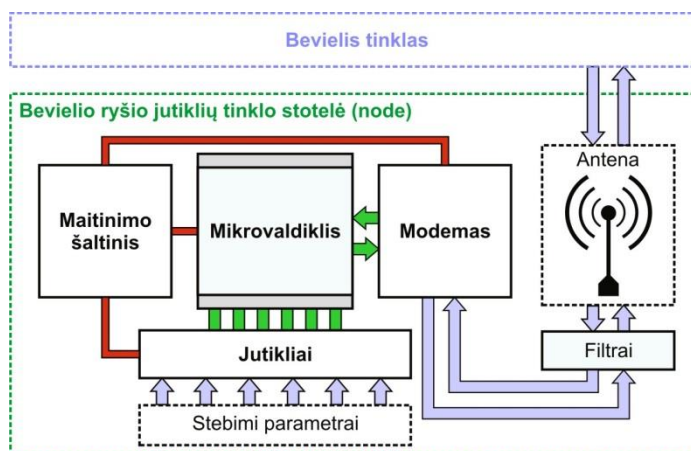
Bevielės tinklinės komunikacijos sprendimas (*angl. Wireless Mesh Network*) buvo pasiūlytas kaip efektyvi technologija plačiajuosčio tinklo prieigos praplėtimui. Ji leidžia bevieliu būdu prisijungti prie tinklo klientams neturintiems tiesioginio priėjimo. Pagrindinis šio tinklo sukūrimo tiklas – suteikti interneto prieigą vartotojams, kurių nepasiekia interneto duomenų kabelis.

### 1.1.3 VANET tinklas

Tai „Ad-Hoc“ kilmės tinklas pritaikytas transporto srityje, kur ryšio stotelė yra pats automobilis. Transporto priemonės komunikuoja tarpusavyje daugiašulio perdavimo būdu taip dalinantis reikiama informacija. Tokio tipo tinklas jau turi dominuojantį standartą pavadintą „WAVE“ (*angl. Wireless Access for Vehicular Environment*). Jis paremtas 802.11 vietinio bevielio tinklo standartu.

### 1.1.4 WSN tinklas

Tipinis bevielių jutiklių tinklas susideda iš daugelio mažų, nebrangių ryšio taškų su atitinkamais ryšio sensoriais, kurie komunikuoja vienas su kitu bevieliu ryšiu daugiašulio duomenų perdavimo būdu. Toks tinklas atlieka vieną bendrą funkciją ir tarnauja atitinkamai aplikacijai, pvz.: aplinkos parametrų stebėjimui, žvalgybai, išmaniosioms transporto sistemoms (ITS), namų apyvokos sistemoms, bei industrinių procesų kontrolei[4]. Bevielio ryšio stotelė susideda iš jutiklių ir juos aptarnaujančių elektroninių grandinių, mažos galios įterptinės sistemos (mikrovaldiklio), atminties ląstelės (jei būtina), radijo modemo ir maitinimo šaltinio. Supaprastinta tokios stotelės struktūrinė schema pavaizduota pav. 1.3.



Pav. 1.3 Tinklo stotelės struktūrinė schema

Pagrindinės bevielių jutiklių tinklo savybės:

- Galimybė turėti daug modulių viename tinkle;
- Mažos galios radijo ryšys;
- Žemas mainų tempas;
- Energijos taupymas;
- Adresavimas pagal duomenis, adresą arba koordinates

## 1.2 Bevielio jutiklių tinklo projektavimo uždaviniai ir iššūkiai

Sunkumai su kuriais susiduriama projektuojant bevielius duomenų perdavimo tinklus ir jų modulius [2]:

- a) Energijos suvartojimo suvaržymai;
- b) Riboti skaičiuojamosios galios resursai;
- c) Galimybė tinkle dirbti daugybei ryšio stotelių;
- d) Adresavimo schemas pritaikymas;
- e) Tinklo skalės (stotelių kiekio) keitimas (*angl. scaling*);
- f) Automatinis persikonfigūravimas;
- g) Duomenų tinkle perteklius;
- h) Nėra nustatyto bendro protokolo, aplikacijos;
- i) Maršruto parinkimas (*angl. routing*).

Minėtos priežastys paskatino naujų protokolų kūrimą, kadangi jau esami negalėjo susidoroti su visomis tokio tinklo užduotimis. Radijo ryšio moduliai ir jų naudojami protokolai bevieliuose jutiklių tinkluose privalo išspręsti minėtas problemas. Taip pat šias problemas spręsimė šio darbo metu, projektuodami WSN modulį ir protokolą duomenų perdavimui.

Energijos sąnaudų ir mikrovaldiklio skaičiavimo galios problema nėra tokia aktuali, kadangi šiuolaikiniai mikrovaldikliai ir mažos galios radijo ryšio mikrosistemos projektuojamos taip, kad suvarotų kuo mažiau energijos neprarandant savo funkcionalumo ir greitaveikos. Net ir mažos galios mikrovaldikliai pasižymi didele greitaveika.

## 2 EUROPOS RADIJO RYŠIO STANDARTO ETSI EN 300 220-1 ANALIZĖ

Pasirinktas 169 MHz nešlio dažnis projektuojamai bevielio ryšio sistemai atitinka ETSI EN 300 220-1 standartą. Šiame darbe apžvelgiama 2012 metų sausio mėnesio standarto versija 2.4.1. Standartas yra parengtas ETSI – Europos Telekomunikacijų Standartų Institute (*angl. European Telecommunications Standards Institute*). Šis standartas apibrėžia trumpo nuotolio įrenginius (*angl. Short Range Devices(SRD)*), kuriais duomenų mainai vykdomi dažnių diapazone nuo 25 MHz iki 1000 MHz, o galia neviršija 500 mW [8]. Standartas taikomas signalizacijų, bevielio identifikavimo, judesio aptikimo ir kitiems bevielio ryšio prietaisams. Pagal standartą projektuojamas bevielio ryšio modulis turi veikti 169,4 – 169,475 MHz dažnio juostoje (75 kHz juostos plotis). Būtent šis dažnių ruožas paskirtas tokio tipo įrenginiams, skirtiems duomenų surinkimui.

### 2.1 Aplinkos sąlygų kategorijos

Įrenginio testavimas turi būti atliekamas normaliomis sąlygomis ir ekstremaliomis sąlygomis nurodytais atvejais. Jei įranga gali būti maitinama tiek vidiniu, tiek išoriniu maitinimo šaltiniu, abu atvejai turi būti testuojami. Testavimo sąlygos skirstomos į normalias ir ekstremalias.

2.2 lentelė. Aplinkos sąlygos pagal kategoriją

Sąlygos	Temperatūra	Drėgmė
Normalios	Nuo +15 °C iki +35 °C	20% - 75%
Ekstremalios kategorija I	Nuo 20 °C iki +55 °C	
Ekstremalios kategorija II	Nuo -10 °C iki +55 °C	
Ekstremalios kategorija III	Nuo +5 °C iki +35 °C	

### 2.2 Dažnio nuokrypis

Nešlio dažnio nuokrypis matuojamas nedomuliuotam nešlio signalui. Dažnio nuokrypis sistemoms, kurių kanalų pasiskirstymas mažesnis arba lygus 25kHz neturi viršyti reikšmių pateiktų 2.3 lentelėje[8].

2.3 lentelė. Siųstuvo nešlio dažnio nuokrypio ribos kai tarpai tarp kanalų mažiau arba lygūs 25 kHz

Nešlio dažnis (Mhz)	<47	nuo 47 iki 137	nuo 137 iki 300	nuo 300 iki 500	nuo 500 iki 1000
Dažnio nuokrypio riba (kHz)	±10,0	±10,0	±10,0	±12,0	±12,5

Visoms kitoms sistemoms (kurių dažnis <1000Mhz) taikomas bendras nuokrypio limitas: ±100 ppm (*angl. Parts per Million*).

## 2.3 Efektinė spinduliuojama galia

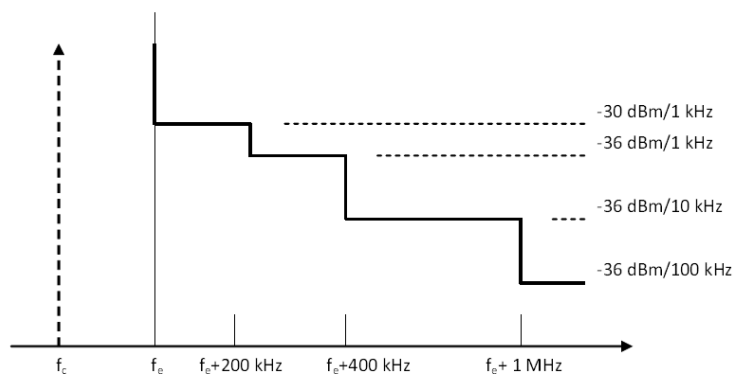
Tiriama efektinės spinduliuojamos galios vertė, esanti maksimalaus lauko stiprumo kryptimi prie specialių matavimo sąlygų. Tyrimas turi būti atliekamas beaidėje kameroje arba atviroje vietovėje (*angl. Open-Area-Test-Site*). Naudojamas maksimalus prietaiso galingumas. Maksimalios galios ribos pateiktos 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Maksimali spinduliuojama galia

Dažnio juosta (MHz)	Juostos plotis (MHz)	Ryšio pritaikymas	Maksimali galia	Tarpai tarp kanalų
169,400 - 169,475	75	Sekimas ir stebėjimas	500 mW	$\leq 50$ kHz
169,400 - 169,475	75	Matavimų duomenų stebėjimas	500 mW	$\leq 50$ kHz
169,475 - 169,4875	12,5	Socialinės pagalbos sistemos	10 mW	12,5 kHz
169,5875 - 169,6000	12,5	Socialinės pagalbos sistemos	10 mW	12,5 kHz

## 2.4 Moduliacijos gaubtinės ribos

Standartas nurodo, jog spinduliavimas normaliomis ir ekstremalioomis sąlygomis atitinkamuose dažniuose turi neviršyti apibrėžtų ribų, kaip parodyta paveikslėlyje 2.1 Paveikslėlyje nurodomi spektrinio galios tankio limitai, pagal atstumą nuo signalo juostos pabaigos.



Pav. 2.1 Moduliacijos juostos spektrinio galios tankio ribos[8]

Paveikslėlyje:

- $f_c$  yra dažnio juostos centras.
- $f_e$  yra dažnio juostos kraštas.
- vaizduojama tik aukštesnioji juostos pusė, žemesnioji lygi pastarosios veidrodinei kopijai.

Šios ribos taip pat taikomos ir skleisto spektro moduliaciją naudojantiems įtaisams (*angl. spread spectrum*). Moduliacijos juostos plotis ( $bw = f_b - f_e$ ) negali viršyti juostos pločio nurodyto lentelėje 2.4.

## 2.5 Spektro prieigos ribojimas

Standartas nurodo, jog prietaisas negali viršyti 10% siųstuvo įjungimo skverbties, jeigu nenaudojama LBT (*angl. Listen Before Talk*) ir AFA (*angl. Adaptive Frequency Agility*) funkcijos. Funkcija AFA yra apibūdinama kaip dinaminis kanalo juostos parinkimas iš galimo dažnių diapazono. Jei skirtingi kanalai nenaudojami, laikoma, kad prietaisas yra fiksuoto dažnio (naudoja vieną kanalą) ir laukia kada kanalas atsilaisvins. Spektro prieigos reikalavimai pateikti 2.7 lentelėje.

Lentelė 2.7. Spektro prieigos reikalavimai

Maksimalus siuntimo laikas vienam perdavimui	1 s
Maksimalus siuntimo laikas eilei paketų	4 s
Maksimalus suminis siuntimo laikas 1val periode 200kHz juostoje	100 s
Minimalus siųstuvo išsijungimo periodas	100 ms
Minimalus klausymosi laikas	5 – 10 ms
Maksimalus laikas tarp klausymosi pabaigos ir siuntimo pradžios	5 ms
LBT slenkstis užimto kanalo indikacijai, kai $P < 100$ mW	-102 dBm @ 6.25 kHz RX BW, -99 dBm @ 12.5 kHz RX BW, -96 dBm @ 20/25 kHz RX BW, -93 dBm @ 50 kHz RX BW.

## 2.6 Apibendrinimas

Pagal standarto ETSI EN 300 220-1 reikalavimus projektuojama bevielio ryšio sistema turi atitikti šiuos pagrindinius parametrus:

- Dažnių juostos plotis iki 75 kHz;
- Moduliacijos forma neribojama;
- Maksimali siųstuvo galia 500 mW;
- Dažnio nuokrypis  $\pm 10,0$  kHz;
- Tarpas tarp ryšio kanalų  $\leq 50$  kHz;
- Leistinas nešlio dažnio nuokrypis  $\pm 10$  kHz;
- Maksimalus įjungto/išjungto siųstuvo laiko santykis 10% (*angl. Duty cycle*) arba LBT;
- Moduliacijos tipo pasirinkimas neribojamas;
- SRD kategorija: II - vidutinės svarbos prietaisai;
- Veikimo temperatūros kategorija: I - ( -20 °C to +55 °C )

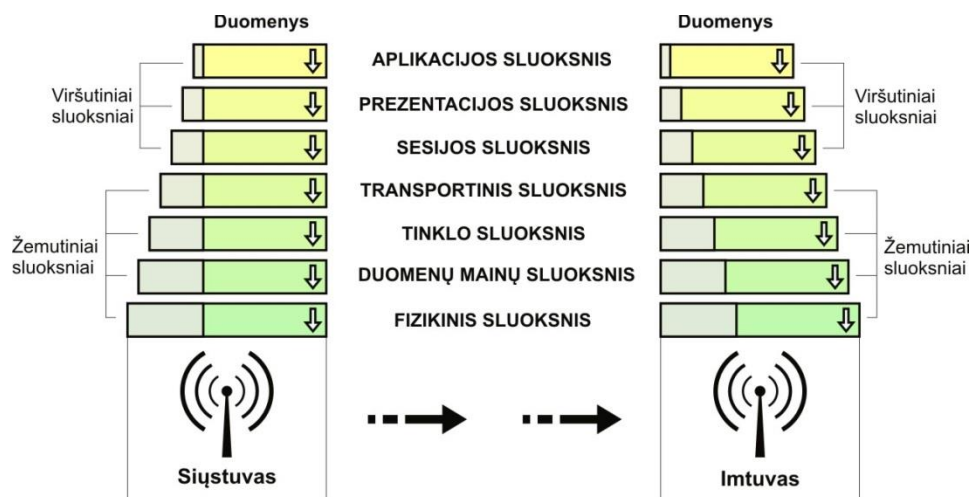
Taip pat prietaisas turi funkcionuoti nustatytuose normalių ir ekstremalių sąlygų temperatūrų ir įtampos lygių diapazonuose. Tolimesnis sistemos projektavimas remsis standarte apibrėžtais reikalavimais.



### 3 DAUGIASLUOKSNIO KOMUNIKACIJŲ MODELIO APŽVALGA

Ryšio sistemos veikimą ir funkcionalumą galima klasifikuoti pagal Tarptautinės Standartų Organizacijos Atviros Sistemos Sujungimo ISO/OSI modelį (*angl. International Standard Organizations's Open System Interconnect*). Labai svarbu suprasti šio modelio architektūrą prieš projektuojant ar diegiant duomenų perdavimo sistemas. Šis modelis naudojamas kaip pasaulinis komunikacijų standartas, padalinantis sistemos protokolo struktūrą į septynis sluoksnius [5]. Duomenys ir valdymas perduodamas iš vieno sluoksnio į kitą pagal sluoksnių hierarchiją. Kiekvienas sluoksnis atlieka savo konkrečias funkcijas. Toks komunikacijų sistemos modelis leidžia ne tik lengviau suprasti jos veikimą ir vykstančius duomenų mainus, bet ir palengvina ryšio sistemų ir jų programinės įrangos projektavimą, bei padidina sistemos pritaikymo lankstumą ir praktiškumą. Pagal standartą protokolai skirstomi į šiuos septynis sluoksnius (Pav. 3.1):

1. Fizinis (*angl. Physical Layer*);
2. Duomenų mainų (*angl. Data Link Layer*);
3. Tinklo (*angl. Network Layer*);
4. Transportinis (*angl. Transport Layer*);
5. Sesijos (*angl. Session Layer*);
6. Prezentacijos (*angl. Presentation Layer*);
7. Aplikacijos (*angl. Application Layer*).



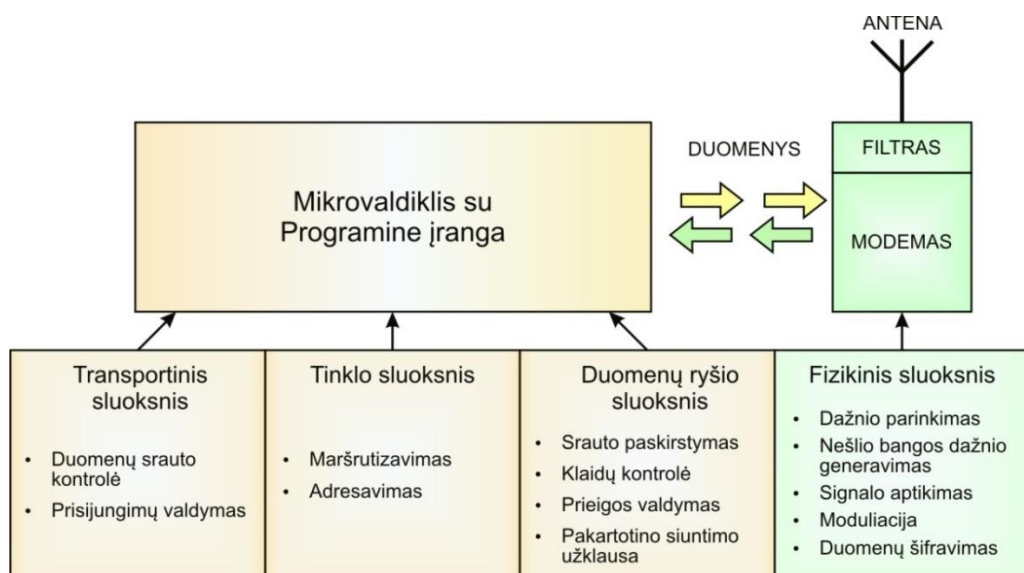
**Pav. 3.1** Sistemos sluoksnių hierarchija pagal ISO/OSI

Dažniausiai šie septyni sluoksniai suskirstomi į dvi dalis – žemutinius ir viršutinius sluoksnius. Viršutinius sluoksnius sudaro sesijos, prezentacinis ir aplikacijos sluoksnis, o apatinius – transportinis, tinklo, duomenų mainų ir fizinis sluoksniai.

### 3.1 Žemutinių OSI modelio sluoksnių apžvalga

Kadangi mūsų projektas susijęs su apatiniais OSI modelio sluoksniais, juos aptarsime plačiau. Fizinis, duomenų perdavimo, tinklo ir transportinis sluoksniai priskiriami žemesniųjų sluoksnių grupei. Protokoliai veikiantys šiuose sluoksniuose vykdo duomenų perdavimą iš vieno tinklo įtaiso į kitą. Šie sluoksniai realizuojami tiek programiniu tiek aparatinio būdu, o tarp žemiausių fizinių lygmenų duomenų perdavimas vyksta fizikine terpe, mūsų atveju- radijo ryšiu. Apibendrinant apatiniai sluoksniai turi užtikrinti, kad perduodami duomenys be klaidų pasiektų aukštesnio lygio sluoksnius[5].

Dažniausiai fizinių sluoksnį sudaro modemas su antena ir analoginėmis ryšio grandinėmis, o transportinio, tinklo ir duomenų ryšio sluoksnio funkcijos vykdomos mikrovaldiklyje. Grafiškai šių sluoksnių struktūra, kurią galima pritaikyti jutiklių tinkluose pavaizduota pav. 3.2.



**Pav. 3.2** Apatinių OSI sluoksnių struktūrinė schema ir funkcijos

#### 3.1.1 Transportinis sluoksnis

Šio sluoksnio funkcija yra duomenų perdavimo patikimumo ir perpildymo išvengimo užtikrinimas. Protokoliai naudojantys šias funkcijas yra atitinkamai pritaikomi arba gaunamiems, arba siunčiamiems duomenims. Duomenų praradimo aptikimui ir atstatymui naudojami skirtingi „mechanizmai“. Transportinis sluoksnis gali būti:

- Orientuotas prisijungimo suderinimui (*angl. connection oriented*) – reikalauja ryšio užmezgimo prieš perduodant duomenis;
- Prisijungimui nepriklausomas (*angl. connectionless*).

Plačiausiai naudojami transportinio sluoksnio protokolai yra TCP (*angl. Transmission Control Protocol*) ir UDP (*angl. User Datagram Protocol*). Minėtieji protokolai yra interneto ir visuotinių tinklų pagrindas. Tačiau sensorinių bevielių tinklų realizavimui TCP protokolas ne visada tinka, kadangi mažos galios bevieliuose tinkluose gali būti naudojamas šuolinis duomenų perdavimas [7].

### 3.1.2 Tinklo sluoksnis

Pagrindinė tinklo sluoksnio funkcija yra maršrutizavimas (*angl. Routing*) ir adresavimas. Bevieliuose sensorių tinkluose gali atsirasti problemų susijusių su šiuo sluoksniu dėl galios saugojimo, ribotos atminties ir tinklo taškų identifikavimo.

Maršrutizavimo protokolo esmė yra nustatyti patikimą ir laisvą duomenų perdavimo maršrutą pagal atitinkamus įverčius (*angl. metrics*). Egzistuoja daugybė maršrutizavimo būdų šiam sluoksniui. Jie gali būti skirstomi į plokščią maršrutizavimą (*angl. flat routing*) arba hierarchinį, taip pat skirstomi į laiku valdomus, apklausa valdomus arba įvykiu valdomus (*angl. event driven*). Laiku valdomas protokolas vykdo periodinius duomenų mainus ir naudojamas aplikacijose, kur reikalingas periodiškasis duomenų stebėjimas. Įvykiu ir užklausa valdomi protokolai duomenis perduoda pagal nustatytą poveikį arba vartotojo užklausą. Taip pat gali reikėti žinoti tinklo mazgų koordinates ir jas nuolat atnaujinti, jei maršrutizavimo protokolas remiasi GPS duomenimis. Plačiau apie tinklo lygmens sluoksnį aptariama kitame skyriuje.

### 3.1.3 Duomenų mainų sluoksnis

Duomenų ryšio sluoksnis atsakingas už duomenų srauto paskirstymą ir duomenų paketų paruošimą siuntimui į fizinį sluoksnį ir jų priėmimą iš jo. Dažnai šis sluoksnis pagal ISO/OSI standartą suskirstomas į du posluoksnius:

- a) MAC (*angl. Medium Access Layer*) – vidurinės prieigos sluoksnis, atliekantis kanalų prieigos valdymą, planavimą, buferių valdymą ir klaidų kontrolę. Bevielių jutiklių tinkluose šis sluoksnis reikalingas energijos sąnaudų optimizavimui, ryšio patikimumui ir mažam prieigos vėlinimui užtikrinti.
- b) LLC (*angl. Logical Link Control*) – loginio ryšio kontrolės sluoksnis, vykdamas duomenų tėkmės kontrolę (*angl. Flow control*), klaidų kontrolę, multipleksavimą, leidžiantį duomenų perdavimą keliais protokolais tuo pačiu tinklu ir automatinį duomenų siuntimo pakartojimo prašymą (*angl. automatic repeat request (ARQ)*).

Nors ir LLC posluksnyje galimos klaidų kontrolės ir duomenų tėkmės kontrolės funkcijos, tačiau jos taip pat gali būti vykdomos transportinio sluoksnio protokoluose[6].

Klaidos ir tinklo nepatikimumas duomenų ryšio sluksnyje dažniausiai atsiranda dėl šių priežasčių:

- Bendrų kanalų interferencijos MAC posluksnyje.
- Signalų slopinimo ir atspindžių.

Interferencijos problema sprendžiama MAC protokole, o signalų slopinimai ir atspindžiai kompensuojami klaidų kontrole (*angl. forward error correction (FEC)*) ir pakartotino perdavimo prašymais (ARQ) fiziniame sluksnyje.

### **3.1.4 Fizinis sluksnis**

Žemiausias sluksnis septynių sluksnių hierarchijoje sukuria sąsają tarp tinklo įrenginių, duomenų bitų siuntimui per fizikinę terpę (bevielio ryšio tinkle fizikinė terpė – ore sklindančios radijo bangos). Fizinio sluksnio funkcijos:

- Dažnio parinkimas;
- Nešlio signalo generavimas;
- Signalų aptikimas;
- Moduliacija;
- Duomenų šifravimas (*angl. Encryption*).

Fizinį sluksnį sudaro antena, analoginis suderinimo grandynas, bei ryšio modemas su siųstuvu ir imtuvu. Dažniausiai šiuolaikiniuose mažos galios radijo ryšio įrenginiuose fizinio sluksnio funkcijas atlieka ryšio modulis, sutalpintas vienoje mikroschemoje. Svarbu tinkamai pasirinkti fizinio sluksnio komponentus ir tinkamai parinkti konfigūraciją, norint, kad įrenginys atitiktų standarto reikalavimus ir efektyviai funkcionuotų.

Šio projekto atveju fizinio sluksnio terpė bus 169 MHz radijo signalas. Šis dažnis pasirinktas todėl, kad tai naujas dažnis Europos mažos galios radijo įtaisų standarte ir jis yra gerokai žemesnis nei 433 MHz, 863 MHz ar 2400MHz dažniai, naudojami panašioms tikslams. Žemesnis nešlio dažnis leidžia duomenis perduoti didesniu atstumu. Teoriškai sumažinę dažnį du kartus, taip pat du kartus laimime ir atstumo. Nors realiomis sąlygomis atstumo padidėjimas nėra toks akivaizdus, tačiau jis yra pastebimas [10].

## 4 DUOMENŲ PERDAVIMO TINKLE PROTOKOLŲ ANALIZĖ

Maršruto parinkimo protokolas yra svarbiausia tinklo sluoksnio dalis. Nuo naudojamo maršrutizavimo protokolo priklauso duomenų paketo turinys ir pats duomenų perdavimo principas. Bevielio duomenų perdavimo tinkluose nėra bendro ir visiems tipams tinkančio standartinio protokolo. Taip yra todėl, kad kiekvienas iš minėtų (MANET, WSN, WMN ar VANET) tinklų turi savo unikalių savybių ir projektavimo iššūkių. Tačiau jie visi klasifikuojami kaip daugiašuliai „multi-hop“ bevieliai tinklai, todėl turi daug bendrų juos apjungiančių savybių [12].

### 4.1 Pagrindinės problemos

Maršruto radimo protokoliai bevieliuose jutiklių tinkluose skiriasi nuo maršruto radimo protokolų kituose tinkluose. Keli išskirtiniai reikalavimai tokio tipo tinklų maršruto radimo protokolams[9]:

- a) **Riboti resursai:** Dėl mažų energijos sąnaudų maršruto nustatymo protokolas negali būti sudėtingas ir reikalaujantis daug skaičiuojamosios galios ir atminties.
- b) **Tinklo gyvavimo laikas:** Didžioji dauguma bevielų jutiklių tinklų panaudojimo sričių reikalauja ilgalaikio tarnavimo laiko. Kadangi kiekvienas duomenų perdavimas vartoja energiją, duomenų perdavimo protokoliai turi būti optimizuoti minimaliam paketų perdavimo kiekiui, o paketai perduodami efektyviausiu maršrutu.
- c) **Tinklo mastas:** Maršrutizavimo protokolas turi sugebėti funkcionuoti esant dideliame tinklo stotelių skaičiui. Turi būti naudojamas efektyvus adresavimas ir duomenų kolizijų prevencija.
- d) **Duomenų kaupimas:** Norint sumažinti duomenų perdavimo laikus galima panaudoti duomenų kompresijos, vidurkinimo, maksimumo ar minimumo radimo funkcijas, priklausomai nuo renkamų duomenų pobūdžio. Taip pat, jei įmanoma duomenis galima kaupti ir perduoti kuo retesniais intervalais, taip mažinant energijos sąnaudas.
- e) **Patikimumas:** Bevieliai sensorių tinklai veikia duomenų perdavimo klaidas skatinančiomis aplinkos sąlygomis. Perdavimo klaidos yra įprastos, kadangi aplinkai būdinga kliūtys ir besikeičiančios oro sąlygos. Jei tinklo taškai išdėstyti atsitiktine tvarka, gali pasitaikyti tankiau išdėstytų vietų, kur sukeliama interferencija ir rečiau išdėstytų, kur radijo ryšio taškas-taškas perdavimo kokybė yra žemesnė.

- f) **Mobilumas:** Tipinis bevielių jutiklių tinklas naudoja stacionarius tinklo taškus. Tačiau gali pasitaikyti atveju kuomet tinklo taškai ar vedančioji (duomenų surinkimo) stotelė juda. Tokiu atveju kintantis perdavimo atstumas, bei judanti antena gali sukelti duomenų praradimus.
- g) **Specifikacijų priklausomybė nuo pritaikymo:** Kadangi bevelis jutiklių tinklo funkcionalumas labai priklauso nuo jo pritaikymo paskirties, maršrutizavimo protokolas taip pat turi būti pritaikytas specifiniam veikimui, pagal bevelio tinklo pritaikymą.

## 4.2 Maršrutizavimo klasifikacija

Šioje dalyje apžvelgiami duomenų perdavimo protokoliai pagal jų veikimo principus. Pagal veikimą jie skirstomi į:

- Adresuojamas *(angl. nodecentric);*
- Neadresuojamas *(angl. data-centric);*
- Vietos (Geografinis) *(angl. location based);*
- Apklausos *(angl. query based);*
- Sąnaudų įvertinimo *(angl. cost field based);*
- Daugiamaršrutis *(angl. multipath based).*

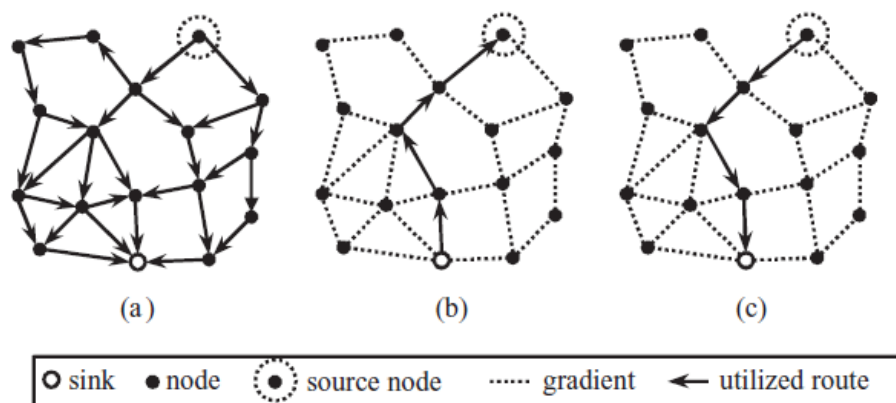
### 4.2.1 Adresuotas maršrutizavimas

Adresuotas maršrutizavimas (*angl. Nodecentric routing*) naudojamas tiek vieliniuose, tiek beveliuose tinkluose ir užtikrina suderinimą su kitais protokolais ir galimybę susijungti su kitais tinklais. Protokolas „Dynamic Source Routing“ priskiriamas adresuoto maršrutizavimo klasei ir taikomas beveliams „Ad hoc“ tinklams. Maršruto radimas atliekamas išsiunčiant tam skirtą duomenų paketą į tinklą. Persiunčiant minėtą paketą, kiekvienas tinklo taškas į jį prideda savo adresą. Kai šis paketas pasiekia tikslą, atsakomasis duomenų paketas gali būti siunčiamas lygiai tuo pačiu keliu. Toks adresavimas gali pareikalauti didelių energijos sąnaudų, kadangi į paketą reikia talpinti visų perdavime dalyvavusių tinklo taškų adresus.

