

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

INFORMATIKOS FAKULTETAS

PROGRAMŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Ignas Plauska

**REALAUS LAIKO INFORMACIJOS SURINKIMO
APARATINĖS BEI PROGRAMINĖS ĮRANGOS SUDARYMAS IR
TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovas

Prof. dr. Egidijus Kazanavičius

KAUNAS, 2012

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

INFORMATIKOS FAKULTETAS

PROGRAMŲ INŽINERIJOS KATEDRA

**REALAUS LAIKO INFORMACIJOS SURINKIMO
APARATINĖS BEI PROGRAMINĖS ĮRANGOS SUDARYMAS IR
TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Recenzentas

Prof. dr. Vacius Jusas

2012 05

Vadovas

Prof. dr. Egidijus Kazanavičius

2012 05

Atliko

IFM-0/5 gr. stud.

I. Plauska

2012 05 24

KAUNAS, 2012

Plauska I. Development and research of real-time data collection software and hardware: Master's Thesis in Informatics/ supervisor prof. dr. E. Kazanavičius; Software Engineering Department, Faculty of Informatics, Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2012. - 53 p.

SUMMARY

Recently, various systems for automatically monitoring and controlling the surrounding environment are gaining more popularity. In such systems, randomly distributed wireless autonomous sensor devices report physical parameters of the environment. The ability to collect data from these devices and have it analyzed and delivered to the user quickly enough is usually critical to monitoring and control decisions.

Therefore a robust and reliable method for collecting data from multiple devices is needed. However, the sensor devices are made with portability and low power in mind, and they usually do not have the resources to employ complex multiple access methods. This means that the method for collecting data from such devices has to be relatively simple. What's more, the data collecting node (sink) itself should be simple, portable and low energy, so it could be comfortably used with portable user devices, such as tablet computers.

The aim of this thesis is to research the possibility of employing a simple DS-CDMA based protocol and low cost hardware for data collection from multiple sensor devices.

A prototype using Microchip dsPIC microcontroller and a low-cost RF module was developed. Experiments focusing on the reliability and timing of data collection while using Gold sequences of increasing length were carried out.

SVARBIŲ TERMINŲ IR SUTRUMPINIMŲ ŽODYNĖLIS

BST – bevieliai sensoriniai tinklai (angl. *WSN – wireless sensor network*) – tinklas, sudarytas iš daugybės aplinkoje išdėstytų sensorinių mazgų;

Sensorinis mazgas (angl. *node*) – mažas, paprastai autonominis iš baterijos maitinamas įrenginys, fiksuojantis įvairius aplinkos parametrus ir radijo ryšiu persiunčiantis juos į galutinį mazgą;

Galutinis mazgas (angl. *sink*) – įrenginys, surenkantis ir galutiniam vartotojui pateikiantis sensorinių mazgų išsiųstą informaciją;

DP – daugybinė prieiga (angl. *MA – multiple access*) – metodas daugeliui informacijos siuntėju/gavėjų bendrauti su vienu mazgu naudojant tą patį ryšio kanalą;

DS-CDMA – (angl. *direct sequence code division multiple access*) – tiesioginės sekos kodinės atskirties daugybinė prieiga, vienas iš daugybinės prieigos metodų, besiremiantis duomenų kodavimu unikaliomis sekomis;

MAI – (angl. *multiple access interference*) – daugybinės prieigos interferencija, DS-CDMA pašalinis efektas, kai skirtingomis sekomis užkoduoti duomenų signalai bendrame kanale paveikia vienas kitą;

FPGA – (angl. *field programmable gate array*) – programuojamoji matrica – lustas, kurio funkciją galima užprogramuoti aparatūros aprašymo kalba;

ASIC – (angl. *application-specific integrated circuit*) – specialios paskirties integrinė grandinė – lustas, kurio funkcija skirta konkrečiam taikymui, ir negali būti keičiama;

PIC – „Microchip“ kompanijos gaminama populiarių mikrovaldiklių šeima;

DSP – (angl. *digital signal processors*) – skaitmeninis signalų procesorius – procesorius, turintis specialių komandų rinkinį, palengvinantį dažnai naudojamus skaitmeninio signalų apdorojimo veiksmus;

OOK – (angl. *on-off keying*) – viena paprasčiausių skaitmeninio signalo moduliacijos formų, kai dvejetainis signalas žymimas siunčiamu arba nesiunčiamu nešančiuoju dažniu.

BPSK – (angl. *binary phase-shift keying* – skaitmeninė fazės moduliacija) – populiari skaitmeninės moduliacijos forma, labai dažnai naudojama CDMA įgyvendinimui.

PAVEIKSLAI

1 pav.	Informacijos surinkimas iš daugelio šaltinių viename mazge.....	9
2 pav.	Informacijos surinkimo procesorius ir jo gaunamas signalas.....	11
3 pav.	Bendro signalo susiformavimas kanale iš N sensorių išsiųstų signalų.....	12
4 pav.	Principinė informacijos surinkimo procesoriaus schema	13
5 pav.	Duomenų išskleidimo ir atkūrimo iliustracija.	13
6 pav.	LFSR konfigūracija m-sekos generavimui.....	17
7 pav.	m-sekos $x^5 + x^3 + 1$ autokoreliacijos reikšmės	17
8 pav.	tarpusavio koreliacijos skirtumai tarp atsitiktinai parinktų ir pageidaujamų polinomų	18
9 pav.	GOLD sekos auto ir tarpusavio koreliacijos reikšmės	19
10 pav.	Logistinis atvaizdavimas pradedant nuo labai artimų pradinių reikšmių	20
11 pav.	Dvejetainės skleidžiančios 31 elemento sekos sudarymas iš logistinio atvaizdavimo, kai $r = 3,9; x_1 = 0,0001$	21
12 pav.	Dvejetainės skleidžiančios 31 elemento sekos sudarymas iš logistinio atvaizdavimo, kai $r = 3,9; x_1 = 0,0002$	22
13 pav.	Sudarytų chaotinių sekų autokoreliacijos reikšmės.....	22
14 pav.	Sudarytų chaotinių sekų tarpusavio koreliacijos reikšmės	23
15 pav.	Signalų apdorojimas informacijos surinkimo procesoriuje, kai sistemoje N siuntėjų.....	24
16 pav.	Siųstuvo DS-CDMA sistemoje modelis	28
17 pav.	Ryšio kanalo modelis	29
18 pav.	Bendro signalo susidarymas, kai duomenis išsiunčia du sensoriai	29
19 pav.	Radio imtuvo stiprinimo kontrolės modelis	30
20 pav.	Informacijos surinkimo procesoriaus modelis.....	30
21 pav.	Informacijos surinkimo DS-CDMA tinkle modeliavimo aplinka, kai sistemoje du siuntėjai .	32
22 pav.	Testinės platformos principinė schema	36
23 pav.	Priimti paketai, kai $R = 5, w = 7$	37
24 pav.	Priimti paketai, kai $R = 5, w = 15$	37
25 pav.	Priimti paketai, kai $R = 10, w = 7$	38
26 pav.	Priimti paketai, kai $R = 10, w = 15$	38
27 pav.	Priimti paketai, kai $R = 5, w = 7$	39
28 pav.	Priimti paketai, kai $R = 5, w = 15$	39
29 pav.	Priimti paketai, kai $R = 10, w = 7$	40
30 pav.	Priimti paketai, kai $R = 10, w = 15$	40
31 pav.	Priimti paketai, kai $R = 5, w = 7$	41
32 pav.	<i>Priimti paketai, kai $R = 5, w = 15$</i>	<i>41</i>
33 pav.	Priimti paketai, kai $R = 10, w = 7$	42
34 pav.	Priimti paketai, kai $R = 10, w = 15$	42
35 pav.	Siųstuvo pozicijos tiriamoje aplinkoje	43

TURINYS

1. Informacijos surinkimo iš daugelio šaltinių analizė	9
1.1. Kontekstas.....	9
1.2. DS-CDMA metodu pagrįstas informacijos surinkimo mazgas.....	10
1.3. Apdorojimo stiprinimas	14
1.4. Skleidžiančių sekų apžvalga	14
1.4.1. Skleidžiančių sekų savybės.....	15
1.4.2. Skleidžiančių sekų autokoreliacija.....	15
1.4.3. Skleidžiančių sekų tarpusavio koreliacija	15
1.4.4. Pageidautinomis savybėmis pasižyminčios sekos	16
1.4.4.1. M – sekos.....	16
1.4.4.2. GOLD sekos	18
1.4.4.3. Chaosu grindžiamos sekos.....	19
1.5. Galima informacijos surinkimo procesoriaus realizacija aparatinėje įrangoje	23
1.5.1. ASIC lustas	24
1.5.2. FPGA matricos.....	25
1.5.3. Mikrovaldiklis.....	25
1.6. Išvados	26
2. Realaus laiko informacijos surinkimo iš daugelio šaltinių modelis	27
2.1. Bendro signalo $s(t)$ sudarymas.....	27
2.2. Radijo imtuvo modelis.....	30
2.3. Informacijos surinkimo procesoriaus modelis.....	30
2.4. Bendros modeliavimo aplinkos sudarymas	31
2.5. Modeliavimo rezultatai ir galutinio metodo sudarymas	33
3. Praktinė metodo realizacija ir eksperimentai.....	35
3.1. Praktinės realizacijos platforma.....	35
3.2. Eksperimentai	36
3.2.1. Duomenų atskyrimo patikimumo priklausomybės nuo sekų ilgio ir pertekliškumo parametrų tyrimas....	36
3.2.2. Duomenų priėmimo patikimumo priklausomybės nuo sekų ilgio	43
4. Išvados	45
5. Literatūros sąrašas.....	46

ĮVADAS

Informacijos surinkimas iš daugelio šaltinių yra svarbus uždavinys įvairiose sistemose. Geras tokios sistemos pavyzdys yra pastaruoju metu populiarūs ir vis dažniau diegiami bevieliai sensoriniai tinklai (BST; angl. *WSN – Wireless Sensor Network*). Šie tinklai paprastai naudojami aplinkos arba konkrečių objektų stebėjimui ir kontrolei. BST susideda iš daug mažų aplinkoje išdėstytų įrenginių – sensorinių mazgų (angl. *node*), kurie fiksuoja įvairius fizinius aplinkos parametrus (pvz., temperatūrą) ir juos radijo ryšiu išsiunčia galutiniam vartotojui. Tokio tinklo funkcionavimas priklauso nuo to, kaip partikimai ir ar laiku surenkama sensorinių mazgų fiksuojama ir išsiunčiama informacija.

Čia kritinį vaidmenį įgyja galutiniai mazgai (angl. *sink*), kurie ir surenka informaciją iš aplinkinių sensorinių mazgų ir ją perduoda tinklo stebėtojo terminalui. Kadangi daug sensorinių mazgų duomenis siunčia tam pačiam galutiniam mazgui, o siuntimui paprastai naudoja atviras ir triukšmingas dažnių juostas, reikalingas toks duomenų perdavimo metodas, kuris leistų daugybinę prieigą (DP – angl. *MA – Multiple Access*) ir turėtų atsparumą triukšmui ir trukdžiams. Čia reikia pažymėti, kad sensoriniai mazgai paprastai yra maitinami iš baterijų ir turi ribotus skaičiavimo resursus, todėl negali pasitelkti sudėtingų ir daug energijos reikalaujančių protokolų ir aparatinės įrangos.

Kaip patrauklus ir nesudėtingas sprendimas gali būti naudojamas DS-CDMA (angl. *Direct Sequence Code Division Multiple Access* – tiesioginės sekos kodinės atskirties daugybinė prieiga), turintis abi paminėtas savybes [1–4]. Metodas remiasi tiesioginiu išsiunčiamų duomenų kodavimu ortogonaliomis sekomis, kurios leidžia informacijos surinkimo mazgui išskirti kiekvieno siuntėjo duomenis iš bendro kanalo, naudojant tik skaitinius signalo apdorojimo būdus.

Darbo objektas – darbe nagrinėjama galimybė sudaryti BST informacijos surinkimo mazgą, pagrįstą DS-CDMA metodu.

Darbo problema – patikimas duomenų surinkimas galutiniame mazge, aptinkant ir atskiriant kiekvieno šaltinio atsitiktiniais laiko momentais perduodamą informaciją. Gautame signale duomenys yra susimaišę tarpusavyje ir paveikti triukšmo, todėl sudėtinga patikimai surinkti kiekvieno šaltinio informaciją.

Darbo tikslas – sudaryti DS-CDMA pagrįstą atskirų informacijos šaltinių siunčiamų duomenų surinkimo metodą, įgyvendinti jį aparatinėje įrangoje taip sudarant BST galutinio mazgo prototipą, ir iširti, kokį duomenų surinkimo patikimumą įmanoma pasiekti.

Uždaviniai. Siekiant šio tikslo darbe reikia atlikti tokius uždavinius:

- atlikti DS-CDMA pagrįstų duomenų atskyrimo metodų analizę;
- atlikti šių metodų galimų realizacijų aparatinėje įrangoje analizę ir įvertinimą;
- sudaryti modeliavimo sistemą MATLAB aplinkoje, skirtą pirminiam DS-CDMA pagrįsto metodo patikimumo tyrimui;
- remiantis modeliavimo rezultatais, sudaryti didžiausią patikimumą galintį pasiekti ir realaus laiko reikalavimus tenkinantį duomenų surinkimo metodą;
- realizuoti metodą pasirinktoje aparatinėje įrangoje;
- iširti duomenų surinkimo patikimumą iš tikrų aplinkoje išdėstytų belaidžių sensorių.

Pirmojoje šio darbo dalyje aptariamas tyrimo kontekstas ir atliekama DS-CDMA metodų, besiremiančių skirtingomis skleidžiančių kodų savybėmis apžvalga. Įvertinamos galimybės realizuoti informacijos surinkimo mazgą skirtingų tipų aparatinėje įrangoje.

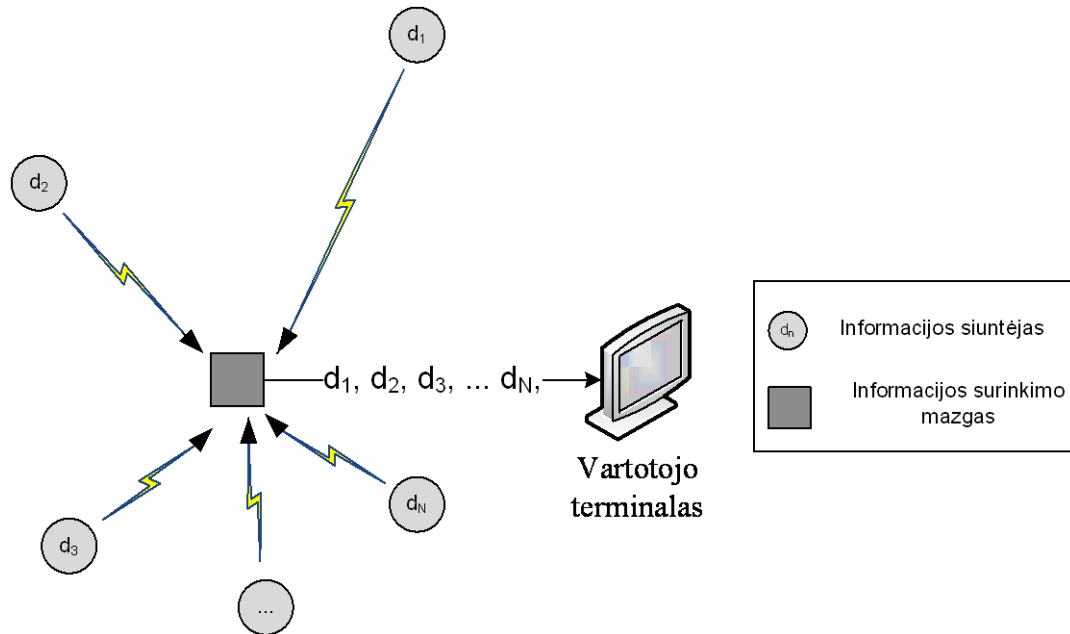
Antrojoje dalyje sudaromas DS-CDMA paremtas BST modelis. Modeliavimo metu siekiama sudaryti optimalų duomenų surinkimo metodą, kuris veiktų pasirinktoje aparatinėje įrangoje ir tenkintų realaus laiko reikalavimus.

Trečiojoje dalyje aprašomas modelio perkėlimas į realią aparatinę įrangą, ir pateikiami duomenų surinkimo patikimumo eksperimentų rezultatai.

1. INFORMACIJOS SURINKIMO IŠ DAUGELIO ŠALTINIŲ ANALIZĖ

1.1. Kontekstas

Bendru atveju sensorinį tinklą, arba bet kokią kitą situaciją, kur daug šaltinių nedideliu nuotoliu siunčia duomenis vienam surinkimo mazgui galima iliustruoti taip:



1 pav. Informacijos surinkimas iš daugelio šaltinių viename mazge

Paprasčiausia tokio tinklo topologija – visi šaltiniai (sensorinių mazgų) siunčia savo duomenis d tam pačiam surinkimo mazgui (vadinamoji žvaigždės topologija), kuris juos surenka ir perduoda vartotojui. Daugelyje taikymų, kur siuntėjų nėra labai daug (pvz., „protingo namo“ sistema, kur sensoriai stebi kambarių temperatūrą ir perduoda ją valdymo terminalui) tokia topologija yra pakankama. Paprastai siuntėjai duomenis perduoti naudoja tą patį belaidį kanalą, taigi iškyla problema – koordinuoti bendravimą tarp visų mazgų, kad jų siunčiama informacija kanale „nesusikirstų“ ir pasiektų galutinį mazgą (t.y., suteikti lygiagrečiosios priegos galimybę).

Koordinavimas atliekamas naudojant dvikryptį ryšį, t.y., sensoriai bendrauja su duomenų surinkimo mazgu ir tarpusavyje. Duomenų surinkimo mazgas gali pranešti sensoriui, kada įvyko duomenų kolizija, gautas sugadintas paketas, ar per tam tikrą laiką negauta paketo iš konkretaus sensoriaus. Sensoriniai mazgai taip pat paprastai gali koordinuoti veiksmus tarpusavyje, informuoti vienas kitą, kada pradeda siųsti duomenis, ir taip išvengti kolizijos.

Taip veikia tokie standartai kaip „Bluetooth“ [5], [6] ir „ZigBee“, [7], [8]. Tai lankstūs standartai, užtikrinantys duomenų perdavimo koordinavimą, bei leidžiantys sudaryti sudėtingesnes nei žvaigždės tipo topologijas pasitelkiant įvairius duomenų maršrutizavimo algoritmus. Abu standartai naudoja 2,4 Ghz radijo dažnį, turi energijos taupymo režimus. Tačiau

šie standartai yra sąlyginai sudėtingi, reikalauja specialios jiems pritaikytos aparatinės įrangos, o jų naudojimas baterijomis maitinamuose įrenginiuose ne visada leidžia pasiekti patenkinamą veikimo laiką – pageidautina, kad sensoriniai mazgai be priežiūros galėtų veikti bent kelerius metus.

Daugelyje taikymų tereikia, kad mazgas galėtų tam tikru intervalu išsiųsti nedidelį duomenų paketą (pvz. temperatūros reikšmę) galutiniam mazgui. Tam paminėtų standartų aukštesnio lygio privalumai, kaip maršrutizavimas, nėra būtini, ir todėl iškyla itin paprastų, mažos kainos ir lengvai projektuojamų sensorinių mazgų poreikis.

