



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Orlaivių navigacijoje naudojamų signalų paketų detektavimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Simonas Riauka

Projekto autorius

Doc. dr. Pranas Kuzas

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Orlaivių navigacijoje naudojamų signalų paketų detektavimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Simonas Riauka

Projekto autorius

Doc. dr. Pranas Kuzas

Vadovas

Prof. Dangirutis Navikas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Simonas Riauka

Orlaivių navigacijoje naudojamų signalų paketų detektavimo metodų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Simonas Riauka

Patvirtinta elektroniniu būdu

Simonas Riauka. Orlaivių navigacijoje naudojamų signalų paketų detektavimo metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Pranas Kuzas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: ADS-B, orlaivių navigacija, signalų apdorojimas, koreliacija.

Kaunas, 2026. 66 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte analizuojami metodai orlaivių siunčiamiems ADS-B paketams aptikti. Darbo tikslas – išanalizuoti skirtingus metodus ADS-B signalo preamblei aptikti, juos išbandyti kompiuterinėse simuliacijose siekiant atrasti efektyviausią sprendimą. Sukurtą algoritmą išbandyti realia aparatine įranga ir pagrįsti jo funkcionalumą realaus pasaulio sąlygomis.

Apžvalginėje dalyje apžvelgiamos skirtingos orlaivių navigacijos sistemos, nuo palydovinių GNSS signalų iki stacionarių ILS stočių. Aptariamos jų funkcionalumo ypatybės bei techninės galimybės. ADS-B sistema pasirenkama kaip darbo pagrindinis akcentas, atliekama detali signalo charakteristikų bei duomenų paketo analizė.

Toliau analizuojami skirtingi būdai ADS-B signalui aptikti. Iš mokslinių šaltinių išrenkamos bei apžvelgiamos dvi pagrindinės kryptys: skaitinių rodiklių bei koreliacijos taikymas. Apžvelgiami skirtingi skaitinių rodiklių algoritmai analizuojantys priimamo signalo fazę, amplitudę bei impulsų laiko postūmius. Koreliacijos metodo analizėje išnagrinėjami koreliacijos skaičiavimo ypatumai atsižvelgiant į du pagrindinius parametrus: koreliacijos kaukės formą, ilgį bei aptikimo slenksčio dydį bei galimybę taikyti adaptyvius metodus jo nustatymui. Trumpai apžvelgiami hibridinis CFAR metodas, DI taikymas bei aparatinių sprendimų įtaka signalo nuskaitymui.

Metodinėje dalyje pereinama prie koreliacijos skaičiavimo išbandymo pasinaudojant kompiuterines simuliacijas. Siekiama atkartoti moksliniuose straipsniuose aptartus metodus pritaikant skirtingas koreliacijos kaukių formas. Šiam tikslui pasiekti sintezuojami pavyzdiniai ADS-B signalai, jiems skaičiuojama koreliacija. Sugeneravus didelį kiekį signalų randama signalo energijos – preamblei koreliacijos amplitudės priklausomybė ir iš jos pritaikomas adaptyvus koreliacijos slenksčio kriterijus preamblei aptikimui indikuoti. Pritaikymo metu surenkami metodų efektyvumo rodikliai prie skirtingų signalas-triukšmas lygių. Pabaigoje koreliacijos algoritmas pritaikomas realioje signalų nuskaitymo sistemoje veikiančioje FPGA matricos pagrindu. Sudaryta sistema išbandoma su pavyzdiniais ADS-B signalais siunčiamais iš SDR siųstuvo.

Išvados – atlikta ADS-B signalų priėmimo metodų analizė parodė du pagrindinius signalo aptikimo metodus iš kurių toliau išnagrinėtas bei išbandytas koreliacijos algoritmas su 6 skirtingomis koreliacijos kaukėmis. Sėkmingai pritaikytas kintamo koreliacijos slenksčio metodas su skirtingos amplitudės signalais, parodyta, kad statinė slenkstinė vertė nenuskaitytų signalo sėkmingai. Išbandytos galimybės sintezuotus ADS-B signalus transliuoti į aplinką panaudojant SDR siųstuvą ir *GNU Radio* aplinką. Funkcionalumas išbandytas su ADS-B signalų priėmimo sistema paremta FPGA matrica. Joje realizuotas koreliacijos bei adaptyvus slenksčio skaičiavimai parodė, kad algoritmas gali būti sėkmingai realizuotas realybėje ir atitinka teorinių simuliacijų rezultatus.