### 4.2.2 Neadresuotas maršrutizavimas

Neadresuoto maršrutizavimo (*angl. data-centric*) atveju perdavimo maršrutas parenkamas pagal jo turinį, o ne pagal siuntėjo ar gavėjo identifikavimą. Tokiu atveju vietoje adreso yra tikrinamas paketo duomenų lauko turinys.

Protokolas atitinkantis šią klasę vadinamas kryptingo paplitimo „Directed Diffusion“ (DD). Duomenų surinkimo taškas (Sink) pasiunčia didelio duomenų kiekio siuntimo užklausą, taip sugeneruodamas duomenų srautą tinkle. Ši užklausa periodiškai paskleidžiama visame tinkle kiekvienam taškui. Kai ši užklausa paketą priima tinklo taškas, jis sukuria galimą kelią duomenų perdavimui vadinamą gradientu. Kai užklausa paketą gauna tinklo taškas turintis reikiamą informaciją, jis ją siunčia atgal į duomenų surinkimo tašką per daug galimų gradientų. Protokolo veikimas atvaizduotas pav. 4.1.



**Pav. 4.1** „Directed Diffusion“ protokolo veikimas (a) mažas duomenų srautas su kiekvieno taško reakcija į duomenų surinkimo taško užklausą; (b) gradiento sutvirtinimas; (c) didelio duomenų srauto perdavimas patvirtintu gradientu; [9]

Tam, kad tinkle duomenys nebūtų siunčiami ratu, kiekvieno gradiento duomenų perdavimo greitis ir priimti elementai saugojami atmintyje. Kai duomenų surinkimo taškas priima reikalautus duomenis, jis sustiprina vieną ar daugiau galimų gradientų. Toks maršruto sustiprinimas vyksta link reikiamo tinklo taško, kuomet kiekvienas tinklo taškas sustiprina duomenų šuolį iki taško, iš kurio jis gavo duomenis. Tiesioginės difuzijos protokolas tuomet pasiūlo energetiškai efektyvų duomenų perdavimo kelią.

### 4.2.3 Vietos (geografinis) maršrutizavimas

Geografinis arba dar vadinamas vietos maršrutizavimas naudoja tinklo taškų pozicijos informaciją duomenų perdavimo maršruto parinkimui. Dažnai jutiklių parodymai būna susieti su vieta iš kurios jie paimti. Vietos maršrutizavimo protokolui nereikia naudoti maršruto lentelių ir įverčių (scales), tačiau kiekvienas tinklo taškas turi žinoti savo poziciją ir šią poziciją taip pat turi žinoti duomenų surinkimo stotis.

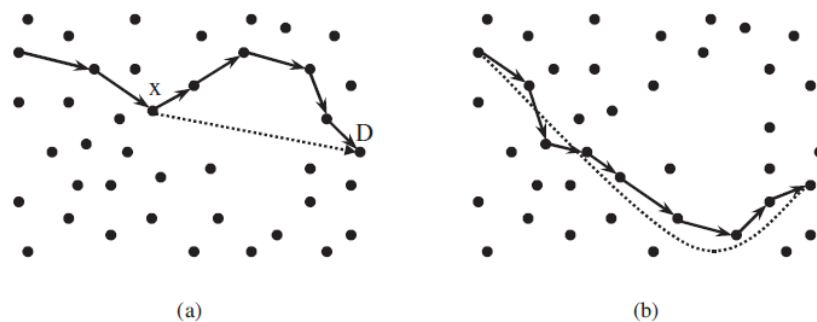
Pozicijos nustatymo įranga, pvz. GPS padidina įrenginio kainą, taip pat padidina energijos sąnaudas, nenaudojant pozicionavimo įrangos rankinis pozicijos nustatymas tampa labai

nepraktiškas, kai tinkle yra daug ryšio taškų. Ši problema sprendžiama pozicionavimo sistemas įdiegiant tik į dalį tinklo taškų, o likusiųjų koordinatės skaičiuojamos gretimų taškų pagalba.

Vietos maršrutizavimo protokolas turi parinkti efektyvų duomenų perdavimo kelią, taip pat įvertinti galimas pozicijos nustatymo paklaidas.

**Cartesian routing** – Dekarto algoritmas yra paprasčiausias tokio tipo maršrutizavimo protokolas. Jis iš vieno tinklo taško duomenis perduoda taškui esančiam arčiausiai. Nors tai paprastas protokolas ir jis randa trumpiausią duomenų perdavimo kelią, tačiau jis netoleruoja tinkle atsiradusių „skylių“ – t.y. išsijungusių, sugedusių ar tam tikroje vietoje rečiau išdėstytų ryšio taškų.

**GPSR** (angl. *Greedy Perimeter Stateless Routing*) maršrutizavimas veikia panašiu principu, tačiau jei tinklo taškas neturi kaimyninio taško artimesnio nei nustatytas atstumas, aptinkama tinklo tuščia vieta, vadinama skylė, o duomenų paketas tuomet siunčiamas perimetro režimu. Toks maršrutizavimas panaudojamas ne tik tinklo skylių išvengimui bet ir sąmoningam duomenų perdavimo tam tikrais tinklo taškais išvengimui. Minėtas maršrutizavimo būdas grafiškai atvaizduotas pav. 4.2. a.



**Pav. 4.2** Tinklo „skylių“ išvengimas naudojant pozicijos protokolus: (a) sekamas perimetras aplink skylę; (b) Trajektorinis maršrutizavimas. [9]

#### 4.2.4 Multitrajektorinis maršrutizavimas

Toks maršrutizavimo protokolas siunčia duomenų paketus iš duomenų šaltinio į duomenų surinkimo tašką ne vienu maršrutu, bet keliais. Priimantis taškas gauna kelis vienodus duomenų paketus, o tai pagerina duomenų perdavimo kokybę, tačiau taip pat padidina energijos sąnaudas, reikalaujant gerokai didesnių ir tankesnių duomenų siuntimų.

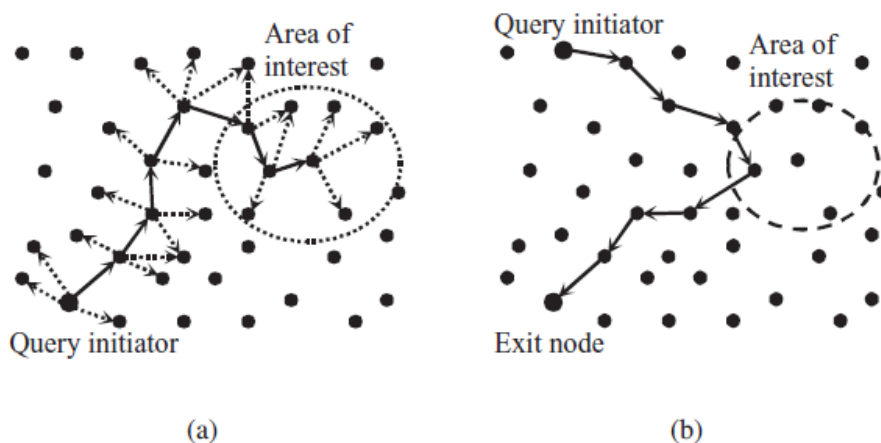
Klasikinis „flooding“ algoritmas yra paprasčiausias multitrajektorinio maršrutizavimo pavyzdys: tinklo taškas persiunčia duomenis gretimams taškams, išskyrus tą iš kurio juos gavo. Tai yra labai neefektyvu, kadangi kiekvienas tinklo taškas gaus tą patį duomenų paketą iš kaimyninių taškų.



#### 4.2.5 Apklausos valdomas maršrutizavimas

Maršrutizavimas valdomas apklausos iš tinklo reikalauja specifinės informacijos apibrėžtos tam tikra išraiška, pvz.: jutiklių tinklui liepiama siųsti duomenis apie vidutinę temperatūrą regione  $x, y$ .

**ACQUIRE** protokolas (*angl. Active Query forwarding In Sensor Networks*) – aktyvios apklausos perdavimas naudoja tinkle surinktą informaciją apklausos vykdymui. Kai tinklo taškas priima užklauso pranešimą, jis jį persiunčia gretimiems tinklo taškams atitinkamu šuolių skaičiumi. Tada gaunamas aplinkinių tinklo taškų atsakymas. Apklausos procesas vykdomas atsiktine arba numatyta trajektorija. Tokio maršrutizavimo pavyzdys grafiškai atvaizduotas pav. 4.3.



**Pav. 4.3** Apklausos valdomas maršrutizavimas: a) ACQUIRE su 1 šuoliu; b) informacijos nukreipiamas maršrutizavimas su parametru  $M = 1$ . [9]

**Informacija nukreipiamas maršruto parinkimas** (*angl. information-directed*) yra taikomas sekimo aplikacijoms. Jis palaiko apklausą judantiems taškams ir leidžia duomenų grąžinimą iš anksto nustatytam ryšio taškui. Šis taškas gali būti tas pats, kuris išsiuntė užklauso, arba bet kuris kitas tinklo taškas. Pavyzdys kaip veikia tokio tipo protokolas atvaizduotas 4.3 b. paveikslėlyje.

**Cost Field-based** maršrutizavimas veikia kiekvienam tinklo mazgui nustatant duomenų perdavimo (siuntimo energijos) sąnaudas, dažniausiai priklausančias nuo atstumo tarp mazgo ir koncentatoriaus. Šios sąnaudos, dar vadinamas perdavimo kaina, taip pat gali būti skaičiuojamas ir pagal kitus įverčius, kaip šuolių skaičius ar sukauptą mazgo energiją (akumulatoriaus įtampa). Svarbiausias reikalavimas – skaičiuojamų sąnaudų didinimas po kiekvieno duomenų perdavimo šuolio, kitu atveju gali atsirasti uždaras perdavimo ciklas (*angl. loop*).

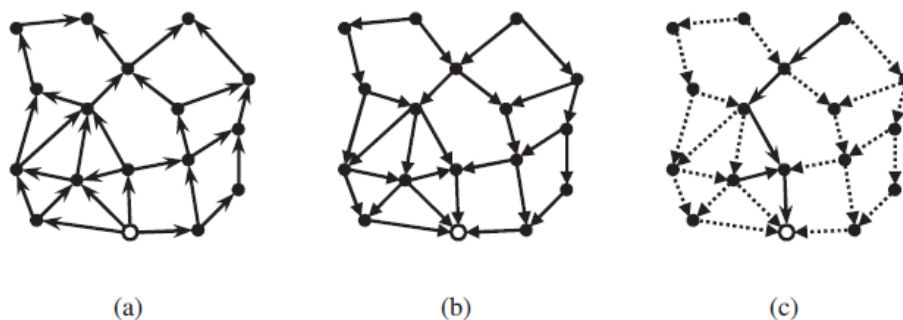
Sąnaudų įvertinimo maršrutizavimo eiga:

- Nustatymo fazė: koncentratorius išsiunčia maršruto pasiūlymą su pradiniu sąnaudų įverčiu, kuris pradžioje lygus nuliui.
- Tinklo mazgas priimtą pasiūlymo pakete esantį sąnaudų įvertį palygina su savoju
- Jei tinklo mazgo sąnaudų įvertis mažesnis, jis prie gauto įveršio prideda sąvajį ir persiunčia duomenų paketą savo kaimyniniams tinklo taškams

Tinklo taškai esantys toliau nuo maršrutizatoriaus pasižymi didesnėmis duomenų perdavimo energijos sąnaudomis ir siunčia duomenis kaimyniniams tinklo mazgams, kurie pasižymi mažesnėmis.

Tokio tipo maršrutizavimo privalumas yra tas, jog maršruto parinkimui pakanka tik to, kad kiekvienas tinklo taškas žinotų savo duomenų persiuntimo sąnaudų įvertį (kainą).

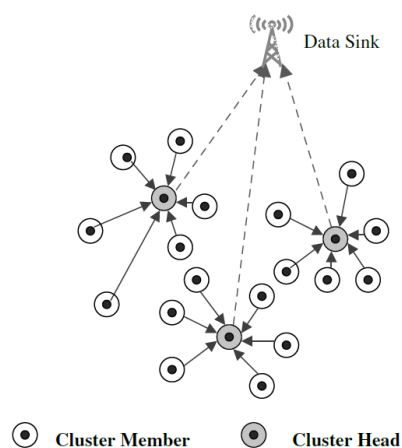
Vienintelis trūkumas – apklausos paketų paskleidimo tinkle būtinumas. Tačiau tai priimtina, dėl bevielių jutiklių tinklų asimetrinio perdavimo savybių. Sąnaudų įverčiu paremtas maršrutizavimas grafiškai atvaizduotas pav. 4.4.



**Pav. 4.4** „Cost Field-Based“ maršrutizavimas a) nustatymo fazė; b) sukurti vektoriai; c) duomenų perdavimas į koncentratorių [11].

**Mažos energijos prisitaikanti grupavimo hierarchija** (angl. *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)*) yra maršrutizavimo algoritmas sukurtas duomenų surinkimui iš gretimų tinklo taškų ir jų persiuntimui į duomenų surinkimo mazgą (koncentratorių)[11]. Grafiškai toks protokolo modelis atvaizduotas pav. 4.5. Pagrindinės šio protokolo užduotys:

- Tinklo gyvavimo laiko prailginimas;
- Energijos sąnaudų sumažinimas kiekvienam tinklo mazgui;
- Duomenų kaupimas siunčiamų pranešimų skaičiui sumažinti.



**Pav. 4.5** „LEACH“ protokolo duomenų perdavimo schema [11]

#### 4.2.6 Maršrutizavimo protokolų apibendrinimas

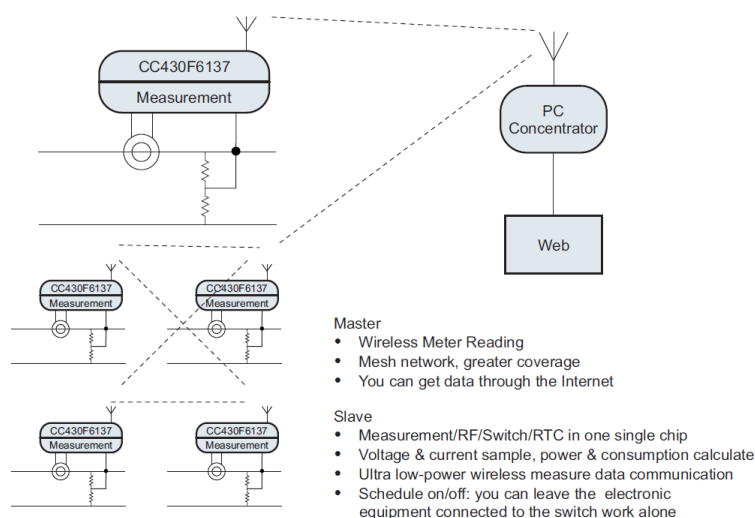
Maršrutizavimo realizavimui gali būti panaudoti įvairios protokolų kombinacijos. Maršrutizavimas yra labai sudėtinga tinklo dalis ir jo realizavimas reikalauja papildomų energijos, skaičiavimo resursų ir paketo ilgio. Jei nėra žinoma kiekvieno tinklo mazgo vieta tinkle, duomenų perdavimo maršruto parinkimas tampa itin sudėtingas, jei norima naudoti daugiašulio perdavimo architektūrą. Lengviausiai daugiašulis perdavimas realizuojamas, jeigu kiekvieno tinklo taško koordinatės yra žinomos ir įvertintos duomenų perdavimo atstumo galimybės. Taip galima tiksliai įvertinti duomenų perdavimo linijų vektorius ir atitinkamai parinkti duomenų perdavimo maršrutą. Tačiau net ir tokiu atveju apkraunamas duomenų paketas, kadangi reikia talpinti visų perdavime dalyvaujančių modulių adresus. Kuo ilgesnis duomenų paketas, tuo ilgesnis jo siuntimo laikas, taip pat ir paketo siuntimo energijos sąnaudos. Tai dar labiau juntama, jeigu naudojamas duomenų perdavimas pagal apklausą (*angl. Query based*).

Lengviausias tinklo realizavimo būdas yra taškas – taškas tipo duomenų mainai, kuomet duomenys keliauja tiesiai iš vieno tinklo taško į kitą, be tarpinių perdavimo taškų. Nors ir tokiu atveju prarandamas ryšio atstumas, bet sumažinamas perdavimų skaičius. Daugiašulio duomenų perdavimo realizavimui galima dalį tinklo taškų naudoti kaip kartotuvus. Pakankamai paprastas ir puikiai projekto realizavimui tinkamas protokolas yra „LEACH“, kadangi jame naudojamas vienas duomenų surinkimo mazgas, o kiti tinklo taškai veikia kaip duomenų surinkėjai. Tolimesnėje projekto eigoje remiamasi panašiu maršrutizavimo principu, projektuojant duomenų perdavimo protokolą.

## 5 TEXAS INSTRUMENTS CC430 DUOMENŲ MAINŲ PROTOKOLAS

Kompanijos „Texas Instruments“ bevielio tinklo sprendimas paremtas MSP430 mikrokontrolerio ir CC1101 radijo ryšio modemo sąjunga vienoje mikroschemoje. Šis sprendimas ir jo protokolas yra gana detalai aprašytas ir yra geras šaltinis, kuriuo galima remtis projektuojant šio darbo objektą - bevielio ryšio modulį. Tinklo sistema susideda iš duomenų surinkimo stotelės (koncentratoriaus) ir jo valdomų tinklo taškų (nodes), naudojančių CC430 mikroschemą.

Koncentratorius (pagrindinis taškas) renka informaciją iš kitų tinklo modulių reguliariais intervalais, kas kart padidindamas atstumą. Kiekvieną kartą jis surenka informaciją apie taškas – taškas susijungimus. Visa tinklo kontrolė atliekama vedančiuoju tinklo tašku (pav. 5.1).



**Pav. 5.1** CC430 tinklo schema [13]

### **Duomenų koncentratoriaus tinkle funkcijos:**

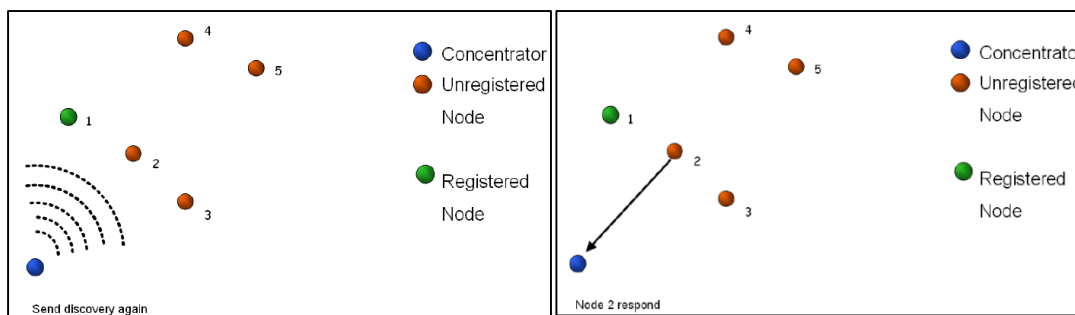
- Naujų tinklo taškų atradimas;
- Tinklo lentelės sudarymas;
- Geriausio maršruto radimas komunikacijai su kiekvienu tašku;
- Duomenų mainai su kiekvienu ryšio tašku;
- Prieiga į WEB serverį.

### **Tinklo modulių (taškų) funkcijos:**

- Atsakyti koncentratoriui kai jis „atrandamas“ tinkle;
- Perduoti maršrutizavimo žinutes kitiems taškams;
- Vykdyti valdymo taško komandas;
- Kalendoriaus funkcija;
- Įjungimo/išjungimo funkcija;
- Parametrų matavimas.

## 5.1 Veikimo principas

1. Koncentratorius išsiunčia pirmąjį tinklo taškų radimo signalą. Gavęs šį signalą, kiekvienas tinklo taškas laukia atsitiktinį laiko intervalą prieš išsiųsdamas atsakomąjį signalą;
2. Koncentratorius gavęs atsiliepimo signalą iš taško, jam nusiunčia patvirtinimo pranešimą, kad jis yra užregistruotas. Koncentratorius naudoja signalo stiprumo parametą RSSI, esantį duomenų pakete atėjusiame iš tinklo taško ir pildo ryšio kokybės lentelę. Pagal šią lentelę sudaromas optimalus duomenų perdavimo maršrutas;
3. Išsiuntus sekantį tinklo taškų radimo signalą, jau užregistruotas tinklo taškas nebeatiliepia tam pačiam koncentratoriui (pav. 5.2 a);
4. Atsiliepus kitam tinklo taškui, jis užregistruojamas ir jam persiunčiamas patvirtinimo pranešimas. (pav. 5.2 b);



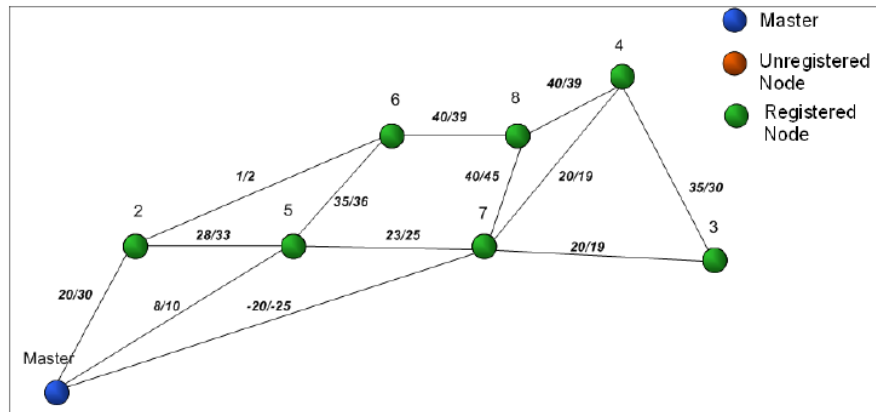
(a)

(b)

**Pav. 5.2** Tinklo taškų radimas: a) taškų radimo signalo siuntimas; b) taško atsakas [13]

5. Užregistravus visus koncentratoriaus ryšio zonoje esančius taškus, jis išsiunčia komandą, įgalinančią pasiekiamus taškus kreiptis į tolimesnius, už koncentratoriaus ryšio zonos esančius taškus;
6. Tuomet tinklo taškų radimo signalą siunčia ne koncentratorius, o tinklo taškas, ir jam atsiliepia tolimesni taškai. Atsiliepimo signalą taškas laukia pakankamą laiko tarpą, kad visi galimi taškai spėtų išsiųsti atsiliepimo pranešimą;
7. Užklausa išsiuntęs ryšio taškas raportuoja koncentratoriui pradedant pirmuoju jam atsiliepusiu tašku;
8. Koncentratorius užregistruoja tinklo tašką ir atnaujina ryšio kokybės lentelę;
9. Procesas vykdomas kol visi tinklo taškai užregistruojami;

Galutinio sudaryto tinklo pavyzdys pavaizduotas pav. 5.3.



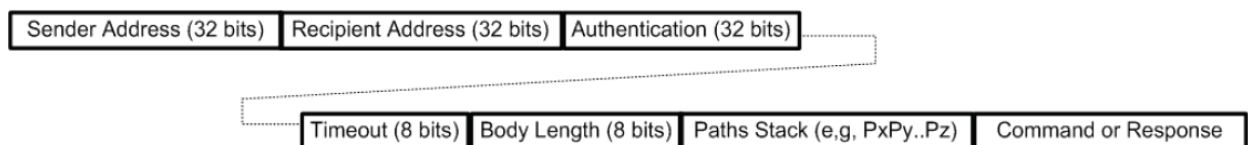
**Pav. 5.3** Sudarytas tinklas [13]

## 5.2 Duomenų paketo formatas

Duomenų paketo ilgis yra kintamas ir susideda iš kelių laukų. Autorizavimo ir laukimo (timeout) laukai palikti tolimesniam sistemos tobulinimui.

Paketo turinys:

- Unikalus siunčiančio mazgo ID (MAC adreso ekvivalentas);
- Unikalus priimančio mazgo ID: turinys lygus nuliui interpretuojamas kaip paieškos paketas;
- Paketo ilgis;
- Kelio informacijos laukas turi visą pranešimo kelio informaciją. Kelią nustato koncentratorius, o priimantis tinklo mazgas kelio informaciją naudoja nustatymui ar siųsti pranešimą tolimesniam tinklo taškui nustatytu keliu ar nutraukti siuntimą ir apdoroti gautą informaciją;
- Komanda ir duomenys. Šią informaciją apdoroja tik priimantysis tinklo mazgas.

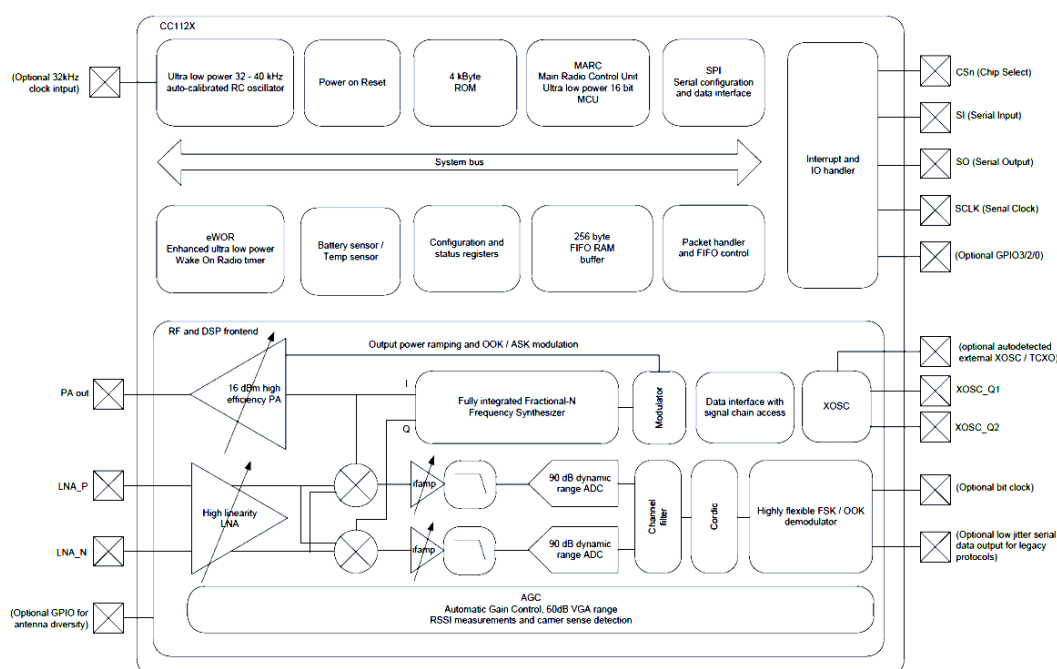


**Pav. 5.4** Paketo struktūra [13]

Apžvelgtas duomenų surinkimui naudojamas protokolas ir ryšio sistema leidžia geriau suvokti kaip gali būti formuojamas daugiašuoelis duomenų perdavimo tinklas ir kaip yra registruojami nauji tinklo moduliai.

## 6 MAŽOS GALIOS RYŠIO MODULIO CC1120 VEIKIMO ANALIZĖ

Siekiami išanalizuoti ir išsiaiškinti pasirinkto ryšio modulio veikimo principą. Radijo ryšio modemas (angl. *transceiver*) CC1120 yra sukurtas nebrangioms mažos perdavimo galios (iki 16dBmW) ir mažos maitinimo galios ryšio sistemoms. Tai yra integruota mikroschema, turinti filtras, moduliatorių, demoduliatorių, galios stiprintuvą, dažnių sintezatorių ir 16 bitų mikrovaldiklį. Šis įtaisas suprojektuotas dirbti ISM (angl. *Industrial, Scientific and Medical*) ir SRD (angl. *Short Range Device*) dažnių juostose. Radijo ryšio modulių šeima CC112x suprojektuota darbu kartu su išoriniu mikrovaldikliu. Mikrovaldiklis reikalingas šio įrenginio konfigūravimui ir valdymui. Supaprastinta blokinė įrenginio schema atvaizduota pav. 6.3.



**Pav. 6.1** Funkcinė - struktūrinė CC1120 modemo schema [14]

Tyrimų ir bandymų tikslams „Texas Instruments“ gamintojas yra išleidęs spausdintinę plokštę su visais reikalingais išoriniais komponentais. Darbo metu bus naudojama CC1120EM\_DK\_169, modulio versija, suderinta 169 MHz nešlio dažniui. Šio modulio fotografija pateikta pav. 6.2.



**Pav. 6.2** Radijo ryšio modulis CC1120EM

## 6.1 CC1120 pagrindiniai parametrai

Pagrindiniai ryšio modulio CC1120 parametrai:

1. 2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK, 4-GFSK, ASK/OOK moduliacijos tipai;
2. Darbo dažnių diapazonai 136.7 MHz – 960 MHz;
3. Gretimo kanalo selektyvumas: 64 dB prie 12.5 kHz tarpų;
4. Imtuvo jautrumas:
  - -123 dBm prie 1.2 kbps;
  - -110 dBm prie 50 kbps;
5. Atitinka ETSI standarto 1 kategorijos reikalavimus 169 MHz ir 433 MHz juostoje;
6. 128 baitų siuntimo ir priėmimo buferiai;
7. Maksimali siųstuvo galia 16 dBm;
8. 4 bendros paskirties prievadai.

Srovės sąnaudos (169 MHz, 25°C, VDD=3V) pateiktos lentelėje 6.1.

Lentelė 6.1 Srovės sąnaudos skirtingais režimais

Sąlygos	Srovės sąnaudos, mA
TX +15 dBm	54
TX +14 dBm	49
TX +10 dBm	41
RX (High performance mode)	23
RX (Low Power Mode)	17
IDLE	1.3

## 6.2 Registrai ir bendros paskirties prievadai

Modemas CC1120 turi 316 valdymo ir 14 komandų registų, kuriais yra keičiama RF modemo konfigūracija, parametrų stebėjimas, duomenų mainai ir komandų siuntimas. Toks didelis registų skaičius leidžia atlikti daugybę nustatymų, tačiau tuo pačiu daro konfigūravimo procesą sudėtingu. Registrai yra pasiekiami per SPI sąsają. Galimas pavienio registro skaitymas/įrašymas, arba „BURST“ skaitymas/rašymas, kuomet registro adresas nusiunčiamas vieną kartą, o tuomet jo turinys skaitomas arba įrašomas nuosekliai - baitas po baito. Tai patogu naudoti skaitant ir įrašant siuntimo ir priėmimo duomenų buferius (TX Fifo ir RX Fifo).

Taip pat CC1120 mikroschema turi keturis papildomus bendros paskirties prievadus (GPIO), kurie gali būti konfigūruojami norimų parametrų stebėjimui. Kiekvienam iš šių prievadų galima priskirti vieną iš 60 galimų signalų, kuriuos galima interpretuoti kaip pertraukties pradžios



arba vėliavėlės nustatymo požymius. Signalai kiekvienam bendros paskirties prievadui nustatomi keičiant atitinkamų registų turinį per SPI sąsają. Galimų GPIO signalų panaudojimo pavyzdžiai:

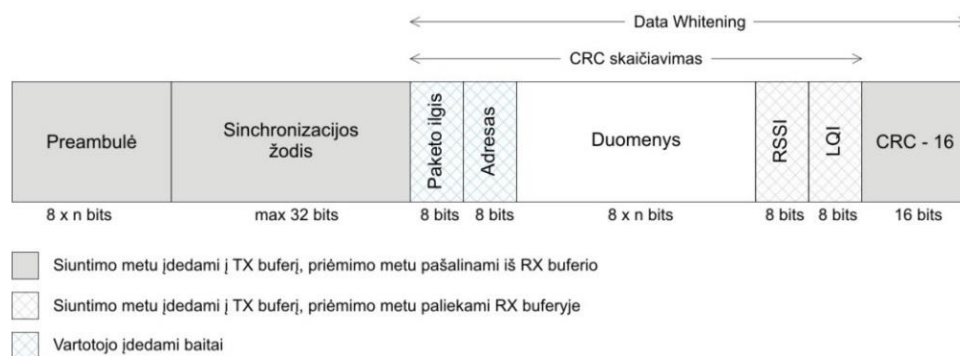
- RX buferio perpildymas;
- TX buferio perpildymas;
- CRC kontrolės atitikimas;
- Paketo preambulės priėmimas;
- Mikrovaldiklio žadinimo pertrauktis.