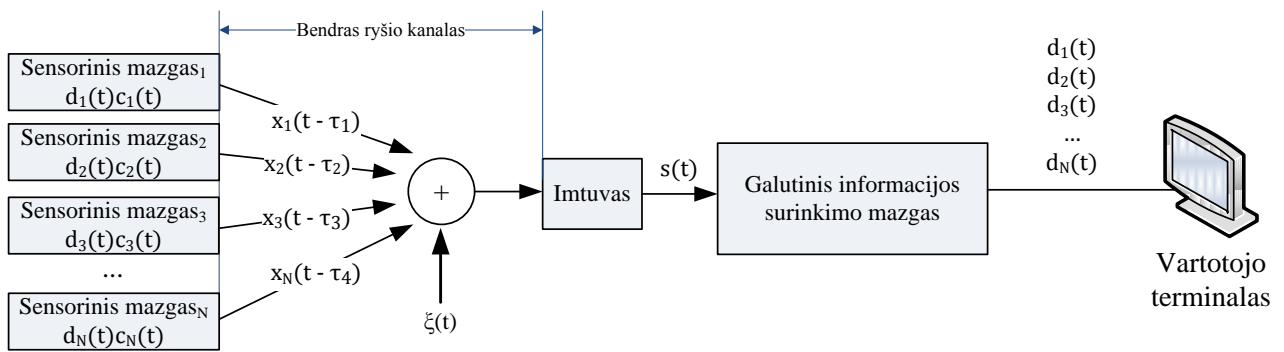
Šiam darbui lygiagrečiai vykdomame tyrime kuriamas sensorinis mazgas, siekiant kiek įmanoma mažesnio energijos suvartojimo ir mažiausios kainos [1]. To siekiama naudojant paprasčiausią nelicencijuojamą 433 MHz dažniu veikiančią siųstuvą, valdomą itin mažai energijos vartojančio mikrovaldiklio. Darbe nustatyta, kad lygiagrečiai prieigai užtikrinti naudojant mažiausiai resursų parankus DS-CDMA metodas. Šis metodas leidžia sensoriniams mazgams siųsti duomenis asinchroniškai, nederinant veiksmų nei tarpusavyje, nei su galutiniu mazgu. Taip galima atsisakyti papildomos ryšio įrangos, o sąlyginai paprastą informacijos siuntimo valdymą perkelti į programinę valdiklio dalį. Atskirų mazgų išsiųstos informacijos teisingas ir patikimas surinkimas tada tampa galutinio mazgo užduotimi.

Svarbiausia, kad nagrinėjamoje realizacijoje nėra atgalinio ryšio tarp informacijos surinkimo mazgo ir sensorinio mazgo, todėl sensoriniam mazgui nėra galimybės sužinoti, ar informacijos surinkimo procesorius išsiųstus duomenis priėmė teisingai.

Paties galutinio informacijos surinkimo mazgo, jo algoritmų sudarymo ir DS-CDMA metodo variacijų, galinčių nulemti informacijos surinkimo patikimumą ir mazgo architektūrą [1] autorius nenagrinėja, kadangi tai iš esmės nekeičia jo sudaromų sensorinių mazgų architektūros ir neįeina į to darbo tikslus. Šie klausimai nagrinėjami šiame darbe.

1.2. DS-CDMA metodu pagrįstas informacijos surinkimo mazgas

Informacijos surinkimo mazgas ir jo gaunamas signalas DS-CDMA pagrįstame tinkle pavaizduotas 2 pav. esančioje diagramoje. CDMA metodo esmė – informacijai persiųsti naudojama daug didesnė dažnių juosta negu būtina, todėl toks metodas dar vadinamas išskleisto spektro metodu.



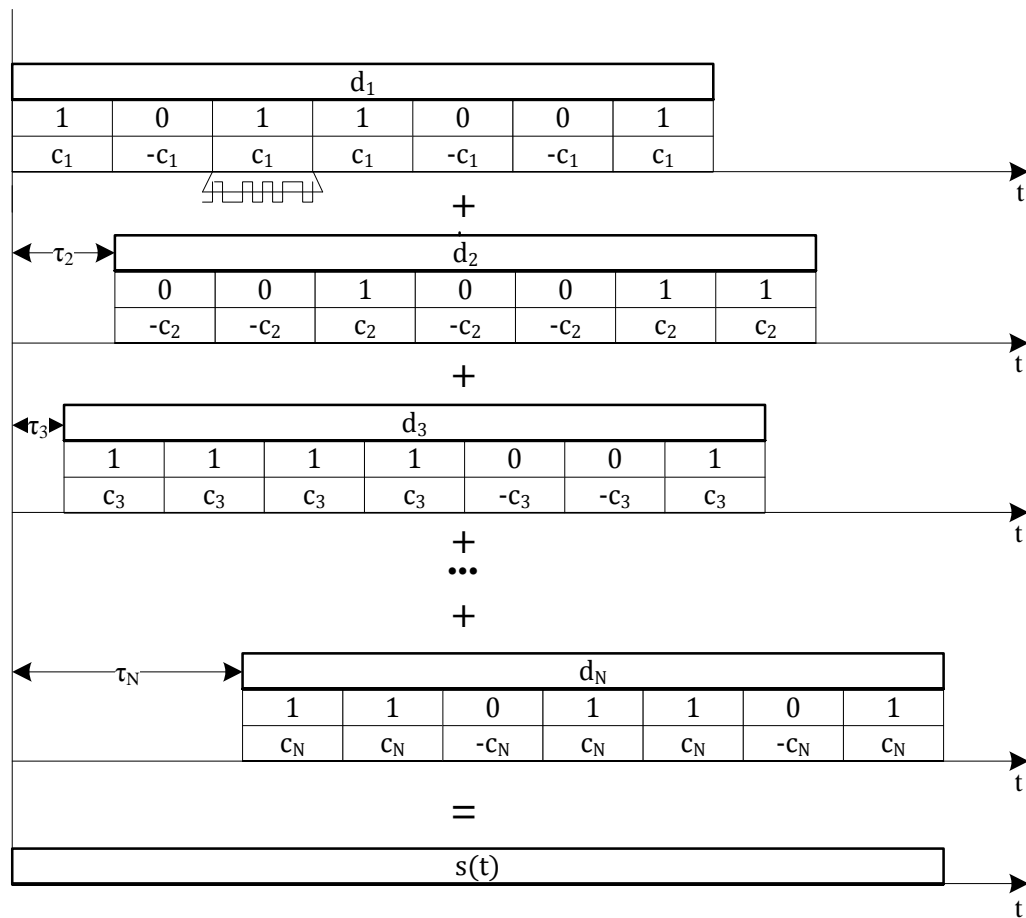
2 pav. Informacijos surinkimo procesorius ir jo gaunamas signalas

Kiekvienas tinklo sensorinis mazgas (toliau darbe vadinamas tiesiog sensoriumi) fiksuoja tam tikrus aplinkos parametrus ir iš jų suformuoja duomenų signalą $d(t)$. Jo kiekvieną bitą papildomai moduliuoja (sudaugina) daug didesnio dažnio skleidžiančia seka $c(t)$. Ši seka yra unikali kiekvienam sensoriumi. Paprastai laikomasi moduliacijos schemas, kai duomenų signalo vienetą atitinka tiesioginė seka, o nulį – invertuota [9]. Taip sudaromas signalas $x(t)$, kuris išsiunčiamas į bendrą visiems mazgams kanalą, veikiamą triukšmo $\xi(t)$. Tokia moduliacija pasiekia keletą sensoriniam tinklui svarbių tikslų [10]:

- *Daugybinė prieiga* – jei keletas sensorių siunčia duomenis tuo pačiu metu, informacijos surinkimo procesorius galės atskirti kiekvieną sensoriumi, jei jų naudojamos sekos nepriklausomos (nekoreliuotos);
- *Atsparumas trukdžiams* – įprastas trumpalaikis triukšmas kanale paveiks tik dalį ilgos sekos, todėl vis dar bus įmanoma iš jos išskirti duomenis. Galima sakyti, kad bito moduliacija M ilgio seka padidina bito energiją M kartų, o didesnės energijos signalas yra atsparesnis trukdžiams;
- *Privatumas* – atkurti duomenis galima tik žinant skleidžiančias sekas, todėl taip pasiekama duomenų apsauga nenaudojant papildomų priemonių.
- *Saugumas* – kadangi signalo energija išskaidoma, jį sunku aptikti ir atskirti nuo aplinkos triukšmo.

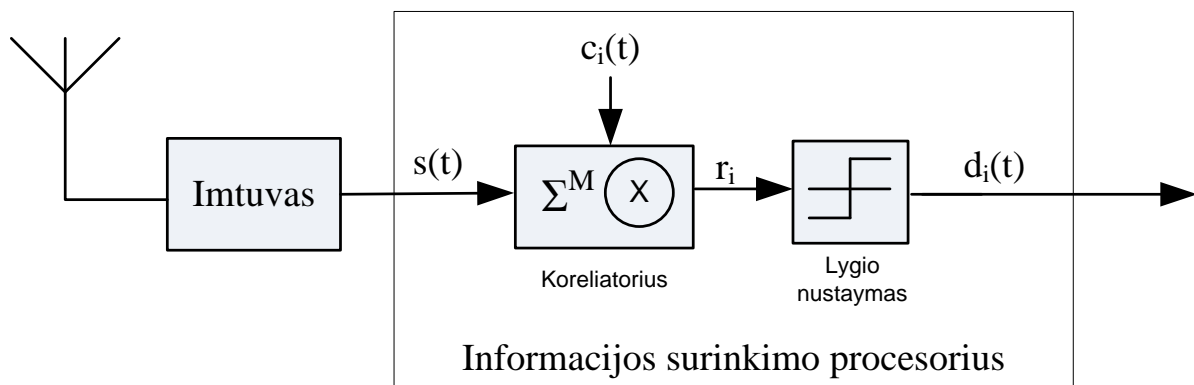
Sensoriai veiksmų tarpusavyje ir su procesoriumi nekoordinuoja, todėl kiekvienas savo signalą išsiunčia procesoriaus atžvilgiu atsitiktiniu laiko momentu τ_i . Taip visi signalai kanale susilieja į vieną $s(t)$, kurį per imtuvą ir gauna informacijos surinkimo procesorius. Bendro signalo susidarymas N sensorių tinkle iliustruotas 3 pav.

Informacijos surinkimo mazgo pagrindinė paskirtis – iš gauto $s(t)$ išskirti kiekvieno sensoriaus duomenų signalą $d(t)$. Procesorius saugo visų siuntėjų kodines sekas ir gali atkurti duomenų bitus ieškodamas konkrečios sekos gautame signale $s(t)$. Kadangi nėra žinoma kada bet kuris sensorius ims siųsti duomenis, procesorius turi nuolatos priimti $s(t)$, ir spėti atlikti kiekvieno sensoriaus duomenų paiešką. To nespėjus, duomenys bus prarasti. Iš čia kyla realaus laiko reikalavimai – vieno bito išskyrimas iš kiekvieno sensoriaus negali trukti ilgiau negu bito periodas T_b . Akivaizdu, kad didėjant duomenų perdavimo spartai, trumpėja laikas skaičiavimams atlikti.



3 pav. Bendro signalo susiformavimas kanale iš N sensorių išsiųstų signalų

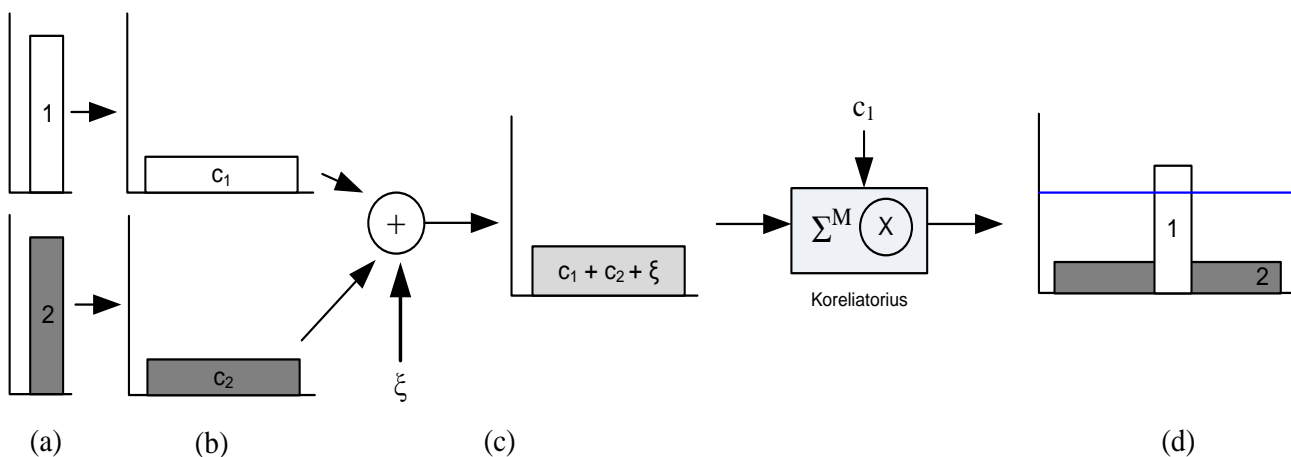
Bendru atveju informacijos surinkimo procesoriaus struktūrą (4 pav.) sudaro suderintas filtras (angl. *matched filter*), arba koreliatorius, kuris lygina gaunamą $s(t)$ su kiekviena žinoma seka, ir sugeneruoja didžiausią rezultatą, kai $s(t)$ su ta seka maksimaliai sutampa, o mažiausią – kai seka ir signalas priešingi. Koreliatoriaus rezultatą tikrina lygio matuoklis, kuris sugeneruoja vienetą prie maksimalaus rezultato, nulį prie minimalaus. Taip iš bendro $s(t)$ atkuriamas kiekvieno sensoriaus duomenų signalas $d(t)$.



4 pav. Principinė informacijos surinkimo procesoriaus schema

Realioje sistemoje koreliacija paprastai nepasiekia kraštutinių reikšmių, kadangi $s(t)$ paveikia triukšmas, taip iškraipydamas signale esančias sekas, be to susiliejusios sekos (3 pav.) iškraipo viena kitą – tai vadinama daugybinės prieigos interferencija (angl. *MAI – Multiple Access Inrterference*). Dėl to lygio matuoklis paprastai suderinamas mažesniems už ekstremumus dydžiams, parenkamiems analitiškai arba eksperimentų keliu. Taip pat gali būti naudojami sudėtingesni sprendimo komponentai, bandantys pašalinti triukšmo ir kitų sekų poveikį ieškomai sekai [11].

Galima sakyti, kad apdorodamas signalą $s(t)$ prie konkrečios sekos koreliatorius panaikina tos sekos skleidimo efektą, o kitas sekas dar labiau išskleidžia. Signalo išskleidimas ir „suskleidimas“ koreliatoriuje iliustruotas 5 pav.:



5 pav. Duomenų išskleidimo ir atkūrimo iliustracija.

Du sensoriai savo siunčiamus duomenis (a) išskleidžia (moduliuoja) skirtingomis skleidžiančiomis sekomis (b) ir išsiunčia į bendrą kanalą, kur jos susideda į vieną signalą, taip pat prisideda triukšmas (c). Koreliatorius, suderintas sekai c_i panaikina skleidimo efektą tik pirmojo sensoriaus signalui, o antrojo – dar labiau išskleidžia (d). 1-asis signalas laikomas aptiktu, kai viršija nustatytą lygį. Dedamoji 2 koreliatoriaus išėjime sudaro MAI. Taip pat matyti,

kad priimto signalo lygis dėl MAI ir triukšmo sumažėjęs.

1.3. Apdorojimo stiprinimas

Apdorojimo stiprinimas (angl. *Processing gain*) [12] yra vienas svarbiausių parametru CDMA sistemoje. Jis nusako duomenų bito dažnio santykį su skleidžiančios sekos dažniu:

$$G_p = \frac{f_d}{f_c}$$

Čia f_d – duomenų dažnis, f_c – sekos dažnis.

Iš čia galima pamatyti, kad diskretaus signalo atveju, G_p yra lygus vieną bitą koduojančios sekos ilgiui M . Praktiškai G_p nusako, kiek vienas bitas „sustiprinamas“ jį kuoduojant skleidžiančia seka. Idealiu atveju, koreliatoriaus išėjimas aptikus ieškomą seką – vieną bitą, turi būti G_p (arba M) lygyje. Iš čia kyla ir parametro pavadinimas. Priimamas kodas yra apdorojamas, o to apdorojimo rezultatas yra G_p kartų didesniame lygyje negu nekoduto bito (kurio apdorojimo rezultato lygis lygus vienetui). Jei seka iškraipoma triukšmo, arba kitų sekų, apdorojimo lygis mažėja. Sekos iškraipymas tiesiogiai priklauso nuo triukšmo kanale ir siuntėjų, naudojančių kitas sekas, skaičiaus.

Kuo labiau iškraipyta $s(t)$ esanti ieškoma seka, tuo mažiau ji išsiskirs iš MAI ir triukšmo koreliatoriaus išėjime (t.y., tuo prasčiau ji koreliuos su originalia seka surinkimo mazge). Galiausiai pasiekiamas toks lygis, kai po koreliacijos nebeįmanoma išskirti sekos iš triukšmo – nebeįmanoma atkurti duomenų. To galima išvengti didinant G_p (t.y., M), arba ieškant tokių sekų, kurios sunkiau paveikiamos triukšmo ir viena kitos.

Sekų ilgio didinimas paprastai nepageidautinas dėl dviejų pagrindinių priežasčių:

- Mažėjanti duomenų perdavimo sparta – padidinus sekos ilgį M , o sekos elementų perdavimo spartą palikus tokią pačią, realių duomenų perdavimo sparta sumažėja.
- Didėjanti skaičiavimų apimtis – koreliacijos skaičiavimo apimtis tiesiogiai proporcinga sekos ilgiui. Esant per didelėms skaičiavimų apimtims gali nepavykti patenkinti realaus laiko reikalavimų.

dėl šių priežasčių dažnai parankiau nedidinti G_p , o ieškoti geresnėmis savybėmis pasižyminčių skleidžiančių sekų.

1.4. Skleidžiančių sekų apžvalga

DS-CDMA pagrįstame tinkle naudojamos skleidžiančios sekos $C = (c_i, i = 1 \dots N)$, kur $c_i \in \{-1, 1\}$. Paprastai tokių sekų elementai vadinami angl. *chip*, taip siekiant juos atskirti nuo

duomenų bitų, bei laikomasi susitarimo, kad dvejetainiame signale $1 = +1$, $0 = -1$. Skleidžiančių sekų savybės turi kritinį vaidmenį, kadangi būtent jos naudojamos skirtingų sensorių duomenims atskirti. Dėl to sekų ortogonalumo (nepanašumo) savybės labiausiai veikia galimybę patikimai atkurti duomenis ir riboja maksimalų galimą sensorių skaičių sistemoje. Parinkus netinkamas sekas, informacijos surinkimas niekada neveiks patikimai.

1.4.1. Skleidžiančių sekų savybės

Prieš analizuojant galimus sekų pasirinkimus, reikia aptarti pagrindinius kriterijus vertinti tokias sekas. Kadangi svarbiausias duomenų išskyrimui yra sekų panašumas, joms vertinti naudojama koreliacija. Koreliacijos funkcija r_{ij} kiekybiškai įvertina dviejų diskrečių M ilgio sekų c_i ir c_j panašumą, arba tarpusavio priklausomybę.

$$r_{ij} = \sum_{n=1}^M c_i(n)c_j(n) \quad (1)$$

Dvejetainių sekų $c \in \{-1,1\}$ atveju r_{ij} įgauna maksimalią reikšmę, lygią M , jei sekos lygos, ir minimalią $-M$, jei sekos priešingos. Kitais atvejais koreliacijos reikšmė labai priklauso nuo sekų savybių ir nusako, kiek sekos yra panašios. Dažniausiai sekos vertinamos pagal du koreliacija paremtus kriterijus – autokoreliaciją, ir tarpusavio koreliaciją [12].