Simonas Riauka. Research of Aircraft Navigation Signal Packets' Detection Methods. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Pranas Kuzas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: ADS-B, aircraft navigation, signal processing, correlation.

Kaunas, 2026, 66 p.

Summary

In this Master's thesis, methods for detecting ADS-B packets transmitted by aircraft are analyzed. The objective of the work is to examine various methods for detecting the ADS-B signal preamble, test them through computer simulations to identify the most effective solution, and validate the developed algorithm using real hardware, demonstrating its functionality under real-world conditions. In the review section, various aircraft navigation systems are examined, ranging from satellite-based GNSS signals to stationary ILS stations. Their functional characteristics and technical capabilities are discussed. The ADS-B system is selected as the primary focus of the work, and a detailed analysis of its signal characteristics and data packet structure is conducted.

Subsequently, different methods for detecting ADS-B signals are analyzed. Based on scientific literature, two primary approaches are identified and reviewed: the application of digital indicators and correlation methods. Various digital indicator algorithms are examined, analyzing the phase, amplitude, and time-domain pulse characteristics of the received signal. In the analysis of the correlation method, the specifics of correlation computation are explored, considering two key parameters: the shape and length of the correlation mask and the detection threshold value with possibility of applying adaptive methods for its determination. A brief overview is also provided of the hybrid CFAR method, the application of AI, and the impact of hardware solutions on signal acquisition.

In the methodological section, the focus shifts to testing correlation computation using computer simulations. The goal is to replicate the methods discussed in scientific papers by applying different correlation mask shapes. To achieve this, sample ADS-B signals are synthesized, and their correlation is computed. By generating a large number of signals, the dependency between signal energy and preamble correlation amplitude is determined, and an adaptive correlation threshold criterion is derived for preamble detection. During implementation, performance metrics are collected for various signal-to-noise ratios. Finally, the correlation algorithm is implemented in a real-time signal acquisition system based on an FPGA matrix. The developed system is tested with sample ADS-B signals transmitted from an SDR transmitter.

Conclusions - the analysis of ADS-B signal reception methods revealed two primary contenders, of which the correlation algorithm with six different correlation masks was further investigated and tested. A variable correlation threshold method was successfully applied to signals of varying amplitudes, demonstrating that a static threshold value would fail to detect the signal. The feasibility of synthesizing and broadcasting ADS-B signals into the environment using an SDR transmitter and the *GNU Radio* framework was also tested. Functionality was validated with an ADS-B signal reception system supported by an FPGA matrix. The implemented correlation and adaptive threshold computations demonstrated that the algorithm can be successfully realized in practice and aligns with the results of theoretical simulations.

Turinys

Paveikslų sąrašas	7
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Apžvalginė dalis.....	12
1.1. Orlaivių signalų apžvalga	12
1.2. ADS-B signalo parametrų apžvalga	14
1.3. ADS-B signalo detektavimo algoritmai	16
1.3.1. Skaitiniai rodikliai	17
1.3.2. Koreliacija	18
1.3.3. Koreliacijos kaukės forma	19
1.3.4. Preambulės aptikimo koreliacija slenkstinė vertė	22
1.3.5. Hibridiniai variantai.....	22
1.4. Aparatiniai sprendimai	25
2. Metodinė dalis.....	29
2.1. Tyrimo atlikimo metodika.....	29
2.1.1. Simuliavimo aplinka.....	29
2.1.2. ADS-B signalo simuliavimas	31
2.2. Simuliavimas programinėje aplinkoje.....	32
2.3. Koreliacijos dinaminė slenkstinė vertė.....	36
2.4. Koreliacijos kaukių dinaminio slenksčio skaičiavimo tikslumo įvertinimas	43
2.5. Signalų sintezavimas	46
2.6. Realizavimas programuojamoje loginių elementų matricoje	51
Išvados	58
Literatūros sąrašas	59
Priedai.....	63
1 priedas. Preambulės kaukių koreliacijos rezultatai	63
2 priedas. Preambulės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio naudojant adaptyvų slenksčio skaičiavimus	65