### 6.3 Duomenų paketo struktūra

CC1120 turi integruotą aparatinę paketų apdorojimo sistemą. Ji gali būti konfigūruojama automatiškai pridėti atitinkamus baitus į siunčiamą paketą. Paketą sudaro:

- Preambulės baitai;
- Sinchronizacijos žodis (11, 16, 18, 24 arba 32 bitų);
- Du ryšio kokybės indikacijos baitai (RSSI, ir LQI);
- Dviejų baitų perteklinės sumos kontrolė (CRC-16);

Standartinė paketo struktūra pavaizduota pav 6.3.



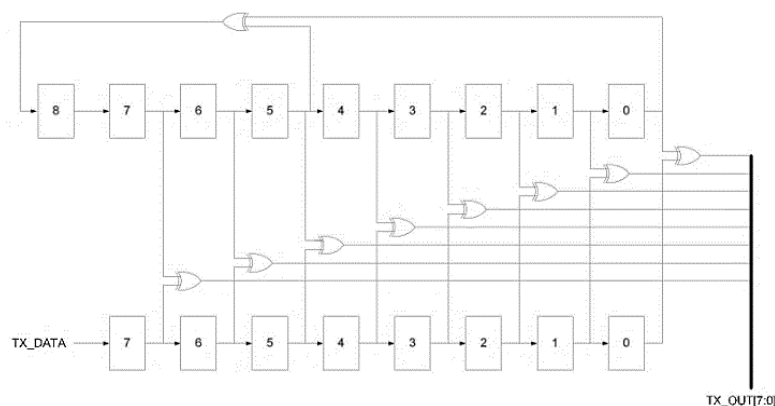
**Pav. 6.3** Paketo struktūra [15]

Imtuvas išpakuoja gautus duomenis ir RX duomenų buferyje palieka tik vartotojo duomenis bei kokybės indikacijos baitus (jei jie siunčiami).

CC1120 palaiko fiksuoto, kintamo ir neriboto dydžio paketų perdavimą. Jei naudojamas kintamas paketo ilgis, pirmasis paketo baitas turi jį aprašyti, kadangi CC1120 modulis priimto paketo ilgį lygina su pirmajame paketo baite atsiųstu skaičiumi. Jei yra naudojamas fiksuoto dydžio paketų perdavimas, į paketo struktūrą nebūtina dėti paketo ilgio baito.

## 6.4 Nuolatinės spektro dedamosios eliminavimas

Užimamos juostos plotyje galia tolygiai pasiskirsto tuomet, kada duomenys yra atsitiktiniai ir neturi nuolatinės dedamosios. Tačiau realiomis sąlygomis duomenys gali turėti ilgas vienetų arba nulių sekas ir tai gali apsunkinti bitų sinchronizavimą imtuvo trakte. Tokiu atveju naudojama technologija, vadinama išbalinimu (angl. *data whitening*). Tai metodas, kuomet duomenys prieš siuntimą yra perleidžiami pro išbalinimo įrenginį, kurį sudaro postūmio registras, o jo grandys yra apjungtos suma moduliu du loginiais elementais. Priimtiems duomenims pakartojama ta pati loginė operacija[15]. (Pav. 6.4).

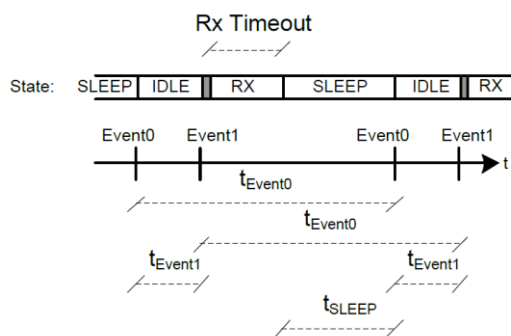


**Pav. 6.4** "Data Whitening" operatoriaus schema [15]

Ši funkcija CC1120 įrenginyje atliekama automatiškai siuntimo ir priėmimo metu ir gali būti įjungta/išjungta keičiant atitinkamo registro turinį. Funkcija „Data Whitening“ taikoma visam paketui, išskyrus preambulę ir sinchronizacijos žodį.

## 6.5 Miego režimo ir imtuvo įjungimo valdymas

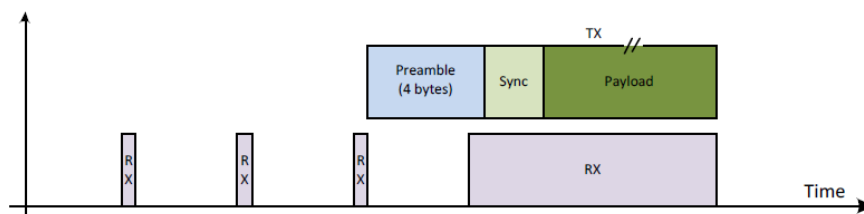
Siekiant kuo mažesnio galios suvartojimo, įrenginio imtuvas neturi būti visą laiką įjungtas. Šis klausimas CC1120 įrenginyje yra sprendžiamas naudojant „eWOR“ funkciją (angl. *Enhanced Wake-On-Radio*), kuri leidžia įrenginiui likti miego režime ir tik nustatytu intervalu pereiti į imtuvo režimą ir laukti signalo. Jei paketas negautas per nustatytą laukimo laiką, įrenginys grįžta atgal į miego režimą. Šiai funkcijai atlikti CC1120 įtaisas turi integruotą laikmatį, kuris generuoja „įvykius“ ir tai leidžia persijungti į miego, budėjimo ir imtuvo režimus be mikrovaldiklio įsikišimo. Šios posistemės darbas laiko ašyje grafiškai pavaizduotas pav. 6.6.



**Pav. 6.5** eWOR režimo laikmačio intervalai[15]

Laikmačio intervalus galima užprogramuoti keičiant atitinkamas registrų reikšmes. Galima keisti visų intervalų (Event0, Event1 ir RX Timeout) dydžius. Kai tik gaunamas sinchronizacijos žodis, užfiksuojama tuometinė laikmačio vertė, kuri gali būti naudojama sinchronizacijai tarp siųstuvo ir imtuvo palaikyti.

Kuomet nėra žinoma kada bus atsiųstas paketas, reikia nuolat laukti ir stebėti radijo signalų aktyvumą radijo juostoje. Radijo įtaisų CC112x serija turi režimą, vadinamą „RF Sniff Mode“ (radijo dažnio pasiklausymo režimas). Kadangi CC1120 suprojektuotas taip, kad pereinamieji procesai būtų labai trumpi, jis gali labai greit įsijungti ir išsijungti. Būtent ši savybė išnaudojama „RF Sniff“ režime, kuomet naudojant tą patį „eWOR“ laikmatį, imtuvas įsijunginėja trumpais impulsais kaip parodyta Pav. 6.6.



**Pav. 6.6** Režimo "RF Sniff Mode" grafinis atvaizdavimas [15]

CC1120 platformoje naudojami efektyvūs signalų apdorojimo algoritmai, kurie leidžia imtuvo stiprintuvui įsijungti praėjus tik 4 preambulės bitams. Imtuvo įsijungimo intervalas turi būti nustatytas taip, kad būtų užtikrinamas bent 4 bitų preambulės priėmimas. Efektyvumo didinimui naudojamas imtuvo valdymas pagal nešlio aptikimą (*angl. RX Termination based on carrier sense*). Jei eteryje nešlio signalas neaptinkamas, imtuvas yra išjungiamas. Kaip teigia gamintojas, srovės sąnaudos „RX Sniff Mode“ režime sumažinamos iki 2 mA, lyginant su 17-22 mA nuolatinio imtuvo darbo režimu.

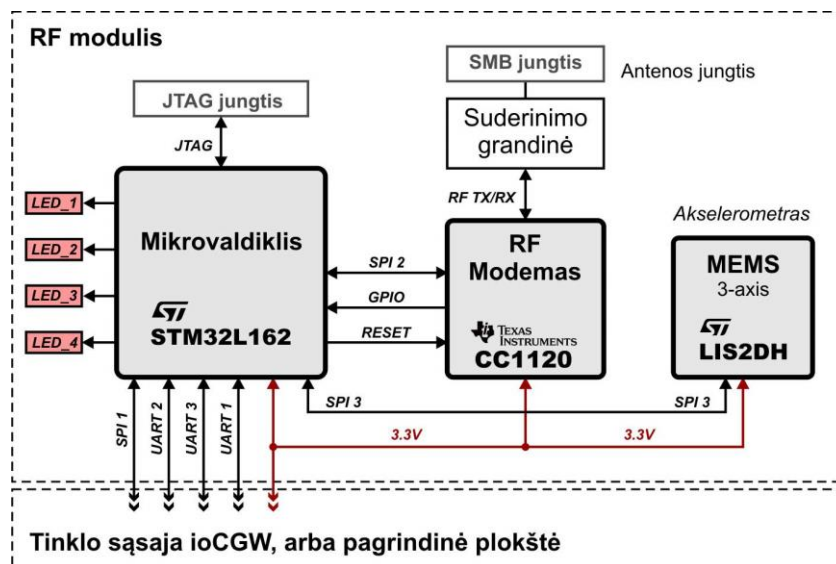
## 7 RADIJO RYŠIO MODULIO PROJEKTAVIMAS

Fizinio sluoksnio realizavimui pasirinktas prieš tai išanalizuotas „Texas Instruments“ gamintojo mažos galios radijo ryšio modulis CC1120, galintis dirbti 169 MHz dažnių juostoje, bei atitinkantis ETSI 300-220 mažos galios radijo įtaisų standartą. Prieš projektuojant bevielio ryšio modulio schemą ir spausdintinio montažo plokštę, pirmiausia buvo surinktas bandomasis sistemos variantas iš „CC1120EM“ ir „STM32 Discovery L1“ maketų. Šis bandomasis variantas aprašytas priede P-1.

Vėliau buvo suprojektuotas analogiškas sistemos prototipas - spausdintinio montažo plokštė, kurioje sutalpinta visa sistema. Šiame paragrafe plačiau aptariamas bevielio ryšio modulio prototipo realizavimas.

### 7.1 Bevielio ryšio modulio aparatinė dalis

Ryšio modemo aptarnavimui, duomenų perdavimo iniciavimui, duomenų kaupimui ir įvairių sąsajų valdymui reikalingas mikrovaldiklis. Pasirinktas mikrovaldiklis - STM32L162. Jis yra skirtas mažos galios sistemoms, bei turi aparatinį AES šifravimo įrenginį, kuris yra būtinas mūsų tinklo modulio realizavimui. Struktūrinė schema pateikta Pav. 7.1.

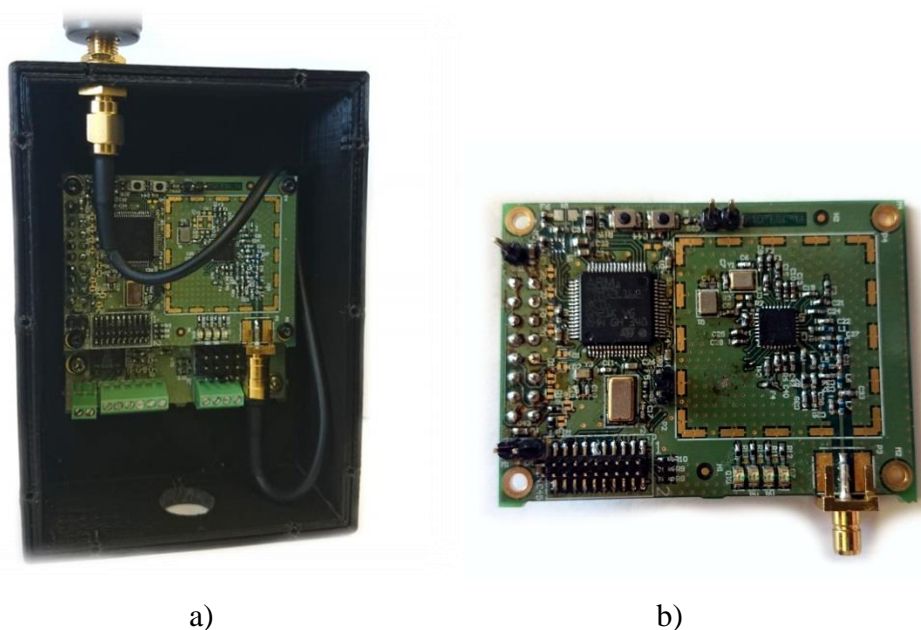


Pav. 7.1 Radijo ryšio modulio prototipo struktūrinė schema

Radijo ryšio trakto dalis yra analogiška „Texas Instruments CC1120EM“ moduliui. Taip pat sukurtas modulis turi akcelerometrą informacijai apie modulio padėtį įvertinti. Jis gali būti naudingas, kuomet ryšio modulis su kartu prijungta meteorologine stotele ar kitokia įranga nugriūna, pavirsta ar yra nešamas. Tuomet mikrovaldiklis gauna indikaciją apie būsenos pakitimą ir galima išsiųsti būsenos paketą į pagrindinę duomenų surinkimo stotį.

Komunikacijoms su išoriniais įrenginiais pritaikytos trys UART komunikacijos sąsajos. Viena skirta komunikacijai su pagrindine duomenų surinkimo stotimi – tinklo sąsaja, o kitos dvi su išoriniais įrenginiais.

Modulio plokštelė ir jungtis pritaikyta prijungimui prie pagrindinės plokštės, montuojamos RF modulio korpuse, kurioje yra maitinimo grandinė ir UART - RS232 signalo lygio keitiklis, arba prie tinklo sąsajos. Abiem atvejais pritaikytos atskiros komunikacijų linijos. Modulio principinė schema pateikta priede P-3. Surinkto radijo ryšio modulio prototipo fotografijos pateiktos Pav. 7.2.



**Pav. 7.2** RF modulio prototipas: a) įmontuotas korpuse; b) modulio plokštė.

Paveikslėlyje Pav. 7.2a matome surinkto bevielio ryšio modulį, kuris gali būti naudojamas kaip nutolęs tinklo taškas (pvz.: prijungtas prie meteorologinės stotelės ar kitokio WSN tinklo renkamų duomenų šaltinio). Kaip atrodo pagrindinė suprojektuoto bevielio ryšio modulio plokštė atvaizduota pav 7.2b.

Antenai prijungti naudojamas trumpas SMA – SMB RF174 50Ω kabelis. Maitinimas ir duomenų linijos jungiamos per precizinius kontaktus išdėstytus 2.54 mm atstumu.

Radio ryšio moduliui panaudojamas 32 MHz 10ppm kvarcinis generatorius, kuris garantuos nešlio dažnio stabilumą standarto apibrėžtose  $\pm 10$  kHz ribose. Mikrovaldikliui panaudotas išorinis 8 MHz kvarcinis generatorius.

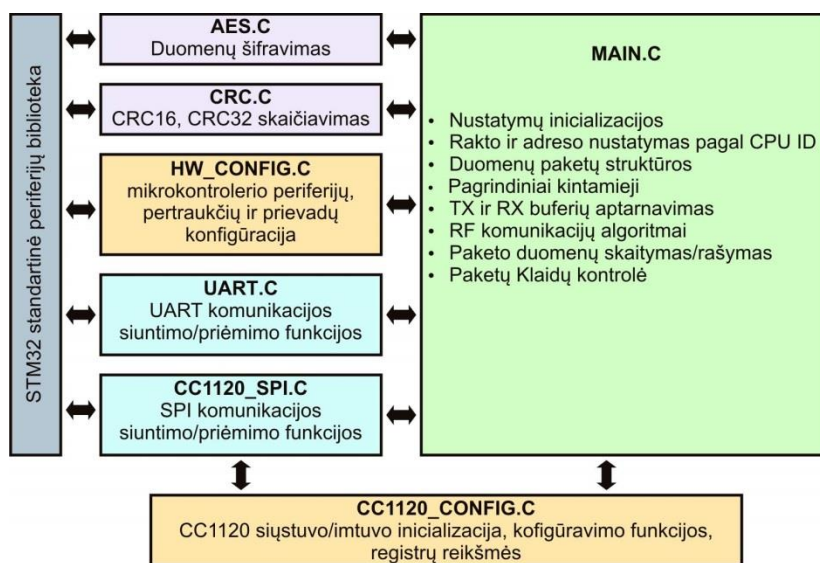
Suprojektuotas modulis turi „reset“ ir vartotojo mygtukus. Paleidimo iš naujo (reset) mygtukas paleidžia sistemą iš naujo, o nuspaudus vartotojo mygtuką ir tuo pat metu spaudžiant paleidimo mygtuką, sistema grįžta į pradinis nustatymus. Tai leidžia grįžti prie pradinio (pagal nutylėjimą) šifravimo rakto naudojimo.

## 7.2 Programinės įrangos projektavimas

Programinės įrangos kūrimas mikrovaldikliui atliekamas su programinės įrangos paketu „Keil uVision 5“. Projektuojama mikrovaldiklio programinė įranga turi atlikti šias funkcijas:

- SPI sąsajos aptarnavimas (duomenų mainai su CC1120 modulių);
- UART sąsajos aptarnavimas (duomenų mainai su išoriniais įrenginiais);
- Komandų interpretavimas;
- Radijo ryšio modulio registrų konfigūravimas;
- Siuntimo ir priėmimo duomenų buferių apdorojimas;
- Kintamo ilgio paketų apdorojimas;
- Duomenų šifravimas;
- CRC kontrolė.

Programinė įranga sudaroma jos kodą skirstant į atskirus modulius pagal programines funkcijas. Sudarytos programinės įrangos struktūra pateikta pav. 7.1.



**Pav. 7.3** Mikrovaldiklio programinės įrangos struktūra.

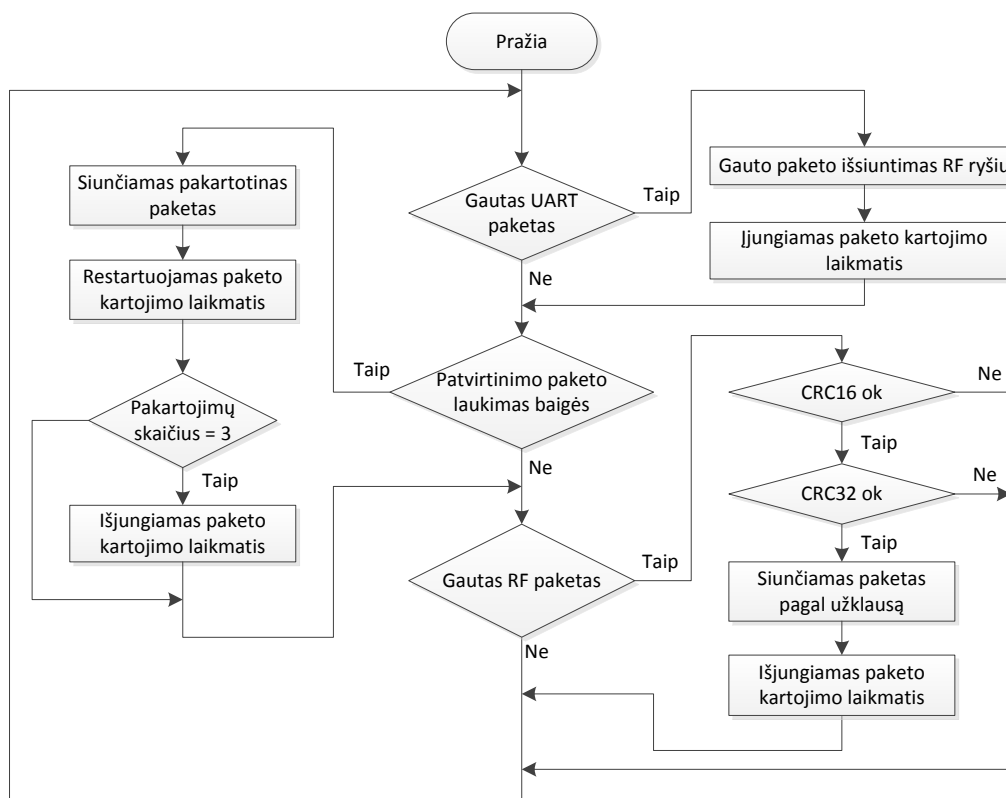
Kaip pavaizduota pav. 8.1 programa suskirstyta į atskiras dalis pagal funkcionalumą:

- MAIN yra pagrindinis programinis failas, kuriame vykdomas inicializacijos ir konfigūracijos funkcijų kvietimas. Čia aprašomi kintamieji, paketo struktūros, siuntimo, priėmimo ir pagrindinės protokolo funkcijos. Taip pat vykdomos ;
- HW\_CONFIG talpina funkcijas skirtas mikrovaldiklio periferijų, bendros paskirties prievadų, pertraukčių ir kitų periferijų konfigūravimui;
- UART faile sukurtos funkcijos UART komunikacijai vykdyti. Sudarytos pavienio baito ir paketo siuntimo funkcijos;

- CC1120\_SPI failas skirtas SPI sąsajos aptarnavimui su CC1120 modemu. Sudarytos pavienio baido ir paketo siuntimo/priėmimo funkcijos, taip pat ir funkcijos komandiniams baitams siųsti;
- CC1120\_CONFIG faile yra standartiniai (*default*) CC1120 nustatymai, taip pat funkcijos nustatymų įrašymui ir keitimui;
- CRC faile yra funkcijos CRC16 ir CRC32 kontrolinei sumai skaičiuoti;
- AES programos kodo failas skirtas duomenų šifravimo ir dešifravimo vykdymui.

### 7.2.1 Pagrindinės programos algoritmas

Pagrindinė programinė dalis paremta begalinio ciklo „while(1)“ pagrindu, nuolat tikrinant nustatytas vėliavėles. Tiek radijo ryšio, tiek UART sąsajomis ateinantys duomenys priimami mikrovaldiklio pertraukčių funkcijomis. Įvykus pertraukčiai ir sėkmingai nuskaičius duomenų paketą, pažymima paketo priėmimo vėliavėlė. Supaprastintas pagrindinės programos algoritmas pateiktas Pav. 7.4.



**Pav. 7.4** Supaprastintas pagrindinės programos algoritmas

Algoritme atvaizduotas supaprastintas duomenų mainų algoritmas. Duomenų mainai programinėje įrangoje vykdomi naudojant daugybę funkcijų ir komandų, kadangi naudojamos skirtingos sąsajos, duomenų masyvai ir struktūros.

## 7.2.2 Duomenų buferiai ir struktūros

Duomenų perdavimui naudojami duomenų masyvai (buferiai) ir struktūros. Du duomenų masyvai „RF\_TX\_Buffer“ ir „RF\_RX\_Buffer“ naudojami duomenų mainams su CC1120 modemu per SPI sąsają. Taip pat šie masyvai naudojami duomenims perduoti į šifravimo/dešifravimo funkcijas. Kadangi duomenys esantys pakete yra skirtingos reikšmės ir paskirties, patogu jų laikymui naudoti duomenų struktūras, kadangi kiekvienas struktūros laukas turi savo pavadinimą. Naudojamos duomenų struktūros surašytos lentelėje 7.1.

Lentelė 7.1 Naudojamos duomenų struktūros

No.	RF_RX_Struct		RF_TX_Struct		UART_RX_Struct		UART_TX_Struct	
	Pavadinimas	Ilgis, baitai	Pavadinimas	Ilgis, baitai	Pavadinimas	Ilgis, baitai	Pavadinimas	Ilgis, baitai
1	PKT_LENGTH	1	PKT_LENGTH	1	LENGTH	1	LENGTH	1
2	DEST_ADDR	4	DEST_ADDR	4	UART_CMD	1	STATUS	1
3	SRC_ADDR	4	SRC_ADDR	4	DEST_ADDR	4	SRC_ADDR	4
4	RADIO_CMD	1	RADIO_CMD	1	SRC_ADDR	4	RADIO_CMD	1
5	DATA	100	DATA	100	RADIO_CMD	1	RSSI	1
6	STATUS	1	STATUS	1	DATA	100	DATA	100
7	INC_CNT	2	INC_CNT	2	CRC16	2	CRC16	2
8	CRC32	4	CRC32	4				
9	RSSI	1						
10	LQI	1						

Plačiau šių kintamųjų reikšmės aprašytos 8.1 skyriuje, kur nagrinėjama paketo struktūra. Kadangi naudojamas kintamo dydžio paketas, keičiasi duomenų kiekis įrašomas į „DATA“ lauką, tačiau struktūros dydis nekinta. Reikiamas duomenų kiekis iš ir į struktūrą rašomas atitinkamomis funkcijomis.

## 7.2.3 Pagrindinės duomenų perdavimo funkcijos

Kintamo ilgio paketų kopijavimui iš buferių į struktūras ir atvirkščiai sukurtos šios funkcijos:

- TX\_Struct\_to\_TX\_Buff – radijo ryšiu siunčiamų duomenų perrašymas iš struktūros į buferį;
- RX\_Buff\_to\_RX\_Struct - radijo ryšiu gautų duomenų perrašymas iš buferio į struktūrą;
- UART\_RX\_Struct\_to\_TX\_Buff – UART sąsaja gautų duomenų perrašymas į radijo ryšio siuntimo buferį;
- RX\_Struct\_to\_UART\_TX\_Struct – radijo ryšiu gauto paketo perrašymas į UART paketo struktūrą.



Šių funkcijų algoritmai pateikti prieduose P-4, P-5, P-6, P-7. Duomenų perdavimo seka, vykdoma mikrovaldiklyje, naudojant šias funkcijas ir lentelėje 7.1 aprašytas duomenų struktūras atvaizduota priede P-11.

#### 7.2.4 Pertraukčių aptarnavimas

Modulio programinėje įrangoje naudojami šie pertraukčių šaltiniai:

- Priimtas paketas bevieliu ryšiu (algoritmas atvaizduotas priede P-9);
- Priimtas baitas UART sąsaja (algoritmas atvaizduotas priede P-10);
- Paketas siunčiamas arba priimamas (naudojama indikacijos tikslams);

Kadangi apie duomenis esančius CC1120 modemo buferyje pranešama išorinio prievado „GPIO“ pertrauktimi ir duomenų mainai visą laiką inicijuojami iš mikrovaldiklio pusės, SPI sąsajos su bevieliu modemu pertrauktis nenaudojama.

#### 7.2.5 Duomenų šifravimas

Duomenų šifravimą atlieka mikrovaldiklio aparatinė periferija. Naudojamas ECB šifravimo algoritmas (*angl. Electronic Code Book*). Panaudojama modifikuota periferinių įrenginių programinės bibliotekos funkcija, kadangi reikia šifruoti ne visą į funkciją perduodamą masyvą, o tik jo dalį. Kadangi šifravimas vyksta 16 baitų blokais, šifruojamų duomenų kiekis turi būti 16 baitų kartotinis. Šifravimo rakto inicializavimo įkėlimo funkcija vykdoma paleidžiant sistemą arba gavus naują raktą iš tinklo sąsajos valdančiojo mazgo. Šifravimo algoritmas pateiktas priede P-10.

#### 7.2.6 Mikrovaldiklio taktinio dažnio nustatymai

Žinoma, jog skaitmeninės sistemos suvartojama energija labai priklauso nuo taktinio dažnio. Programiniu būdu parenkami mikrovaldiklio taktinio dažnio nustatymai taip, kad būtų kuo mažesnės energijos sąnaudos. Taip pat sumažinama procesoriaus šerdies įtampa iki minimalios reikšmės. Naudojami nustatymai pateikti lentelėje 7.2.

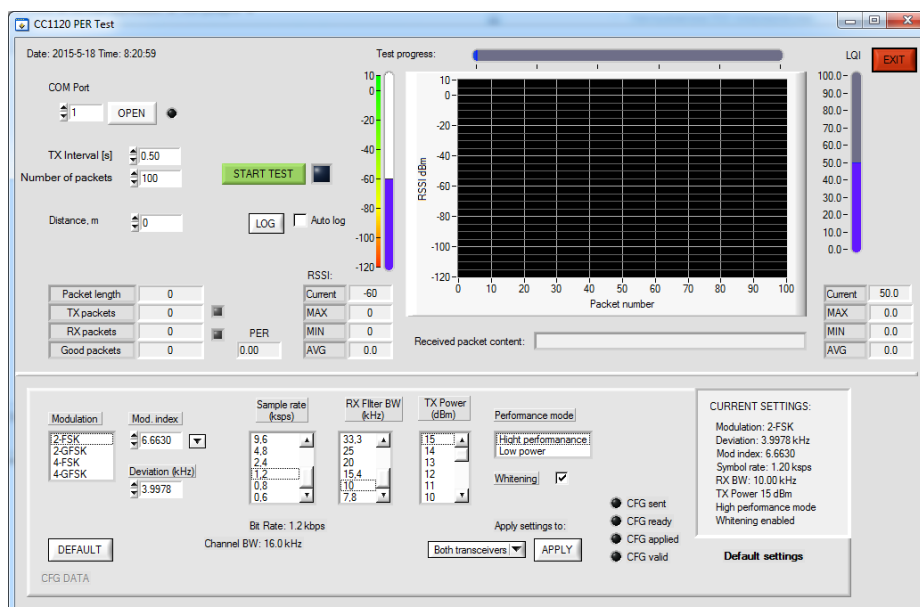
Lentelė 7.2 Mikrovaldiklio nustatymai

Parametras	Apibūdinimas	Reikšmė
SYSCCLK	Šerdies taktinis dažnis	8 MHz
HCLK	Duomenų magistralės taktinis dažnis	2 MHz
Vcore	Procesoriaus šerdies įtampa	1.2 V

Šie parametrai nustatomi pradiniam sistemos paleidimo faile, keičiant dažnio daliklio reikšmes, bei įtampos diapazono registrus.

## 7.2.7 Ryšio patikimumo tyrimo aplikacijos projektavimas

Kompiuterinė aplikacija sukurta su „LabWindows CVI“ programiniu paketu. Aplikacija skirta ryšio parametrų stebėjimui, PER testo valdymui ir CC1120 nustatymams atlikti. Ji per UART sąsają siunčia paketus ryšio moduliui ir inicijuoja jų perdavimą. Sukurtos aplikacijos vartotojo sąsajos atvaizdas pateiktas Pav. 7.5.



**Pav. 7.5** Santykinio paketų klaidų skaičiaus matavimo aplikacijos langas

Vartotojas gali nustatyti kiek paketų ir kokių periodu bus siunčiama testo metu. Paspaudus testo paleidimo mygtuką, pradedami siųsti paketai ir atvaizduojamas testo progresas. Išsiuntus nustatytą paketų skaičių testas automatiškai sustabdomas.