1.4.2. Skleidžiančių sekų autokoreliacija

Autokoreliacija – koreliacija tarp dviejų per p atskaitų perstumtų tos pačios sekos versijų.

$$r(p) = \sum_{n=1}^M c_i(n)c_i(n+p) \quad (2)$$

Jeigu $p = 0$, arba $p = M$ jei seka periodinė, gaunama (1) išraiška ir maksimali autokoreliacijos reikšmė. Prie kitų postūmių gaunamas rezultatas itin svarbus patikimam informacijos išskyrimui, kai sensoriai duomenis siunčia atsitiktiniais laiko momentais. Tokiu atveju informacijos surinkimo procesorius signalą turi analizuoti priėmęs kiekvieną naują sekos elementą, ir neišvengiamai turės koreliuoti ieškomą seką su jos paslinktu variantu. Jeigu koreliacijos rezultatas prie bet kokio kito nei nulinis postūmio bus pakankamai didelis, gali būti neteisingai aptiktas bitas duomenų signale. Todėl reikalingos sekos, turinčios kuo mažesnę autokoreliacijos reikšmę prie nenulinių postūmių.

1.4.3. Skleidžiančių sekų tarpusavio koreliacija

Tarpusavio koreliacija r_{ij} nuo autokoreliacijos skiriasi tuo, kad čia skaičiuojama koreliacija

tarp skirtingų sekų su postūmiais p .

$$r_{ij}(p) = \sum_{n=1}^M c_i(n)c_j(n+p) \quad (3)$$

Sistemoje naudojamų sekų tarpusavio koreliacija iš esmės lemia duomenų išskyrimo patikimumą ir didžiausią galim sensorių skaičių tinkle. Signale $s(t)$ susimaišiusios sekos duomenų išskyrimo metu viena kitai sudaro MAI, kurio dydis labiausiai priklauso nuo sekų tarpusavio koreliacijos dydžio.

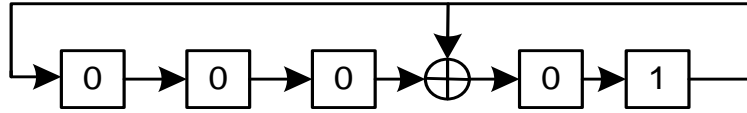
Patikimas signalo iš i -tojo sensoriaus išskyrimas galimas tik tada, jei MAI reikšmė po koreliacijos smarkiai mažesnė už ieškomo signalo reikšmę (4 pav.). Dėl to reikalingos tokios sekos, kurių tarpusavio koreliacija prie bet kokių postūmių yra kuo mažesnė.

1.4.4. Pageidautinomis savybėmis pasižyminčios sekos

Aukščiau aprašytomis koreliacinėmis savybėmis pasižymi ir CDMA sistemose paprastai naudojamos pseudoatsitiktinės (arba pseudotriukšmo) sekos (PN – angl. *Pseudo Noise*) [12], [13]. Kaip akivaizdu iš pavadinimo, tokios sekos panašios į triukšmą ir yra netolimos ortogonalios. Paprastai jos turi gerai žinomas koreliacijos reikšmes prie įvairių postūmių, todėl jas naudojant galima sukontroliuoti MAI.

1.4.4.1. M – sekos

M – sekos generuojamos pasitelkiant LFSR (angl. *Linear Feedback Register*) registrą su tam tikra grįžtamojo ryšio logika, kuris, nustatytas į bet kokią nenulinę reikšmę ir stumiamas, generuoja pseudoatsitiktinę $2^k - 1$ ilgo seką. Čia k – registro pozicijų skaičius. LFSR registro grįžtamąjį ryšį sudaro į tam tikras jo pozicijas per modulių 2 pridamas paskutinis išstumtas bitas. Konkrečios pozicijos paprastai nurodomos vadinamuoju primityviuoju polinomu, kurio laipsniai ir nurodo, į kurias pozicijas perduodamas grįžtamasis ryšys. Tuo pačiu polinomu aprašytas LFSR iš viso gali generuoti $2^k - 1$ sekų, kadangi tiek startinių nenulinių reikšmių galima įrašyti į registrą. Tačiau žinoma, kad to paties polinomo iš skirtingų startinių reikšmių generuojamos sekos yra tos pačios sekos, tik su skirtingais poslinkiais. Išsamus LFSR savybių ir primityviųjų polinomų sudarymo aprašymas pateiktas [13].



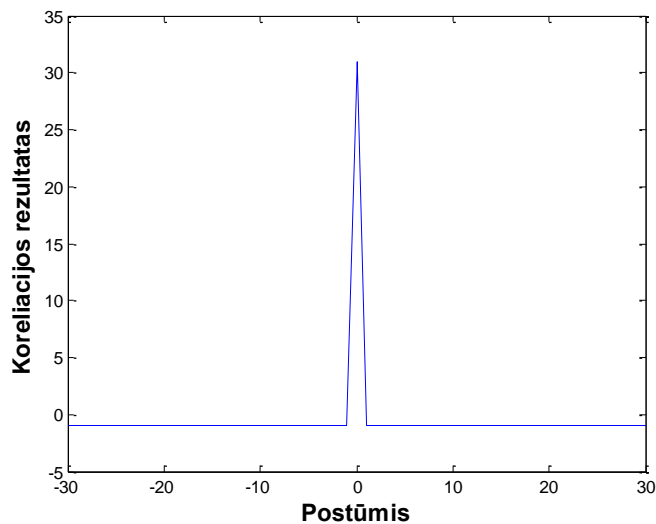
6 pav. LFSR konfigūracija m-sekos generavimui.

LFSR sudarymas iliustruotas 6 pav. Kadangi yra penkios pozicijos, $r = 5$, ir generuojamos sekos ilgis yra $2^5 - 1 = 31$. Registrą nusako primitivusis polinomas $x^5 + x^3 + 1$.

Visos m-sekos yra balansuotos – vienetų ir nulių skaičius sekoje skiriasi vienetu. Sekos pasižymi dviejų reikšmių autokoreliacinėmis savybėmis [13]:

$$r(p) = \begin{cases} N & p = kN \\ -1 & p \neq kN \end{cases} \quad (4)$$

Čia N – sekos ilgis, p – postūmis, k – sveikasis skaičius.



7 pav. m-sekos $x^5 + x^3 + 1$ autokoreliacijos reikšmės

M-sekų tarpusavio koreliacijos savybės gerokai mažiau ištyrinėtos, ir paprastai yra blogesnės negu autokoreliacijos savybės. Yra žinoma, jog iš kai kurių primitiviųjų polinomų generuojamos m-sekų poros turi daugiausiai trijų reikšmių tarpusavio koreliaciją. Tokios sekos (arba polinamai) vadinamos pageidaujamosiomis sekomis (polinomais).

Pageidaujamų m-sekų koreliaciją galima apibrėžti taip:

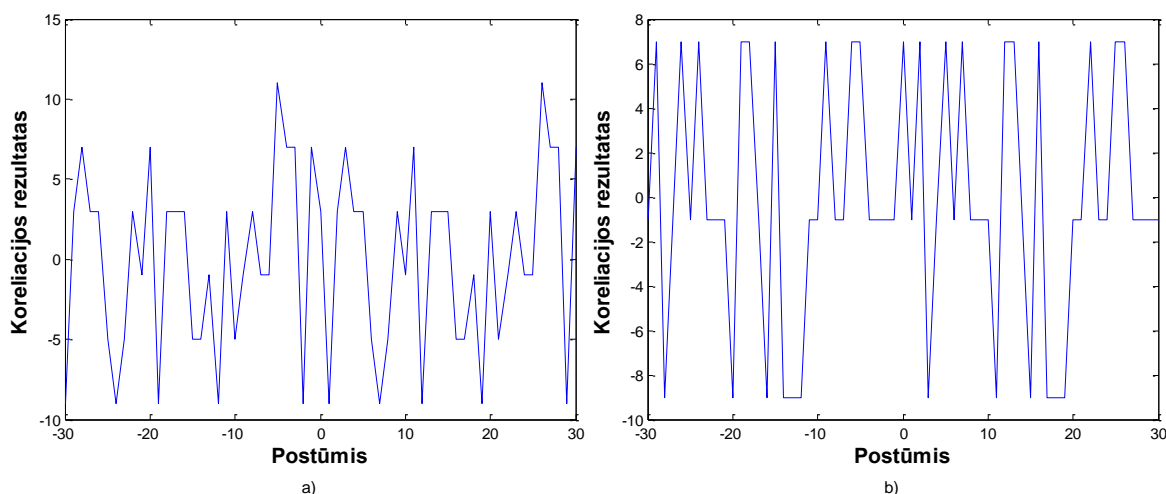
$$r(N) = 1 + 2^{|(k+2)/2|} \quad (5)$$

Čia N – sekų ilgis, o $r(N)$ įgauna vieną iš trijų reikšmių: -1 , $-r(N)$, $r(N) - 2$.

Deja, tokių sekų porų nėra daug, pvz., tarp 127 elementų ilgio sekų yra tik 6 sekos, kurios

tarpusavyje gali sudaryti pageidaujamas poras, tarp kitų ilgių tokių sekų yra dar mažiau [13]. Taigi to paties ilgio m-sekų su geromis tarpusavio koreliacinėmis savybėmis pasirinkimas yra ribotas.

Sinchronizuotose sistemose (t.y., tokiose, kur informacijos surinkimo procesorius žino visų siuntėjų duomenų išsiuntimo laikus ir visada gali sekas priimti be postūmių) siuntėjų atskyrimui gali būti naudojamos tos pačios sekos su skirtingais postūmiais, tačiau tai neįmanoma asinchroninėse sistemose, kur tenka koreliuoti ieškomą seką su jos paslinktu variantu.



8 pav. tarpusavio koreliacijos skirtumai tarp atsitiktinai parinktų ir pageidaujimų polinomų

8 pav. iliustruota tarpusavio koreliacija tarp atsitiktinai parinktų 31 ilgių m-sekų poros (a) ir tarp pageidaujimų sekų poros (b). Paprastų sekų poros tarpusavio koreliacijoje matyti keli palyginti aukšti pikai (tikėtina, kad su ilgesnėmis sekomis būtų gaunami dar didesni pikai, ir jų būtų daugiau), dėl ko jos paprastai nėra naudojamos DS-CDMA sistemose. Kita vertus, pageidaujimų m-sekų pora turi tik tris pagal (5) gaunama koreliacijos reikšmes, tačiau, kaip jau minėta, tokių m-sekų porų yra nedaug.

1.4.4.2. GOLD sekos

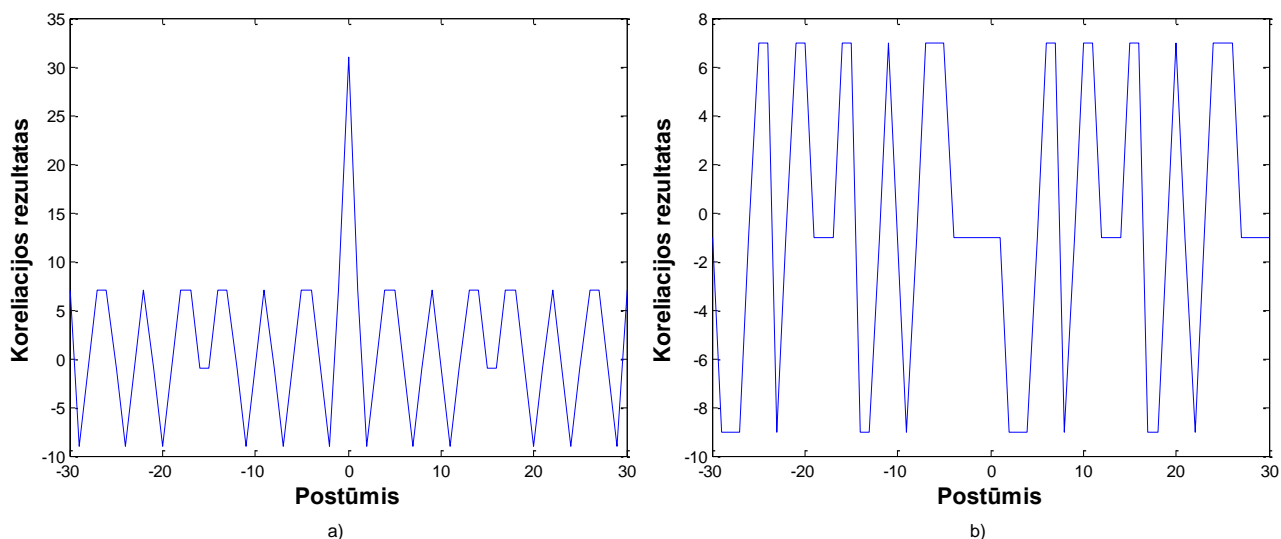
GOLD sekos pirmą kartą buvo sudarytos Robert Gold [14]. Šios sekos turi geresnes tarpusavio koreliacijos savybes negu m-sekos, tačiau blogesnes autokoreliacijos savybes. Kadangi tarpusavio koreliacijos savybės daugelyje sistemų yra svarbesnės ir lemia didžiausią galimą vartotojų skaičių sistemoje (šiam darbe – sensorių kiekį tinkle), jos naudojamos plačiau nei m-sekos.

GOLD sekos sudaromos iš dviejų to paties ilgio N pageidaujimų m-sekų, kurios sudedamos moduliu 2. Keičiant sudedamų sekų postūmius (arba generuojančių registrų pradines

reikšmes) iš viso galima gauti $2^N - 1$ naujų sekų [10]. Visų tokių sekų nenulinio postūmio autokoreliacija ir bet kokio postūmio tarpusavio koreliacija įgauna vieną iš trijų reikšmių, kaip ir pageidaujamų m-sekų tarpusavio koreliacija.

Lyginant su m-sekomis, GOLD sekos turi tokius trūkumus:

- Jos ne visada balansuotos (t.y., 1 ir -1 kiekis sekoje ne vienodas);
- Turi didesnes autokoreliacijos reikšmes.



9 pav. GOLD sekos auto ir tarpusavio koreliacijos reikšmės

9 pav. iliustruotos tokių sekų koreliacijos savybės – a) GOLD sekos, sudarytos iš $x^5 + x^3 + 1$ ir $x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$, su pradinėmis reikšmėmis $[0,0,0,0,1]$, $[0,0,0,0,1]$ autokoreliacija; b) Pirmosios sekos ir sekos iš tos pačios polinomų poros su pradinėmis reikšmėmis $[0,0,0,0,1]$, $[0,0,0,1,0]$ tarpusavio koreliacija.

1.4.4.3. Chaosu grindžiamos sekos

Dar viena galimybė sudaryti geromis koreliacinėmis savybėmis pasižyminčias sekas yra naudojant matematinius chaotinius generatorius. Chaotiniai generatoriai – tai dinaminės sistemos, aprašomos parametrizuotomis iteracinėmis lygtimis, kurių generuojami rezultatai yra labai jautrūs pradinėms reikšmėms. Mažiausi skirtumai pradinėse reikšmėse iššaukia labai skirtingus, neįmanomus iš anksto nuspėti rezultatus. Tačiau visi rezultatai iš tiesų yra deterministiniai ir gali būti pakartoti žinant pradines sąlygas. Toks sistemų veikimas vadinamas deterministiniu chaosu arba tiesiog chaosu [15].

Pastaruoju metu vis plačiau nagrinėjamos galimybės dvejetaines skleidžiančias sekas generuoti diskrečių sistemų chaoso generatoriais. Vienas pirmųjų, tai pasiūliusių buvo [16].

Diskrečiosios dinaminės sistemos nusakomos būsenos lygtimi

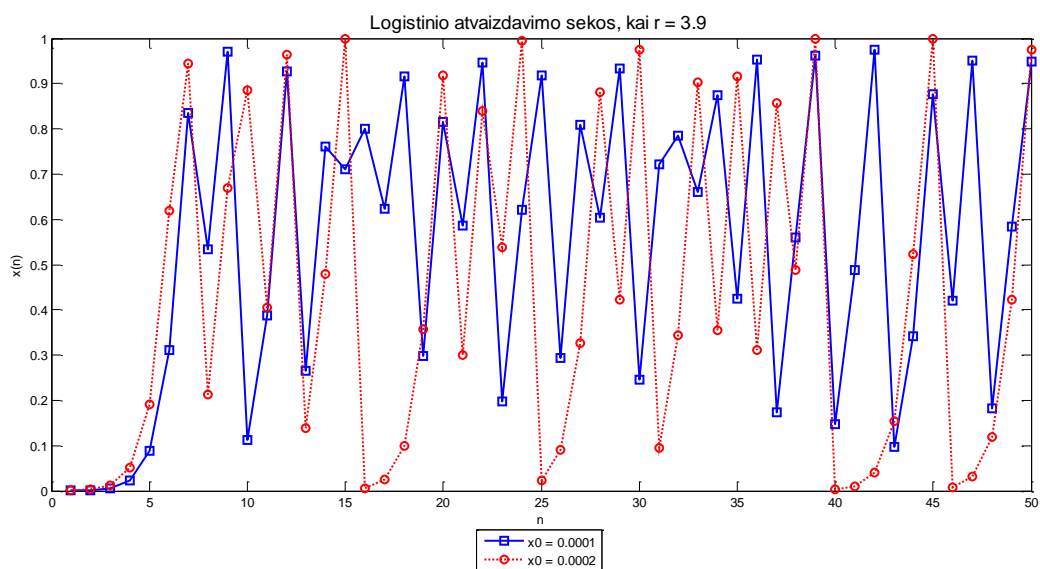
$$x_{k+1} = f(x_k), k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Čia x_k – būsena, o f atvaizduoja būsena x_k į sekančią būsena x_{k+1} . Pradedant nuo pradinės būsenos x_0 , pakartotinis atvaizdavimo f naudojimas sukuria seką $\{x_k : k = 0, 1, 2, \dots\}$. Kai kurios tokios sistemos pasižymi anksčiau minėta savybe – dideliu jautrumu pradinėms būsenoms – yra chaotinės.

Viena paprasčiausių ir geriausiai ištyrinėtų tokių sistemų yra logistinis atvaizdavimas, kurio panaudojimas skleidžiančios sekos generavimui ir nagrinėjamas [16]. Logistinis atvaizdavimas (arba generatorius) nusakomas būsenos lygtimi

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n) \quad (7)$$

čia $0 \leq x_m \leq 1, 0 \leq r \leq 4$, r vadinamas bifurkacijos parametru. Sistemos reikšmės labai priklauso nuo r . Kai $3,57 \leq r \leq 4$, generuojama seka yra neperiodinė ir nekonverguojanti. Įrodyta, kad su šiomis r reikšmėmis logistinis atvaizdavimas yra chaotinis intervale $[0, 1]$, ir yra labai jautrus pradinei reikšmei x_0 . Netgi pradėjus atvaizdavimą nuo labai mažai besiskiriančių pradinių reikšmių, po kelių iteracijų gautos sekos bus visiškai nekoreliuotos. Tai iliustruota 10 pav:



10 pav. Logistinis atvaizdavimas pradedant nuo labai artimų pradinių reikšmių

Teoriškai joks chaotinės sekos taškas negali pasikartoti, kadangi, jei bent vienas taškas sekoje pasikartotų, seka taptų periodine. Praktiškai, dėl riboto pradinių reikšmių tikslumo bet kioje realioje sistemoje, seka anksčiau ar vėliau ims kartotis. Kuo didesnis sistemos tikslumas,

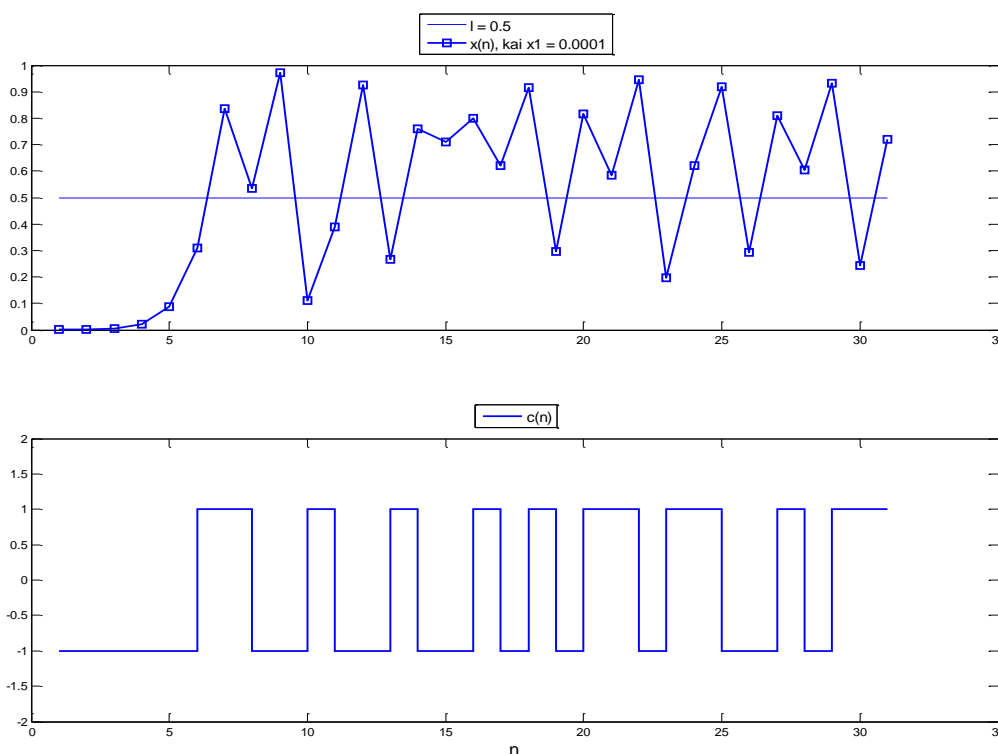
tuo ilgesnė chaotinio atvaizdavimo generuojama neperiodinė seka. Skleidimo sekas generavimui tai neturi įtakos, kadangi net ir sąlyginai mažo tikslumo pradinės reikšmės užtikrina gerokai ilgesnes neperiodines sekas, negu reikalinga DS-CDMA sistemoje.