Paveikslų sąrašas

1 pav. Orlaivių navigacijos signalai ir jų panaudojimas.....	13
2 pav. ADS-B demoduliuoto duomenų paketo iliustracija.....	14
3 pav. ADS-B paketo duomenų lauko sandaros dalys	15
4 pav. Atriboto dažnių spektro ADS-B signalo pavyzdys.....	15
5 pav. Trijų aptartų impulsų atradimo metodų iliustracijos.....	17
6 pav. Idealios formos preambulės grafikas	20
7 pav. Idealios preambulės autokoreliacijos rezultatas	20
8 pav. ADS-B sėkmingo paketų priėmimo koeficientas lyginant DO260B standarto metodą	21
9 pav. Neigiamų koeficientų naudojimo koreliacijos rezultato forma	21
10 pav. CFAR algoritmo pritaikyto ADS-B signalui aptikti diagrama.....	23
11 pav. CFAR algoritmu imami koreliacijos taškai	24
12 pav. SDR imtuvo pavyzdinė struktūrinė diagrama.....	25
13 pav. Įterptinių sistemų ADS-B imtuvo pavyzdinės struktūrinė diagrama.....	26
14 pav. FPGA pagrįsto ADS-B imtuvo pavyzdinė struktūrinė diagrama	26
15 pav. Logaritminio detektoriaus analizės schema su simuliuotais signalais.....	27
16 pav. ADS-B preambulės atradimo patikimumas didinant naudingo signalo lygį (Sp)	27
17 pav. Sintezuoto pilno ADS-B paketo tarpiniai ir galutinis rezultatas	32
18 pav. Tyrimui naudojamų susintezuotų kaukių signalų pavyzdžiai.....	33
19 pav. Idealios preambulės koreliacijos rezultatas	34
20 pav. Preambulės su neigiamais koeficientais koreliacijos rezultatas	35
21 pav. Išplėstos preambulės koreliacijos rezultatas	35
22 pav. Penkių ADS-B signalų, sintezuotų su skirtingomis amplitudėmis grafikas	36
23 pav. Didėjančio signalo amplitudės koreliacijos skaičiavimo rezultatai šešioms kaukėms	37
24 pav. Sugeneruotų signalų koreliacijos rezultato amplitudės preambulės	39
25 pav. Idealios preambulės, vidurkio varianto rezultatų kreivės pritaikymo rezultatas	40
26 pav. Idealios preambulės, vidurkio varianto rezultatų kreivės pritaikymo rezultatas	41
27 pav. Visų preambulių antros eilės polinomų MSE paklaidų vertės.....	42
28 pav. Visų preambulių penktos eilės polinomų MSE paklaidų vertės	42
29 pav. Idealios preambulės, vidurkio varianto aptikimo grafikas.....	43
30 pav. Išplėstos preambulės, vidurkio varianto aptikimo grafikas	43
31 pav. Išplėstos preambulės su atribotomis grindimis aptikimo grafikas.....	44
32 pav. Idealios preambulės kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio.....	44
33 pav. Neigiamos normalizuotos preambulės kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė	45
34 pav. Išplėstos preambulės kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio	45
35 pav. ADALM-PLUTO SDR vaizdas (kairėje) bei vidinės struktūros diagrama.....	47
36 pav. Eksperimento struktūrinė schema	47
37 pav. Sintezuoto ADS-B paketo įrašyto į failą atskaitų grafikas	48
38 pav. Dekoduoto ADS-B paketo pagrindinė informacija	49
39 pav. Sudaryta <i>GNU Radio</i> struktūra ADS-B signalo sintezavimui.....	49
40 pav. <i>GNU Radio</i> aplinkoje matomas sintezuotas signalas bei jo priimtas vaizdas	50
41 pav. <i>GNU Radio</i> lange matoma dekoduo to paketo informacija.....	50
42 pav. Osciloskopu stebimas demoduliatoriaus išėjimo signalas.....	51
43 pav. Signalų nuskaitymo įrenginio su FPGA struktūrinė schema	53