Pagrindinės aplikacijos funkcijos yra:

- Priimtu ir išsiųstų paketų skaičiavimas ir PER indikacija;
- CRC indikacija;
- RSSI indikacija;
- CC1120 radijo ryšio parametrų nustatymas.
- Automatinis gautų rezultatų dokumentavimas (Log)

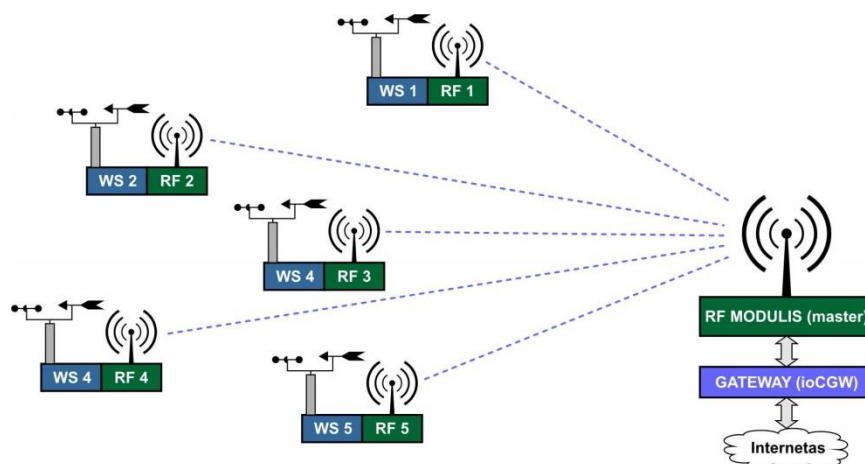
Apatinė aplikacijos lango dalis skirta ryšio parametrų nustatymams. Galima nustatyti moduliacijos tipą, moduliacijos indeksą, perdavimo spartą, imtuvo filtro juostos plotį, siųstuvo galią, bei greitaveikos ir duomenų išbalinimo režimus. Paspaudus mygtuką „APPLY“ pradedama nustatymų keitimo procedūra, aprašyta 8.2.1 paragrafe. Pagal OSI standartą tai yra aplikacijos sluoksnis. Tokios komunikacijos realizavimas buvo geras pagrindas tolimesniam sistemos kūrimui, kadangi per UART sąsają prototipinis ryšio modulis jungiasi su tinklo sąsaja (ioCGW).

## 8 DUOMENŲ MAINŲ PROTOKOLO REALIZAVIMAS

Tinklo moduliui sukurtas duomenų mainų protokolas, kuriame kiekvienas tinklo taškas turi savo adresą, o duomenų mainus inicijuoja prie modulio prijungtas įrenginys – tinklo sąsaja, meteorologinė stotelė, jutiklis ar kitas prietaisas.

Pirminis tinklo prototipo variantas naudoja taškas- taškas duomenų perdavimo būdą, o duomenų nukreipimas vykdomas naudojant 32 bitų adresus. Pagrindinės protokolo savybės:

- Kintamas paketo ilgis;
- Duomenų mainus inicijuoja vedantysis mazgas arba meteorologinė stotelė;
- Adresuotas maršrutizavimas;
- Perdavimo būdas taškas – taškas (*end – to –end*);
- Kintamas paketų ilgis;
- Duomenų šifravimas AES128;
- Apsauga nuo atakų.

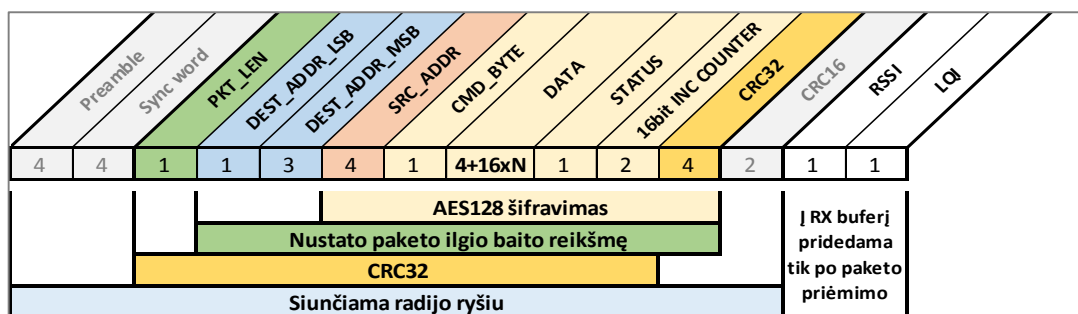


**Pav. 8.1** Sukurto WSN tinklo topologija

Dėl sudėtingo realizavimo daugiašoulis duomenų perdavimas atidedamas vėlesniam sistemos tobulinimo etapui, tačiau dėl parinktos paketo struktūros, bevielio ryšio modulis gali būti naudojamas kaip kartotukas, taip įgalinant duogiašouli duomenų perdavimą ir padidinant maksimalų atstumą.

## 8.1 Paketo struktūra

Duomenų mainai bevieliniu ryšiu vykdomi kintamo ilgio paketais, kurie gali būti 20, 36, 52, 68, 84, 100 ar 116 baitų. Tokie paketo ilgiai yra pasirinkti ne atsitiktinai, o dėl AES128 šifravimo posistemės veikimo principo – šifravimo 16 baitų blokais. Ilgis pasirenkamas priklausomai nuo siunčiamų duomenų kiekio. Paketo struktūra pateikta Pav. 8.2.



**Pav. 8.2** Paketo struktūra naudojama duomenų mainų protokole

Paketo elementų paskirtis ir detalesnis jų paaiškinimas pateiktas lentelėje 8.1.

Lentelė 7.1. Duomenų paketo baitų funkcijos

Nr.	Pavadinimas	Apibūdinimas
1	PREAMBLE	Preambulės baitai (0xAA) skirti laikinei sinchronizacijai tarp siųstuvo ir imtuvo (bitų lygio sinchronizacija)
2	SYNC	Sinchronizacijos baitai (0x55, 0x43, 0xAA, 0x21), po kurių perduodamas vartotojo suformuotas paketas (baitų lygio sinchronizacija)
3	PKT_LEN	Paketo ilgio baitas naudojamas paketo ilgiui nurodyti. Jo vertė lygi paketo baitų kiekiui, be paketo ilgio, preambulės, sinchronizacijos žodžio, CRC16, RSSI ir LQI baitų
4	DEST_ADDR_LSB	Gavėjo adresas (DEST_ADDR_LSB - jauniausias baitas, DEST_ADDR_MSB - vyriausi baitai), skirtas nurodyti kuriam tinklo mazgui siunčiamas paketas. Jauniausias baitas gali būti tikrinamas automatiškai CC1120 įrenginyje. Likusių adreso baitų tikrinimas turi būti atliekamas mikrovaldiklio programine įranga.
5	DEST_ADDR_MSB	
6	SRC_ADDR	Siuntėjo adresas nurodo priimančiam įrenginiui iš kur atėjo paketas. Pagal šį adresą gali būti siunčiamas atsakymo paketas.
7	CMD_BYTE	Komanda, nurodanti paketą priimančiam įrenginiui kokią funkciją vykdyti
8	DATA	Duomenų laukas skirtas vartotojo informacijai perduoti. Ši paketo dalis yra kintamo ilgio, priklausomai nuo perduodamos informacijos kiekio.
9	STATUS	Informacija apie įrenginio būseną (pvz. baterijos įtampa)
10	16 bit INC COUNTER	16 baitų skaitiklis pasikartojančių paketų prevencijai. Skaitiklis didinamas kas kart siunčiant paketą, taip kiekvieną paketą padarant unikalų, net jei likęs turinys nepakinta. Tai naudojama apsaugai nuo atakų ir pakartotinių paketų priėmimo.
11	CRC32	32 bitų ciklinė perteklinė kontrolė papildomam duomenų perdavimo patikimumui ir saugumui užtikrinti. Vykdoma mikrovaldiklyje (MCU)
12	CRC16	16 bitų ciklinė perteklinė kontrolė, vykdoma automatiškai CC1120 radijo ryšio modulyje
13	RSSI	Priimto signalo stiprumo indikatorius (Received Signal Strength Indicator) [dBm], informuojantis koks signalo lygis buvo imtuve paketo priėmimo metu
14	LQI	Vyriausias bitas skirtas CRC16 atitikimo indikacijai. Likę 7 bitai - ryšio kokybės indikatorius – abstraktus skaitinis įvertis apie tai, kaip lengva demoduluoti priimtą signalą.

## 8.2 Komandinis baitas

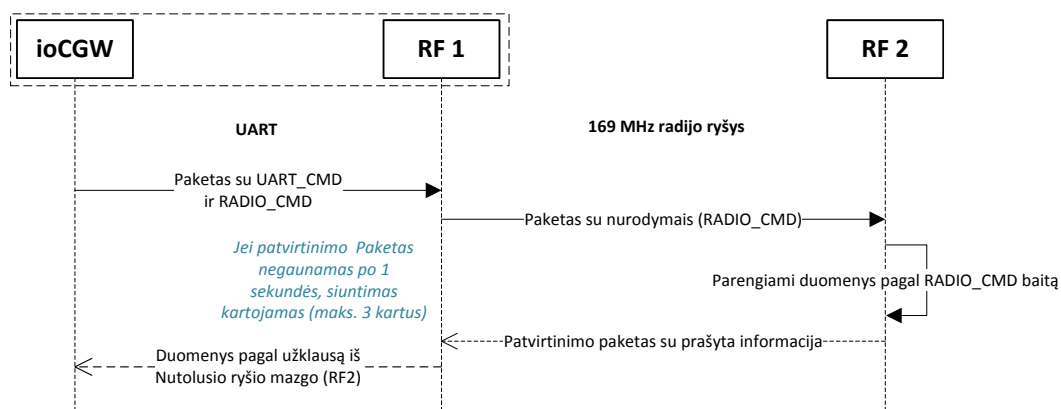
Komandinis baitas šiame protokole labai svarbus, kadangi pagal jį programinėje įrangoje yra vykdoma atitinkama funkcija. Šis baitas nurodo ką tinklo moduliui daryti su priimtais duomenimis arba kokius duomenis siųsti atgal. Galima iš viso nustatyti 255 šio baito reikšmes ir plėsti protokolo funkcionalumą. Protokolo naudojami komandiniai baitai aprašyti lentelėje 8.1.

Lentelė 8.1. Komandinių baitų aprašymas

Nr.	Pavadinimas	HEX	Aprašymas
1	TEST_PKT	0x00	Jokio veiksmo (bandymo tikslais)
2	REPEAT_PKT	0x01	Prašymas pakartoti paketą (bandymo tikslais)
3	UPDATE_KEY	0x02	Atnaujinti AES128 raktą (raktas įrašomas į atmintį)
4	CHANGE_KEY	0x03	Pakeisti AES128 raktą (naujas raktas pritaikomas šifravimui)
5	SET_DEFAULT_KEY	0x04	Nurodymas nustatyti AES128 raktą pagal nutylėjimą (pagal CPU ID)
6	GET_WS_DATA	0x05	Prašymas siųsti meteorologinės stotelės duomenų
7	GET_ACE_DATA	0x06	Prašymas 3D akcelerometro duomenų
8	GET_BATTERY_STATUS	0x07	Prašymas baterijos įtampos duomenų
...	...	...	<i>Tolimesniam sistemos vystymui</i>

## 8.3 Duomenų mainų protokolai

Duomenų mainai atliekami tarp dviejų radijo ryšio modulių. Vienas yra prijungtas prie tinklo sąsajos (ioCGW) ar kito valdančiojo įrenginio, o kitas prie duomenų šaltinio (pvz. meteorologinė stotelė). Duomenų mainai vyksta apklausos principu: vedantysis tinklo mazgas siunčia paketa su komandiniu baitu, pagal kurį nutolęs tinklo mazgas gražina reikiamus duomenis. Tokiu atveju duomenų mainus inicijuoja vedantysis tinklo mazgas (Pav. 8.3).

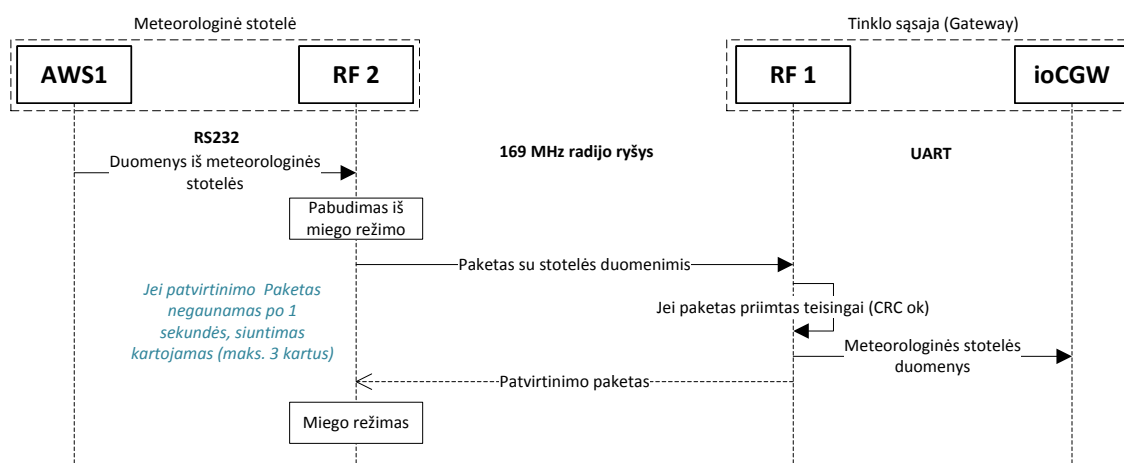


Pav. 8.3 Tinklo prototipo duomenų mainų protokolai

Esant šiam mainų protokolui nutolęs ryšio mazgas turi visuomet būti pasiklausymo režime su įjungtu imtuvu, o tai reikalauja didesnių energijos sąnaudų.

### 8.3.1 Duomenų surinkimas iš meteorologinių stotelių

Skirtingai, nei prieš tai aptartame protokole, čia duomenų perdavimą inicijuoja prie nutolusio modulio prijungtas įrenginys. Prie meteorologinės stotelės jungiamas ryšio modulis dirba miego režime ir laukia paketo iš stotelės, kuris siunčiamas kas 10 minučių RS232 sąsaja. Priimamas signalas iš meteorologinės stotelės pažadina mikrovaldiklį ir jis persijungia į veikimo režimą. Kai duomenys iš meteorologinės stotelės surenkami, jie siunčiami radijo ryšiu vedančiajam (*angl. Host*) moduliui, kuris prijungtas prie tinklo sąsajos (*angl. Gateway*). Išsiuntus paketą persijungiama į klausymo režimą (įjungiamas imtuvas) ir laukiamas patvirtinimo paketas iš vedančiojo modulio. Gavus patvirtinimo paketą grįžtama į miego režimą. Duomenų mainų diagrama pateikta Pav. 8.4.



Pav. 8.4 Duomenų perdavimo iš meteorologinių stotelių UML diagrama

Šiuo atveju nutolęs tinklo taškas (RF2) gali naudoti miego režimą ir imtuvą laikyti išjungtą. Tai yra efektyviai energijos sąnaudas taupantis protokolas.

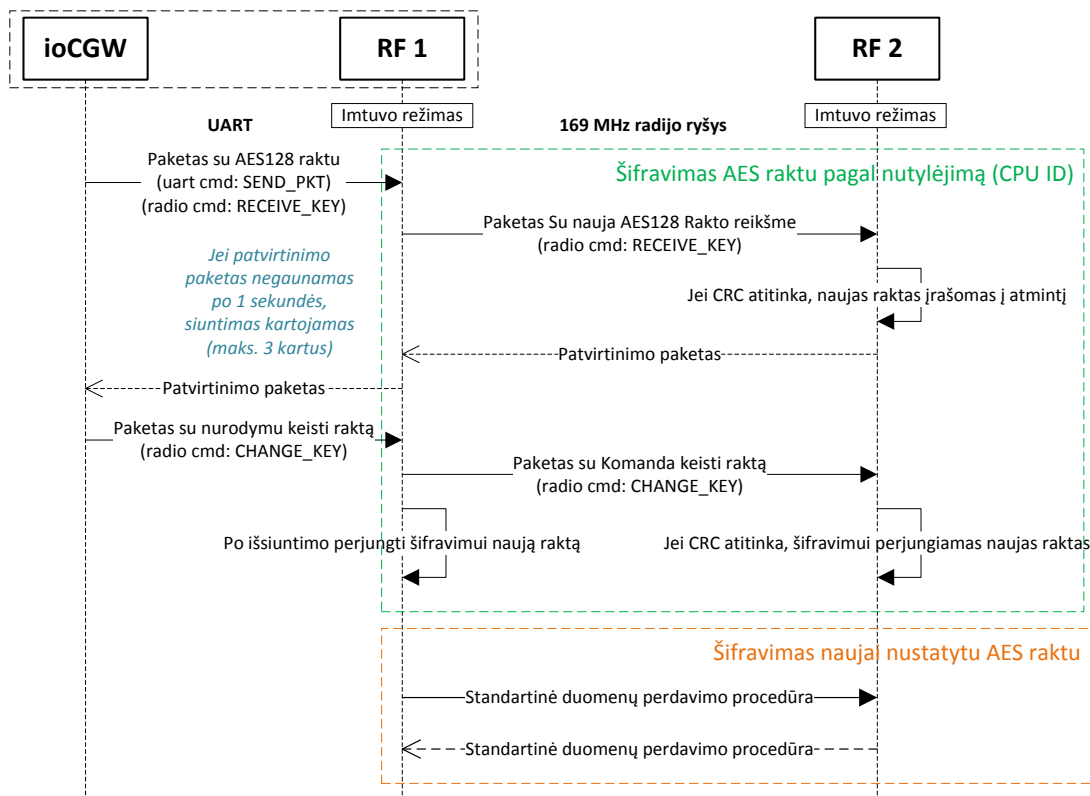
### 8.3.2 Duomenų šifravimo rakto keitimo protokolas

Šifravimo rakto AES128 posistemei keitimas inicijuojamas iš tinklo vedančiosios sąsajos (ioCGW) mazgo. Tik pradėtas naudoti RF modulis naudoja savo procesoriaus unikalų 96 bitų numerį kaip rakto dalį, o likę vyriausi baitai užpildomi nuliais. Šis raktas turi būti naudojamas norint ryšio moduliui nusiųsti naują raktą.

Paketas su CHANGE\_KEY komandiniu baitu siunčiamas į nutolusį modulį. Po siuntimo RF modulis persijungia į imtuvo režimą ir laukia patvirtinimo paketo. Jei patvirtinimo paketas negaunamas per vieną sekundę, paketo siuntimas kartojamas (kartojama maks. 3 kartus).

Nuolęs ryšio modulis gavęs paketą įrašo naują raktą į atmintį ir grąžina patvirtinimo paketą. Vedantysis mazgas, gavęs indikaciją, kad naujas raktas priimtas sėkmingai, siunčia komandą „CHANGE\_KEY“, kad šį raktą pradėti naudoti duomenų šifravimui.

Pradinis raktas pagal CPU ID kodą gali būti grąžintas spaudžiant vartotojo ir restartavimo mygtukus kartu. Šifravimo rakto keitimo protokolas atvaizduotas Pav. 8.5.



**Pav. 8.5** Rakto keitimo protokolas

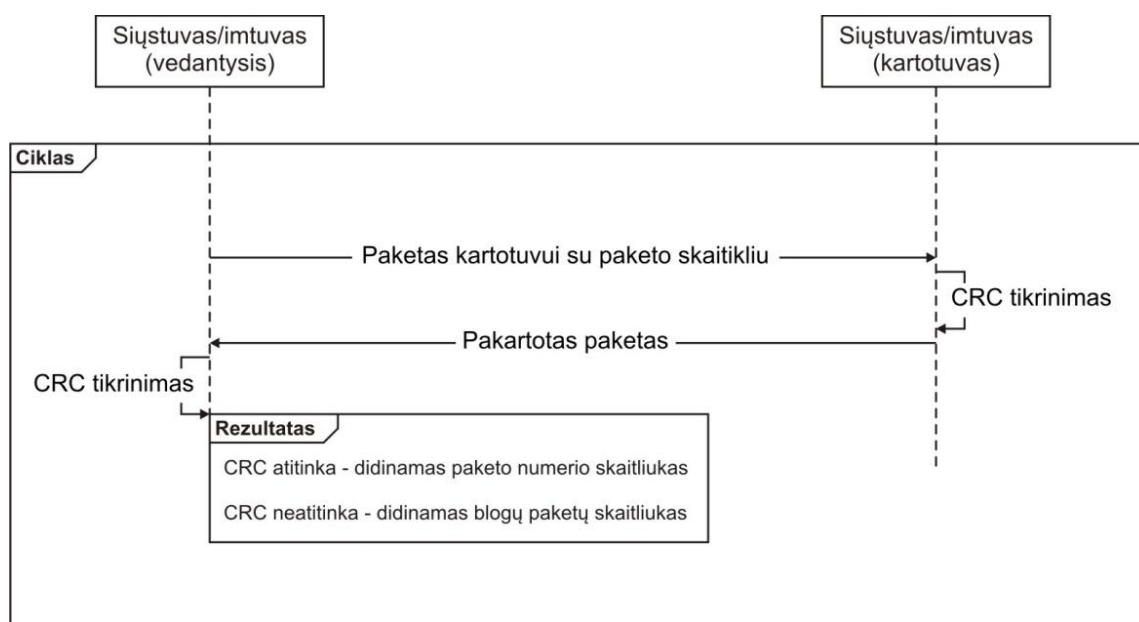
Rakto keitimas gali būti prilyginamas tinklo modulio registravimui tinkle. Kadangi nešifruotu ryšiu siųsti raktą yra nesaugu, kiekvienam naujam tinklo moduliui šifravimo raktas turi būti siunčiamas skirtingai šifruotu ryšiu, nes kiekvienas tinklo modulis pradinio šifravimo raktu priskiria savo unikalų procesoriaus ID. Vienintelis tokios sistemos trūkumas yra tas, jog vartotojas norėdamas į tinklą pridėti modulį, turi žinoti jo identifikacijos numerį. Vėliau duomenų mainai vykdomi naudojant bendrą šifravimo raktą. Toks protokolas leidžia visą laiką naudoti šifruotą duomenų perdavimą, net ir tinklo modulio registravimo į tinklą (rakto keitimo) metu.

### 8.3.3 Santykinio paketų klaidų skaičiaus tyrimo protokolas

Sukurtas protokolas buvo taikytas ryšio patikimumo tyrimams, santykinio paketų klaidų skaičiaus radimui (*angl. Packet Error Ratio - PER*). Testo rezultatas yra procentinis santykis tarp išsiųstų ir be klaidų priimtų paketų. Testo procedūra bus vykdoma turint vedantįjį siųstuvą/imtuvą su prijungtu kompiuteriu ir kartotuvą. Taip bus tiriamas abipusis ryšys (*bidirectional*). Testo procedūra atliekama šia tvarka:

1. Paketas išsiunčiamas iš vedančiojo (HOST) įrenginio su paketo numerio skaitikliu.
2. Kartotuvus priima paketą, atlieka CRC tikrinimą:
  - Jei CRC atitinka – kartotuvus išsiunčia tą patį paketą atgal;
  - Jei CRC neatitinka – laukiama kito paketo
3. Vedantysis įrenginys priima paketą, atlieka CRC tikrinimą:
  - Jei CRC atitinka – padidinamas paketo numerio skaitiklis;
  - Jei CRC neatitinka – padidinamas paketų klaidų skaitiklis.

Testo UML sekų diagrama pavaizduota Pav. 8.6.



**Pav. 8.6** Santykinio paketų klaidų skaičiaus tyrimo schema

Santykiniis paketų klaidų skaičiaus testas turi būti atliekamas įvairiomis sąlygomis, kad būtų galima įvertinti kaip ryšio kokybę įtakoja įvairūs aplinkos parametrai, t.y. ryšio atstumas ir siųstuvo-imtovo parametrai: mainų tempas, moduliacijos būdas, juostos plotis. Testo protokolas labai panašus į standartinį duomenų mainų perdavimą sukurtame tinklo protokole, aprašytame 8.3 paragrafe. (Pav. 8.3).





## 9 RADIJO RYŠIO PARAMETRŲ ANALIZĖ

Norint tinkamai parinkti signalo moduliacijos parametrus, reikia suprasti jų reikšmę ir išsiaiškinti kiekvieno parametro įtaką duomenų perdavimui. Nagrinėsime dvejetainę dažninę moduliaciją 2-FSK ir kvadratūrinę dažninę moduliaciją 4-FSK.

### 9.1 Skaitmeninė dažnio manipuliacija

Skaitmeninis dažnio manipuliavimas FSK (angl. Frequency Shift Keying) yra plačiai naudojamas moderniose bevielėse duomenų perdavimo sistemose. Tai yra harmoninio signalo dažnio keitimas suteikiant jam vieną ar kitą vertę pagal dvejetainį moduliavimo signalą.

Dvejetainės dažninės moduliacijos atveju turime du dažnius  $f_1$  ir  $f_2$ . Vienas turi loginio nulio vertę (tarpo dažnis), o kitas loginio vieneto (žymės dažnis), taigi vienu simboliu perduodamas vienas bitas [17]. Perdavimo išraišką galima aprašyti taip (formulė 9.1):

$$s(t) = \begin{cases} U\cos(\omega_1 + \varphi_1), & \text{kai perduodamas } 0 \\ U\cos(\omega_2 + \varphi_2), & \text{kai perduodamas } 1 \end{cases} \quad (9.1)$$

Čia  $\omega_1$  – ciklinis tarpo simbolio dažnis;  $\omega_2$  – ciklinis žymės simbolio dažnis;  $\varphi_1$  – pradinė tarpo fazė;  $\varphi_2$  – pradinė žymės fazė.

Kvadratūrinė dažninė moduliacija naudoja keturis dažnius, kurių kiekvienas reiškia dviejų bitų seką (00, 01, 10, 11). Naudojant tą pačią simbolių perdavimo spartą, kvadratūrinė dažninė moduliacija 4-FSK leidžia pasiekti dvigubai didesnę mainų tempą negu dvejetainė dažninė moduliacija. Perdavimo išraišką galima aprašyti pagal 9.2 formulę:

$$s(t) = \begin{cases} U\cos(\omega_1 + \varphi_1), & \text{kai perduodamas } 00 \\ U\cos(\omega_2 + \varphi_2), & \text{kai perduodamas } 01 \\ U\cos(\omega_3 + \varphi_3), & \text{kai perduodamas } 10 \\ U\cos(\omega_4 + \varphi_4), & \text{kai perduodamas } 11 \end{cases} \quad (9.2)$$

Čia  $\omega_n$  – ciklinis simbolio dažnis;  $\varphi_n$  – pradinė simbolio fazė;

Koks simbolis perduodamas esant atitinkamam dažniui priklauso nuo radijo ryšio sistemos ir jos konfigūracijos. Radijo ryšio modulis CC1120 leidžia vartotojui laisvai konfigūruoti simbolių priklausomybę nuo dažnio, vadinamą simbolių žemėlapiu. Ryšio patikimumui ir kokybei šie nustatymai įtakos nedaro, tačiau simbolių perdavimo žemėlapis gali būti keičiamas norint užtikrinti ryšio unikalumą ir saugumą.

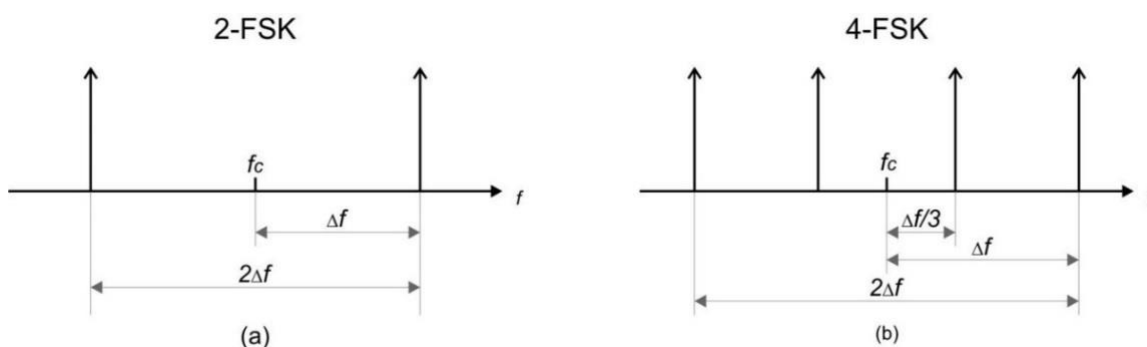
Simbolių žemėlapiro konfigūravimo galimybės atvaizduotos lentelėje 9.1.

9.1 lentelė. Galimos simbolių dažnio reikšmės

Moduliacijos formatas	Simbolio reikšmė	Konfigūracijos varianto numeris			
		1	2	3	4
		Simbolio dažnis			
2-(G)FSK	'0'	$F_c - \Delta f$	$F_c + \Delta f$		
	'1'	$F_c + \Delta f$	$F_c - \Delta f$		
4-(G)FSK	'00'	$F_c - \Delta f/3$	$F_c - \Delta f$	$F_c + \Delta f/3$	$F_c + \Delta f$
	'01'	$F_c - \Delta f$	$F_c - \Delta f/3$	$F_c + \Delta f$	$F_c + \Delta f/3$
	'10'	$F_c + \Delta f/3$	$F_c + \Delta f$	$F_c - \Delta f/3$	$F_c - \Delta f$
	'11'	$F_c + \Delta f$	$F_c + \Delta f/3$	$F_c - \Delta f$	$F_c - \Delta f/3$

## 9.2 Pagrindiniai moduliacijos parametrai

Dažnių ašyje abu moduliacijos būdus (2-FSK ir 4-FSK) galima atvaizduoti taip (Pav. 9.1):



**Pav. 9.1** FSK signalo simbolių perdavimo atvaizdavimas dažnio ašyje a) 2-FSK; b) 4-FSK

Pagrindiniai parametrai kurie naudojami apibūdinti radijo signalo moduliaciją:

9.2 lentelė. Pagrindiniai skaitmeninės dažninės moduliacijos parametrai

Žymėjimas	Pavadinimas
$F_c$	nešlio dažnis (centrinis dažnis) ( <i>angl. carrier frequency</i> )
$\Delta f$	dažnio deviacija ( <i>angl. frequency deviation</i> )
$2\Delta f$	dažnio atskirtis ( <i>angl. frequency separation (spacing)</i> )
$f_r$	simbolių perdavimo sparta ( <i>angl. symbol rate</i> )
$\beta$	analoginio signalo moduliacijos indeksas
$h$	skaitmeninio signalo moduliacijos indeksas

Pagal Carson'o taisyklę analoginės dažninės moduliacijos signalo juostos plotis skaičiuojamas pagal formulę 9.3:

$$BW_{FM} = 2(\Delta f + f_m) \quad (9.3)$$

Čia  $BW_{FM}$  – dažninės moduliacijos juostos plotis;  $\Delta f$  – maksimali (pikinė) dažnio deviacija;  $f_m$  – moduluojančio signalo dažnis.

Perduodamo skaitmeninio moduliuto signalo spektro plotis turėtų būti kuo siauresnis, kad būtų efektyviai naudojama dažnių juosta ir esant reikalui būtų galimybė panaudoti daugiau nei vieną ryšio kanalą. Tą pačią formulę galima pritaikyti ir skaitmeninės dažninės manipuliacijos signalo juostos pločiui skaičiuoti. Carson'o taisyklės taikymas FSK signalui (formulė 9.4) [18]:

$$BW_{FSK} = 2 \left( \frac{h}{2T_s} + \frac{1}{2T_s} \right) = \frac{h+1}{T_s} = (h+1)f_s \quad (9.4)$$

Čia  $BW_{FSK}$  – FSK juostos plotis;  $h$  – skaitmeninio signalo moduliacijos indeksas;  $T_s$  – simbolių perdavimo periodas;  $f_s$  – simbolių perdavimo dažnis ( $f_s = 1/T_s$ ).

Svarbus parametras apibūdinantis moduliuotą signalą yra moduliacijos indeksas – ryšys tarp mainų tempo ir deviacijos. Analoginio signalo moduliacijos indeksas skaičiuojamas pagal 9.5 formulę. Moduliacijos indeksas M-FSK moduliacijos rūšiai skaičiuojamas pagal formulę 9.6. [18]:

$$\beta = \frac{2\Delta f}{f_s} \quad (9.5)$$

$$h = \frac{2\Delta f}{(M-1)f_s} \quad (9.6)$$

Čia  $M = 2$ , kai naudojama 2-FSK,  $M = 4$ , kai naudojama 4-FSK moduliacija.