Kadangi DS-CDMA sistemoje reikalinga dvejetainė seka, įgaunanti reikšmes $\{-1,1\}$, o chaotinis logistinis atvaizdavimas (taip pat ir kitokie chaotiniai atvaizdavimai) generuoja sekas, kurių reikšmės nėra dvejetainės. Todėl reikalingas metodas chaotinę seką paversti į dvejetainę. Paprastai naudojamas kvantavimas [17], kai chaotinės sekos reikšmės, viršijančios nustatytą lygį, laikomos 1, o mažesnės -1. Turint chaotinę seką $x(n)$, dvejetainė seka $c(n)$ sudaroma:

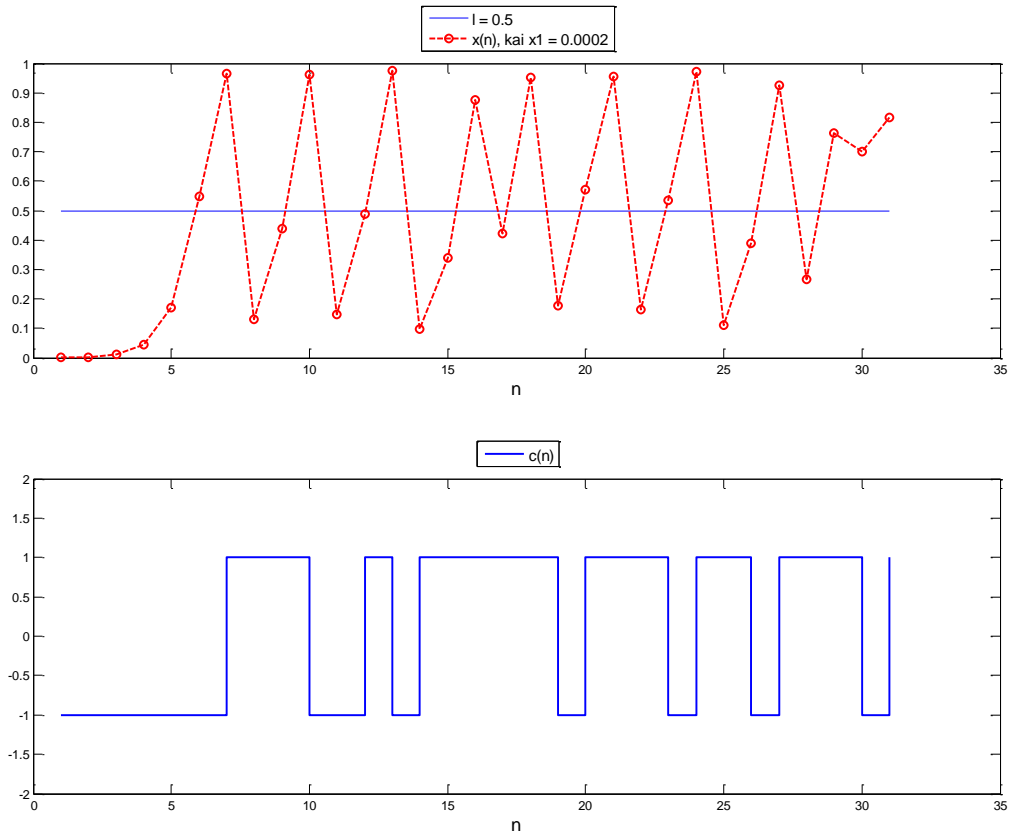
$$c(n) = \begin{cases} 1, & \text{kai } |x(n)| > l \\ -1, & \text{kai } |x(n)| \leq l \end{cases} \quad l \geq 0 \quad (8)$$

čia l – pasirinktas kvantavimo lygis. Siekiant dar geresnių chaotinių dvejetainės sekos savybių, galima naudoti kelių lygių kvantavimą. Be to, M ilgio seką galima išrinkti iš gerokai ilgesnės pradinės sekos intervalo $[x_n; x_n + M]$, taip gaunant dar vieną keičiamą parametą x_n .

Dviejų sekų sudarymas iš logistinio atvaizdavimo, kai naudojamas vienas kvantavimo lygis $l = 0,5$ ir intervalas parenkamas nuo pirmojo elemento, iliustruotas 11 ir 12 pav.:

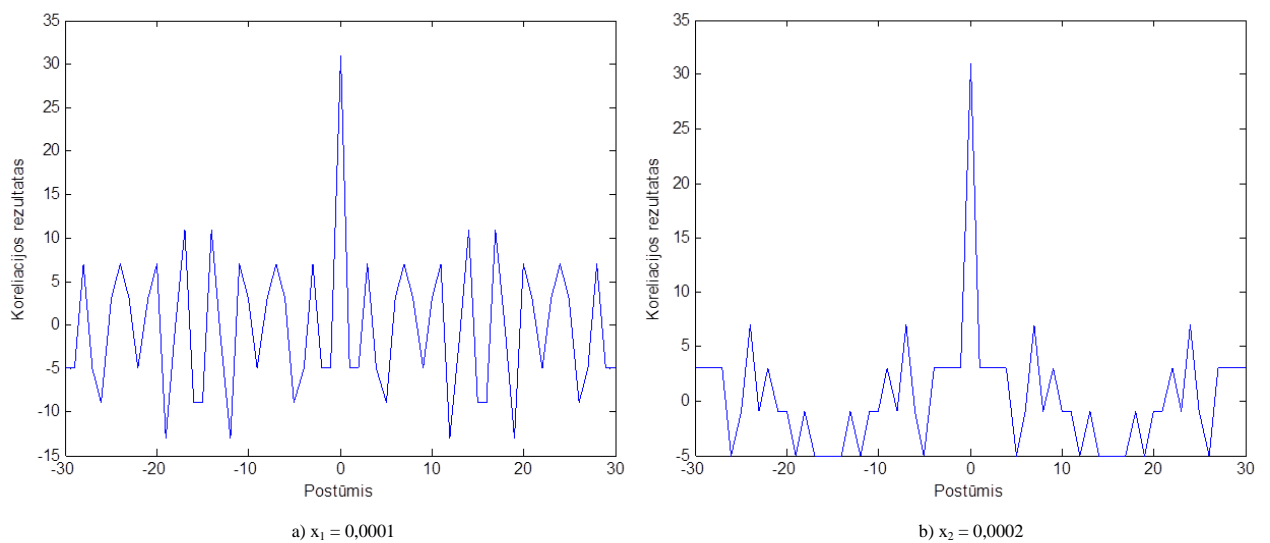


11 pav. Dvejetainės skleidžiančios 31 elemento sekos sudarymas iš logistinio atvaizdavimo, kai $r = 3,9$; $x_1 = 0,0001$.



12 pav. Dvejetainės skleidžiančios 31 elemento sekos sudarymas iš logistinio atvaizdavimo, kai $r = 3,9$; $x_1 = 0,0002$.

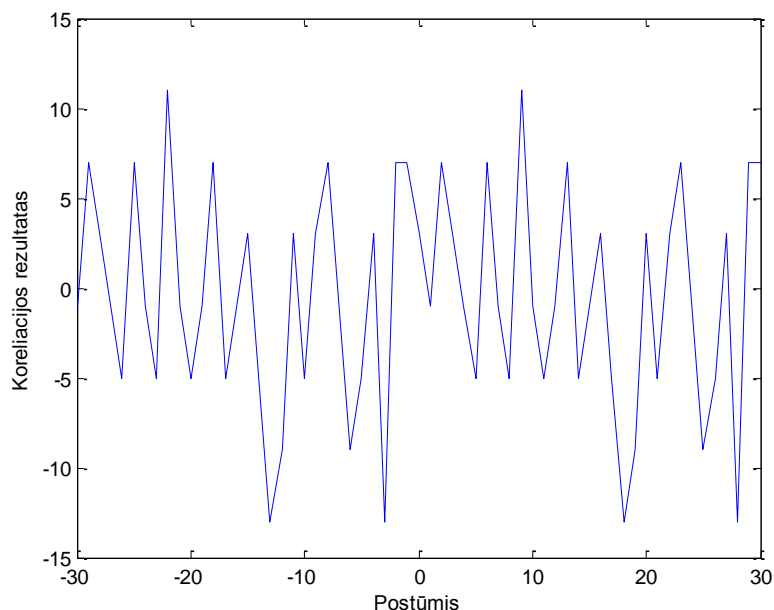
Tokiu principu sudarytų sekų koreliacinės savybės negali būti nustatomos analitiškai dėl chaotinio atvaizdavimo nenuspėjamumo. Aukščiau sudarytų sekų autokoreliacijos reikšmės pateiktos 13 pav.:



13 pav. Sudarytų chaotinių sekų autokoreliacijos reikšmės

Nors pirmosios sekos autokoreliacijos savybės gana prastos, antroji savo savybėmis nenusileidžia GOLD sekoms (9 pav.). Tikėtina, kad tokių sekų yra pakankamai, jog jas būtų galima naudoti DS-CDMA sistemoje.

Chaotinių sekų tarpusavio koreliacijos savybės taip pat gali būti įvairios. Aukščiau pateiktų sekų tarpusavio koreliacija įgyja sąlyginai dideles reikšmes, lyginant su tokio paties ilgio GOLD sekomis. Tačiau parinkus kitokius pradinius parametrus įmanoma rasti ir geresnes (t.y., mažesnes) tarpusavio koreliacijos reikšmes turinčias sekas.



14 pav. Sudarytų chaotinių sekų tarpusavio koreliacijos reikšmės

Nežinomos ir analitiškai nenustatomos chaotinių sekų savybės apsunkina jų panaudojimą DS-CDMA sistemose, kadangi sekų su geromis (geresnėmis nei žinomų PN sekų, kad būtų verta jas apskritai naudoti) koreliacijos savybėmis paieška gali trukti itin ilgai ir neduoti norimų rezultatų.

1.5. Galima informacijos surinkimo procesoriaus realizacija aparatinėje įrangoje

Nors informacijos surinkimo procesoriui, skirtingai nei duomenis jam siunčiantiems sensoriams, nėra keliami griežti energijos suvartojimo ir autonomiškumo reikalavimai, pageidautina, kad procesorius taip pat būtų nedidelis ir portabilus, tam, kad jį būtų galima naudoti su vartotojo nešiojamais įrenginiais (pvz., planšetiniu kompiuteriu, kuris veikia kaip nešiojamas terminalas). Tačiau, realizacija turi užtikrinti pakankamus skaičiavimo pajėgumus.

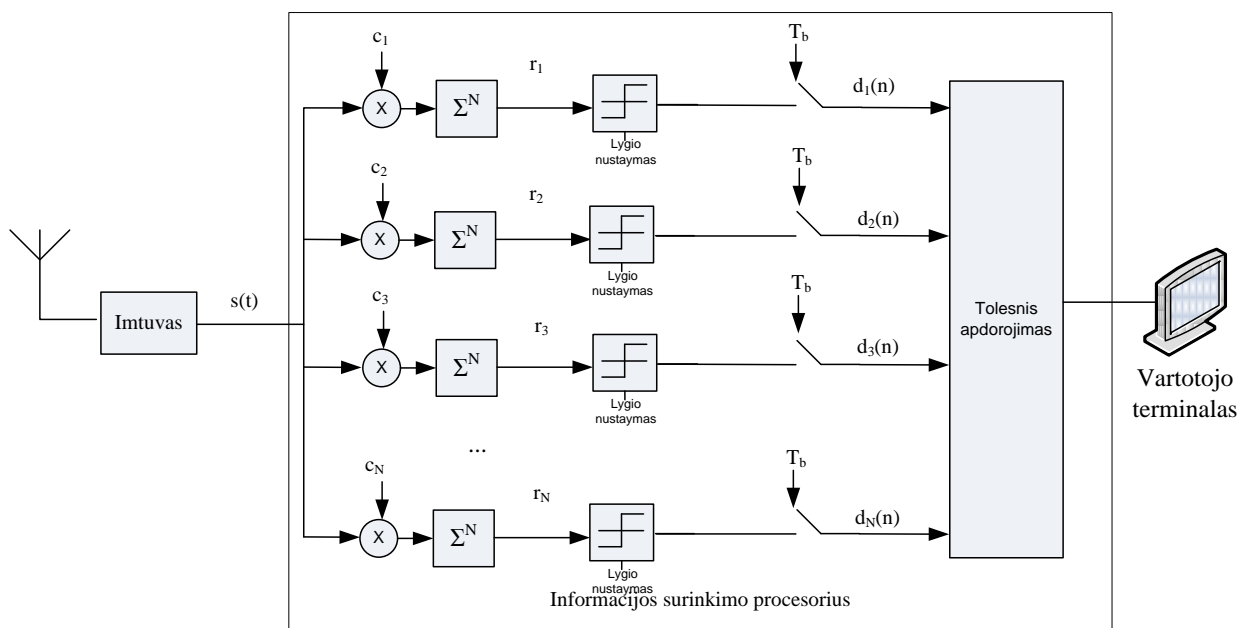
Bendru atveju, bet kokios funkcijos realizaciją aparatinėje įrangoje galima išskirti į keturias rūšis:

- ASIC lustas;
- FPGA matrica;
- Programuojamas mikrovaldiklis;
- Keleto iš aukščiau paminėtų variantų bendras panaudojimas;

1.5.1. ASIC lustas

ASIC – (angl. *application-specific integrated circuit*) – tai konkrečiam taikymui skirtas lustas, kurio atliekama funkcija suprojektuojama ir „įkeliama“ į lustą fizinių loginių grandynų sujungimų pavidalu lusto gamybos metu. Suteikia didžiausią įmanomą spartą ir lygiagretaus vykdymo galimybes.

Galimas skaičiavimų lygiagretumas yra itin pageidaujamas apdorojant gautą signalą, su kuriuo reikia skaičiuoti koreliaciją kiekvienam žinomam siuntėjui. 4 pav. pavaizduotą principinę informacijos surinkimo schemą galima išplėsti į N koreliatorių, iš kurių kiekvienas skaičiuoja gauto signalo koreliaciją su viena iš N sekų:



15 pav. **Signalų apdorojimas informacijos surinkimo procesoriuje, kai sistemoje N siuntėjų**

Būtent ASIC luste paprasta bent iš dalies realizuoti tokius lygiagrečius skaičiavimus. Kita vertus, tai mažiausiai lankstus variantas, kadangi pagaminto lusto funkcijos niekaip nebegalima keisti. Be to, tai ir brangiausias bei ilgiausiai projektuojamas pasirinkimas, todėl retai naudojamas prototipų gamybai, kai eksperimentuojama norint įsitikinti pasirinkto metodo teisingu veikimu ir funkcinė metodų realizacija gali dažnai keistis.

1.5.2. FPGA matricos

Prototipams kurti geresnis pasirinkimas yra FPGA (angl. *field programmable gate array*) matricos, kurios gali būti programuojamos norimai funkcijai. Programavimo metu FPGA sudarančios loginės ląstelės sujungiamos programuojamais jungikliais taip įgyvendinant norimą loginę funkciją. Paprastai FPGA naudojami būtent kaip ruošiamo ASIC lusto prototipas, kuris pakankamai gerai atspindi būsimo lusto funkcionalumą. Taip pat dažnai FPGA lustai naudojami ir galutiniams vartotojams skirtuose įrenginiuose, kadangi yra pigesni paprasčiau bei greičiau pritaikomi norimai funkcijai.

Kaip ir ASIC luste, FPGA matricoje galima įgyvendinti lygiagrečius skaičiavimus, ir lengviau patenkinti realaus laiko reikalavimus signalo apdorojimui. Dėl savo universalumo ir spartos FPGA matricos dažniau nei kiti variantai naudojamos atliekant tyrimus ir kuriant prototipus DS-CDMA taikymuose [18–21].

Pagrindinis FPGA, kaip prototipo platformos trūkumas yra pradinė kaina. Prototipinės plokštės, suteikiančios galimybę programuoti ir testuoti FPGA lustus yra pakankamai brangios, be to, patys lustai paprastai yra brangesni, nei panašių galimybių mikrovaldikliai.

1.5.3. Mikrovaldiklis

Mikrovaldiklius paprastai sudaro tame pačiame luste esantys santykinai paprastas procesoriaus branduolys, programuojama atmintis ir įvairi periferinė įranga (tokia kaip analoginiai-skaitmeniniai keitikliai, įvairios bendravimo sąsajos). Labai dažnai naudojami įvairiose įterptinėse sistemose, kur reikalinga pigi, tačiau lanksti sistema.

Skirtingai nei anksčiau nagrinėti lustai, mikrovaldikliai programos gali vykdyti tik nuosekliai, taigi tokia funkcija kaip koreliacija turi būti atliekama nuosekliai apdorojant gaunamą signalą su kiekviena turima seka, taigi informacijos surinkimo algoritmas, įgyvendintas mikrovaldiklyje negalės pasižymėti didele sparta.

Pagrindinis mikrovaldiklių privalumas – didelis lankstumas. Dauguma mikrovaldiklių programuojami C kalba ar jos poaibiais, taigi galima paprastai ir greitai įgyvendinti bet kokią funkciją, kuri neviršija mikrovaldiklio skaičiavimo pajėgumų.

Šiuo metu daugelis gamintojų siūlo pigių mikrovaldiklių šeimas, kurių instrukcijų rinkiniai papildyti DSP (angl. *digital signal processing* – skaitmeninis signalų apdorojimas), instrukcijomis, tokiomis kaip MAC (angl. *multiply and accumulate* – kaupiančios sandaugos instrukcija), kuri leidžia itin spartų koreliacijos skaičiavimą. Nors sparta jie nepralenkia ASIC ar FPGA, taikymuose, kur itin didelė sparta nebūtina, o reikalingas lankstumas, tokie mikrovaldikliai yra patraukliausias pasirinkimas.

1.6. Išvados

- Šio skyriaus pirmojoje dalyje buvo aptartas darbo kontekstas ir pagrįstas paprasto, bet patikimo duomenų surinkimo metodo reikalingumas. Bendradarbiaujant su [1] autoriumi, nuspręsta, kad patraukliausias reikiamas savybes turintis toks metodas yra DS-CDMA;
- Tolesnėje dalyje išnagrinėti pagrindiniai DS-CDMA teoriniai aspektai. Nustatyta, kad kritinis parametras DS-CDMA sistemos veikimo patikimumui yra duomenų moduliaviui naudojamų sekų koreliacinės savybės;
- Įsitikinta, kad iš nagrinėtų sekų geriausiomis savybėmis pasižymi ir populiariausios DS-CDMA taikyme yra GOLD sekos;
- Aptartos galimybės realizuoti informacijos surinkimo procesorių aparatinėje įrangoje. Nors ASIC ar FPGA lustai suteiktų didesnę spartą signalo apdorojimui, jie yra per brangūs pradinio prototipo kūrimui;
- Patrauklus ir nebrangus variantas kuriamam informacijos surinkimo procesoriui yra DSP instrukcijomis papildytas mikrovaldiklis, kurio architektūra leidžia optimalų koreliacijos funkcijos skaičiavimą.