44 pav. Pagrindinių FPGA modulių struktūrinė schema.....	54
45 pav. FPGA koreliatoriaus modulio detali struktūrinė schema.....	54
46 pav. <i>ModelSim</i> loginės simuliacijos FPGA signalų diagrama.....	55
47 pav. Atnaujinta eksperimento struktūrinė schema.....	56
48 pav. FPGA iš AKK nuskaitymo signalo vaizdas kompiuterinės programos lange.....	56
49 pav. Prailgintos koreliacijos kaukės rezultatas apskaičiuotas FPGA ir perduotas į kompiuterį ..	57
50 pav. ADS-B preambulės aptikimo eksperimento rezultato oscilograma.....	57
51 pav. Preambulės su neigiamais normalizuotais koeficientais koreliacijos rezultatas.....	63
52 pav. Išplėstos normalizuotos preambulės koreliacijos rezultatas	63
53 pav. Diferencijuotos preambulės koreliacijos rezultatas	64
54 pav. Neigiamos koreliacijos kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio...	65
55 pav. Išplėsto normalizuotos koreliacijos kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė.....	65
56 pav. Diferencijuotos kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio.....	66

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ADS-B – angl. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast;

CRC – angl. Cyclic Redundancy Check;

FPGA – angl. Field Programmable Gate Array;

PPM – angl. Pulse Position Modulation;

MTL – angl. Minimum Triggering Level;

RF – angl. Radio Frequency;

SDR – angl. Software Defined Radio;

SNR – angl. Signal to Noise Ratio.

Įvadas

Nuo pat radijo ryšio pradžios šios srities signalų apdorojimo pastangos buvo skirtos siekiant padidinti priimamo signalo kokybę – kad duomenis būtų galima perduoti toliau, greičiau ir patikimiau. Šioje srityje aktyviai dirbama ir šiandien: nauji ir ambicingi kosmoso projektai reikalauja patikimo ir didelio pralaidumo ryšio vis didesniais atstumais, o tais atvejais, kai tuose pačiuose dažnių diapazonuose dirba daug įrenginių, dažnai pasireiškia interferencija, trikdžiai ir duomenų paketų persidengimas. Ne visas ryšių komunikacijų problemas galima išspręsti aparatiniais būdais, todėl komunikacijų signalų analizės, apdorojimo algoritmai bei jų tyrimai yra aktuali ir įdomi sritis.

Su signalų perdavimo problema susiduria visos radijo dažnius naudojančios sferos, o viena daugiausiai akcentuojama pastaruoju metu – ypač dideliais saugumo standartais pasižyminti oro navigacija. Šioje srityje tinkamas signalo priėmimas yra gyvybiškai svarbus, iš žemės perduodama orų, skridimo planų informacija, o iš kosmoso – navigacijos duomenys. Patys lėktuvai komunikacijų signalais identifikuoja save oro uostų dispečeriams bei prisideda prie nusileidimo saugumo sekant savo pozicijos informaciją.