Pagal 5 ir 6 formules matome, jog kuo mažesnis moduliacijos indeksas, tuo siauresnis signalo spektras. Žinant naudojamą deviaciją  $\Delta f$  ir simbolių perdavimo tempą  $f_s$  galima apskaičiuoti signalo juostos plotį 2-FSK ir 4-FSK atveju (9.7 ir 9.8 formulės).

$$BW_{2-FSK} = \left( \frac{2\Delta f}{f_s} + 1 \right) f_s = 2\Delta f + f_s \quad (9.7)$$

$$BW_{4-FSK} = \left( \frac{2\Delta f}{3f_s} + 1 \right) f_s = \frac{2\Delta f}{3} + f_s \quad (9.8)$$

Čia  $BW_{2-FSK}$  – 2-FSK moduliuto signalo juostos plotis;  $BW_{4-FSK}$  – 4-FSK moduliuto signalo juostos plotis;

Naudojant teorinius skaičiavimus juostos plotį galima įvertinti tik apytiksliai, kadangi jis priklauso ne tik nuo deviacijos ir mainų tempo, bet ir nuo viso radijo ryšio trakto - vidinės siųstuvo sandaros, suderinimo grandinės ir jos komponentų.

Norint įvertinti signalo užimamą juostos plotį ir pagal tai įvertinti kokio juostos pločio filtrą reikia naudoti imtuvė, rekomenduojama įvertinti ir radijo ryšio sistemos kvarco nestabilumą. Kvarco nestabilumas įvertinamas PPM (angl. Parts Per Million) vienetais, pvz.: viena PPM vertė reiškia 1 HZ nuokrypį 1 MHz signalui.

Centrinio dažnio (nešlio dažnio) juostos pločio skaičiavimui pagal kristalo nestabilumą galima naudoti formulę 9.9 [19].

$$BW_{CARRIER} = 4 \cdot XTAL_{PPM} \cdot f_{CARRIER} \quad (9.9)$$

Čia  $BW_{CARRIER}$  – nešlio signalo juostos plotis;  $XTAL_{PPM}$  – kvarco nestabilumo vertė;  $f_{CARRIER}$  – nešlio signalo dažnis.

Įvertinus dažnio nuokrypį dėl kvarco nestabilumo ir moduliacijos signalo juostos plotį, galutinė kanalo juostos pločio lygtis atrodo taip [19]:

$$BW_{CHANNEL} = BW_{CARRIER} + BW_{FSK} \quad (9.10)$$

Čia  $BW_{CARRIER}$  – nešlio signalo juostos plotis;  $BW_{FSK}$  – moduluoto signalo juostos plotis skaičiuojamas pagal 9.7 arba 9.8 formulę.

### 9.3 MSK moduliacija

Dažninė moduliacija MSK (*angl. Minimum Shift Keying*) yra 2-FSK moduliacijos atvejis, kuomet naudojamas moduliacijos indeksas yra lygiai  $h=0.5$ . Tokiu atveju fazės pokytis vieno simbolio perdavimui bus  $\mu/2$ , o dažnio komutavimo metu fazė bus  $0^\circ$ . Taip susiaurinamas FSK signalo juostos plotis, kadangi išvengiama staigių fazės šuolių – stačių signalo frontų.

Deja, norint įgyvendinti MSK sąlygą, moduliacijos indeksas turi būti lygiai  $h=0.50000 \dots$  Tai pasiekti yra labai sunku, ypač naudojant skaitmeninį moduliatorių, kurio deviacijos dažnio reikšmė yra diskretinė [18].

### 9.4 GFSK moduliacija

Dažninės moduliacijos FSK signalai dažnai filtruojami vadinamuoju Gauso žemo dažnio filtru (*angl. Gaussian lowpass filter*) (GLPF). Šis filtras naudojamas signalo spektrui siaurinti ir gretutinio kanalo galiai mažinti. Dažninė moduliacija, naudojanti Gauso filtrą sutrumpintai vadinama GFSK (*angl. Gaussian Frequency Shift Keying*). Filto impulsinė charakteristika laiko ašyje atitinka Gauso skirstinį, iš ko ir kilęs filtro pavadinimas.

## 9.5 Teoriniai juostos pločio skaičiavimai

Naudojantis prieš tai minėtomis formulėmis, galima atlikti teorinius juostos pločio skaičiavimus 2-FSK ir 4-FSK moduliacijai esant skirtingam duomenų mainų tempui ir moduliacijos indeksui. Skaičiavimais siekiama įvertinti reikiamus imtuvo filtro nustatymus ir juostos pločio atitikimą standartui. ETSI EN 300 220-1 standarto apibrėžta juosta bevielių sensorių tinklams yra 75 kHz pločio (169,4 MHz – 169,475 MHz), todėl mus domina juostos plotis šiose ribose.

Juostos pločio skaičiavimui panaudotos mainų tempo reikšmės nuo 0.6 kbps iki 100 kbps. Moduliacijos indeksas nuo 0.5 iki 2.5. Kvarco nestabilumo reikšmė 10 PPM (kaip ir CC1120EM modulyje). Skaičiavimai atliekami naudojant 10 formulę. Juostos pločio reikšmė atvaizduota ir spalvos gradientu: geltona spalva - artima ribinei 75 kHz juostai, balta – žemiau 75 kHz ribos ir oranžinė – raudona žymi juostos plotį, viršijantį leidžiamas pagal standartą ribas. Teoriniai skaičiavimai pateikti 9.1 ir 9.2 lentelėse.

9.1 lentelė. 2-FSK juostos pločio priklausomybė nuo moduliacijos indekso ir mainų tempo

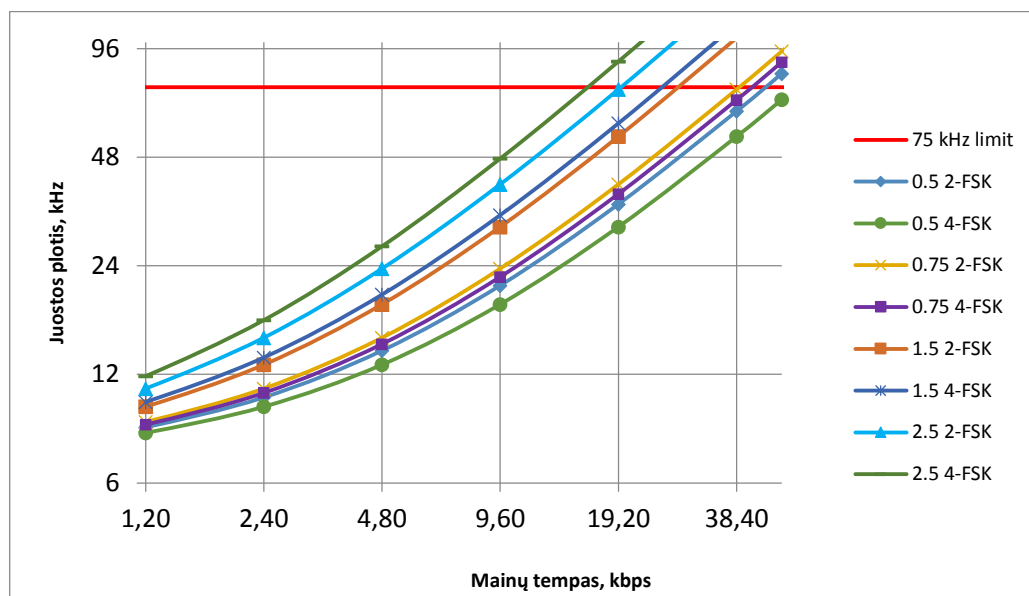
Mainų tempas, kbps	Moduliacijos indeksas								
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
	Signalų juostos plotis, kHz								
0,60	7,66	7,81	7,96	8,11	8,26	8,41	8,56	8,71	8,86
0,80	7,96	8,16	8,36	8,56	8,76	8,96	9,16	9,36	9,56
1,20	8,56	8,86	9,16	9,46	9,76	10,06	10,36	10,66	10,96
2,40	10,36	10,96	11,56	12,16	12,76	13,36	13,96	14,56	15,16
4,80	13,96	15,16	16,36	17,56	18,76	19,96	21,16	22,36	23,56
9,60	21,16	23,56	25,96	28,36	30,76	33,16	35,56	37,96	40,36
19,20	35,56	40,36	45,16	49,96	54,76	59,56	64,36	69,16	73,96
38,40	64,36	73,96	83,56	93,16	102,76	112,36	121,96	131,56	141,16
50,00	81,76	94,26	106,76	119,26	131,76	144,26	156,76	169,26	181,76
76,80	121,96	141,16	160,36	179,56	198,76	217,96	237,16	256,36	275,56
100,00	156,76	181,76	206,76	231,76	256,76	281,76	306,76	331,76	356,76

9.2 lentelė. 4-FSK juostos pločio priklausomybė nuo moduliacijos indekso ir mainų tempo

Mainų tempas, kbps	Moduliacijos indeksas								
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
	Signalų juostos plotis, kHz								
0,60	7,51	7,735	7,96	8,185	8,41	8,635	8,86	9,085	9,31
0,80	7,76	8,06	8,36	8,66	8,96	9,26	9,56	9,86	10,16
1,20	8,26	8,71	9,16	9,61	10,06	10,51	10,96	11,41	11,86
2,40	9,76	10,66	11,56	12,46	13,36	14,26	15,16	16,06	16,96
4,80	12,76	14,56	16,36	18,16	19,96	21,76	23,56	25,36	27,16
9,60	18,76	22,36	25,96	29,56	33,16	36,76	40,36	43,96	47,56
19,20	30,76	37,96	45,16	52,36	59,56	66,76	73,96	81,16	88,36
38,40	54,76	69,16	83,56	97,96	112,36	126,76	141,16	155,56	169,96
50,00	69,26	88,01	106,76	125,51	144,26	163,01	181,76	200,51	219,26
76,80	102,76	131,56	160,36	189,16	217,96	246,76	275,56	304,36	333,16
100,00	131,76	169,26	206,76	244,26	281,76	319,26	356,76	394,26	431,76

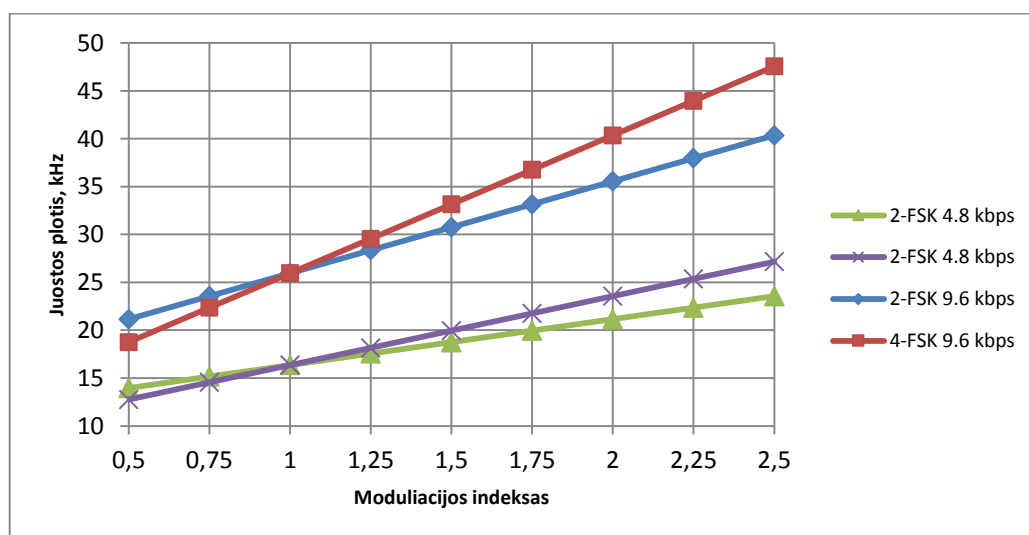
Skaičiavimai rodo, jog teoriškai maksimalus mainų tempas 75 kHz juostoje yra 38,4 kbps 2-FSK atveju ir 50 kbps 4-FSK atveju, naudojant moduliacijos indeksą 0.5. Tačiau net ir teoriškai apskaičiuotos juostos pločio reikšmės yra arti 75 kHz ribos, o realiu atveju yra tikimybė, kad

standarto nustatyta riba bus pažeidžiama. Be to, didelis mainų tempas nėra prioritetas, kuriant mažos galios bevielio ryšio sistemą. Grafiškai juostos pločio priklausomybė atvaizduota Pav. 9.1.



**Pav. 9.1** 2-FSK ir 4-FSK teorinio juostos pločio priklausomybė nuo mainų tempo, esant skirtingam moduliacijos indeksui.

Taip iš gautų duomenų matoma, jog esant moduliacijos indeksui  $h < 1$ , 4-FSK atveju gauname siauresnį juostos plotį, nei 2-FSK. Esant  $h = 1$ , juostos plotis vienodas (Pav. 9.2).

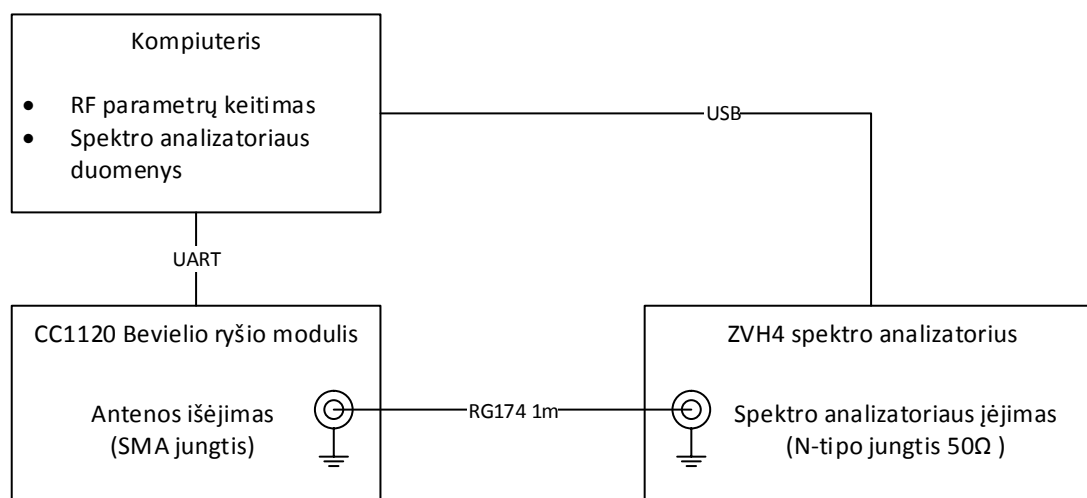


**Pav. 9.2** 2-FSK ir 4-FSK teorinio juostos pločio priklausomybė nuo moduliacijos indekso, esant skirtingam mainų tempui.

## 9.6 Kanalo juostos pločio matavimai spektro analizatoriumi

Atliekamais tyrimais siekiama išsiaiškinti koks realus signalo juostos plotis esant skirtingiems moduliacijos nustatymams. Taip pat ištiriama koks realus juostos pločio skirtumas tarp GFSK ir FSK moduliacijos ir koks nukrypimas nuo teorinių skaičiavimų.

Kanalo juostos pločio tyrimai atliekami naudojant „Rohde&Schwarz“ ZVH/4 spektro analizatorių. Jo įėjimas jungiamas RG174 kabeliu prie CC1120 bevielio ryšio modulio antenos išėjimo. Kadangi maksimali leistina spektro analizatoriaus įėjimo galia yra 20dBm, galima naudoti maksimalią siųstuvo galią (15dBm). Taip pat maksimalią siųstuvo galią reikalauja naudoti ETSI 300 220-1 standartas, kuomet tiriamas juostos plotis. Bandymo schema atvaizduota Pav. 9..



**Pav. 9.3** Signalo juostos pločio tyrimo schema

Spektrinio analizatoriaus konfigūruojamas pagal standarte aprašytus reikalavimus. Parenkamas maksimalios vertės išsaugojimo režimas (*angl. max hold*) ir pikinės reikšmės detektorius. Matavimas atliekamas siunčiant 100 duomenų paketų. Užimamas kanalo plotis matuojamas pagal signalo spektrinio galios tankio pasiskirstymą juostoje. Laikoma, kad užimamas juostos plotis, tai plotis kuriame yra 99% signalo galios. Duomenų siuntimo aktyvacija ir moduliacijos parametrai keičiami su 7 skyriuje aprašyta aplikacija. Duomenys iš spektro analizatoriaus fiksuojami su jam skirta programine įranga „ZVH view“.



## 9.6.1 Matavimų rezultatai

Matuojame 2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK ir 4-GFSK signalus. Kaip ir teoriniuose skaičiavimuose tyrimai atliekami naudojant skirtingą moduliacijos indeksą ir duomenų mainų tempą. Į lenteles surašomi matavimo rezultatai. Siekiama iširti, kiek sumažėja juostos plotis naudojant GFSK moduliaciją su žemo dažnio Gauso filtru, lyginant su paprasta FSK moduliacija. Palyginimui skaičiuojame procentinį juostos pločio pokytį  $\Delta BW$  pagal 9.11 formulę.

$$\Delta BW = \left(1 - \frac{BW_{FSK}}{BW_{GFSK}}\right) \cdot 100 \quad (9.11)$$

Čia  $\Delta BW$  – procentinis juostos pločio pokytis,  $BW_{FSK}$  – FSK signalo juostos plotis,  $BW_{GFSK}$  – GFSK signalo juostos plotis.

Mainų tempas keičiamas nuo 1.2 kbps iki 38.4 kbps. Moduliacijos indeksas nuo 0.5 iki 2.5. Matavimo rezultatai pateikti 9.3 ir 9.4 lentelėse.

9.3 lentelė. 2-FSK ir 2-GFSK moduliacijos juostos pločio matavimo rezultatai

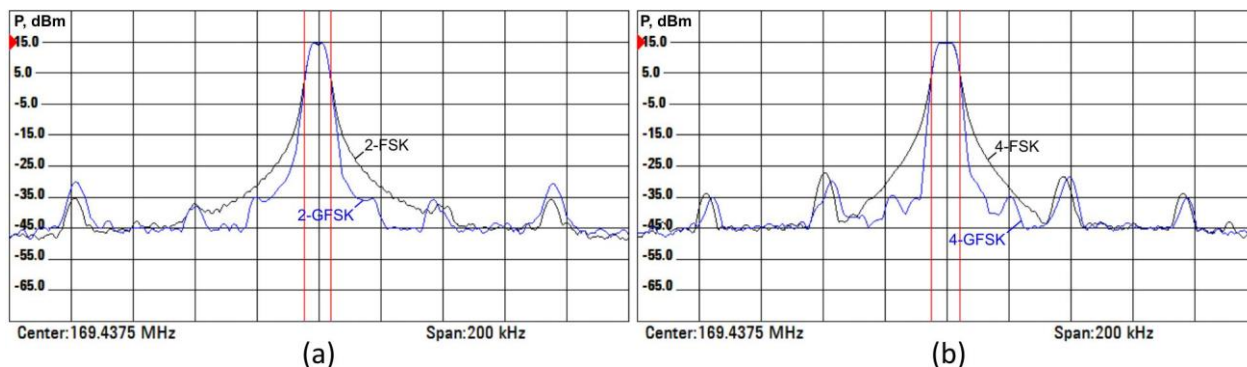
2-(G)FSK		MOD_INDEX														
		0.5			1			1.5			2			2.5		
		BW, kHz			BW, kHz			BW, kHz			BW, kHz			BW, kHz		
s. rate, kbps	bit rate, kbps	2-FSK	2-GFSK	$\Delta BW, \%$	2-FSK	2-GFSK	$\Delta BW, \%$	2-FSK	2-GFSK	$\Delta BW, \%$	2-FSK	2-GFSK	$\Delta BW, \%$	2-FSK	2-GFSK	$\Delta BW, \%$
1.2	1.2	7.143	6.746	-5.88%	7.937	7.302	-8.70%	8.889	7.937	-11.99%	9.127	8.333	-9.53%	10.159	8.571	-18.53%
2.4	2.4	7.937	7.54	-5.27%	9.524	8.381	-13.64%	11.429	9.524	-20.00%	12.302	10.667	-15.33%	13.968	11.746	-18.92%
4.8	4.8	9.524	8.73	-9.10%	12.698	11.111	-14.28%	15.873	13.095	-21.21%	18.651	15.476	-20.52%	21.429	17.778	-20.54%
9.6	9.6	16.238	12.302	-31.99%	19.841	17.063	-16.28%	29.206	21.825	-33.82%	31.746	26.984	-17.65%	42.063	31.746	-32.50%
19.2	19.2	33.33	27.341	-21.90%	45.556	39.937	-14.07%	57.143	48.571	-17.65%	69.721	59.365	-17.44%	81.746	67.971	-20.27%
38.4	38.4	59.524	46.429	-28.20%	86.905	67.857	-28.07%	119.05	86.905	-36.99%	139.29	108.33	-28.57%	170.24	126.19	-34.91%

9.4 lentelė. 4-FSK ir 4-GFSK moduliacijos juostos pločio matavimo rezultatai

4-(G)FSK		MOD_INDEX														
		0.5			1			1.5			2			2.5		
		BW, kHz			BW, kHz			BW, kHz			BW, kHz			BW, kHz		
s. rate, kbps	bit rate, kbps	4-FSK	4-GFSK	$\Delta BW, \%$	4-FSK	4-GFSK	$\Delta BW, \%$	4-FSK	4-GFSK	$\Delta BW, \%$	4-FSK	4-GFSK	$\Delta BW, \%$	4-FSK	4-GFSK	$\Delta BW, \%$
0.6	1.2	6.957	6.812	-2.13%	8.319	7.967	-4.42%	9.127	8.73	-4.55%	9.921	9.554	-3.84%	10.714	10.317	-3.85%
1.2	2.4	8.333	7.619	-9.37%	10.714	9.524	-12.49%	12.302	11.111	-10.72%	13.889	12.698	-9.38%	15.873	14.286	-11.11%
2.4	4.8	10.794	9.127	-18.26%	14.683	12.698	-15.63%	18.254	16.27	-12.19%	21.825	19.444	-12.25%	25.397	23.016	-10.34%
4.8	9.6	15.079	13.095	-15.15%	22.222	19.841	-12.00%	29.762	26.587	-11.94%	37.302	33.73	-10.59%	44.841	40.873	-9.71%
9.6	19.2	38.286	33.303	-14.96%	54.762	44.567	-22.88%	71.111	60	-18.52%	87.778	74.444	-17.91%	103.33	87.759	-17.75%
19.2	38.4	58.333	47.619	-22.50%	88.095	76.19	-15.63%	125.71	103.57	-21.38%	171.05	129.76	-31.82%	242.86	178.44	-36.10%

Matavimo rezultatai rodo, jog 2-FSK ir 4-FSK moduliacijos atveju, naudojant Gauso filtrą juostos plotis sumažėja. Kuo didesnis moduliacijos indeksas ir mainų tempas, tuo ryškiau matomas santykinis juostos pločio sumažėjimas GFSK atveju. Kaip ir teoriniuose skaičiavimuose naudojant 0.5 moduliacijos indeksą galima pasiekti 38.4 kbps mainų tempą neviršijant 75 kHz juostos pločio.

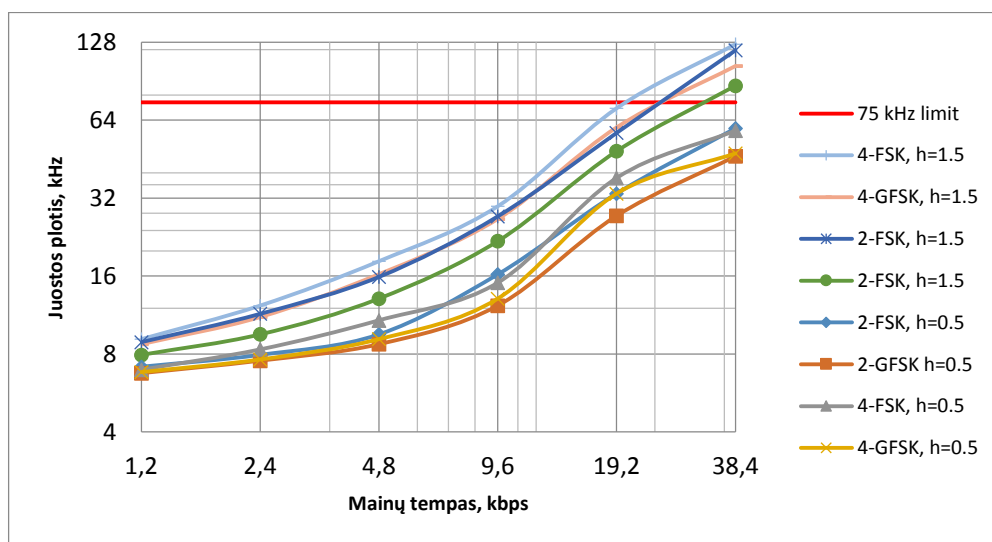
Gauso filtro įtaka signalui aiškiai atsispindi spektro analizatoriaus lange. Kaip atrodo 2-FSK ir 4-FSK signalai su ir be Gauso filtro atvaizduota Pav. 9..



**Pav. 9.4** Spektrų palyginimas su ir be ŽDGF: a) 2-FSK ir 2-GFSK b) 4-FSK ir 4-GFSK  
Mėlyna linija – signalo spektras naudojant Gauso filtrą, juoda linija – nenaudojant filtro.  
Mainų tempas 4.8 kbps

Pav. 9. akivaizdžiai matosi, jog GFSK moduliacijos atveju spektras yra siauresnis ir jo pagrindinis gaubtinės lapelio šonai yra gerokai statesni. GFSK moduliacija pravartu naudoti, kuomet reikalinga siaurajuostė komunikacija, bei daugiau nei vienas kanalas dažnių juostoje.

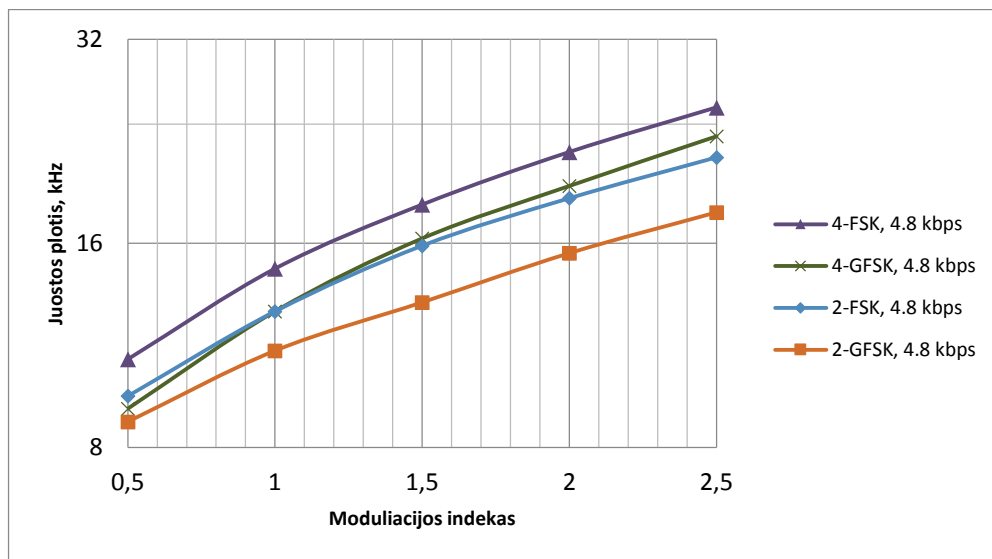
Grafiškai tyrimo rezultatai atvaizduojami pav. 9.5



**Pav. 9.5** Kanalo juostos pločio matavimų rezultatai. Juostos pločio priklausomybė nuo mainų tempo, esant skirtingai moduliacijos rūšiai ir moduliacijos indeksui.

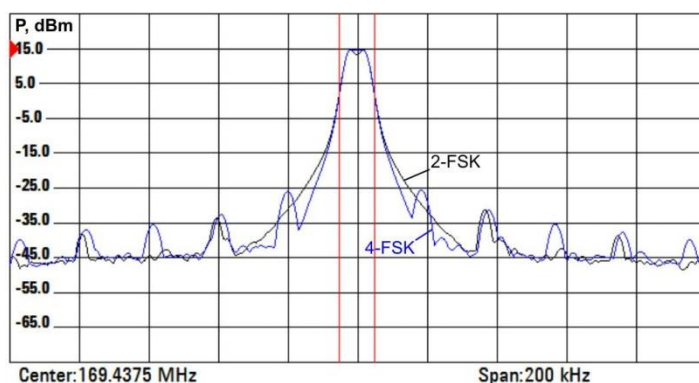
Jeigu atvaizduotume išmatuotas juostos pločio priklausomybę nuo moduliacijos indekso, pastebėtume, jog 4-FSK ir 4-GFSK signalų spektrai nėra siauresni už 2-FSK ir 2-GFSK, kuomet

moduliacijos indeksas mažesnis už vienetą. Tai skiriasi nuo teorinių rezultatų. Išmatuotų juostos pločio priklausomybė nuo moduliacijos indekso atvaizduota Pav. 9.



**Pav. 9.6** Juostos pločio priklausomybė nuo moduliacijos indekso

Matome, jog 4-(G)FSK signalas užima platesnę dažnių juostą, nei 2-(G)FSK signalas. Reikia įvertinti ir tai, jog siunčiant paketus 4-FSK ar 4-GFSK moduliacijos forma, paketo preambulė ir sinchronizacijos žodžio baitai siunčiami 2-FSK moduliacija. Taigi, matavimų metu, kuomet naudota 4-FSK moduliacija, iš tikrųjų dalis signalo buvo 2-FSK, todėl nematome tikrojo 4-FSK signalo spektro. Galimai dėl tos pačios priežasties matavimo rezultatai skiriasi nuo teorinių skaičiavimų. Palyginimas, kaip skiriasi 2-FSK ir 4-FSK signalų spektro gaubtinės atvaizduotas Pav. 9.

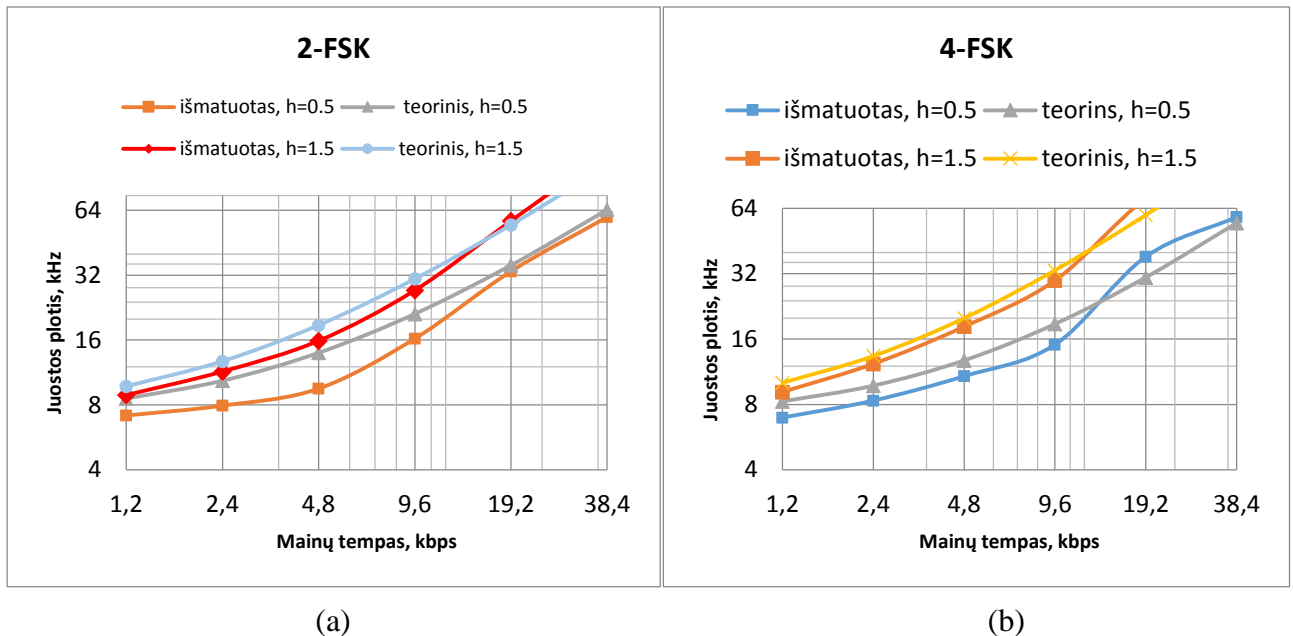


**Pav. 9.7** 2-FSK ir 4-FSK spektrų palyginimai esant 2.4 kbps mainų tempui ir 1.5 moduliacijos indeksui. Mėlyna linija – signalo spektras naudojant Gauso filtrą, juoda linija – nenaudojant filtro.