2. REALAUS LAIKO INFORMACIJOS SURINKIMO IŠ DAUGELIO ŠALTINIŲ MODELIS

Norint sudaryti patikimą duomenų surinkimo metodą, pirmiausia sudarytas DS-CDMA pagrįstas duomenų surinkimo modelis bei nustatytas jo tinkamumas realizacijai aparatinėje įrangoje.

Modeliavimui panaudotas programinės įrangos paketas MATLAB. Tai galinga programinė aplinka ypač tinkanti signalų analizei ir modeliavimo uždavinių sprendimui. Modeliavimui daugiausia naudota MATLAB paketo Simulink posistemė – interaktyvus grafinis įrankis dinaminių sistemų modeliavimui. Simulink siūlo įvairiems specializuotiems taikymams (pvz., signalų aporojimo radijo ryšio) skirtus blokus, kurie palengvina ir automatizuoja modelių sudarymą.

2.1. Bendro signalo $s(t)$ sudarymas

1 pav. pavaizduotą signalą $s(t)$ galima pažymėti

$$s(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t - \tau_i) + \xi(t) \quad (9)$$

čia:

N – tinkle veikiančių siuntėjų kiekis;

$x_i(t - \tau_i)$ - i -tojo siuntėjo signalas, su τ_i vėlinimu;

$\xi(t)$ - triukšmo kanale dedamoji.

Kadangi čia nagrinėjamas diskretinis dvejetainis iš imtuvo gautas signalas, galima jį perrašyti tokia išraiška:

$$s(n) = \sum_{i=1}^N x_i(n - p_i) + \xi(n) \quad (10)$$

tada p_i žymi i -tajam siuntėjui priskirto kodo poslinkį procesoriuje turimo atitinkamo kodo atžvilgiu. Kiekvieno siuntėjo signalą savo ruožtu galima išreikšti duomenų ir skleidžiančio kodo elementų sandauga, kur vienas duomenų bitas sudauginamas su kiekvienu kodo elementu:

$$x_i(n) = d_i(Mn)c_i(n) \quad (11)$$

čia:

M – skleidžiančio kodo ilgis (periodas);

$d_i \in \{0,1\}$ – duomenų signalas;

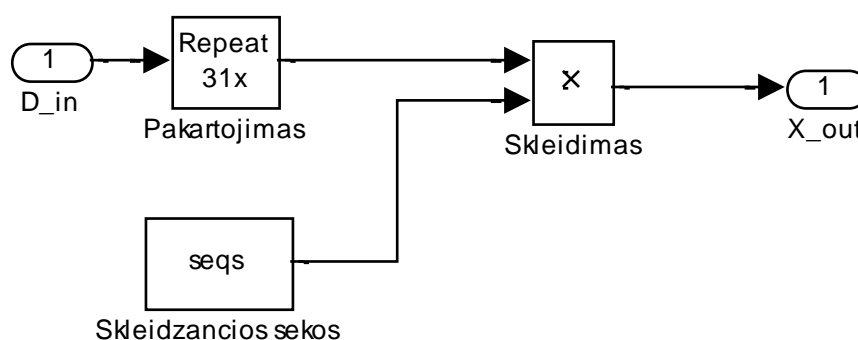
$c_i \in \{0,1\}$ – skleidžianti seka.

Čia būtina pažymėti, kad nagrinėjant bet kokias DS-CDMA sistemas paprastai laikoma, kad dvejetainis signalas yra polinis, t.y., sudarytas iš $\{-1,1\}$. Toks žymėjimas teisingas, jeigu signalo moduliacijai radijo ryšiu naudojama BPSK (angl. *binary phase shift keying* – fazinė moduliacija), kurios elgseną kanale matematiškai galima modeliuoti būtent su $\{-1,1\}$ – kadangi duomenų signalo nulis ir vienetas moduluojami priešingos fazės nešančiąja banga. Taigi bendrame kanale įvykus duomenų nulio ir vieneto kolizijai, jie vienas kitą panaikina.

Tačiau, šiame darbe nagrinėjamoje sistemoje duomenų signalas koduojamas $\{0,1\}$, t.y., naudojama OOK moduliacija (angl. *On-Off Keying*, Įjungta-išjungta moduliacija). Ši moduliacijos schema naudojama siekiant energijos taupymo sensoriaus (duomenų siuntėja) pusėje [1]. Energijos taupymas, lyginant su BPSK čia pasiekiamas, kadangi, esant 0 (tiek duomenų signalo, tiek skleidžiančios sekos), OOK siųstuvas nieko nesiunčia, kai BPSK siųstuvus išsiunčia tiek 0, tiek 1;

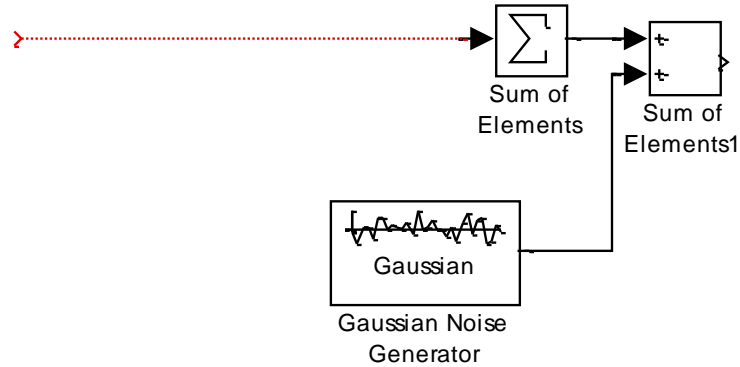
Ši moduliacija retai naudojama DS-CDMA sistemose, kadangi pakeitus GOLD sekų (ar kitų pseudo atsitiktinių sekų) įprastinius $\{-1,1\}$ į $\{0,1\}$, jų savybės suprastėja. Sekas vis dar galima naudoti, bet duomenų išskyrimo patikimumas sumažėja. Nors OOK moduliacija naudojama retai, dokumentuotų tokio naudojimo pavyzdžių yra [2].

Simulink modelyje pagal (11) sudaromas vieno siųstuvo signalas sudaromas panaudojus tokius blokus. Duomenų signalas d ir sekos paduodamos iš pagrindinės Matlab aplinko :



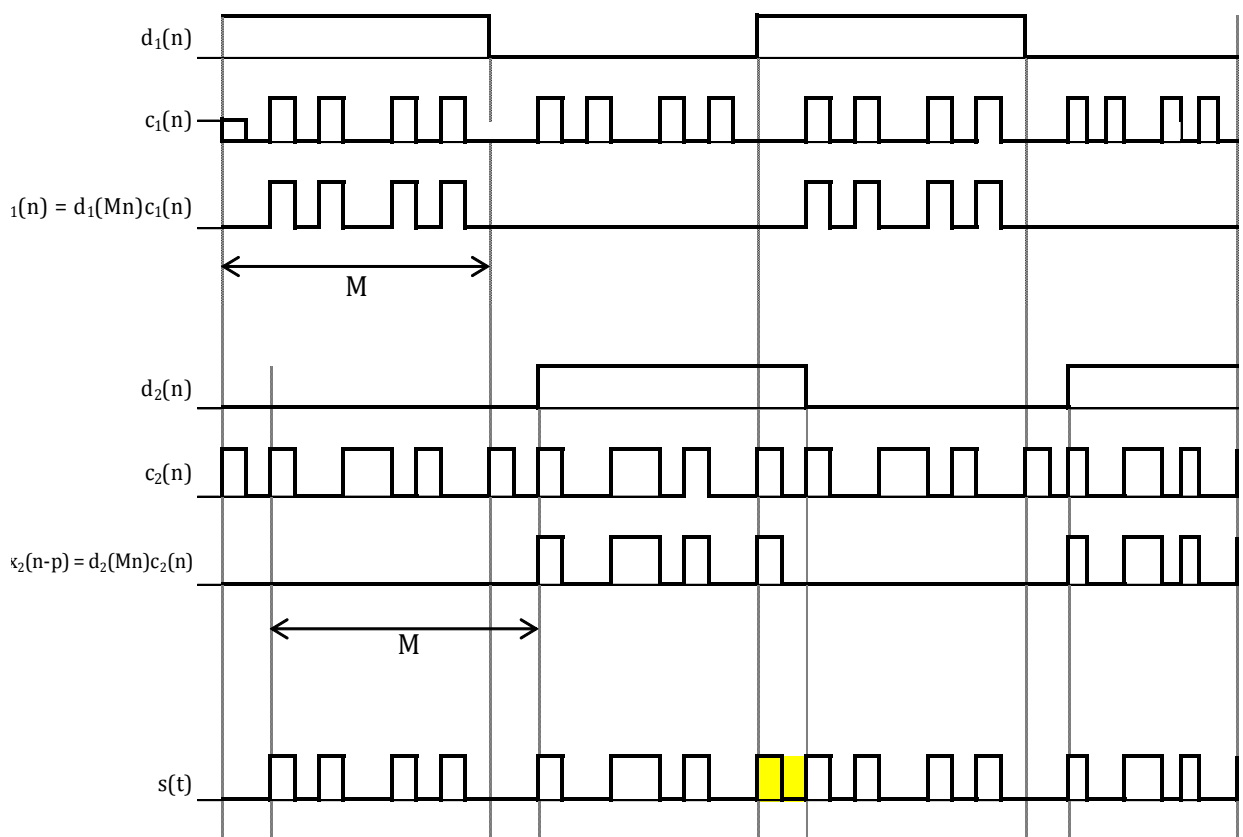
16 pav. Siųstuvo DS-CDMA sistemoje modelis

Ryšio kanalas modeliuojamas ne atliekant loginį ARBA, o sudedant signalus ir pridėdant triukšmo dedamąją. Toks modelis pasirinktas siekiant tiksliau modeliuoti kanalo triukšmą ir radijo imtuvo modelį (kuriame ir atliekamas signalo amplitudės ribojimas), kuris aptariamas tolesniame poskyryje.



17 pav. Ryšio kanalo modelis

Dviejų signalų susilieėjimas kanale iliustruotas 17 pav. (ilustracija nevaizduoja triukšmo):



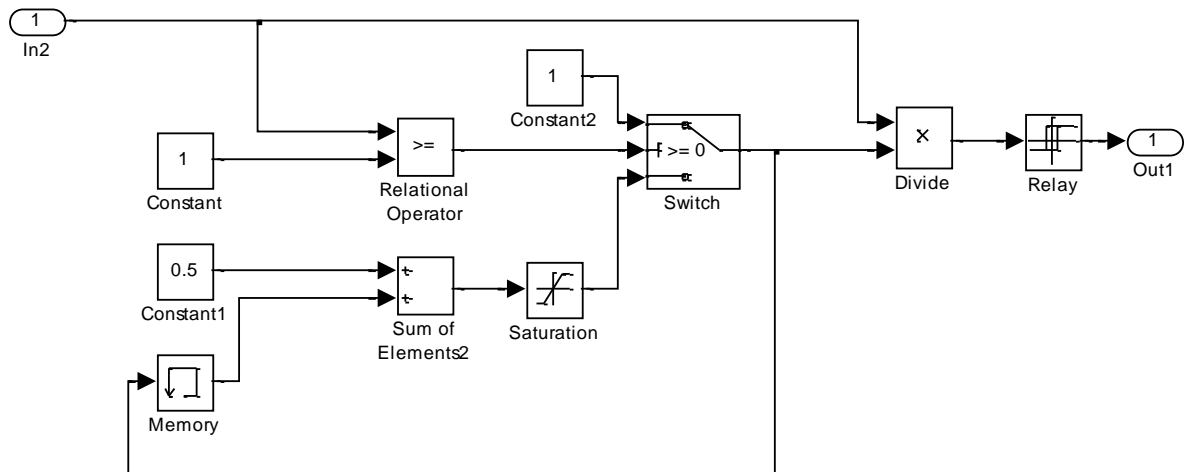
18 pav. Bendro signalo susidarymas, kai duomenis išsiunčia du sensoriai

Paryškintame $s(t)$ segmente susilieėja dalis abiejų signalų vienetų. Matyti, kad dalis 1-ojo signalo sekos yra paveikta antrojo signalo seka, tačiau jis vis tiek gali būti aptinkamas ir paverčiamas į duomenų signalą $d_i(n)$. Tokio modelio teisingumu buvo įsitikinta aparatiškai

realizavus procesorių ir ištyrus sinchroniškai iš dviejų siųstuvų išsiųstą ir priimtą žinomą signalą.

2.2. Radijo imtuvo modelis

Sudarant informacijos surinkimo procesoriaus aparatinę realizaciją, kaip radijo signalo imtuvas buvo pasirinktas paprastas RX433n modulis. Bendru atveju jo modelio būtų galima ir nesudaryti, tačiau siekiant tikslesnių modeliavimo rezultatų, buvo nuspręsta modeliuoti imtuvo atliekamą signalo stiprinimo kontrolę (AGC – angl. *automatic gain control*).

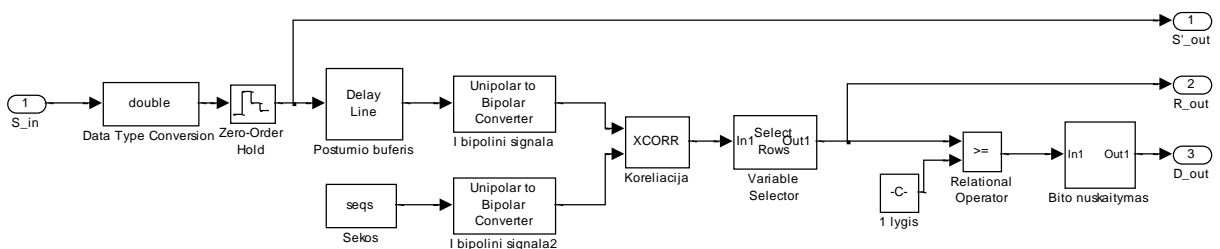


19 pav. Radijo imtuvo stiprinimo kontrolės modelis

AGC svarbus norint tiksliau sumodeliuoti kanalo triukšmą. Stiprinimo kontrolė imtuve pasireiškia tuo, kad, gaunant stiprų signalą, jo stiprinimas mažinamas, o neaptinkant stipraus signalo, stiprinimas palaipsniui didinamas. Tai reiškia, kad aptikęs stiprų signalą iš siųstuvo, imtuvas nereaguos į triukšmą (nebent triukšmas yra didesnės ar panašios galios kaip ir siųstuvo signalas), o ilgesnį laiką nesant stipraus signalo, ims gaudyti triukšmą iš kanalo.

2.3. Informacijos surinkimo procesoriaus modelis

Galiausiai sudaromas informacijos surinkimo procesoriaus modelis, kurio algoritmas bus įgyvendinamas aparatinėje įrangoje.



20 pav. Informacijos surinkimo procesoriaus modelis

Anksčiau minėta pakitusios koreliacijos savybių problema sprendžiama paprasčiausiai pakeičiant priimtus $\{0,1\}$ į $\{-1,1\}$, o informacijos surinkimo procesoriuje saugomas sekas koduoti įprastiniu būdu.

Kaip matyti iš 20 pav., struktūriškai modelis nėra sudėtingas, jam sudaryti pakanka 11 blokų. Iš siųstuvo gaunamas signalas diskretizuojamas *chip* dažniu, ir įrašomas į postūmio buferį. Su buferio reikšme ir kiekviena turima seka kiekvieno takto metu skaičiuojama koreliacija ir lyginama su nustatytu vieneto lygiu. Kadangi į buferį įstumiami vis nauji signalo elementai, nuolatos atliekamas koreliacijos skaičiavimas pagal (3) apibrėžimą. Jei koreliacija viršija nustatytą lygį, palyginimo blokas suformuoja vieneta, kuris išsaugomas bito diskretizavimo bloke. Šis blokas nuolatos tikrina lygio matuoklio reikšmę, ir jei ji aukšta (t.y., vienetas) išsaugo ją ir perduoda į duomenų išėjimo jungtį iki kito bito periodo pradžios, kada išėjimo reikšmę nustato į nulį ir vėl tikrina lygio matuoklio reikšmę.

Nors modelis gana paprastas, jo realizacija aparatinėje įrangoje gali kelti problemų, kadangi koreliaciją reikia skaičiuoti kiekvieno sekos elemento periodo metu, vadinasi, reikia spėti suskaičiuoti poslinkio registro koreliaciją su kiekviena turima seka. Naudojant N ilgio seką, ir apdorojant K sekų, reikės atlikti:

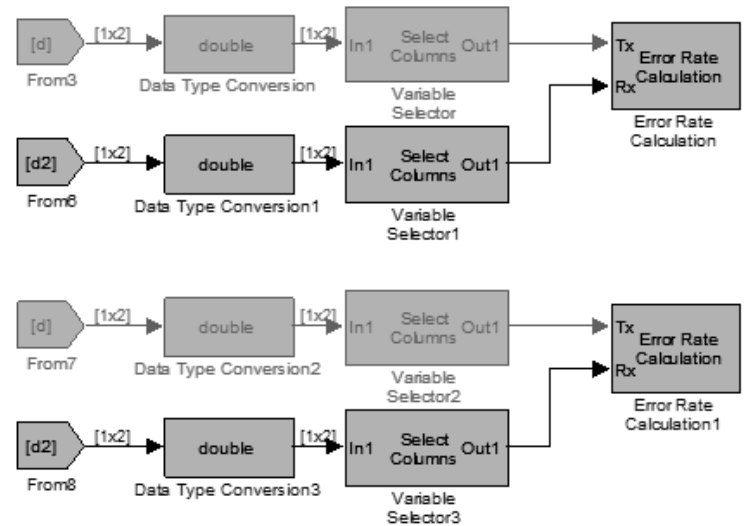
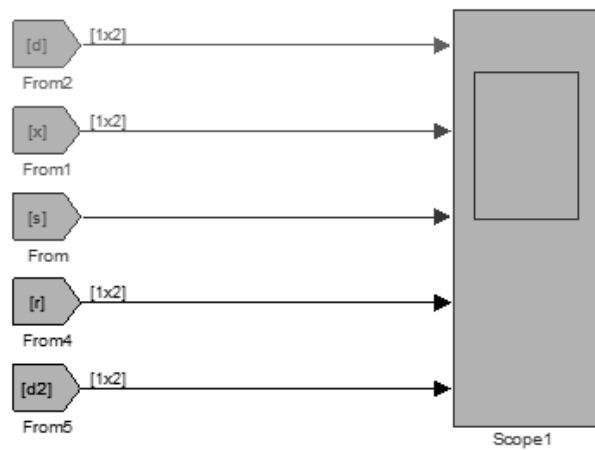
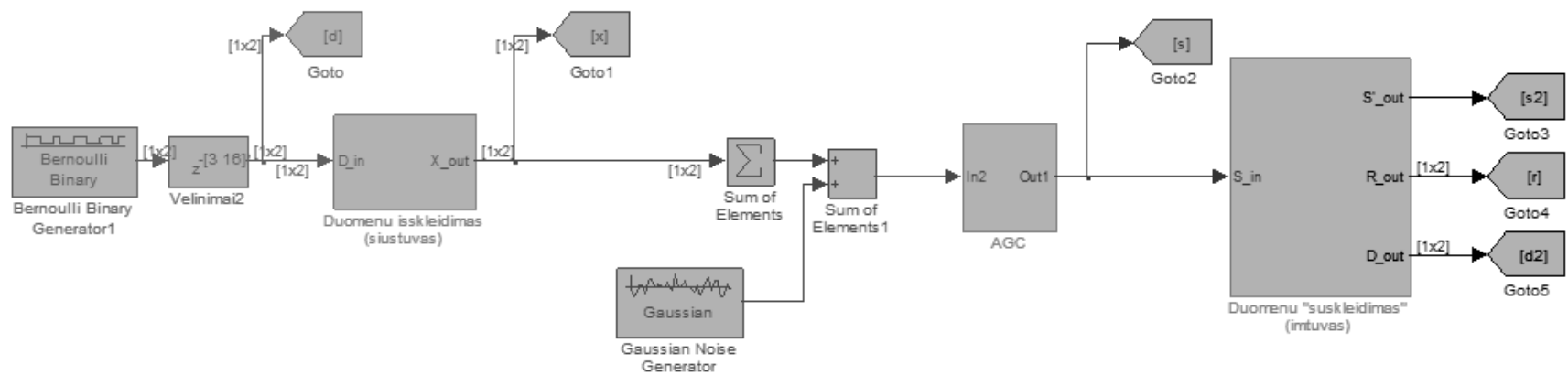
$$K * N^2 \quad (12)$$

Daugybės ir sudėties operacijų. Būtent čia itin naudingomis taps DSP mikrovaldiklių papildomos instrukcijos, tokios kaip MAC (paprastai ši instrukcija vieno vykdymo metu gali sudauginti operandus, pridėti juos prie akumulatoriaus, ir nuskaityti operandus kitam instrukcijos vykdymui, taigi vietoje (12) operacijų tereikia atlikti N).