Šiai itin svarbiai informacijai perduoti susiduriama su vis daugiau kliūčių:

- didėjantis lėktuvų kiekis ore užteršia naudojamą dažnių spektrą. Orlaivių industrija kasmet nuosaikiai auga, o ateityje prognozuojamas nuo 5,6 iki 10,2 % kelionių skaičių augimas [1]. Kasmet dronų rinkai augant 13,8 %, jų panaudojimui vis griežtinami reikalavimai ir priklausomai nuo dydžio ar skridimo vietos, reikalaujama naudoti tuos pačius identifikacijos signalus kaip lėktuvams. Pavyzdžiui JAV informacinio ADS-B signalo siuntimo reikalauja skrendant aukščiau nei 700 m ar esant 55 km atstumu nuo bet kokio oro uosto [2];
- augantis įrenginių su radijo siųstuvais kiekis rinkoje lemia vis didėjančią EM spinduliuotę, kuri išplinta ir į kitus dažnių ruožus, kas daro neigiamą įtaką orlaivių navigacijos signalų dažnių ruožų užterštumui;
- tos pačios navigacijos sistemos naudojamos ir kariniams tikslams – dronų ar raketų skrydžio parametrų ir trajektorijai užtikrinti. Kariniams tikslams naudojamos gynybos priemonės (dažnių ruožo slopinimas) taikomos plačiai, jos veikia ir gretimais dažnių ruožus ir gretimas teritorijas, kuriose nevyksta kariniai veiksmai.

Pasaulyje kylant visa naujiems konfliktams, tokių atvejų daugėja, o taip pat labai aktyviai šis reiškinys stebimas ir pietvakarių Lietuvoje. Nuo Ukrainos invazijos kaimyninės šalys aktyviai slopina GNSS signalus siekiant sustabdyti dronų atakas, bet toks slopinimas patenka ir į Lietuvos teritoriją. Stebimi atvejai, kai kai kuriais laiko tarpais sutrinka civilinių orlaivių pakilimo/nutūpimo procesas dėl nepakankamo vietos nustatymo tikslumo [3].

Visi šie veiksniai pasižymi radijo spektre kaip trikdžiai arba triukšmas, kas pablogina silpnų signalų priėmimo galimybes. Šiai problemai spręsti galima taikyti pažangesnius signalų apdorojimo sprendimus, kurie leistų aptikti komunikacinius signalus esant blogesniai SNR lygiui. Šiame darbe fokusuojamasi į orlaivių automatinės priklausomo stebėjimo-transliavimo sistemos ADS-B signalus. Didelis dėmesys skiriamas paketų atpažinimo sekos – preambulės detektavimo signalų apdorojimo sprendimams, vykdoma egzistuojančių orlaivių navigacijos signalų apdorojimo sprendimų apžvalga ir tyrimas.

Kartu su preambulės aptikimo sprendimų tyrimu siekiama rezultatus pritaikyti ir pasyvaus radaro sistemoje – gebėti nustatyti išsiųsto ADS-B paketo lokaciją pasitelkiant keturių imtuvų sistemą ir trilateracijos skaičiavimą. Darbo metu bus atsižvelgta į preambulės aptikimo metodų įtaką paketo priėmimo laiko nustatymo tikslumui, kas daro didžiausią įtaką lokacijos nustatymo preciziškumui.

Darbo tikslas: ištirti ADS-B paketų preambulių detektavimo ir paketų dekodavimo metodus triukšmingo radijo kanalo sąlygomis bei įvertinti preambulių koreliacinių detektavimo algoritmų atsparumą veikiant triukšmui.

Darbo uždaviniai:

1. apžvelgti orlaivių ADS-B komunikacinių signalų apdorojimo literatūrą, fokusuojantis į aptikimo efektyvumo gerinimo metodus;
2. išrinkti galimus naudoti algoritmus ADS-B signalų detektavimui atlikti. Juos ištestuoti programinėje aplinkoje, įvertinti praktinį jų pritaikymą;
3. apžvelgti skirtingus būdus ADS-B signalo atpažinimui realizuoti. Remiantis mokslinėje literatūroje publikuotais metodais, sukurti ir ištirti ADS-B preambulės detektavimo triukšmingoje aplinkoje algoritmus. Tarpusavyje juos palyginti pagal paketo sėkmingą aptikimą (Packet Error Rate) prie skirtingų signalas – triukšmas (SNR) sąlygų;
4. kompiuterinės simuliacijos aplinkoje sintezuoti testavimo ADS-B paketą, kurį signalų generatoriumi ar radijo dažnių siųstuvu SDR platformoje būtų galima perduoti 1,09 GHz dažnių ruože;
5. sukurti programuojamos logikos matricos pagrindu sudarytą ADS-B paketų priėmimo sistemą. Prototipe realizuoti išrinktus signalų apdorojimo algoritmus ir įvertinti jų veikimą realiomis sąlygomis;