Matome, jog 4-FSK signalas turi dvigubai daugiau šoninių spektro gaubtinės lapelių, kadangi 4-FSK atveju naudojami keturi dažniai, vietoje dviejų.

## 9.6.2 Tyrimo rezultatų palyginimas su teoriniais skaičiavimais

Gautų tyrimo rezultatų palyginimui, atvaizduojame 2-FSK ir 4-FSK teorines bei išmatuotas juostos pločio reikšmes tame pačiame grafike (Pav. 9.)



**Pav. 9.8** Teorinių ir išmatuotų juostos pločių palyginimas: a) 2-FSK, b) 4-FSK

Išmatuotas signalo juostos plotis yra mažesnis nei teorinio, esant mažesniems mainų tempams. Esant 19.2 ir didesniems duomenų mainų tempams išmatuotas juostos plotis yra šiek tiek didesnis.

## 9.7 Rezultatų apibendrinimas

Atlikti teoriniai skaičiavimai ir juostos pločio matavimai spektro analizatoriumi leidžia įvertinti kokius moduliacijos parametrus galima naudoti neperžengiant standarto nustatytos juostos pločio. Tiek teoriniai tiek matavimo rezultatai rodo, jog maksimalus perdavimo tempas gali būti 38.4 kbps, jeigu naudosime mažą moduliacijos indeksą ( $h=0.5$ ).

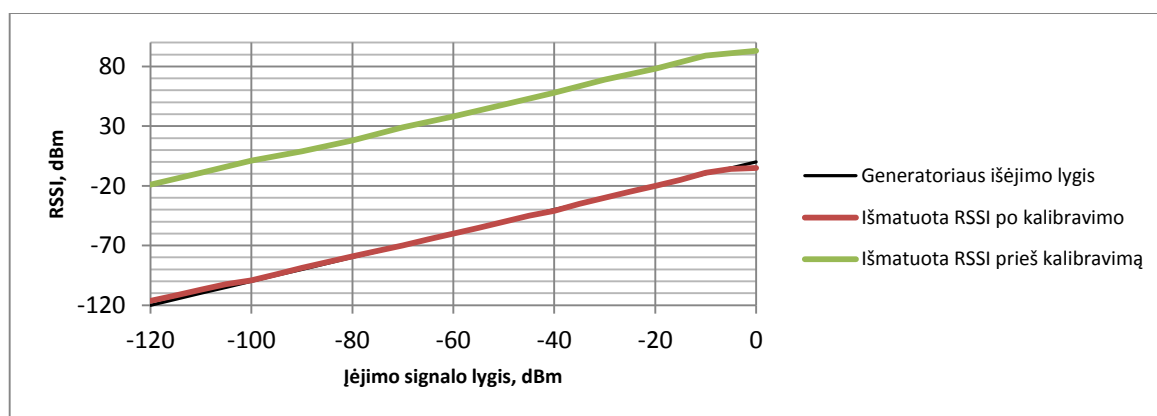
Taip pat, esant būtinybei, galima naudoti mažą mainų tempą, bet ryšio perdavimui paskirti daugiau kanalų. Kol kas pasirinktas duomenų perdavimas vienu ryšio kanalu.

## 9.8 Priimto signalo lygio indikacijos kalibravimas

Radio ryšio modulis priimto signalo stiprumą indikuoja RSSI parametru (*angl. RSSI – Received Signal Strength Input*). Tai yra priimto signalo stiprumo lygis išreikštas decibelais milivatui [dBm]. Kadangi pagal nutylėjimą ši reikšmė nėra nustatyta, kalibravimą turi atlikti pats vartotojas. Tai atliekama į RF modulio imtuvą siunčiant žinomo stiprumo signalą ir stebint CC1120 RSSI registro vertę. Ši vertė gali būti kvantuojama 8 arba 12 bitų skiriamąja geba. Daugeliu atvejų pakanka 8 bitų (0.25 %).

Norint gauti teisingą RSSI reikšmę, kalibruota RSSI korekcijos reikšmė turi būti atimama iš išmatuotos. Tai galima padaryti rankinių būdu arba įrašyti korekcijos reikšmę į atitinkamą „AGC\_GAIN\_ADJUST“ registrą. Kalibruota reikšmė gaunama sulyginant priimamo signalo galią su išmatuota RSSI reikšme iš CC1120 registro. Pvz.: jei į CC1120 siunčiame 0 dBm galios signalą, o nuskaityta RSSI reikšmė yra 100, reikia taikyti -100dBm korekcijos reikšmę [16].

Kalibravimas atliekamas su HP 8657A signalų generatoriumi (0.1 - 1040 MHz), naudojant 169 MHz nemoduliuotą sinusinės formos signalą. Ryšio modulis prie signalo generatoriaus prijungiamas RG174 kabeliu (SMA – N-tipo jungtys). Naudojama galia: nuo -120dBm iki 0 dBm. Priimamo signalo galios matavimui naudojame 8 bitų skiriamąją gebą (1 dBm). Gauti rezultatai pateikti priede P-2 ir Pav. 9..



**Pav. 9.9** RSSI reikšmė pagal generatoriaus signalo galią prieš ir po kalibravimo

Iš grafiko 9.1 matome jog nekalibruota RSSI reikšmė smarkiai skiriasi nuo signalo generatoriaus siunčiamo signalo galios. Po to atliekamas tas pats testas su -99 ir -98 dBm korekcine reikšme. Pagal grafiko, pavaizduoto pav. 10.1 matome, jog gauna RSSI reikšmė ne daug nukrypsta nuo signalo generatoriaus išėjimo galios (grafike juoda linija). Labiausiai tikėtina priimto radio signalo stiprumo ruože (nuo -100 iki -10 dBm) išmatuota vertė atitinka signalo generatoriaus siunčiamo signalo galią, todėl kalibracijos rezultatai mus tenkina.

## 10 ENERGIJOS SĄNAUDŲ TYRIMAI

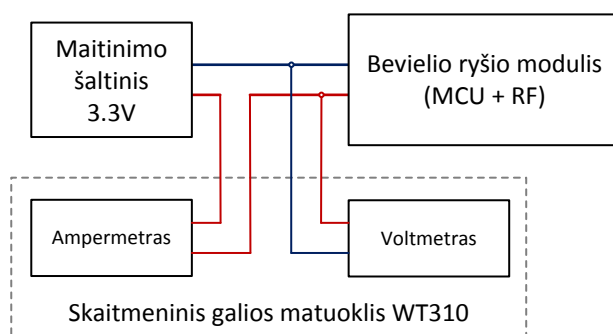
Šiais tyrimais siekiama išsiaiškinti kokios yra sukurto radijo ryšio modulio galios ir energijos sąnaudos esant įvairiems darbo režimams. Taip pat siekiama įvertinti baterijos talpos reikalavimus atitinkamam veikimo laikui.

### 10.1 Galios suvartojimas pagal darbo režimą

Bevielio ryšio modulis pagal atliekamą veiksmą dirba keliais režimais:

- Miego režimas
- Veikimo režimas
- Siųstuvo režimas
- Imtuvo režimas

Srovės ir galios suvartojimas kiekviename režime matuotas Yokogawa WT310 skaitmeniniu galios matuokliu. Srovės ir galios fiksavimui naudojamas „Max Hold“ pikinės reikšmės detektorius. Duomenų mainų tempas yra 4.8 kbps, o siųstuvo galia 15dBm. Tyrimų schema pateikta Pav. 10.1.



**Pav. 10.1** Galios matavimo schema

Matavimo rezultatai pateikti lentelėje 11.1.

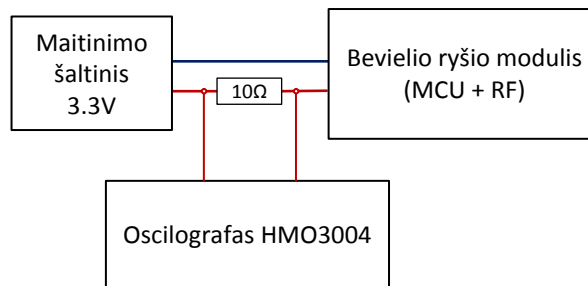
11.1 lentelė. Srovės ir galios suvartojimas iš maitinimo šaltinio

Režimas	Būsenos	I, mA	P, mW
Miego režimas	MCU sleep, RF power down	1,12	3,67
Veikimo režimas	MCU running, RF idle	3,85	12,6
Siųstuvo režimas	MCU on, TX on 15dBm	68,28	220,5
Nuolatinis imtuvo režimas	MCU on, RX on	26,34	86,5
Imtuvas priimant paketą	MCU on, RX on, priimamas paketas	27,72	91,1

Sistemos suvartojama galia yra didžiausia paketo siuntimo metu (68.28 mA, 220.5 mW).

## 10.2 Galios suvartojimo laike tyrimas

Duomenų paketų siuntimas ir priėmimas vyksta labai greitai ir norint tiksliai stebėti tokio proceso energijos sąnaudas, reikia naudoti didelės greitaiveikos srovės matavimo įrangą. Išėitis yra naudoti šunto varžą sistemos maitinimo įėjime ir matuoti jos įtampą oscilografu. Srovės išraišką gausime pagal Omo dėsnį, žinodami šunto varžos reikšmę. Naudojamas „ROHDE&SCHWARZ HAMEG“ HMO3004 4GS/s spartos oscilografas. Srovės reikšmės gavimui panaudojama osciloskope esanti „math“ funkcija, skaičiuojanti srovę pagal šunto varžos įtampą. Atvaizde 10.2 pateikiama tyrimo schema.

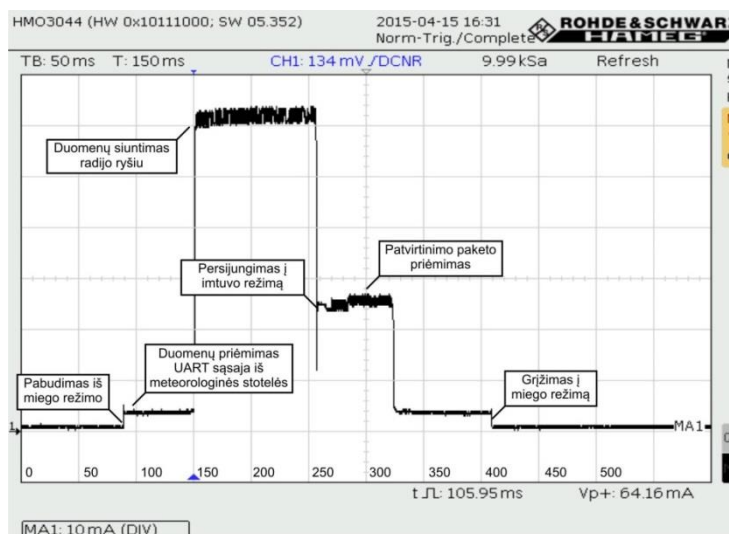


**Pav. 10.2** Trumpų srovės impulsų matavimo schema

Suvartojamos srovės pokyčiai paketų priėmimo ir siuntimo metu registruojami dviem modulio panaudojimo atvejais:

- Kai modulis prijungtas prie meteorologinės stotelės;
- Kai modulis prijungtas prie tinklo sąsajos.

Srovės suvartojimas, kuomet ryšio modulis naudojamas meteorologinės stotelės duomenims siūsti, atvaizduotas Pav. 10.3. (pagal protokolą, aprašytą paragrafe 8.2.4)



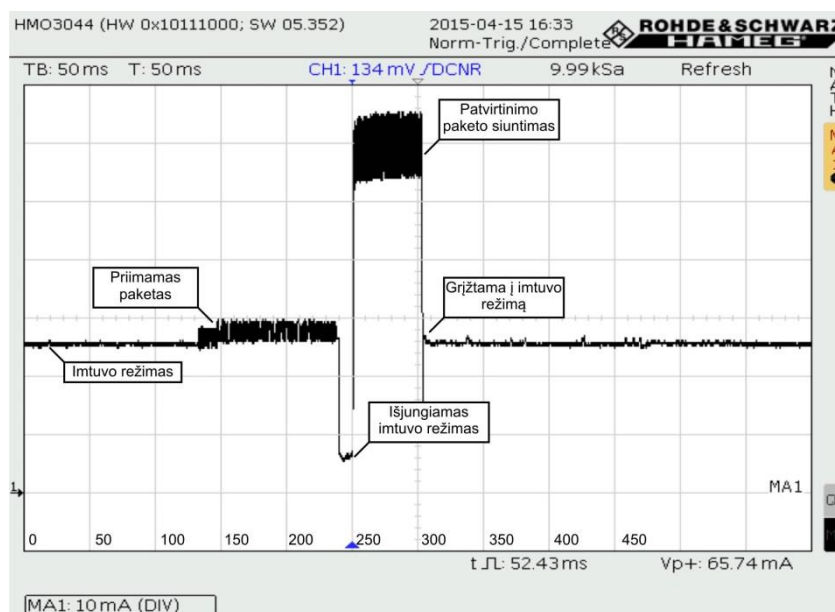
**Pav. 10.3** Tinklo modulio, prijungto prie metrologinės stotelės srovės suvartojimo oscilograma

Osciloskopu išmatuoti intervalai pateikti lentelėje 11.2

11.2 lentelė. Radijo ryšio modulio veikimo režimų intervalai

Veikimo režimas	T, ms
Duomenų priėmimas UART sąsaja	59
Paketo siuntimas radijo ryšiu	106
Paketo priėmimas radijo ryšiu	65
Laukimo režimas prieš užmiegant	83

Klausymo režime dirbančio ir prie tinklo sąsajos prijungto modulio srovės suvartojimas laiko ašyje pateiktas Pav. 10.4.



**Pav. 10.4** Radijo ryšio modulio prijungto prie tinklo sąsajos srovės suvartojimas duomenų mainų metu

Atliktų matavimų metu osciloskopo pagalba rasti laiko intervalai, esant skirtingiems srovės suvartojimo lygiams. Kiekvienas radijo ryšio modulio veikimas ryškiai atsispindi oscilografo ekrane, ypač paketo siuntimo ir priėmimo metu, kuomet matomas ne tik srovės suvartojimo šuolis, bet ir trikdžiai.

Iš paveikslėlio 10.3 matome, kad energijos sąnaudas dar galima optimizuoti, sumažinus laiką tarp patvirtinimo paketo priėmimo ir miego režimo įjungimo. Nors tai ženkliai nepakeis energijos sąnaudų būtent šiuo atveju, tačiau esant tankesniems paketų mainams, energijos sąnaudų sumažėjimas gali būti pastebėtas.



### 10.3 Energijos sąnaudų įvertinimas

Išanalizavus nutolusio modulio srovės ir galios suvartojimą, kai jis prijungtas prie meteorologinės stotelės, galima apskaičiuoti jo energijos sąnaudas per skirtingus laiko tarpus ir įvertinti kokios talpos akumuliatorių naudoti jo maitinimui. Rezultatai pateikti lentelėje 11.3.

11.3 lentelė. Energijos sąnaudų skaičiavimai

Režimas	Veikimo laikas 10 min intervale, ms	Procentinis veikimo laikas 10 min intervale	I, mA	P, mW	Energijos sąnaudos per 1 valandą		Energijos sąnaudos per parą (24 val.)		Energijos sąnaudos per 30 dienų	
					mWh	mAh	mWh	mAh	Wh	Ah
miego (sleep)	599687	99.948%	1.12	3.67	3.6681	1.1194	88.0341	26.8660	2.6410	0.8060
UART RX	59	0.010%	3.85	12.6	0.0012	0.0004	0.0297	0.0091	0.0009	0.0003
Radio ryšys TX	106	0.018%	68.28	220.5	0.0390	0.0121	0.9349	0.2895	0.0280	0.0087
Radio ryšys RX	65	0.011%	27.72	86.5	0.0094	0.0030	0.2249	0.0721	0.0067	0.0022
laukimo (idle)	83	0.014%	3.85	91.1	0.0126	0.0005	0.3025	0.0128	0.0091	0.0004
<b>Iš viso:</b>	<b>600000</b>	<b>100.00%</b>			<b>3.7303</b>	<b>1.1354</b>	<b>89.5261</b>	<b>27.2494</b>	<b>2.6858</b>	<b>0.8175</b>

Pagal gautus duomenis galima apskaičiuoti kokios energijos sąnaudos bus metų laikotarpyje (formulė 11.1). Laikykime, jog maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas yra 95%:

$$E_{Wh/met.} = 365 \cdot E_{Wh/24h} \cdot \frac{100}{95} \quad (11.1)$$

Čia  $E_{Wh/met.}$  – energijos sąnaudos metų eigoje, Wh;  $E_{Wh/24h}$  - energijos sąnaudos per parą, Wh.

$$E = 34.31 \text{ Wh/metams}$$

Apskaičiuotos energijos sąnaudos yra idealių sąlygų atveju, kuomet paketai siunčiami kas 10 minučių ir po kiekvieno siuntimo gaunamas vienas patvirtinimo paketas. Kadangi duomenų perdavimas vyksta santykinai retai, todėl didžiausia energijos sąnaudų dalis priklauso nuo miego režimo metu suvartojamas galios.

Kadangi metų laikotarpyje apskaičiuotas energijos suvartojimas yra apie 34.3 Wh, esant 3.3 V maitinimo įtampai, akumuliatoriaus talpa turėtų būti didesnė nei minėtas dydis. Jeigu modulis yra stacionarus ir baterijos dydis nėra svarbus, tokiems energijos poreikiams puikiai tinka rinkoje plačiai paplitę didelės talpos švininiai 6V akumuliatoriai su talpa nuo 6 Ah, arba 12V akumuliatoriai su talpa nuo 3 Ah (abiem atvejais 36Wh).

## 10.4 Paketo siuntimo laiko priklausomybė nuo moduliacijos ir mainų tempo

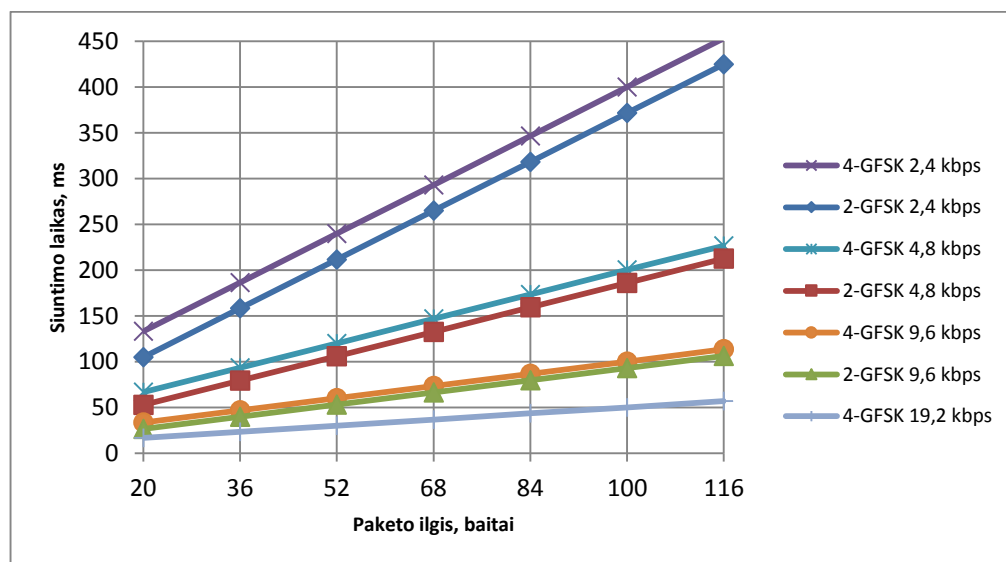
Nors ir įsitikinome, kad siųstuvo suvartojama galia sudaro tik 0.02% visos suvartojamos energijos, jeigu paketai siunčiami kas 10 minučių. Tačiau vėlesniuose radijo ryšio modulio panaudojimo atvejuose bus reikalingas žymiai tankesnis paketinių duomenų perdavimas.

Tyrimas atliekamas naudojant du skirtingus moduliacijos būdus (2-GFSK ir 4-GFSK) ir skirtingus mainų tempus. Naudojant šunto varžą maitinimo įėjime stebimas srovės kitimas ir užfiksuojamas impulso plotis. Išmatuotas siųstuvo įsijungimo laikas pateiktas lentelėje 11.4. Paketo ilgis keičiamas nuo 20 iki 116 baitų, pagal protokolo galimybes.

11.4 lentelė. Paketo siuntimo periodas

Paketo ilgis, baitai	2-GFSK 2,4 kbps	2-GFSK 4,8 kbps	2-GFSK 9,6 kbps	4-GFSK 2,4 kbps	4-GFSK 4,8 kbps	4-GFSK 9,6 kbps	4-GFSK 19,2 kbps
	Paketo siuntimo laikas, ms						
20	104,95	52,53	26,33	133,17	66,73	33,42	16,73
36	158,38	79,24	39,66	186,49	93,35	46,72	23,41
52	211,61	105,85	52,99	239,92	119,96	60,03	30,06
68	264,93	132,57	66,33	293,15	146,67	73,44	36,74
84	318,36	159,48	79,64	346,57	173,39	86,64	43,42
100	371,69	185,89	92,95	400	200,2	100,05	50,03
116	425,01	212,51	106,25	453,23	226,71	113,46	56,71

Grafiškai gauti duomenys pateikti pav. 5.



**Pav. 10.5** Paketo siuntimo laiko priklausomybė nuo paketo ilgiui, esant skirtingiems moduliacijos parametrams ir mainų tempui

Pagal gautus rezultatus matome, jog naudojant tą patį mainų tempą, 4-FSK moduliacijos atveju paketo išsiuntimas trunka truputį ilgiau nei 2-FSK atveju. Taip yra todėl, kad preambulės ir sinchronizacijos žodžio baitai perduodami 2-FSK formatu, kurio duomenų perdavimo sparta dvigubai mažesnė. Taip pat gauti rezultatai labai nedaug skiriasi nuo teorinių.

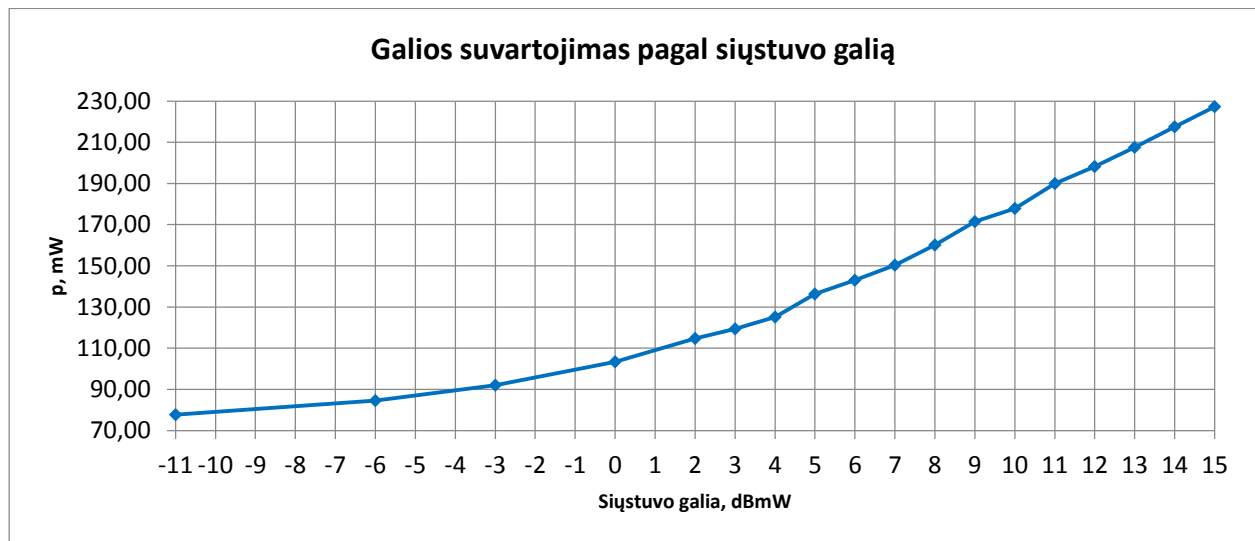
## 10.5 Galios suvartojimas pagal nustatytą siųstuvo galingumą

Suvartojamos galios matavimas atliekamas su Yokogawa WT310 galios matuokliu. Matuojama srovė imama iš maitinimo šaltinio. Atliekami trys matavimai ir apskaičiuojamas vidurkis. Siųstuvo galia keičiama nuo -11 iki 15 dBmW. Įėjimo įtampa 3.289V. Matavimo rezultatai pateikti lentelėje 4. Grafiškai rezultatai atvaizduoti Pav. 10.6.

Lentelė 11.5. Galios suvartojimas pagal siųstuvo galingumą

Siųstuvo galia, dBm	matavimas 1		matavimas 2		matavimas 3		Viurkis	
	I, mA	P, mW	I, mA	P, mW	I, mA	P, mW	I, mA	P, mW
15	69,17	227,50	69,01	226,97	69,13	227,37	69,10	227,28
14	66,02	217,14	66,28	217,99	66,14	217,53	66,15	217,56
13	63,19	207,83	63,10	207,54	63,04	207,34	63,11	207,57
12	60,28	198,26	60,27	198,23	60,25	198,16	60,27	198,22
11	57,68	189,71	57,74	189,91	57,92	190,50	57,78	190,04
10	54,00	177,61	54,07	177,84	54,12	178,00	54,06	177,81
9	51,23	168,50	51,20	168,40	53,92	177,34	52,12	171,41
8	47,27	155,47	47,28	155,50	51,44	169,19	48,66	160,05
7	44,91	147,71	44,89	147,64	47,26	155,44	45,69	150,26
6	42,88	141,03	42,67	140,34	44,93	147,77	43,49	143,05
5	40,87	134,42	40,84	134,32	42,68	140,37	41,46	136,37
4	37,99	124,95	38,12	125,38	38,02	125,05	38,04	125,12
3	36,29	119,36	36,26	119,26	36,38	119,65	36,31	119,42
2	34,85	114,62	34,90	114,79	34,87	114,69	34,87	114,70
0	31,37	103,18	31,49	103,57	31,48	103,54	31,45	103,43
-3	27,79	91,40	28,11	92,45	28,02	92,16	27,97	92,00
-6	25,86	85,05	25,69	84,49	25,61	84,23	25,72	84,59
-11	23,72	78,02	23,66	77,82	23,54	77,42	23,64	77,75

Pav. 10.1 Srovės suvartojimo grafikas



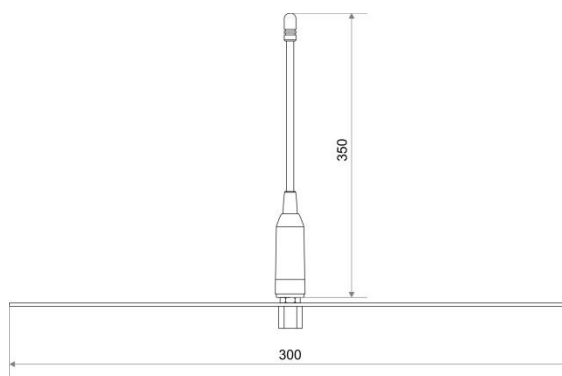
Pav. 10.6 Bendros sistemos galios suvartojimo grafikas pagal nustatytą siųstuvo galingumą

## 11 RADIJO RYŠIO PATIKIMUMO TYRIMAI

### 11.1 Testo metodas

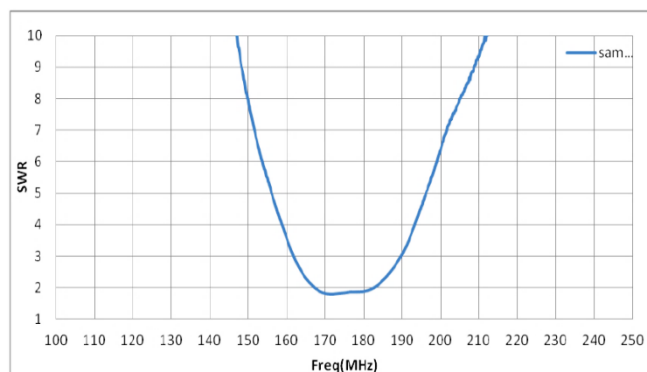
Radio ryšio tyrimai atlikti tarp dviejų tinklo taškų, esant skirtingiems atstumams ir radio ryšio parametrams. Viena antena tvirtinama stacionariai, o kita ant automobilio stogo, taip įgalinant nesunkų atstumo tarp tinklo taškų keitimą. Testų metu naudotas protokolas aprašytas 8.1 skyriuje.

Bandymams atlikti naudojama visakryptė, suderinta 169 MHz, ketvirčio bangos ilgio ( $\lambda/4$ ) antena. Kartu su ja naudota 30 cm skersmens apskritimo formos „žemės“ plokštuma (Pav. 11.1).



**Pav. 11.1** Bandymų metu naudotos antenos brėžinys

Naudotos antenos gamintojas pateikia stovinčios bangos koeficiento charakteristiką esant 30cm žemės plokštumai. Ji atvaizduota Pav. 11.2



**Pav. 11.2** Antenos stovinčios bangos koeficiento grafikas [20]

Pagal Pav. 11.2, matome, jog stovinčios bangos koeficiento vertė 169.4 – 169.475 MHz ruože yra apie 1.8 – 1.9. Teoriškai pagal šį koeficientą, galios perdavimo efektyvumas turėtų būti apie 90% [21].

## 11.2 Radijo ryšio tyrimai naudojant suprojektuotą modulį

Prototipo tyrimai atlikti šiomis sąlygomis:

- 300 metrų tiesioginis matomumas (pieva šalia kelio) (priedas P-12);
- 3190 metrų netiesioginis matomumas (miestas - vanduo) (priedas P-13);
- 4530 metrų netiesioginis matomumas (miestas – vanduo) (priedas P-14);
- 400 metrų per mišką (priedas P-15);
- 550 metrų per mišką (priedas P-16);
- 1450 metrų per lauką (priedas P-17);

Bandymai atlikti siunčiant ir priimant 1000 vnt. 16 baitų paketų. Oro sąlygos šių bandymų metu: giedras dangus, +8 °C, vėjuota.