2.4. Bendros modeliavimo aplinkos sudarymas

Visi sudaryti blokai sujungiami į pagrindinę modeliavimo aplinką (21 pav.). Skleidžiančios sekos ir kiti parametrai, reikalingi modeliavimui, sugeneruojami pagrindinėje Matlab aplinkoje paleidžiamu kodu. (Pagrindinis kodas ir jo naudojamos funkcijos pateikiamos prieduose).

Modeliavimo aplinka buvo naudojama optimalioms vieneto lygio reikšmėms nustatyti, bei patikrinti sudaryto algoritmo teisingumui, prieš įgyvendinant jį aparatinėje įrangoje.



21 pav. Informacijos surinkimo DS-CDMA tinkle modeliavimo aplinka, kai sistemoje du siuntėjai

2.5. Modeliavimo rezultatai ir galutinio metodo sudarymas

Atlikus duomenų surinkimo modeliavimą, kai vartotojų skaičius $K = 2$, o kaip duomenys paduodamas atsitiktinis bitų srautas iš 1000 bitų, gauti BER (angl. *bit error rate* - bitų klaidų santykis) rezultatai parodė, kad duomenų išskyrimas laisvai maišantis duomenų signalams nėra itin patikimas:

1 lentelė. BER priklausomybė nuo GOLD sekos ilgio, kai $K=2$

GOLD sekos ilgis	Vidutinis BER
31	0,27
63	0,22
127	0,26
255	0,23

Įdomu, kad BER mažai priklauso nuo sekos ilgio. Daroma išvada, kad tokius rezultatus lemia pasirinkta OOK moduliacija, kadangi naudojamos sekos prie tokios moduliacijos nėra efektyvios – įvykus duomenų kolizijai, signalai per smarkiai paveikia vienas kitą, kad būtų galima iš jų patikimai išskirti duomenis. Be to literatūroje, kur paprastai nagrinėjama CDMA esant BPSK moduliacijai, pateikiami žymiai geresni BER įvertinimai.

Kadangi moduliacijos schemą norima palikti nepakeistą reikia ieškoti metodo pagerinti duomenų priėmimo rodiklius. Pavyzdžiui, [2] siūloma vengti signalo kolizijų retinant duomenų signalo vienetus – duomenų simboliams koduoti naudojamos ilgesnės, negu būtina bitų sekos.

Šiame darbe išbandomas kitoks metodas, kurio esmę sudaro dvi dalys:

- naudojamas duomenų pertekliškumas – tas pats duomenų paketas siunčiamas keletą kartų R ;
- duomenų kolizijų stengiami išvengti į siuntimą įnešant atsitiktinumo – prieš kiekvieno paketo siuntimą palaukiama tam tikrą atsitiktinį laiko tarp, kuris lygus vieno paketo siuntimo laiko kartotiniui wT_p , čia T_p - vieno paketo siuntimo periodas;

Svarbu rasti optimalų santykį tarp šių dviejų parametru, kadangi per didelė R reikšmė gali nulemti didesnę kolizijų skaičių, kurio galima stengtis išvengti didinant w . Kita vertus, per didelis w itin ištempa to paties paketo išsiuntimą, kas prieštarautų realaus laiko sistemos esmei.

Norint išbandyti šį metodą, sudaryta simuliacinio aplinkos nėra patogi, kadangi, modeliuojant ilgesnį sistemos veikimo laiką prireikia daug skaičiavimų, kurie modeliavimo laiką padaro per ilgą.

Metodas bus išbandytas jį realizavus aparatinėje įrangoje ir atliekant siuntimus realioje aplinkoje.

3. PRAKTINĖ METODO REALIZACIJA IR EKSPERIMENTAI

3.1. Praktinės realizacijos platforma

Praktinei bandomo metodo realizacijai pasirinktas Microchip dsPIC33FJ64MC802 mikrovaldiklis [22], turintis specialių DSP instrukcijų rinkinį. Itin svarbios šiam taikymui komandos MAC, DO ir REPEAT (pastarosios dvi - aparatūriškai realizuotos ciklo instrukcijos). Kiti šiam taikymui svarbesni parametrai:

2 lentelė. Realizacijos platforma

Maksimalus taktinis dažnis	80 Mhz
Maksimali sparta	40 MIPS
Atmintis	16.384 b
Programos atmintis	64 KB
Architektūra	Harvardo (16b duomenys, 24b instrukcijos) 16x16 daugintuvas MAC instrukcija
Kompiliatorius	Microchip C30

Kadangi šio mikrovaldiklio kompiliatorius pilnai nepalaiko turimų DSP instrukcijų, siekiant kuo spartesnės realizacijos, signalo diskretizavimo ir koreliacijos skaičiavimo funkcija parašyta ASM kalba, panaudojant MAC ir DO instrukcijas. Turint ASM kodą, galima tiksliai nustatyti atliekamų instrukcijų skaičiaus priklausomybę nuo sekos ilgio ir bendro apdorojamų sekų skaičiaus:

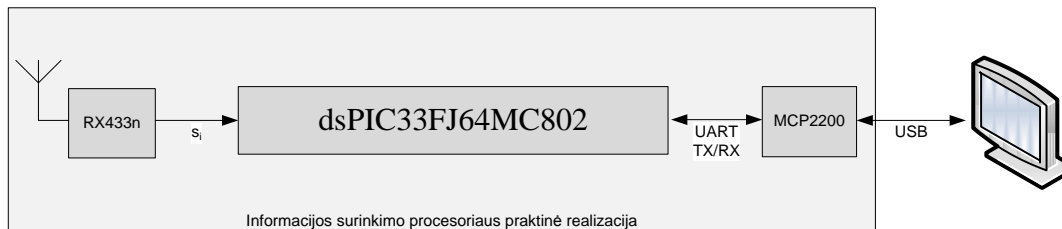
$$27 + K(9 + N) \quad (13)$$

čia K - apdorojamų sekų skaičius;

N - sekų ilgis.

Pavyzdžiui, jeigu naudojama maksimali 80 MIPS sparta, vienai 127 ilgio sekai apdoroti prireiks apie 4,3 μ s, taigi įmanoma pasiekti 200 kcps, arba 25 kbps spartą. Kadangi naudojama radijo ryšio modulis palaiko maksimalią 4800 bps spartą, tokio apdorojimo greičio visiškai pakanka apie 40 siuntėjų apdoroti.

Sudarytos testinės platformos principinė schema pateikta 22 pav. Radijo modulis RX433n gautą signalą perduoda mikrovaldikliui, kuris atlieka signalo apdorojimą ir per UART sąsają per MCP2200 schemą, kuri paverčia UART signalą į USB sąsają perduoda rezultatus stebėtojo kompiuteriui.



22 pav. Testinės platformos principinė schema

3.2. Eksperimentai

Eksperimentų tikslas yra ištirti duomenų priėmimo iš sensorinių mazgų patikimumą naudojant ankstesniame skyriuje pasiūlytą kolizijų išvengimo metodą. Duomenų priėmimo patikimumas tiriamas naudojant didėjančio ilgio GOLD sekas.

Eksperimentai atlikti bendradarbiaujant su [1] autoriumi, kuris parūpino sensorių programinę ir aparatinę įrangą.

3.2.1. Duomenų atskyrimo patikimumo priklausomybės nuo sekų ilgio ir pertekliškumo parametrų tyrimas

Šio eksperimento tikslas - nustatyti, kaip nuo sekos ilgio ir laukimo parametrų priklauso galimybė atskirti daugelio siuntėjų duomenis.

Tyrimo metu naudojami keturi sensoriniai procesoriai, išdėstyti toje pačioje patalpoje, vienodu 1 metro atstumu nuo informacijos surinkimo procesoriaus. Kiekvienas sensorinis procesorius siunčia 32 bitų ilgio 50 duomenų paketų 1 minutės intervalu:

<i>Preambulė</i>								<i>Paketo nr.</i>								<i>Testiniai duomenys</i>																					
1	0	0	1	1	0	0	1											0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0						

Paketo numeris leidžia atpažinti, kada priimtas pakartotinai išsiųstas paketas ir nustatyti, kada gaunama daug perteklinių paketų. Tada galima bandyti mažinti pakartotinių siuntimų skaičių.

Eksperimentas atliekamas keičiant šiuos parametrus:

- N - GOLD sekos ilgis;

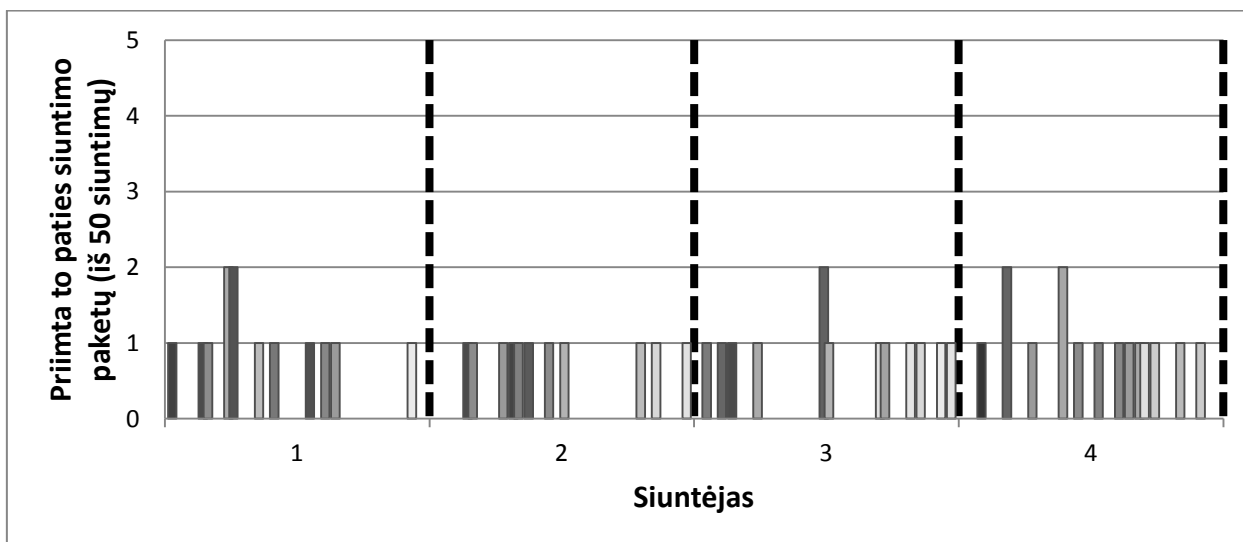
- **R** - pakartotinai siunčiamų paketų skaičius;
- **w** - maksimalus paketo periodų laukimo skaičius tarp pakartotinių siuntimų.

Paketas laikomas gautu, jeigu gautas bent vienas iš pakartotinai siunčiamų paketų, bet stebimas ir perteklinių paketų skaičius.

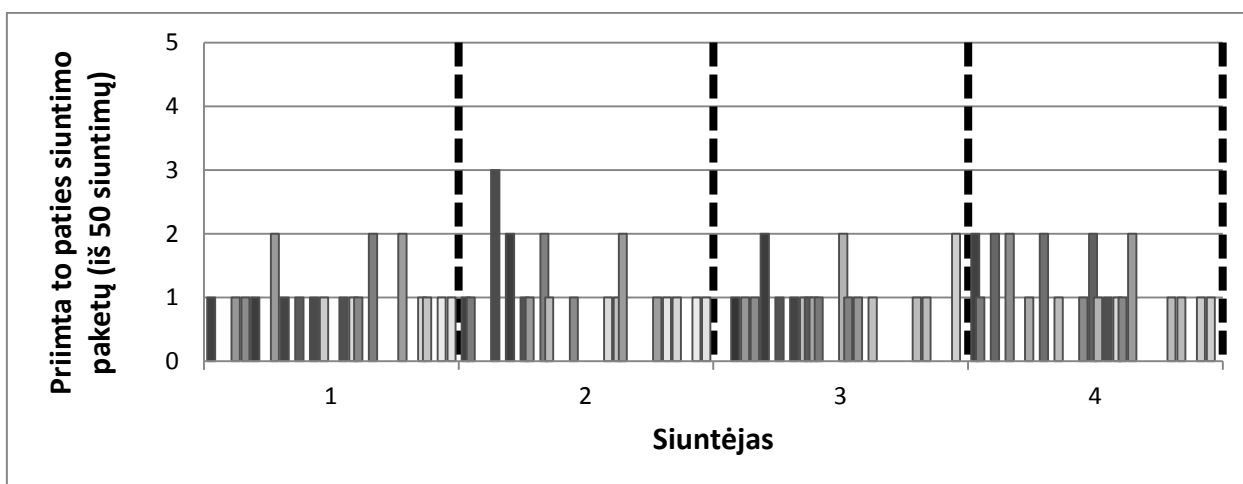
Paketas atpažįstamas iš preambulės ir laikomas gautu, jeigu visi testinių duomenų bitai teisingi. Paketo numeris lyginamas su anksčiau gauto paketo numeriu ir didžiausiu galimu paketo numeriu (50). Laikoma, kad paketas negautas, jeigu jo numeris išeina iš galimų reikšmių intervalo.

Žemiau pateikiami eksperimento rezultatai sugrupuojant iš kiekvieno siuntėjo gautus paketus pagal jų numerį:

- **Naudojama 31 ilgio GOLD seka**

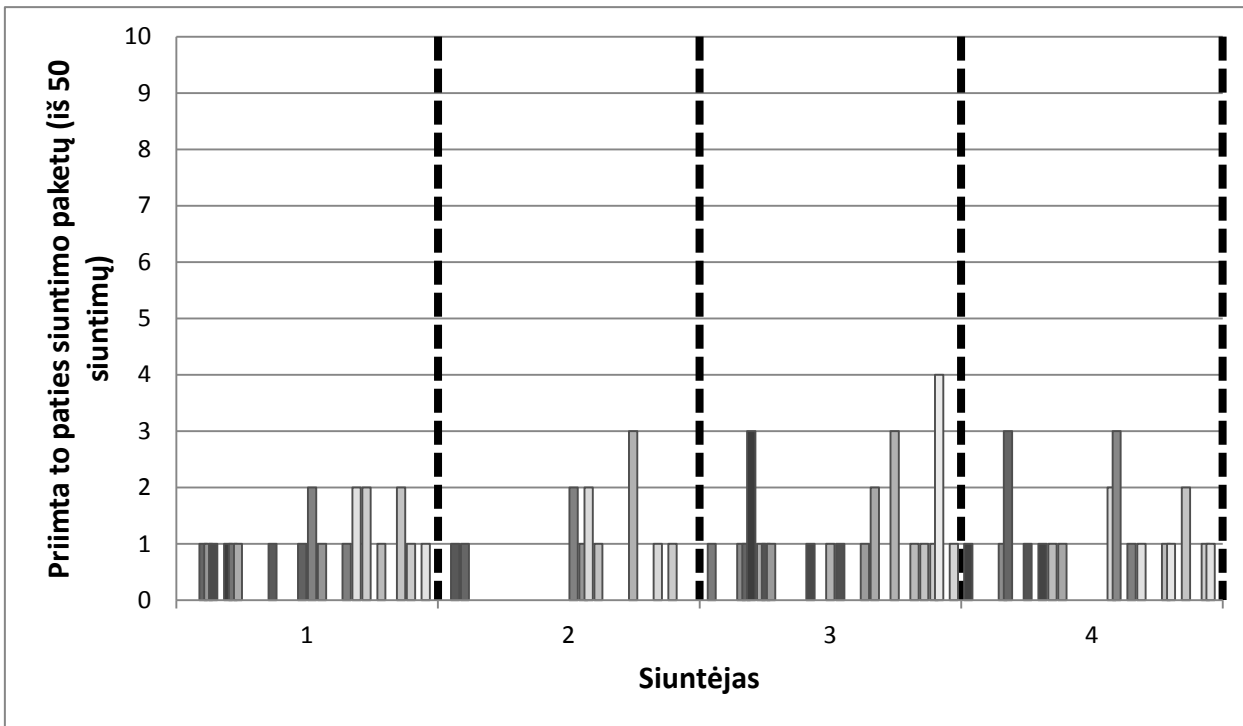


23 pav. Priimti paketai, kai $R = 5, w = 7$

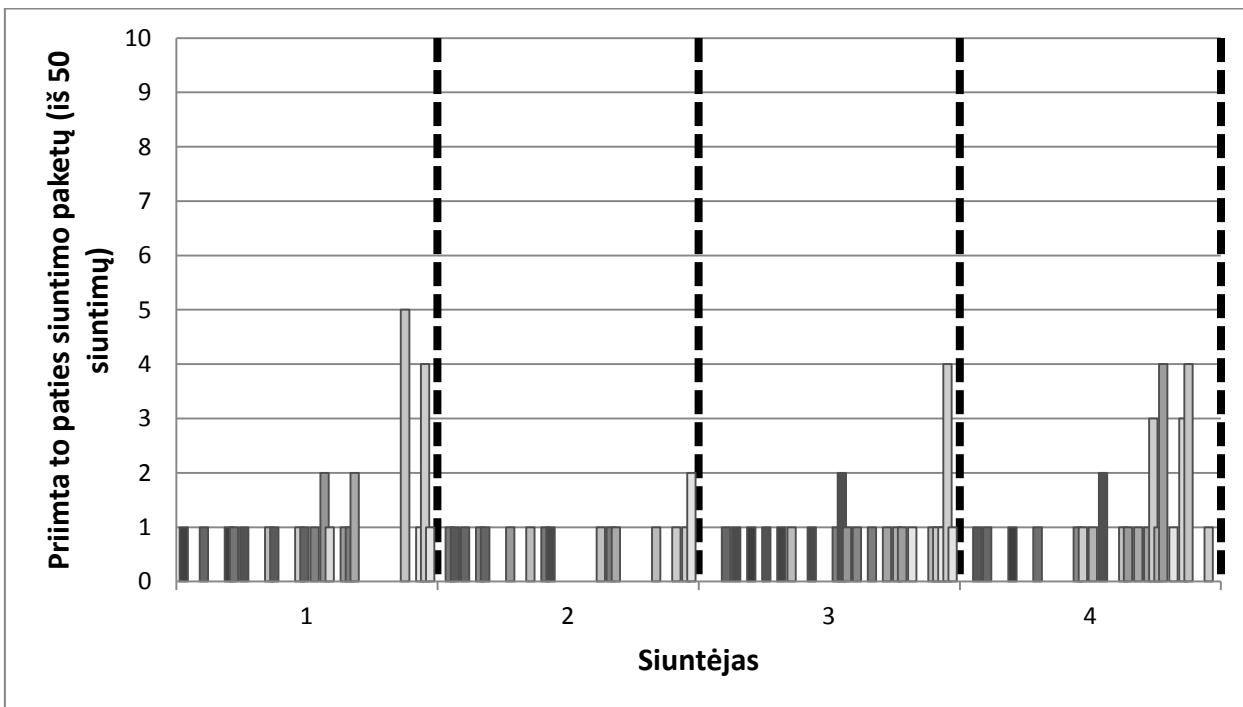


24 pav. Priimti paketai, kai $R = 5, w = 15$

Matyti, kad su mažo ilgio seka negaunama daug paketų. Nors priimta ir perteklinių didesnis skaičius paketų negauta. Laukimo periodo padidinimas situaciją šiek tiek pagerino, tačiau daug paketų vistiek negaunama. Toliau bandoma didinti pakartotinai siunčiamų paketų skaičių.