1. Apžvalginė dalis

Šiame skyriuje analizuojami moksliniai tyrimai bei kita literatūra susijusi su lėktuvų navigacijos signalais bei jų apdorojimu. Siekiama įvertinti taikomus metodus signalų detektavimui pagerinti triukšmingoje aplinkoje.

1.1. Orlaivių signalų apžvalga

Pirmiausia bus apžvelgiami orlaivių naudojami signalai navigacijai, siekiant išrinkti pagrindinį tyrimo parametrų rinkinį pagal kelis kriterijus. Orlaivių eksploatavimui reikalingos ryšio priemonės naudoja įvairių dažnių radijo signalus, jie pasitelkiami įvairiose kelionės stadijose. Pagrindiniai orlaivių navigacijoje naudojami signalai išvardinti toliau.

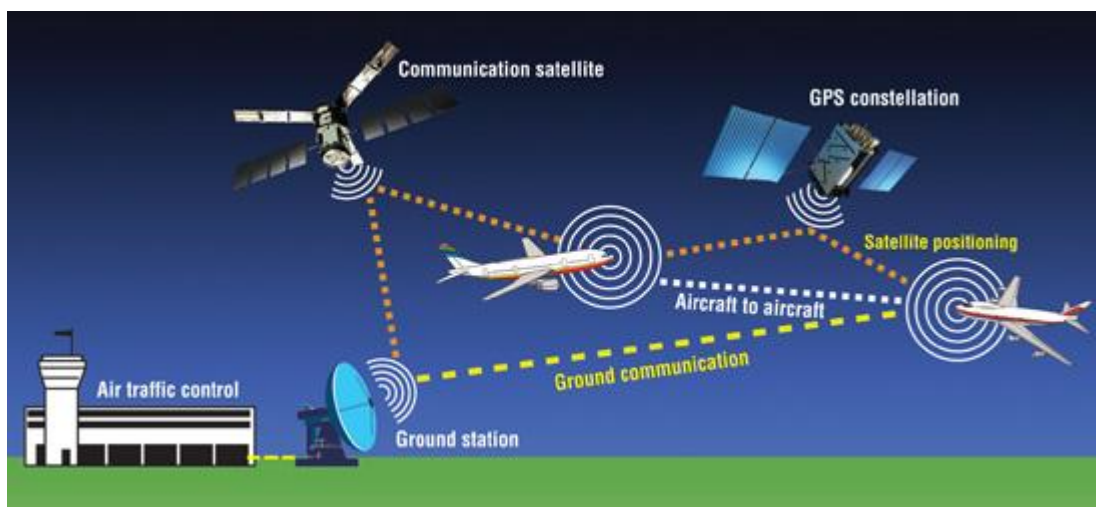
- pozicijos nustatymo – signalai skirti absoliučiai lėktuvo pozicijai nustatyti visos kelionės metu. Dažniausiai naudojami palydovų skleidžiami GNSS signalai žemę pasiekia iš 6 skirtingų žvaigždynų ir yra priimami plačiame dažnių ruože – nuo 1164 iki 1610 MHz. Sėkmingai nuskaičius keturių palydovų siunčiamus signalus galima apskaičiuoti tikslią poziciją bet kurioje žemės vietoje. Taip pat egzistuoja antžeminių stočių alternatyvos kaip DME ar VOR sistemos nusakančios reliatyvią poziciją bei kryptį iki stacionarios stoties. Signalai siunčiami 960 – 1215 MHz dažnių režyje DME [4] ir 108 – 117,95 MHz VOR sistemose [5]. Signalų nuskaitymui reikia turėti tiesioginę matomumo liniją tarp orlaivio ir stoties, todėl efektyvus veikimo atstumas yra ribojamas aplinkinių kliūčių bei žemės išlinkimo ir neviršija 240 – 360 km;