14.1 lentelė. RF modulio konfigūracijos naudotos radijo ryšio patikimumo tyrime

Moduliacija	Mainų tempas [kbps]	Moduliacijos indeksas	Deviacija [kHz]	Juostos plotis (teorinis) [kHz]		Imtuvo filtro juostos plotis [kHz]	Siųstuvo galia [dBm]
				Teorinis	Išmatuotas		
2-GFSK	4.8	1.5	3.6	18.8	13,095	20	15
2-GFSK	4.8	0.5	1.2	14	8.73	15.4	15
4-GFSK	19.2	1	14.4	45.2	44,57	50	15
4-GFSK	19.2	0.5	7.2	30.8	33.3	33.3	15

Gauti rezultatai pateikti lentelėje 14.2

Lentelė 14.2. Radijo ryšio tyrimo rezultatai

Aplinka	Atstumas [m]	Moduliacijos tipas	Perdavimo sparta [kbps]	Mod. Indeksas	RSSI vid.	Išsiųsti paketai	Teisingai priimti paketai	PER [%]
Tiesioginis matomumas 300 m	300	2-GFSK	4.80	1.50	-75.60	1000	1000	0.00
		4-GFSK	19.20	1.00	-74.90	1000	999	0.10
Miesto aplinka, Netiesioginis matomumas	3190	2-GFSK	4.80	1.50	-94.80	1000	995	0.50
		2-GFSK	4.80	0.50	-94.40	1000	999	0.10
		4-GFSK	19.20	1.00	-93.70	1000	960	4.00
		4-GFSK	19.20	0.50	-94.10	1000	1000	0.00
Miesto aplinka, Netiesioginis matomumas	4530	2-GFSK	4.80	1.50	-95.00	1000	999	0.10
		2-GFSK	4.80	0.50	-95.00	1000	996	0.40
		4-GFSK	19.20	1.00	-94.70	1000	1000	0.00
		4-GFSK	19.20	0.50	-95.10	1000	996	0.40
Miškas	400	2-GFSK	4.80	1.50	-90.50	1000	1000	0.00
		2-GFSK	4.80	0.50	-89.40	1000	998	0.20
		4-GFSK	19.20	1.00	-89.30	1000	971	2.90
		4-GFSK	19.20	0.50	-90.80	1000	991	0.90
Miškas	550	2-GFSK	4.80	1.50	-97.60	1000	249	75.10
		2-GFSK	4.80	0.50	-93.60	1000	868	13.20
		4-GFSK	19.20	1.00	-93.40	1000	739	26.10
		4-GFSK	19.20	0.50	-93.70	1000	635	36.50
Laukas, netiesioginis matomumas	1450	2-GFSK	4.80	1.50	-90.40	1000	999	0.10
		2-GFSK	4.80	0.50	-90.10	1000	999	0.10
		4-GFSK	19.20	1.00	-89.90	1000	997	0.30
		4-GFSK	19.20	0.50	-90.10	1000	999	0.10

### 11.3 Radijo ryšio patikimumo tyrimo apžvalga

Pirmasis tyrimas atliktas esant tiesioginiam matomumui tarp dviejų RF mazgų (300m). Net ir tokiomis sąlygomis buvo stebimas nedidelis paketų praradimas (iki 0,1%). Aiškių skirtumų tarp perdavimo 2-GFSK ir 4-GFSK konfigūracijų šiomis sąlygomis nepastebėta. Paketų praradimai panašūs į atsitiktinio pobūdžio ir galimai sukelti greta esančių pastatų, elektros tinklų ar pravažiuojančių automobilių.

Kitas bandymas atliktas esant ~3.2 km atstumui tarp siųstuvų/įmtuvų. Šiomis sąlygomis pasiektas 0.1% PER (2-GFSK, 0.5 mod. ind.) ir 0% PER (4-GFSK, 0.5 mod. ind.). Abejais moduliacijos atvejais mažesnis moduliacijos indeksas sumažino PER santykį.

Esant 4.5 km atstumui, mažesnis moduliacijos indeksas nežymiai padidino prarastų paketų skaičių, o tai prieštarauja prieš tai atlikto bandymo rezultatams ir galima hipotezė, jog paketų praradimai yra atsitiktinio pobūdžio ir nebūtinai įtakoti ryšio nustatymų. Esant 0.5 moduliacijos indeksui ir 2-(G)FSK moduliacijai, tenkinama MSK sąlyga (*angl. Minimum Shift Keying*), kuomet pereinamasis laikas tarp signalo fazių yra vienodas, o juostos plotis mažesnis. Tačiau gauti rezultatai neįrodo MSK moduliacijos pranašumo.

Didžiausi paketų praradimai pastebėti bandant duomenų perdavimą miške. Esant 400 metrų atstumui, PER neviršijo 3%, tačiau atstumą padidinus iki 550 metrų PER svyravo tarp 13% ir 75%. Vidutinis priimto signalo stiprumas buvo ne mažesnis nei prieš tai atliktuose bandymuose, esant 3.2 ir 4,5 km atstumui, tačiau paketų praradimai buvo daug didesni. Panašu, jog priimto signalo lygio pakanka, tačiau jis keliaudamas per mišką yra iškraipomas.

Miško įtaką signalo perdavimui patvirtinta bandymą atliekant greta miško esančiame lauke. Kuomet ryšio linija tarp siųstuvų/įmtuvų nekirto miško, buvo stebimi minimalūs paketų praradimai (0.1% – 0.3%), esant 1.45 km). Tačiau pavažiavus už miško kampo, net ir esant panašiam atstumui, paketų perdavimas nutrūko.

Tyrimai buvo atlikti ir su suprojektuotu bevielio ryšio modulio prototipu ir su pirminiu modulio maketu, aprašytu priede P-1. Abiem atvejais pasiekti labai panašūs rezultatai, todėl galima teigti, jog ryšio dalies projektavimas įvykdytas sėkmingai. Su pirminiu radijo ryšio maketu atliktų radijo ryšio bandymų rezultatai pateikti prieduose P-18, P-19 ir P-20.

## IŠVADOS

Projektuojant bevielio ryšio modulį susidurta su panašiomis problemomis, kurios buvo aptartos pirmoje darbo dalyje. Daugiašiuolio duomenų mainų tinklo realizavimas atmestas dėl pernelyg sudėtingo protokolo, paketo ilgio ir dažno duomenų perdavimo reikalavimų. Daugiašiuolio perdavimo protokolo realizavimas atidedamas tolimesniam sistemos tobulinimo laikotarpiui.

Įsitikinta, jog tiksliai apskaičiuoti moduliacijos juostos plotį yra sunku. Išmatuotos juostos pločio vertės šiek tiek skiriasi nuo teorinių. Neatmetama galimybė, jog matavimo rezultatus galėjo įtakoti ir spektro analizatoriaus matavimo paklaidos. Tačiau gautų rezultatų pakako imtuvo filtro juostos pločio nustatymui. Iširta, jog maksimalus galimas duomenų perdavimo tempas 169.4 – 169.475 MHz dažnio juostoje su CC1120 mažos galios radijo ryšio modemu yra 38,4 kbps. Sistema pajėgi vykdyti duomenų perdavimą ir didesniu tempu, tačiau tokiu atveju pažeidžiamos standarte nustatytos ribos.

Naudojant Gauso žemo dažnio filtrą (2-GFSK ir 4-GFSK moduliacija), signalo juostos plotis sumažėja esant bet kokiam mainų tempui ir moduliacijos indeksui. Tačiau kuo didesnis mainų tempas, tuo juostos pločio susiaurėjimas ryškesnis. Taigi GFSK moduliacija efektyviai veikia norint sumažinti juostos plotį, ypač prie didesnio mainų tempo. Esant moduliacijos indeksui  $h=1.5$  juostos plotis 2-GFSK atveju susiaurinamas nuo 12%, esant 1.2 kbps mainų tempui ir iki 37% esant 38.4 kbps mainų tempui. Esant 4-GFSK moduliacijai tomis pačiomis sąlygomis juostos plotis sumažėja nuo 4,5% iki 21.4%.

Įvykio arba laiko inicijuojamas protokolas yra efektyviausias energijos sąnaudų prasme, kadangi ryšio modulis gali būti miego režime su išjungtu imtuvu, nes jam nereikia laukti užklauso paketo iš centrinio modulio. Tokio tipo protokolas buvo realizuotas jungiant suprojektuotą bevielio ryšio modulį prie meteorologinės stotelės. Apskaičiuota, kad nutolęs ryšio modulis tokiu atveju turėtų veikti metus laiko su 6V 6Ah baterija. Sukurto bevielio ryšio modulio energijos sąnaudos dar gali būti sumažintos taikant gilesnį miego režimą, taip pat vietoj nuolatinio imtuvo režimo taikant nešlio signalo paieškos režimą, aptartą 6.1.5 paragrafe.

Radijo ryšio tyrimai parodė, jog labiausiai ryšio kokybę įtakoja atstumas ir kliūtys. Taip pat pastebėta, jog kartais įvyksta atsitiktinio pobūdžio paketų praradimai. Norint pagerinti duomenų perdavimo atstumą, geriausias sprendimas būtų naudoti galios stiprintuvą, tačiau tokiu atveju smarkiai padidėtų energijos sąnaudos, ypač jei paketų perdavimai vyksta dažnai. Bandymų rezultatai parodė, jog naudojant aprašytą sistemą ir esant geroms aplinkos sąlygoms (mažai kliūčių arba tiesioginis matomumas), galima pasiekti 4.5 km ryšio atstumą be didelių paketų praradimų, taip pat pasiekti 19.2 kbps mainų tempą.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. **Clafis Project CMS.** Crop, Livestock and Forests Integrated System for Intelligent Automation. Project web page 2015. Prieiga per internetą: <http://www.clafis-project.eu/>
2. **Sherin Abdel Hamid, Hossam Hassanein, Glen Takahara.** Routing for Wireless Multi Hop Networks – Unifying and Distinguishing Features. Technical Report. 2011. P. 3 – 15.
3. **S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic,** Mobile Ad Hoc Networking.: IEEE PRESS, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
4. **I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci.** Wireless Sensor Networks: a survey. Elsevier's Computer Networks, vol. 38, no. 4, p. 393 – 422, Mar. 2002.
5. OSI Model Concepts. January 8, 2009. Prieiga per internetą: [http://www.petri.co.il/osi\\_concepts.htm#](http://www.petri.co.il/osi_concepts.htm#)
6. **Aaron Balchunas.** OSI Reference Model v1.31. 2012. P. 3 – 7.
7. **Ahmad Abed Alhameed Alkhatib, Gurvinder Singh Baicher.** Wireless Sensor Network Architecture. 2012 International Conference on Computer Networks and Communication Systems. – Singapore: IACSIT Press, 2012. P. 2 – 4.
8. **European Telecommunications Standards Institute.** ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 2012-01. Part 1.
9. **Mauri Kuorilehto, Mikko Kohvakka, Jukka Suhonen, Panu Hamalainen, Marko Hannikainen, Timo D. Hamalainen.** Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice: Theory, Realization and Deployment. Tampere University of Technology, Finland. John Wiley & Sons, Ltd. 2007.
10. **Walter Debus.** RF Path Loss & Transmission Distance Calculations. Technical Memorandum. Axonn, LCC. 2006
11. **Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati** Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols and Applications. Wiley- Interscience. A John Willey & Sons, INC. 2007
12. **Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E.Kamal.** Routing Techniques in Wireless Sensor Networks Survey. Dept. of Electrical and Computer Engineering. Iowa State University
13. **Vincent Chan, Steve Underwood, Mars Leung, Roc Yu.** CC430-Based Simple Wireless Mesh Network Mains Switch: Application Report – April 2011.
14. **Texas Instruments.** CC1120 High-Performance RF Transceiver for Narrowband Systems. Datasheet. [pdf]
15. **Texas Instruments.** CC112X/CC1175 Low-Power High Performance Sub-1 GHz RF transceivers/Transmitter. User's Guide. [pdf]
16. **Fredrik Eriksen.** CC112x RSSI and CS Response Time. Design Note DN510. [pdf]
17. **A. Čitavičius.** Dvejetainis skaitmeninis moduliavimas. Kauno Technologijos Universitetas. Mokomoji paskaitų medžiaga. [pdf]

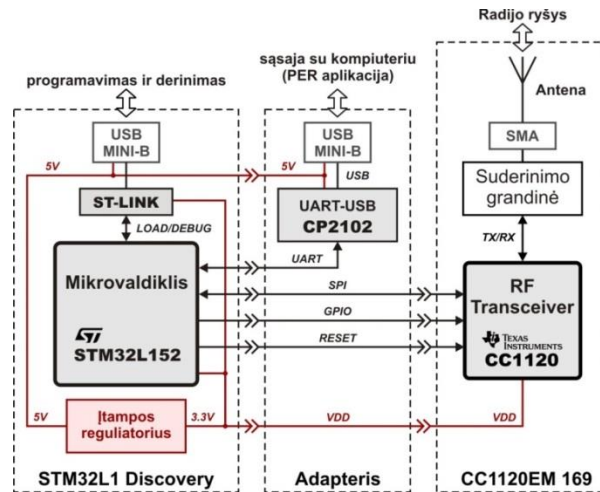


18. **Earl Mccune.** Practical Digital Wireless Signals. ISBN-13 978-0-511-67538-6. Cambridge University Press. 2010.
19. **Sverre Hellan.** CC11XX Sensitivity versus Frequency Offset and Crystal Accuracy. Texas Instruments. Design Note DN005. [pdf]
20. **Taoglas Antenna Solutions.** FW.80.SMA.M Antenna. Specification. [pdf]
21. **Marki Microwave.** Return Loss to VSWR Conversion. [pdf]

## PRIEDAI

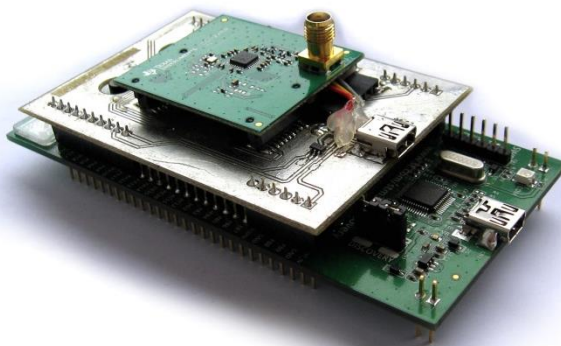
### P-1 Bandymo maketo struktūra (pradinis sistemos variantas)

Pirminiams radijo ryšio bandymams surinktą modulį sudaro maketas su mikrovaldikliu ir prie jo prijungtas radijo ryšio modulis. Tam, kad ryšio modulį būtų galima patikimai ir tvirtai prijungti prie mikrokontrolerio maketo, suprojektuojamas tam skirtas adapteris su tinkamomis jungtimis. Taip pat jame suprojektuojamas USB-UART sąsajų keitiklis, užtikrinantis duomenų mainus tarp kompiuterio ir mikrovaldiklio. Visos sistemos struktūrinė schema pateikta žemiau.



Pav. Radijo ryšio sistuvo–imtuvo struktūrinė schema

Maitinimui naudojama USB 5V įtampa, kuri keičiama įtampos reguliatoriumi, esančiu „STM32L Discovery“ makete į 3.3V įtampą, kurią naudoja mikrovaldiklis ir RF modulis. Surinkto maketo fotografija pateikta apačioje.



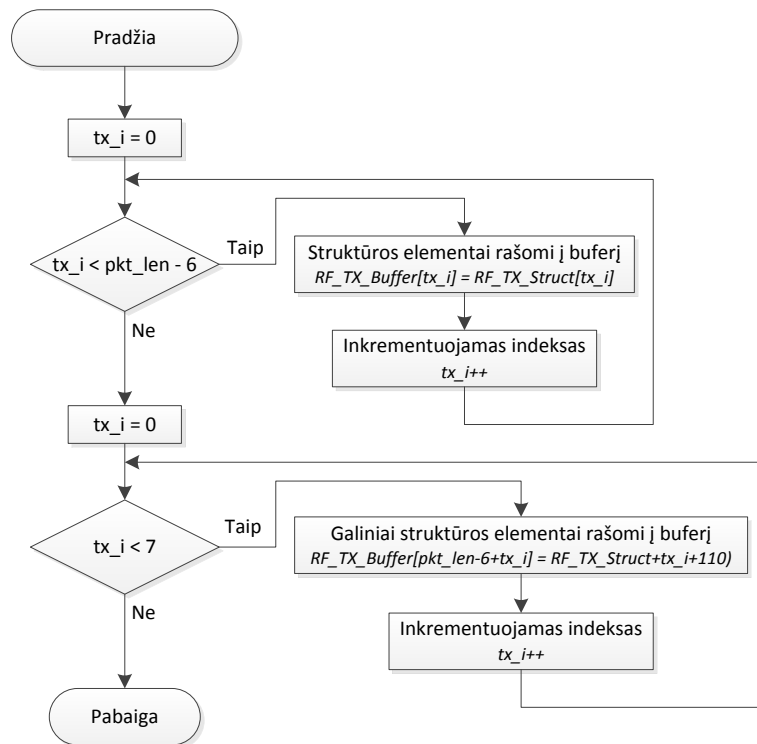
Pav. Radijo ryšio bandymų maketas

**P-2** RSSI reikšmių prieš ir po kalibravimo lentelė

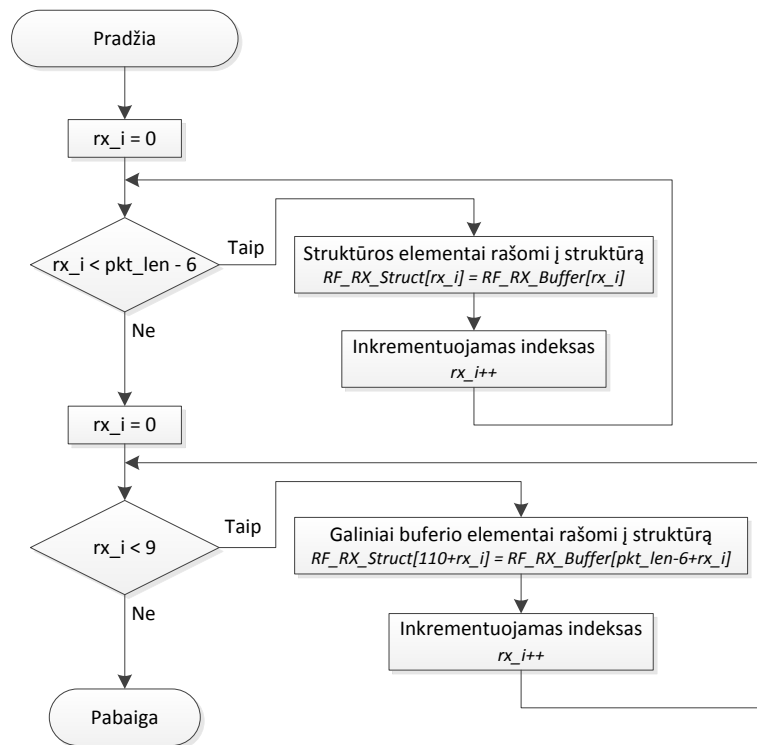
Generatoriaus išėjimo galia, dBm	Be kalibravimo		Po kalibravimo -99 dBm korekcija		Po kalibravimo -98 dBm korekcija	
	RSSI , dBm	Offset	RSSI , dBm	Nuokrypis, dBm	RSSI , dBm	Nuokrypis, dBm
0	93	93	-6	-6	-5	-5
-10	89	99	-10	0	-9	1
-20	78	98	-21	-1	-20	0
-30	69	99	-30	0	-30	0
-40	58	98	-41	-1	-41	-1
-50	48	98	-51	-1	-50	0
-60	38	98	-61	-1	-60	0
-70	29	99	-70	0	-70	0
-80	18	98	-81	-1	-80	0
-90	9	99	-90	0	-90	0
-100	1	101	-98	2	-97	3
-110	-9	101	-108	2	-107	3
-120	-19	101	-117	3	-117	3
		<b>Vid: 98.53</b>		<b>Vid: -0,307</b>		<b>Vid: 0,307</b>



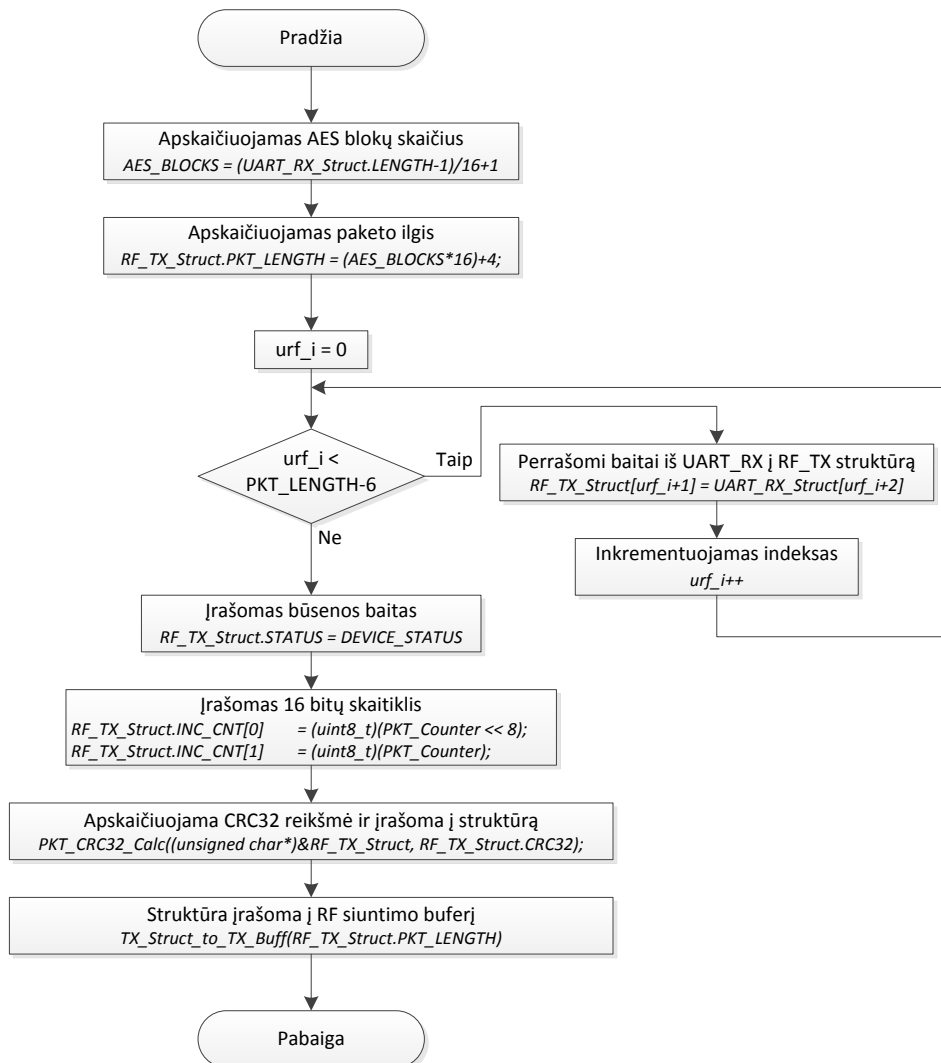
**P-4 TX\_Struct\_to\_TX\_Buff** funkcijos algoritmas, vykdomas siunčiamų duomenų struktūros kopijavimą į buferį.



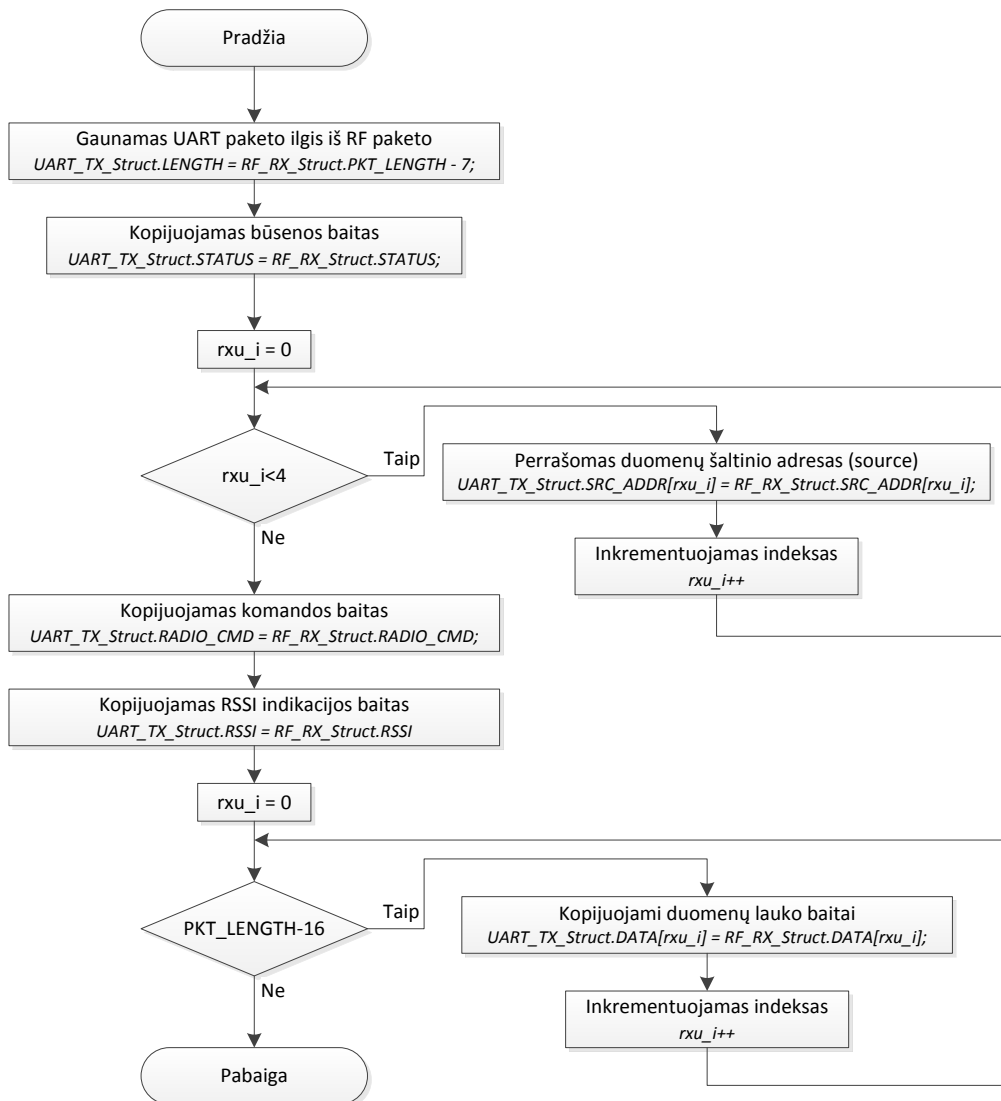
**P-5 RX\_Buff\_to\_RX\_Struct** kopijavimo algoritmas



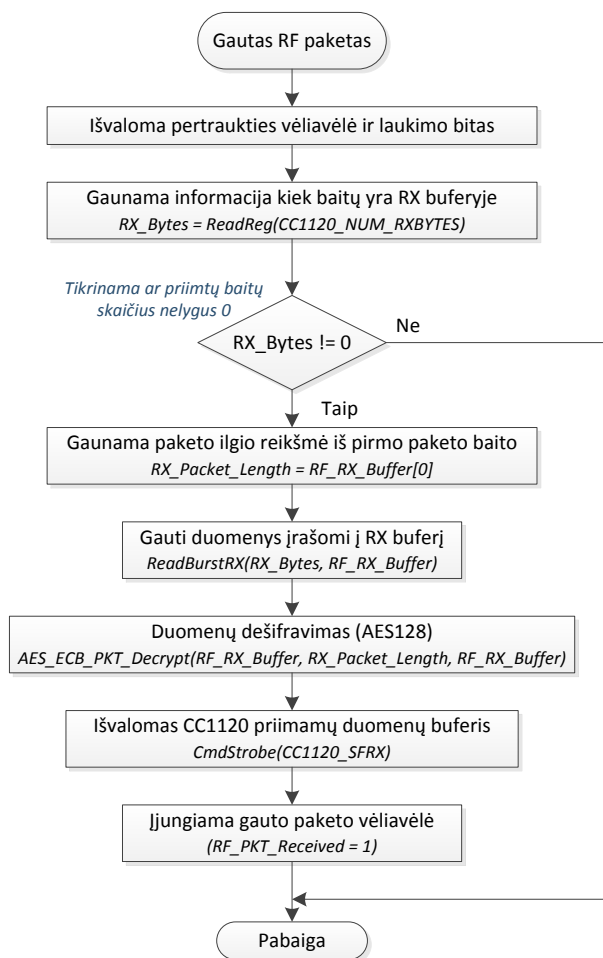
**P-6** UART\_RX\_Struct\_to\_TX\_Buff funkcijos algoritmas, vykdomas duomenų kopijavimą iš UART gautų duomenų struktūros į siuntimo buferį.



**P-7** RX\_Struct\_to\_UART\_TX\_Struct funkcijos algoritmas, vykantis duomenų kopijavimą iš radijo ryšiu gautų duomenų struktūros į UART duomenų siuntimo struktūrą.