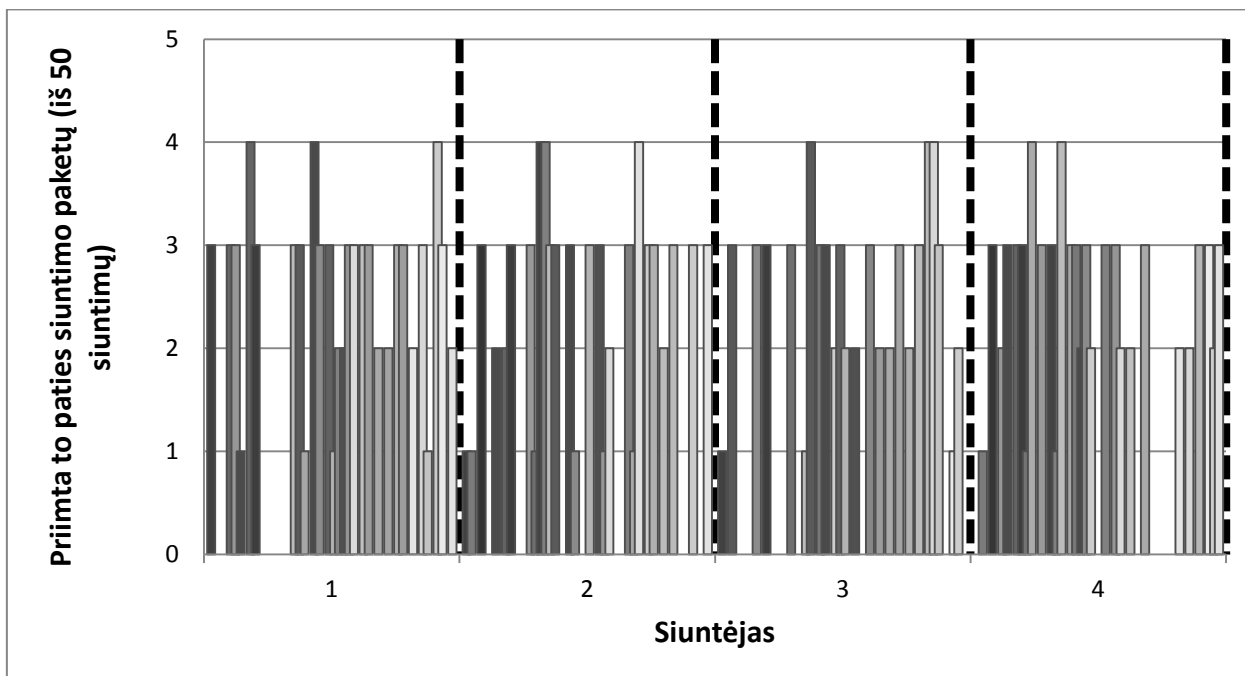
25 pav. Priimti paketai, kai $R = 10$, $w = 7$



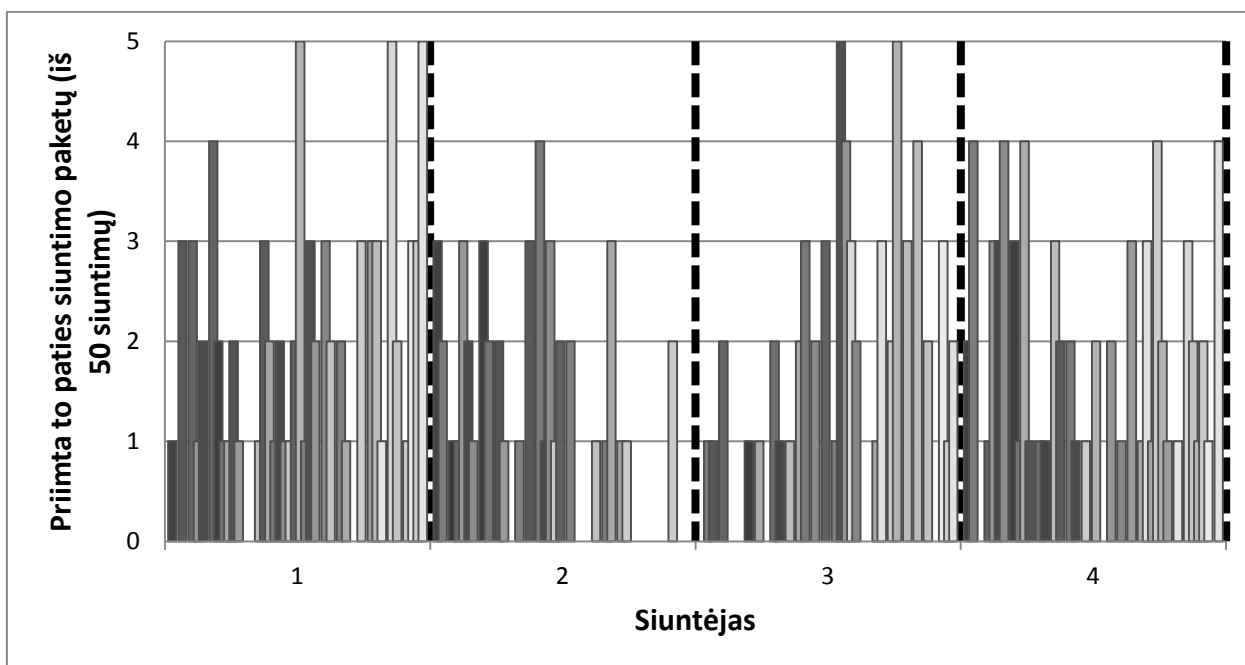
26 pav. Priimti paketai, kai $R = 10$, $w = 15$

Akivaizdu, kad laukimo periodo padidinimas situacijos nepagerino. Padidinus laukimo periodą ir perteklinių paketų skaičių, rezultatai nepasikeitė. Galima daryti išvadą, kad 31 ilgio sekos neužtikrina patikimo duomenų perdavimo. Atliekamas bandymas su ilgesne seka.

- Naudojama 63 ilgio GOLD seka



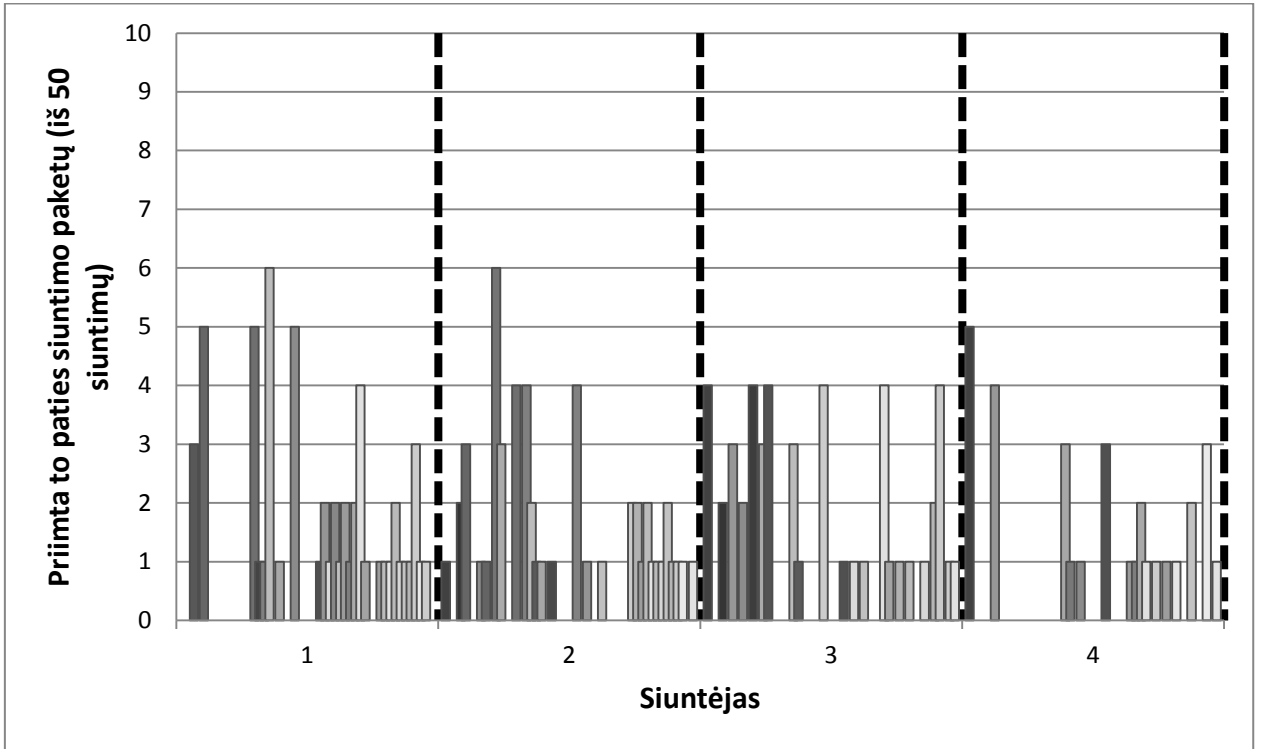
27 pav. Priimti paketai, kai $R = 5$, $w = 7$



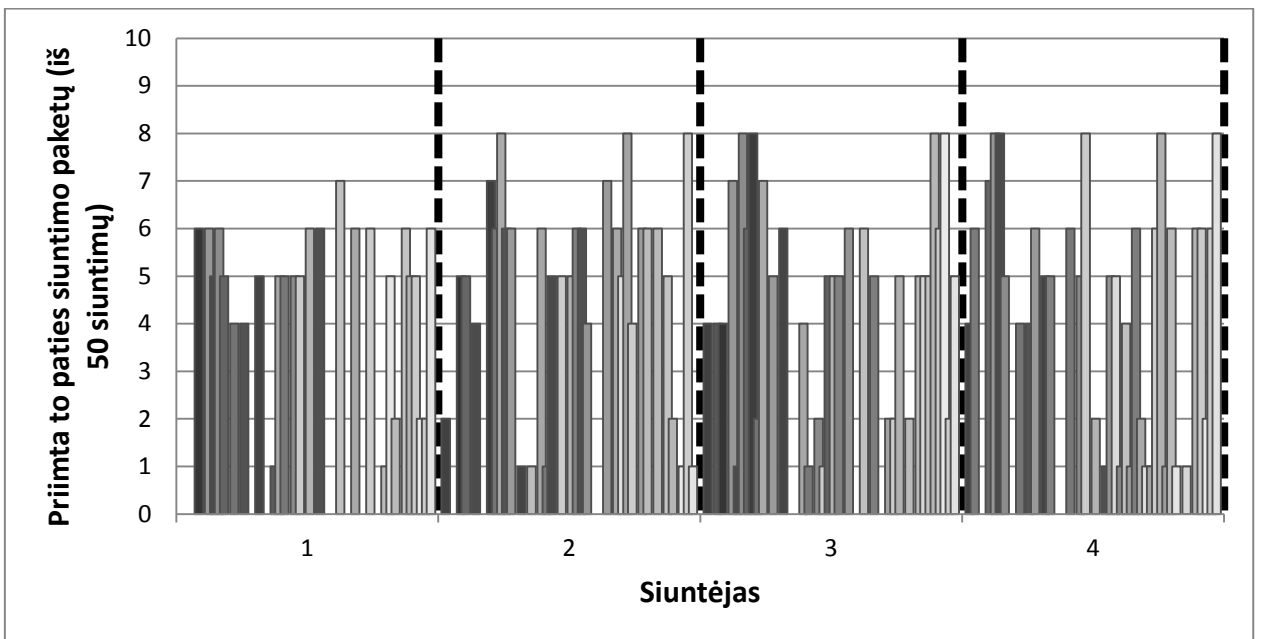
28 pav. Priimti paketai, kai $R = 5$, $w = 15$

Sekos ilgio padvigubinimas akivaizdžiai padidino gaunamų paketų skaičių, gaunama daug perteklinių, tačiau matyti, kad vis dar yra negautų paketų. Laukimo periodo padidinimas

rezultatus pablogino.



29 pav. Priimti paketai, kai $R = 10$, $w = 7$



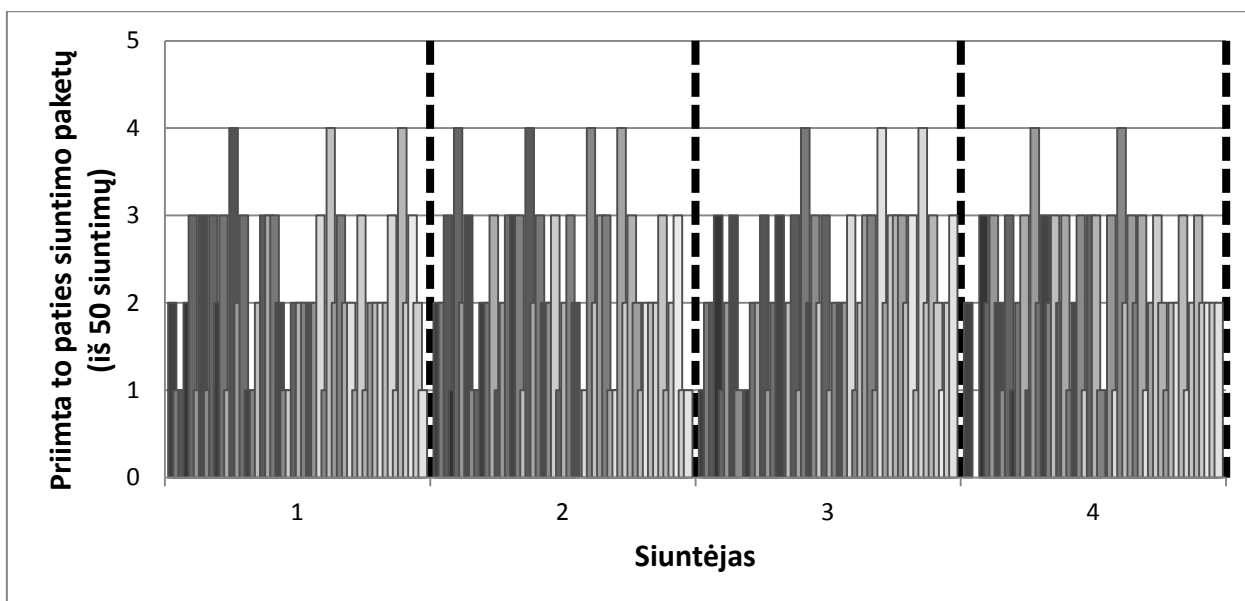
30 pav. Priimti paketai, kai $R = 10$, $w = 15$

Pakartotinių paketų skaičiaus padidinimas, palikus mažą laukimo periodą, akivaizdžiai pablogino priėmimo galimybes. Galima manyti, kad susidurta su situacija, kai pakartotinai siunčiamų paketų skaičius padidino kolizijų tikimybę.

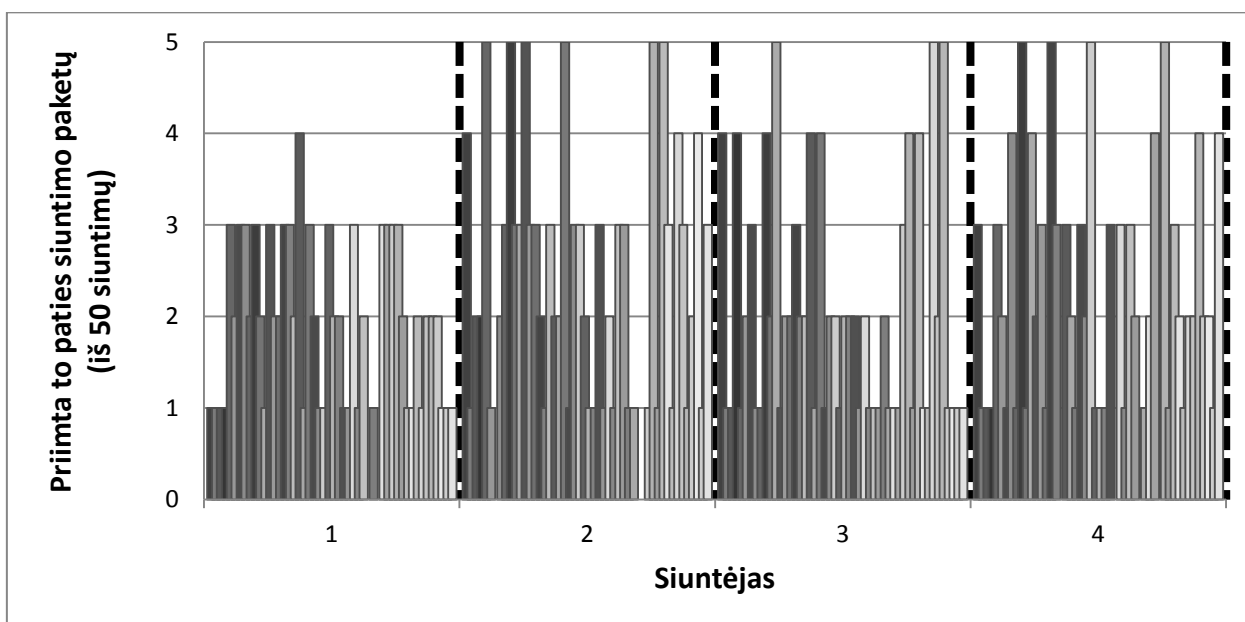
Padvigubinus maksimalų laukimo periodą, situacija pagerėjo, ir buvo gauti beveik visi

išsiųsti paketai, ne visi. Kadangi darbo tikslas - kuo didesnis duomenų surinkimo patikimumas, toliau eksperimentuojama su dar ilgesne seka.