Nusileidimo metu yra dar svarbesnis skridimo krypties tikslumas, todėl plačiai naudojama ILS sistema paskutinei kelionės daliai įveikti. Ji iš antžeminių antenų spinduliuoja porą kryptinių signalų nukreiptų nusileidimo tako tiese. Du 108 – 112 MHz ir 329,15 – 335 MHz dažnių signalai moduluojami ir maišomi taip, kad erdvėje sudarytų signalo moduliacijos skirtumus nukrypęs nuo optimalaus nusileidimo tako trajektorijos, taip informuojant lakūną apie reikalingas krypties korekcijas. Orlaiviai naudojami šia sistema esant nuo 30 kilometrų iki 400 metrų nuo nusileidimo tako arba iki tol kol jis tampa aiškiai matomas akimis [6];

- susidūrimams ore tarp lėktuvų išvengti naudojama TCAS sistema. Naudoja SSR transponderį nustatyti aplinkinių orlaivių reliatyvią poziciją, aptikus galimas susidūrimo sąlygas – automatinio tarpusavio susitarimo tarp lėktuvų principu pilotams teikia rekomendacijas skridimo krypties pakeitimui. Informacijos mainai tarp lėktuvų vykdomi dvejais dažniais: 1030 MHz skirtas apklausai o 1090 MHz - atsakymui;
- identifikaciniai – apklausos arba pastoviu režimu informuoja apie lėktuvo duomenis. Kariniams tikslams naudojamos IFF (angl. *Identification Friend or Foe*) sistemos paremtos kriptografiniais procesais, jų paskirtis - atskirti priešo lėktuvus nuo savų.

Komercinėje erdvėje pastoviai siunčiamos ADS-B žinutės. Jos identifikuoja lėktuvo numerį, skridimo kryptį, greitį, aukštį ir poziciją taip teikiant reikalingą informaciją oro uostų dispečeriams. Dėl moduliacijos ir duomenų kodavimo paprastumo ši sistema yra labai populiari tarp orlaivių sekimo mėgėjų, kurių teikiami duomenys prisideda pvz.: prie atviros prieigos projekto Flightradar24 skirto sekti komerciniams lėktuvams.

Visi išvardinti signalai skirti bendravimui ne tik su antžeminėmis stotimis, bet ir tarp orlaivių. Taip pat į sistemą įeina ir palydovų žvaigždynai, paprasčiausi jų – teikia esamos vietos informaciją, kiti surenka siunčiamų lėktuvų signalus, kas ypač svarbu tokiose vietose, kur antžeminių stočių nėra, pvz.: virš vandenynų.



1 pav. Orlaivių navigacijos signalai ir jų panaudojimas [7]

Visi šie signalai labai svarbūs saugiai lėktuvų kelionei užtikrinti, bet taip pat jie turi ir trūkumų jų aptikimui, kurie yra itin svarbūs šiam tyrimui:

- ILS – sukurta užtikrinti trumpo nuotolio sistemą neskirta tolimai navigacijai, todėl jos stiprumo pilnai užtenka aptikimui kelių kilometrų atstumu nuo oro uosto, bet ne daugiau [8];
- DME, VOR sistemos remiasi antžeminėmis stotimis, todėl jų aprėptis yra stipriai ribojama horizonto ir siekia iki 100 km. [8, 9];
- TCAS ir ADS-B veikia tankiai naudojame 1090 MHz radijo spektre, todėl galimas duomenų paketų, siunčiamų iš kelių lėktuvų vienu metu, persidengimas ir sugadinimas [10];
- GNSS ir ADS-B – siunčiamos iš toli patiria didelį signalo slopinimą atmosferoje ar ties kitais objektais. Abu savo taikinį pasiekia dideliu atstumu – GNSS iš palydovo o ADS-B nuo lėktuvo iki toli esančios antžeminės stoties.