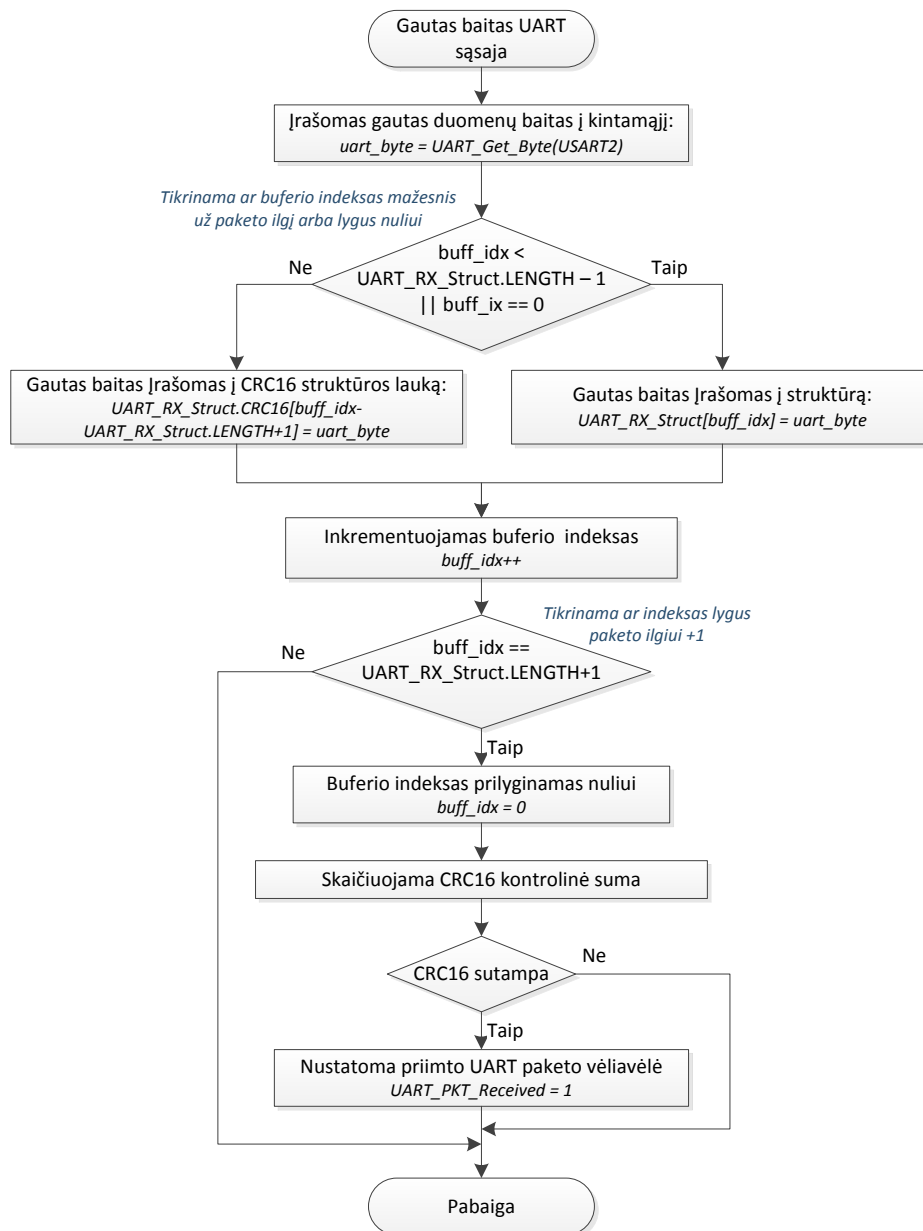


## P-8 Radijo ryšiu gauto paketo pertraukties funkcijos algoritmas

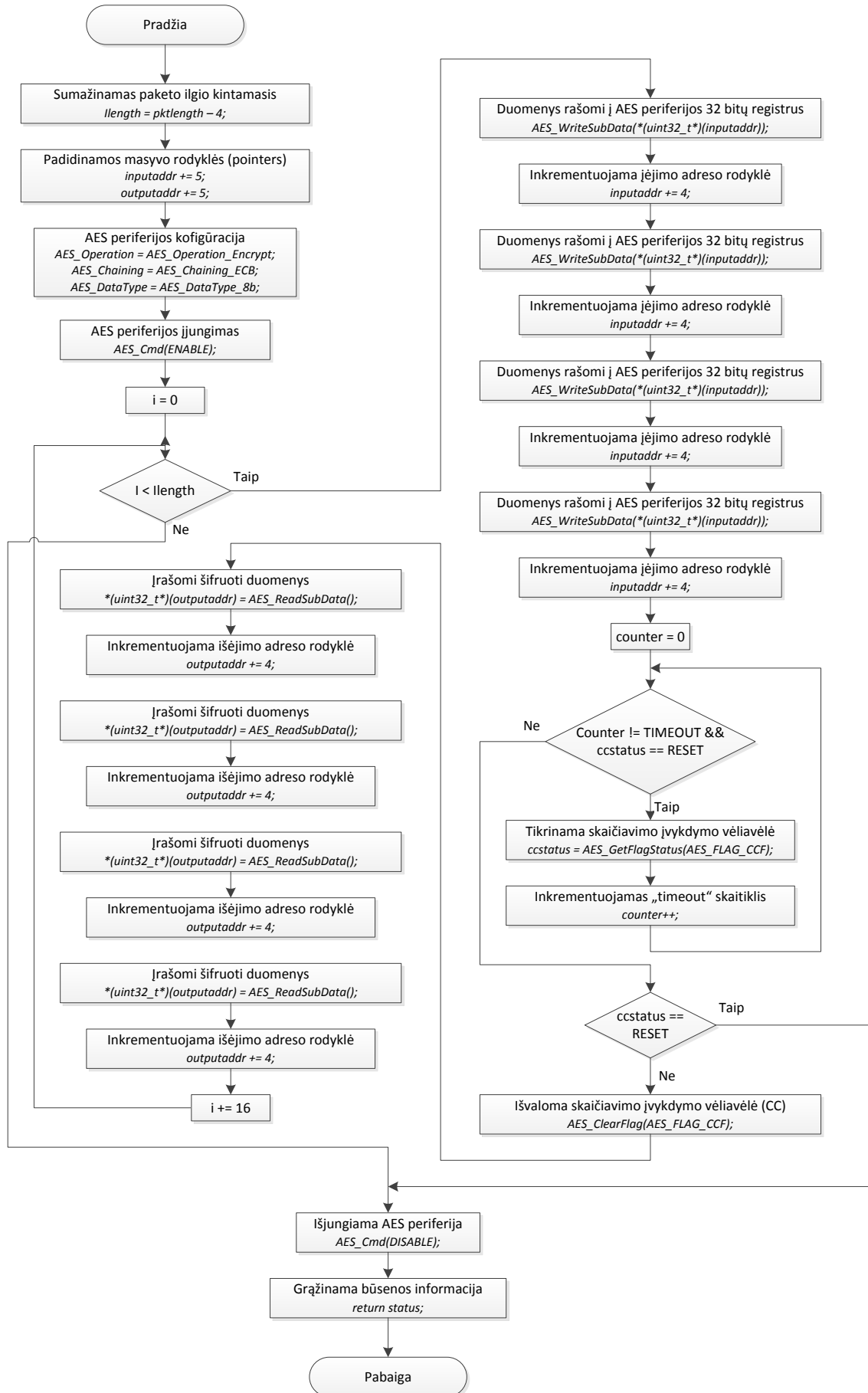




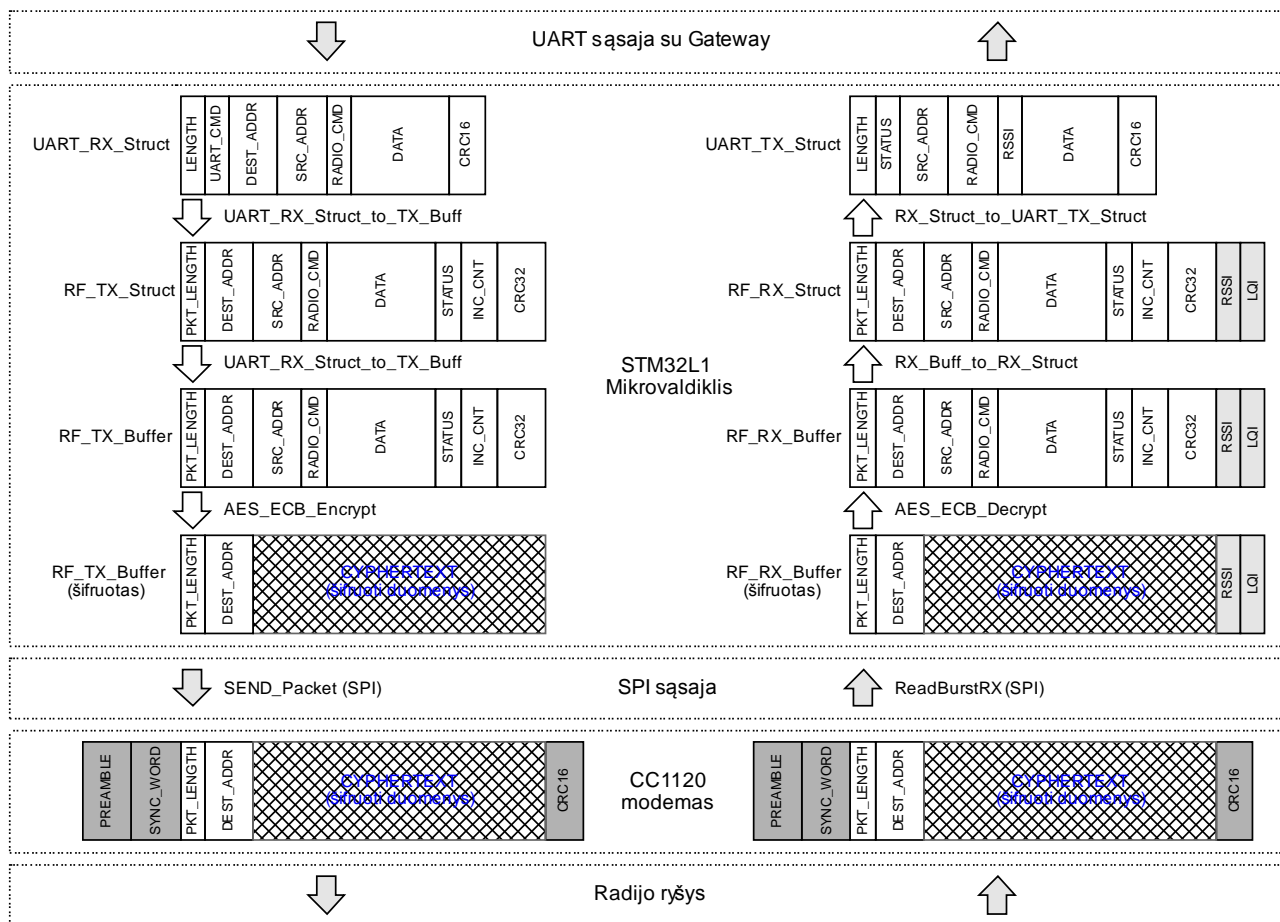
**P-9** UART sąsajos pertraukties algoritmas, gavus duomenų baitą.



## P-10 Duomenų šifravimo algoritmas (AES128).

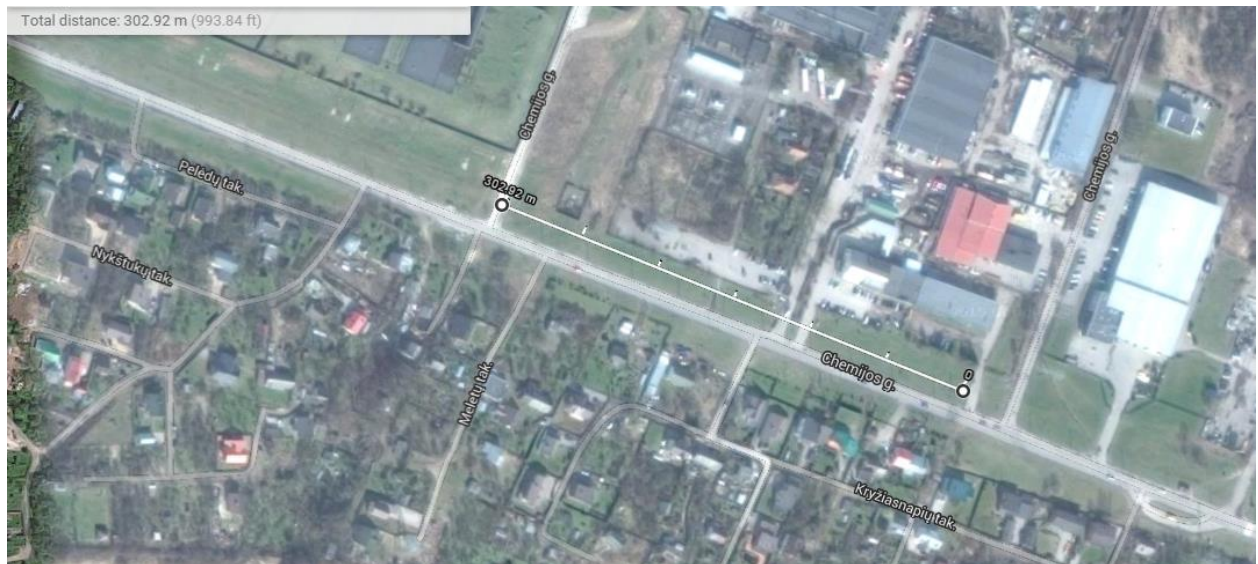


# P-11 Duomenų paketo perdavimo mikrovaldiklyje atvaizdavimas.

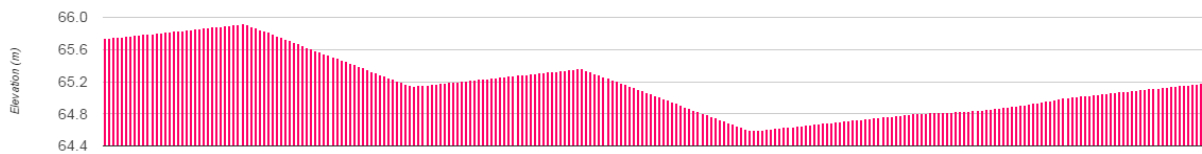


## P-12 Radijo ryšio tyrimas trumpu nuotoliu (300m)

Distance [m]	Modulation	Symbol rate [ksps]	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	TX interval [s]	TX packets	RX good packets	PER [%]	Date/Time
300	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-75.10	-76	-75	0.20	1000	994	0.60	Date: 2015-3-15 Time: 15:12:5
	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-75.20	-76	-74	0.20	1000	999	0.10	Date: 2015-3-15 Time: 15:23:1
	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-75.10	-76	-74	0.15	1000	989	1.10	Date: 2015-3-15 Time: 15:29:20
	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-75.60	-76	-75	0.15	1000	990	1.00	Date: 2015-3-15 Time: 15:33:2
	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-75.60	-76	-75	0.20	1000	1000	0.00	Date: 2015-3-15 Time: 15:36:58
	4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-74.90	-76	-74	0.15	1000	999	0.10	Date: 2015-3-15 Time: 15:26:29
4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-75.00	-76	-74	0.20	1000	995	0.50	Date: 2015-3-15 Time: 15:40:43	



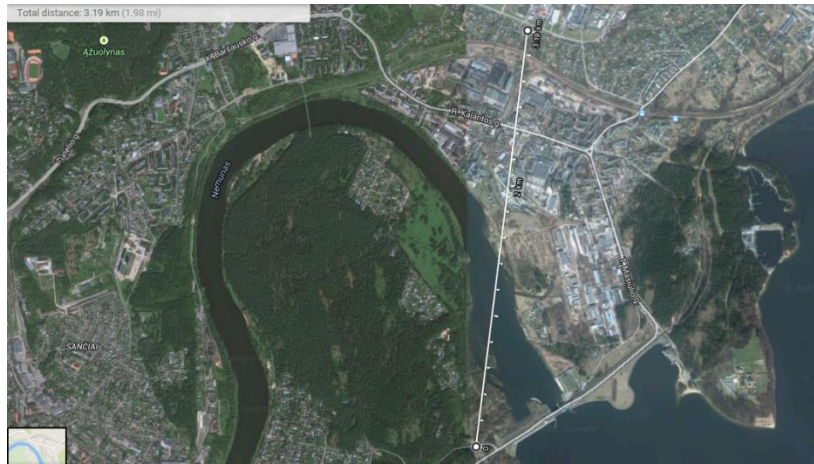
Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]



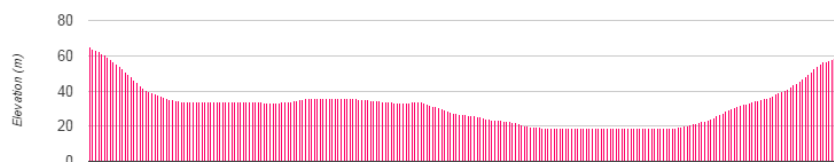
Reljefo lygio tarp tinklo modulių grafikas [daftlogic.com]

### P-13 Radijo ryšio tyrimas 3 km atstumu

Distance [m]	Modulation	Symbol rate [kpsps]	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	TX interval [s]	TX packets	RX good packets	PER [%]	Date/Time
3190	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-94.80	-96	-93	0.15	1000	995	0.50	Date: 2015-3-15 Time: 16:53:25
	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-94.30	-96	-93	0.15	1000	990	1.00	Date: 2015-3-15 Time: 16:57:5
	2-GFSK	4.80	4.80	0.50	-94.40	-96	-92	0.15	1000	999	0.10	Date: 2015-3-15 Time: 17:7:27
	4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-93.70	-95	-92	0.15	1000	960	4.00	Date: 2015-3-15 Time: 17:1:41
	4-GFSK	9.60	19.20	0.50	-94.10	-96	-93	0.15	1000	1000	0.00	Date: 2015-3-15 Time: 17:4:24



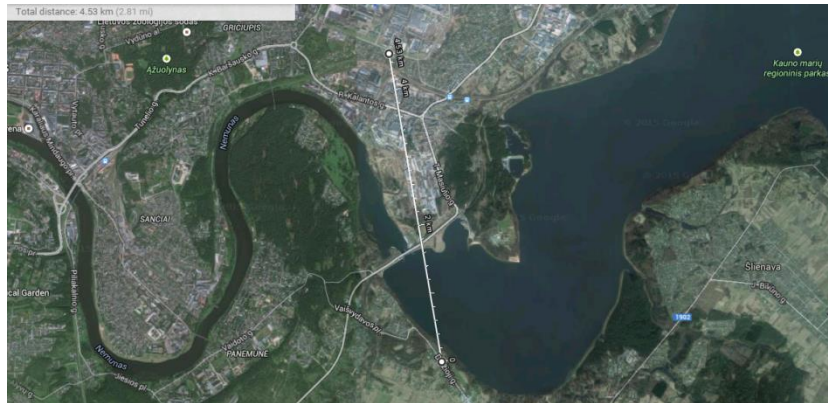
Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]



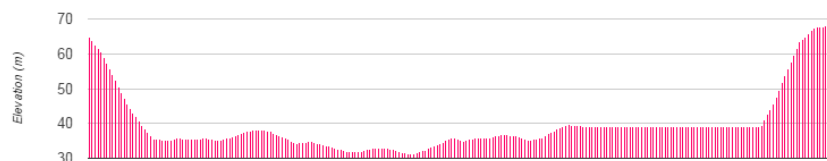
Reljefo lygio tarp tinklo modulių grafikas [daftlogic.com]

## P-14 Radijo ryšio tyrimas 4.5 km atstumu

Distance [m]	Modulation	Symbol rate [ksps]	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	TX interval [s]	TX packets	RX good packets	PER [%]	Date/Time
4530	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-95.00	-96	-95	0.15	1000	999	0.10	Date: 2015-3-15 Time: 17:24:11
	2-GFSK	4.80	4.80	0.50	-95.00	-96	-94	0.15	1000	996	0.40	Date: 2015-3-15 Time: 17:34:6
	2-GFSK	9.60	9.60	0.50	-95.00	-96	-94	0.15	1000	990	1.00	Date: 2015-3-15 Time: 17:21:12
	4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-94.70	-96	-94	0.15	1000	1000	0.00	Date: 2015-3-15 Time: 17:27:3
	4-GFSK	9.60	19.20	0.50	-95.10	-96	-94	0.10	1000	996	0.40	Date: 2015-3-15 Time: 17:31:16



Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]



Reljefo lygio tarp tinklo modulių grafikas [daftlogic.com]

## P-15 Radijo ryšio tyrimas miške (400m)

Distance [m]	Modulation	Symbol rate [kps]	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	TX interval [s]	TX packets	RX good packets	PER [%]	Date/Time
400	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-90.50	-95	-87	0.15	1000	1000	0.00	Date: 2015-3-16 Time: 13:33:18
	2-GFSK	4.80	4.80	0.50	-89.40	-94	-86	0.20	1000	998	0.20	Date: 2015-3-16 Time: 13:30:19
	4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-89.30	-95	-86	0.15	1000	971	2.90	Date: 2015-3-16 Time: 13:36:45
	4-GFSK	9.60	19.20	0.50	-90.80	-95	-88	0.15	1000	991	0.90	Date: 2015-3-16 Time: 13:40:27



Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [maps.google.lt]



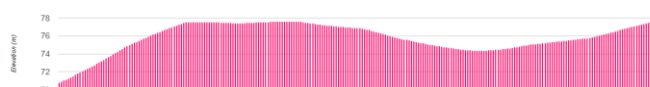
Reljefo lygio tarp tinklo modulių grafikas [daftlogic.com]

## P-16 Radijo ryšio tyrimas miške (550m)

Distance [m]	Modulation	Symbol rate [kps]	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	TX interval [s]	TX packets	RX good packets	PER [%]	Date/Time
550	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-97.60	-100	-95	0.20	1000	249	75.10	Date: 2015-3-16 Time: 13:24:1
	2-GFSK	4.80	4.80	0.50	-93.60	-98	-90	0.15	1000	868	13.20	Date: 2015-3-16 Time: 13:55:42
	4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-93.40	-96	-91	0.15	1000	739	26.10	Date: 2015-3-16 Time: 13:52:42
	4-GFSK	9.60	19.20	0.50	-93.70	-97	-90	0.15	1000	635	36.50	Date: 2015-3-16 Time: 13:44:8



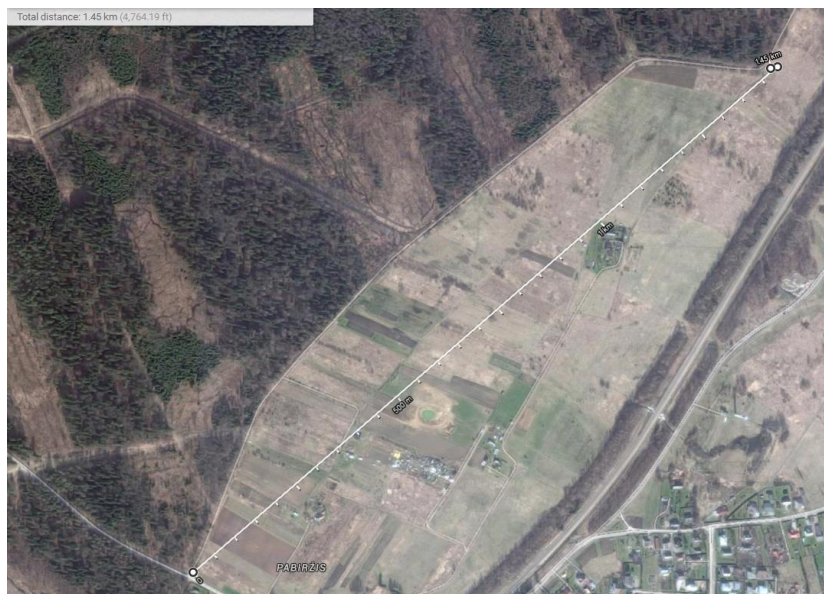
Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]



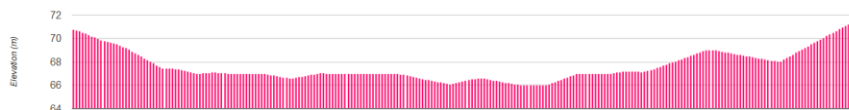
Reljefo lygio tarp tinklo modulių grafikas [daftlogic.com]

## P-17 Radijo ryšio tyrimas 1.5 km atstumu lauke

Distance [m]	Modulation	Symbol rate [ksps]	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	TX interval [s]	TX packets	RX good packets	PER [%]	Date/Time
1450	2-GFSK	4.80	4.80	1.50	-90.40	-93	-88	0.15	1000	999	0.10	Date: 2015-3-16 Time: 14:12:54
	2-GFSK	4.80	4.80	0.50	-90.10	-92	-88	0.15	1000	999	0.10	Date: 2015-3-16 Time: 14:9:58
	4-GFSK	9.60	19.20	1.00	-89.90	-93	-87	0.15	1000	997	0.30	Date: 2015-3-16 Time: 14:18:32
	4-GFSK	9.60	19.20	0.50	-90.10	-93	-88	0.15	1000	999	0.10	Date: 2015-3-16 Time: 14:15:49



Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]



Reljefo lygio tarp tinklo modulių grafikas [daftlogic.com]



**P-18** Radijo ryšio tyrimai lygiame lauke, naudojant CC1120EM maketą (1100m atstumu)

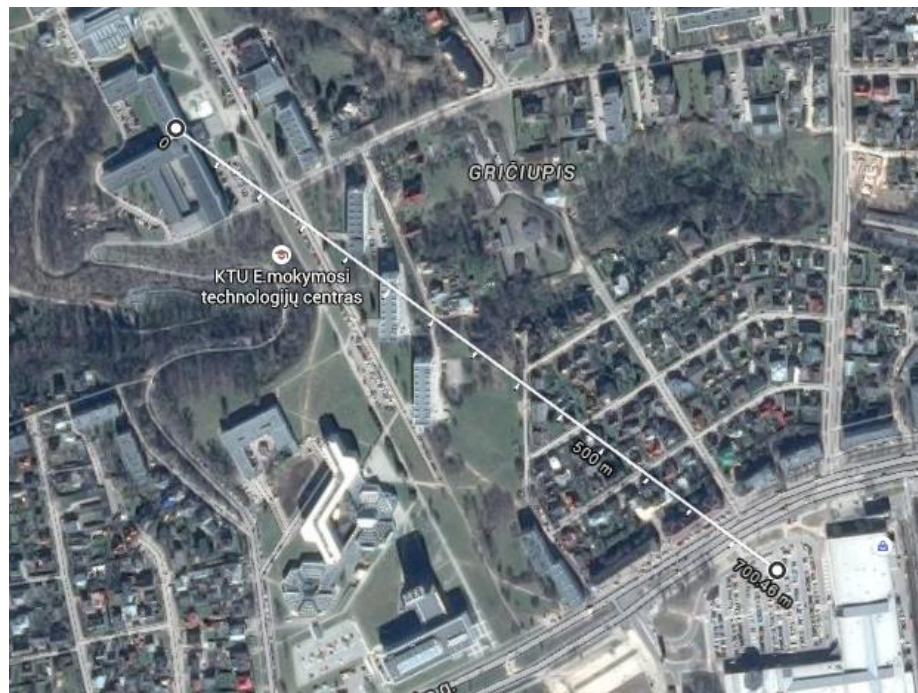
Distance [m]	Modulation	Bit rate [kbps]	Mod. Index	RSSI avg.	RSSI min	RSSI max	RX good packets	PER [%]	Date/Time
1000	2-GFSK	1.2	2.5	-95.3	-97	-94	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:14:36
			1.5	-95.6	-97	-95	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:15:25
			0.5	-95.3	-97	-94	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:17:21
		2.4	2.5	-95.5	-96	-95	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:18:15
			1.5	-95.2	-96	-94	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:18:55
			0.5	-95.2	-96	-95	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:19:41
		4.8	2.5	-91.9	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:35:48
			1.5	-92	-93	-91	99	1	Date: 2015-2-16 Time: 13:34:48
			0.5	-91.7	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:38:28
		9.6	2.5	-92.1	-93	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:39:5
			1.5	-92.6	-94	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:39:41
			0.5	-92.5	-94	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:41:47
	19.2	1.5	-92.4	-94	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:42:44	
		0.5	-93.1	-94	-92	99	1	Date: 2015-2-16 Time: 13:43:16	
		2.5	-92.5	-94	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:44:32	
	4-GFSK	2.4	1.5	-91.8	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:45:32
			0.5	-92	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:46:23
			2.5	-92.2	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:47:9
		4.8	1.5	-91.9	-92	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:47:36
			0.5	-92.1	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:48:7
			2.5	-92.1	-93	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:48:40
		9.6	1.5	-91.8	-92	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:49:9
			0.5	-92	-93	-91	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:49:37
			1.5	-92.7	-94	-92	98	2	Date: 2015-2-16 Time: 13:50:11
19.2		1.5	-92.6	-94	-92	98	2	Date: 2015-2-16 Time: 13:50:35	
		0.5	-92.2	-93	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:51:8	
		0.5	-92.2	-93	-92	100	0	Date: 2015-2-16 Time: 13:51:24	



Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]

**P-19** Radijo ryšio tyrimai miesto sąlygomis, naudojant CC1120EM maketą (700m atstumu)

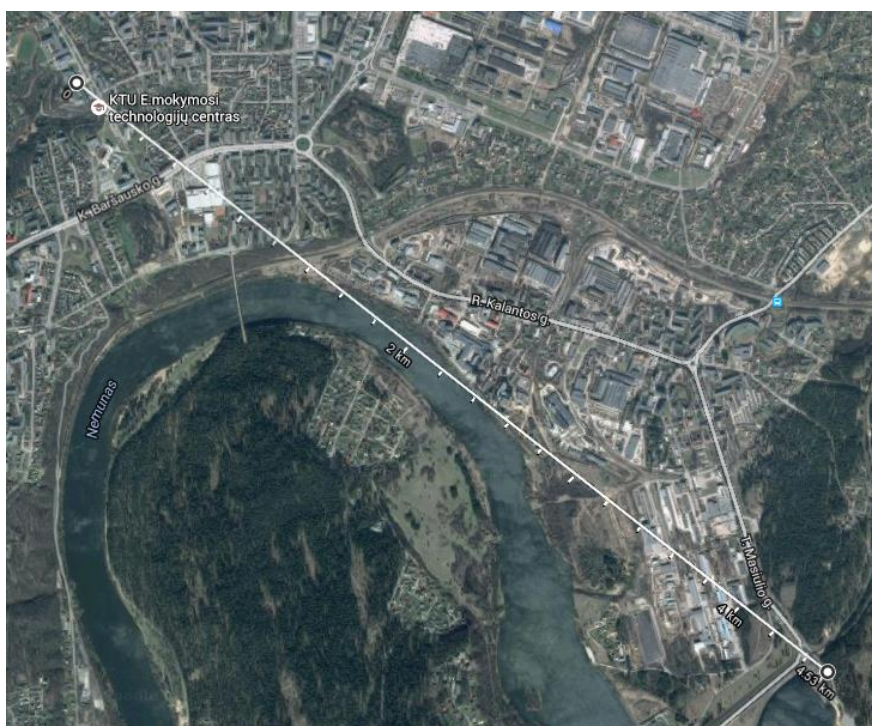
700m		Šlapdriba, vėjas															
		Mod. Index 2.5						Mod. Index 1.5					Mod. Index 0.5				
	Symbol rate [kps]	Bit rate [kbps]	RSSI [dBm]	TX	RX	RX OK	PER [%]	RSSI [dBm]	TX	RX	RX OK	PER [%]	RSSI [dBm]	TX	RX	RX OK	PER [%]
<b>2-FSK</b>	1.2	1.2	-84.7	100	100	100	0	-84.3	100	100	100	0	-84.8	100	100	100	0
	2.4	2.4	-83.4	100	100	100	0	-83.5	100	100	100	0	-84.9	100	100	100	0
	4.8	4.8	-84.8	100	100	100	0	-84.5	100	100	100	0	-84.3	100	100	100	0
	9.6	9.6	-84.5	100	100	97	3	-83.9	100	100	100	0	-84.2	100	100	96	4
	19.2	19.2						-83.5	100	100	100	0	-85.1	100	100	99	1
<b>2-GFSK</b>	1.2	1.2	-84.1	100	100	100	0	-84.1	100	100	100	0	-84.2	100	100	100	0
	4.8	4.8	-85.3	100	100	100	0	-85.6	100	100	100	0	-84.8	100	100	100	0
	9.6	9.6	-83.8	100	100	100	0	-85.6	100	100	100	0	-84.5	100	100	100	0
	19.2	19.2						-85.3	100	100	100	0	-85.3	100	100	100	0
<b>4-FSK</b>	1.2	2.4	-84.9	100	100	92	8	-84.7	100	100	97	3	-84.4	100	100	99	1
	4.8	9.6	-84.5	100	100	99	1	-84	100	100	98	2	-84.9	100	100	100	0
	9.6	19.2						-85.3	100	100	99	1	-85.9	100	100	98	2
	19.2	38.4											-84.7	100	100	98	2
<b>4-GFSK</b>	1.2	2.4	-89.9	100	100	91	9	-85.9	100	100	99	1	-85.5	100	100	100	0
	4.8	9.6	-84.1	100	100	100	0	-85	100	100	99	1	-85.1	100	100	98	2
	9.6	19.2						-84.9	100	100	99	1	-84.4	100	100	99	1
	19.2	38.4											-84.3	100	100	99	1



Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]

**P-20** Radijo ryšio tyrimai miesto sąlygomis, naudojant CC1120EM maketą (4500m atstumu)

4560m		nedidelis lietus, vėjas															
		Mod. Index 1.5						Mod. Index 1.0					Mod. Index 0.5				
Symbol rate [kpsps]		Bit rate [kbps]	RSSI [dBm]	TX	RX	RX OK	PER [%]	RSSI [dBm]	TX	RX	RX OK	PER [%]	RSSI [dBm]	TX	RX	RX OK	PER [%]
<b>2-GFSK</b>	0.6	0.6						-96.5	100	100	87	13	-96.7	100	100	84	16
	1.2	1.2	-97.5	100	100	100	0	-97.2	100	100	97	3	-96.8	100	100	90	10
	2.4	2.4	-96.6	100	100	98	2	-96.7	100	100	100	0	-95.8	100	100	82	18
	4.8	4.8	-98.8	100	99	94	6	-96.1	100	100	98	2	-97	100	100	92	8
<b>4-GFSK</b>	2.4	4.8	-96.4	100	100	100	0	-96.1	100	100	100	0	-96.1	100	100	100	0
	4.8	9.6	-96.4	100	100	87	13	-97.1	100	100	100	0	-96.5	100	100	86	14
	9.6	19.2	-97.1	100	100	83	17	-97.1	100	100	74	26	-98.6	100	100	97	3
	19.2	38.4											-95.5	100	99	96	4



Atlikto bandymo vietovės žemėlapis [Google Maps]