- Naudojama 127 ilgio GOLD seka

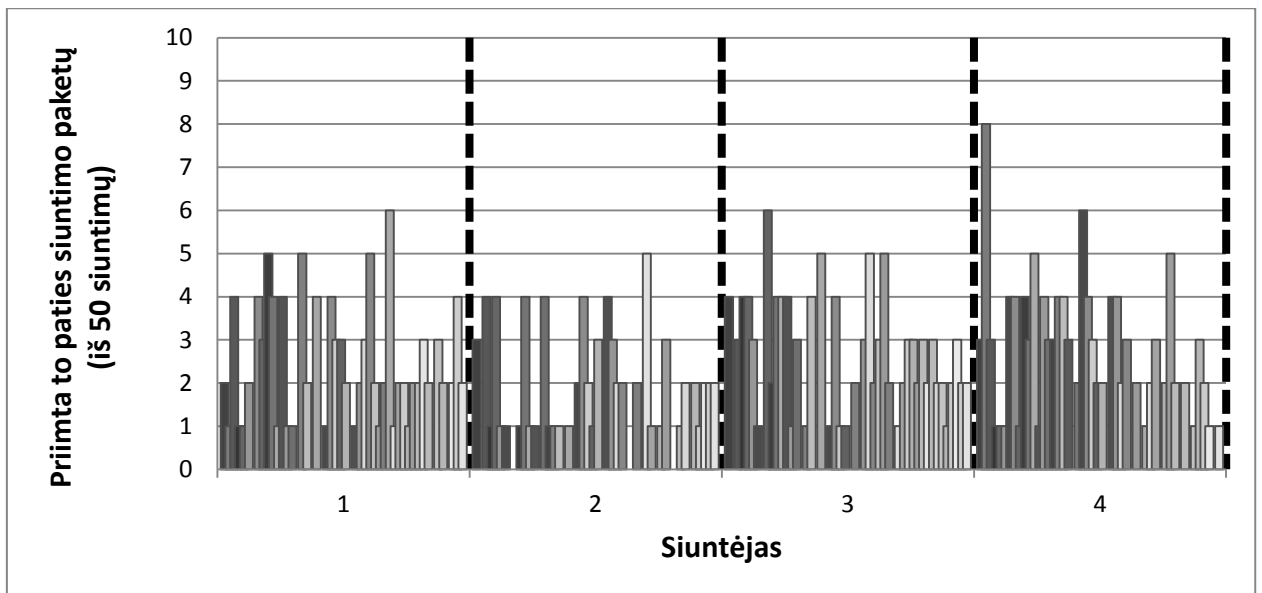


31 pav. Priimti paketai, kai $R = 5$, $w = 7$

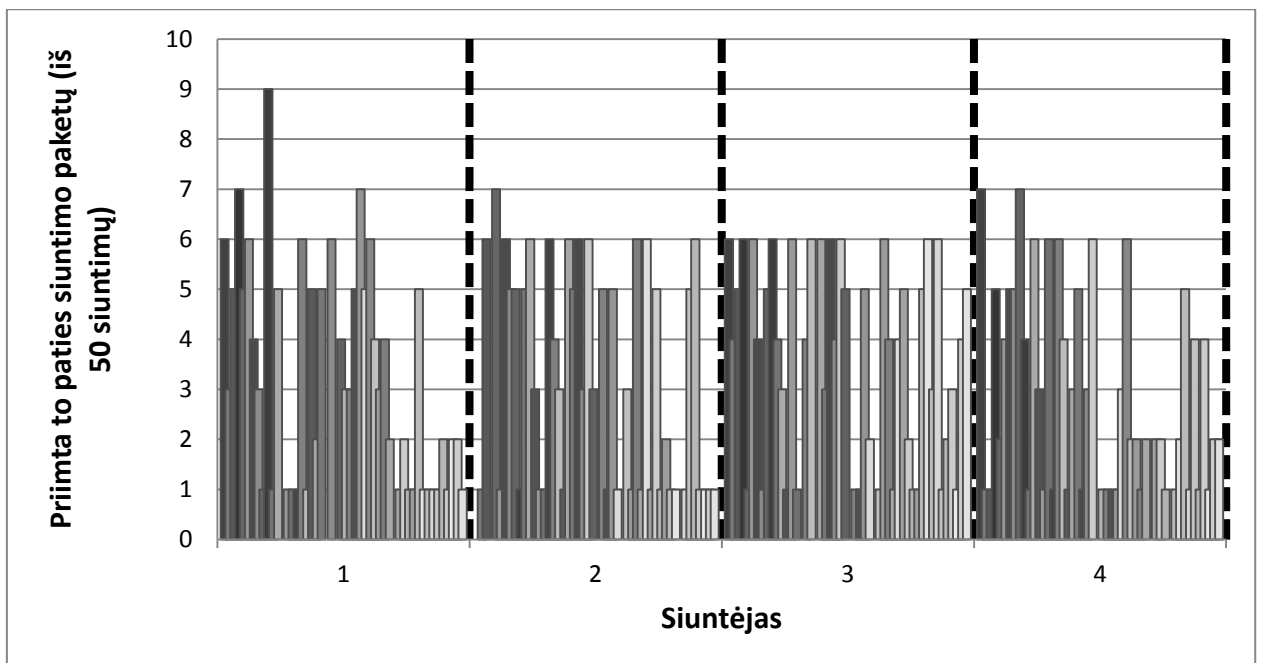


32 pav. Priimti paketai, kai $R = 5$, $w = 15$

Panaudojus 127 ilgio seką, buvo gauti beveik visi paketai, dauguma jų buvo pertekliniai. Laukimo periodo priimtų perteklinių paketų skaičių nežymiai sumažino.



33 pav. Priimti paketai, kai $R = 10$, $w = 7$



34 pav. Priimti paketai, kai $R = 10$, $w = 15$

33 pav. ima ryškėti tendencija, kai padidinus pakartotinai siunčiamų paketų skaičių, bet nepakeitus laukimo periodo, rezultatai akivaizdžiai suprastėja. Šiuo atveju matyti, kad laukimo periodo padidinimas dvigubai nebuvo pakankamas.

Apibendrinti visų eksperimentų rezultatai pateikti 3 lentelėje.

4 lentelė. Priimtų paketų kiekio procentais priklausomybė nuo sekų ilgio ir laukimo parametru

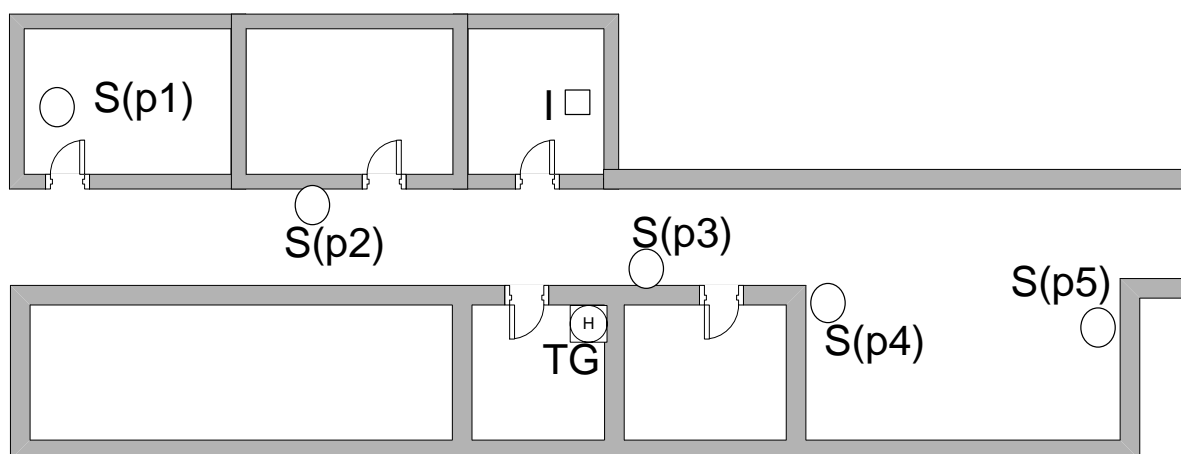
Sekos ilgis	Perteklinių paketų skaičius			
	5		10	
	Laukimo periodai			
	7	15	7	15
31	23,5	35	29,5	37,5
63	54	61,5	47	64,5
127	97	95,5	81,5	92

Iš apibendrintų rezultatų matyti, kad net 127 ilgio seka neužtikrino 100 % priėmimo patikimumo. Taip pat pasirodo, jog perteklinių paketų skaičiaus didinimas ženkliai nepagerina duomenų priėmimo, o ilgesnių sekų atveju netgi pablogina.

Matyti, kad laukimo periodo padidinimas daugiau atvejų patikimumą pagerina. Tačiau per ilgas laukimo periodas tampa nepraktiškas, kadangi duomenys iš sensorinių procesorių smarkiai vėluos ir daugeliu atvejų nebeteks prasmės.

3.2.2. Duomenų priėmimo patikimumo priklausomybės nuo sekų ilgio

Šio eksperimento tikslas - išsiaiškinti, kaip priklauso patikimo priėmimo atstumas nuo naudojamos sekos ilgio. Eksperimente buvo panaudotas vienas siųstuvas, kuris buvo paliekamas įvairiose pozicijose tiriamoje patalpoje.



35 pav. Siųstuvo pozicijos tiriamoje aplinkoje

Čia I - informacijos surinkimo procesorius;

TG - triukšmo generatorius;

Siųstuvas siunčia tokius pačius paketus, kaip ir ankstesniame tyrime. Nepasikeitė ir paketo gavimo kriterijai. Rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Priėmimo patikimumo priklausomybė nuo sekos ilgio ir sintėjo atstumo nuo imtuvo

Siųstuvo pozicija	Atstumas	Priimtų paketų procentas santykis	
		64 bitų skleidimo sekos ilgis	128 bitų skleidimo sekos ilgis
p1	20	59,2	92,6
p2	8	60,8	95,1
p3	10	40,8	51,1
p4	15	0	0
p5	20	0	0

Matyti, kad ilgesnė seka užtikrina geresnę duomenų priėmimą. Gauti įdomūs rezultatai - iš pozicijų *p4* ir *p5* negautas nei vienas paketas, nors jų atstumas ne didesnis nei *p1*. Tai gali būti paaiškinama triukšmo šaltiniu netoliese esančioje patalpoje. Atsparumo triukšmui čia neužtikrino ir 128 ilgio seka.

Atlikus eksperimentus, matyti, kad ilgesnės sekos bet koku atveju gerina duomenų išskyrimo ir priėmimo patikimumą. Perteklinių paketų siuntimas nedavė lauktų rezultatų ir daugeliu atvejų duomenų priėmimą pablogino. Kita vertus, laukimo periodo pailginimas tarp paketų beveik visais atvejais davė gerus rezultatus, tačiau laukimo laiko ilginimas ne visada praktiškas, nes gali smarkiai užvėlinti duomenis.

4. IŠVADOS

- Atlikta DS-CDMA pagrįstų duomenų atskyrimo metodų analizė, nustatyta, kad kritinis tokių metodų parametras, veikiantis duomenų atskyrimo iš bendro ir triukšmingo signalo patikimumą yra skleidimui naudojamų sekų koreliacinės savybės;
- Įvertinus galimybes įgyvendinti informacijos surinkimo procesorių aparatinėje įrangoje, realizacijai pasirinktas mikrovaldiklis, pasižymintis dideliu taikymų lankstumu ir turintis specializuotas, signalų apdorojimą palengvinančias instrukcijas;
- Sudarytas informacijos surinkimo modelis MATLAB aplinkoje, atlikus modeliavimą nustatyta, kad darbe radijo komunikacijai naudojama OOK moduliacija DS-CDMA tinkle neleidžia pasiekti optimalių rezultatų, nes įvykus signalų kolizijai jie pernelyg paveikia vienas kitą ir nebeįmanoma išskirti duomenų;
- Pasiūlytas metodas mažinti duomenų kolizijų tikimybę, įterpiant atsitiktinės trukmės kaukimo periodus tarp siunčiamų paketų, taip pat įvesti duomenų perteklišumą kelis kartus išsiunčiant tą patį paketą;
- Metodas realizuotas dsPIC33FJ64MC802 mikrovaldiklyje, išnaudojant jo siūlomas DSP instrukcijas;
- Atlikus eksperimentus su keturiais duomenis siunčiančiais sensoriniais procesoriais nustatyta, skleidžiančių sekų ilginimas visais atvejais padidina duomenų priėmimo patikimumą, o duomenų pertekliškumo didinimas gerus rezultatus duoda tik naudojant trumpas sekas, arba ilgam laukimo periodui tarp išsiunčiamų paketų. Tuo tarpu laukimo periodo ilginimas dažniausiai padidina priimtų paketų skaičių, tačiau smarkiai vėluojančių duomenų kaina.

5. LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] R. Lukas, “Realaus laiko sensorinio procesoriaus aparatinės ir programinės įrangos sudarymas ir tyrimas,” Kaunas, 2012.
- [2] C.-H. Liu and H. H. Asada, “A source coding and modulation method for power saving and interference reduction in DS-CDMA sensor network systems,” in *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, 2002, vol. 4, pp. 3003 – 3008 vol.4.
- [3] M. Chen, C. Oh, and A. Yener, “Efficient Scheduling for Delay Constrained CDMA Wireless Sensor Networks,” in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, 2006, pp. 1 –5.
- [4] P. Venkitasubramaniam, S. Adireddy, and L. Tong, “Sensor networks with mobile access: optimal random access and coding,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 22, no. 6, pp. 1058 – 1068, Aug. 2004.
- [5] C. Dethe, D. Wakde, and C. Jaybhaye, “Bluetooth Based Sensor Networks Issues and Techniques,” in *Modelling Simulation, 2007. AMS '07. First Asia International Conference on*, 2007, pp. 145 –147.
- [6] J. M. Larrauri, B. A. Larrinaga, M. L. Lopez, and J. S. Cubillo, “A Bluetooth sensor network based on the IEEE 1451 standard: A sensor network solution to evaluate the wellbeing of the passenger and improve safety in cars,” in *Wireless Information Networks and Systems (WINSYS), Proceedings of the 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1 – 6.
- [7] C. Evans-Pughe, “Bzzzz zzz [ZigBee wireless standard],” *IEE Review*, vol. 49, no. 3, pp. 28 – 31, Mar. 2003.
- [8] I. Poole, “What exactly is . . . ZigBee?,” *Communications Engineer*, vol. 2, no. 4, pp. 44 – 45, Sep. 2004.
- [9] R. Pickholtz, D. Schilling, and L. Milstein, “Theory of Spread-Spectrum Communications– A Tutorial,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 5, pp. 855 – 884, May 1982.
- [10] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and software radio for mobile communications*. Boston: Artech House, 2002.
- [11] S. Moshavi, “Multi-user detection for DS-CDMA communications,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 34, no. 10, pp. 124–136, 1996.
- [12] H.-H. Chen, *The next generation CDMA technologies*. Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.
- [13] D. V. Sarwate and M. B. Pursley, “Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, no. 5, pp. 593 – 619, May 1980.
- [14] R. Gold, “Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing (Corresp.),” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 4, pp. 619 –621, Oct. 1967.
- [15] S. H. Kellert, *In the wake of chaos : unpredictable order in dynamical systems*. Chicago [u.a.: Univ. of Chicago Press, 1993.
- [16] G. Heidari-Bateni and C. D. McGillem, “Chaotic sequences for spread spectrum: an alternative to PN-sequences,” in *Wireless Communications, 1992. Conference Proceedings., 1992 IEEE International Conference on Selected Topics in*, 1992, pp. 437 –440.
- [17] T. Kohda and A. Tsuneda, “Even- and odd-correlation functions of chaotic Chebyshev bit

- sequences for CDMA,” in *Spread Spectrum Techniques and Applications, 1994. IEEE ISSSTA '94., IEEE Third International Symposium on*, 1994, pp. 391 –395 vol.2.
- [18] M. Elnamaky and D. Massicotte, “FPGA implementation of correlation and ML channel estimation for long code CDMA systems,” in *Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA), 2010 10th International Conference on*, 2010, pp. 418 –421.
- [19] B. Sreedevi, V. Vijaya, C. K. Rekh, R. Valupadasu, and B. R. Chunduri, “FPGA implementation of DSSS-CDMA transmitter and receiver for ADHOC networks,” in *Computers Informatics (ISCI), 2011 IEEE Symposium on*, 2011, pp. 255 –260.
- [20] D. Kim, M. Kim, and G. E. Sobelman, “FPGA-based CDMA switch for networks-on-chip,” in *Field-Programmable Custom Computing Machines, 2005. FCCM 2005. 13th Annual IEEE Symposium on*, 2005, pp. 283 – 284.
- [21] X. Reves, A. Gelonch, and F. Casadevall, “Software radio implementation of a DS-CDMA indoor subsystem based on FPGA devices,” in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001 12th IEEE International Symposium on*, 2001, vol. 1, p. D–86 –D–90 vol.1.
- [22] Prieiga per internetą :
- <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en532314> [2012-05-15]

PRIEDAI

MODELIAVIMO SISTEMOS MATLAB INICIALIZAVIMO KODAS

```
*****
*****
% Aplinka GOLD sekoms testuoti
*****
*****
% Struktūros su gold seku parametrais
% gp1 - polinomas 1
% gp2 - ploinomas 2
% ini1 - pirmojo polinomo pradine pozicija
% ini2 - antrojo polinomo pradine pozicija
params255 = struct('gp1',{[8,7,6,1]}, 'ini1',{[0,0,0,0,0,0,0,1],[0,0,0,0,0,0,0,1]}, ...
                  'gp2',{[8,7,6,5,2,1,0]}, 'ini2',{[0,0,0,0,0,0,0,1],[0,0,0,0,0,0,1,1]});

params127 = struct('gp1',{[7,3,0]}, 'ini1',{[0,0,0,0,0,0,1],[0,0,0,0,0,0,1]}, ...
                  'gp2',{[7,3,2,1,0]}, 'ini2',{[0,0,0,0,0,0,1],[0,0,0,0,0,1,1]});

params63 = struct ('gp1',{[6,1,0]}, 'ini1', {[0,0,0,0,0,1],[0,0,0,0,0,1]}, ...
                  'gp2',{[6,5,2,1,0]}, 'ini2', {[0,0,0,0,0,1],[0,0,0,0,1,1]});

params31 = struct ('gp1',{[5,3,0]}, 'ini1', {[0,0,0,0,1],[0,0,0,0,1]}, ...
                  'gp2',{[5,4,3,2,0]}, 'ini2', {[0,0,0,0,1],[0,0,0,1,1]});

% Koreliacijos rezultato lygiai, nustatantys, kada aptinkamas bitas
thres_1 = [64 64]; % 1 lygis

% Sugeneruoti seku matrica - kur kiekvienas stulpelis - atskira seka
seqs = goldseq_matrix(params255); % Nepoline seka ci = {0,1}
seqs_bp = seqs*2-1; % Poline seka ci = {-1,1}

% % Parameters for TX/RX
f_tx = 2000; % Chip daznis siustuve
f_rx = 2000.2; % Chip dnuskaitymo daznis imtuve
cpb = size(seqs,1); % Sekos elementu (chip) skaicius
n = size(seqs,2); % Skirtingu seku skaicius
Tc_tx = 1/f_tx; % Chip periodas siustuve
Tc_rx = 1/f_rx; % Chip nuskai9tymo periodas imtuve

%Parametrai kitiems blokams
info_prob = ones(1,n)*0.5;
info_seed = randseed(1,1,n);
delays = randi(16,1,n);
initial = zeros(1,n);
```

GOLD SEKŲ GENERAVIMO KODAS

```
function [ gout ] = goldseq(gp1, ini1, gp2, ini2, n)
%GOLDSEQ GOLD funkcijos generavimas

%*****
% gp1   : polinomas 1 1
% ini1  : pradiniu reiksmiu vektorius 1
% gp2   : polinomas 2
% ini2  : pradiniu reiksmiu vektorius 2
% n     : seku skaicius (nubutinas)
% gout  : sugeneruotos sekos
%*****

if nargin < 5
    n = 1;
end

m1 = pnseq(gp1, ini1);
m2 = pnseq(gp2, ini2);

gout = zeros(n, length(m1));

for ii = 1:n;
    gout(ii,:) = xor(m1, m2);
    m2         = shift(m2,1,0);
end

end
```

GOLD MATRICŲ GENERAVIMO KODAS

```
function [ gout ] = goldseq_matrix(values)
%GOLDSEQ GOLD sekugeneravimo funkcija

%*****
%*****
% values   : struktura su parametrai seku generavimui
%*****% Struktūros sudetis
% Struktūros su gold seku parametrais
% gp1   - polinomas 1
% gp2   - polinomas 2
% ini1  - pirmojo polinomo pradine pozicija
% ini2  - antrojo polinomo pradine pozicija
%*****
%*****

s_length = size(values,2);           % length of the structure
gout = zeros(s_length, 2^values(1).gp1(1)-1);
for ii=1:s_length
    if (values(ii).gp1(1) ~= values(ii).gp2(1))
        disp('Visu polinomu auksciausi laipsniai turi sutapti');
    elseif (values(ii).gp1(1) ~= size(values(ii).ini1,2) || values(ii).gp2(1)
    ~= size(values(ii).ini2,2))
        disp('Pradiniu busenu vektoriu ilgiai turi buti lygus polinomo
    auksciausia laipsniui');
    else
        gout(ii,:) = goldseq(values(ii).gp1, values(ii).ini1, values(ii).gp2,
        values(ii).ini2);
    end
end

end
```