Kaip matoma, kai kurios sistemos turi įgimtų priėmimo atstumo apribojimų savo dizaine ar yra apribojamos horizonto. Kitos – pilnai gali būti naudojamos ir ilgais ir trumpais atstumais, todėl jų pritaikymas stipriai priklauso nuo aplinkos sąlygų ir jas galima gerinti pasitelkus signalų apdorojimo algoritmus.

Iš minėtų sistemų signalo slopinimas nuo išorinių veiksnių pasižymi daugiausia ADS-B, TCAS ir GNSS signaluose, todėl būtent į jų aptikimą bus kreipiamas didžiausias dėmesys.

Šios tiriamos navigacijos sistemos turi daug panašumų - naudoja diskretinius signalus informacijai perduoti ir kadangi duomenys nėra periodiniai, bei erdvėje gali pasirodyti bet koku laiko momentu, jų aptikimui pradžioje yra integruojama fiksuotos formos preambulė. Šios, signalo sinchronizacijai kritiškai svarbios, preambulės informacija yra itin svarbi sėkmingam duomenų atstatymui imtuve.

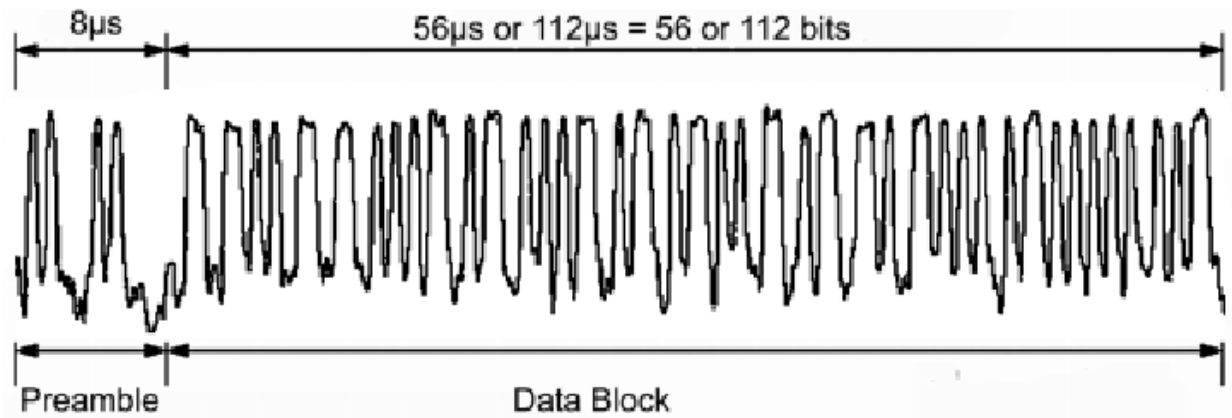
Toliau einančių duomenų masyvas sudarytas iš kelių dalių indikuojančių perdavimo protokolą (ADS-B, TCAS ar kiti), duomenų tipą ir jų vertes.

DF	[Short 56 bits]											Extended [+ 56 bits]			
	[2]	[3]	[8]	[1]	[2]	[3]	[2]	[3]	[1]	[2]	[16]	[13]	[24]	[32]	[24]
0 ACAS	0	0	#	VS	CC	SL		RI			AC		AP		
4 Alt R	0	0	#	FS		DR		UM			AC		AP		
5 ID R	0	0	#	FS		DR		UM			AC		AP		
11 All-Call R	0	1	#	CA				AA					PI		
16 TCAS	1	0	#	VS		SL		RI			AC		MV		AP
17 ES Xpdr	1	0	#	CA				AA					ME		PI
18 ES Non Xpdr	1	0	#	CF				AA					ME		PI
20 Comm-B Alt R	1	0	#	FS		DR		UM			AC		MB		AP
21 Comm-B Id R	1	0	#	FS		DR		UM			ID		MB		AP
24 Comm-D (ELM)	1	1	*	KE		ND							MD		AP

- AA Address announced
- AC Altitude code
- AP Address parity
- CA Capability
- CC Cross-link capability
- CF Control field
- DR Downlink request
- FS Flight status
- ID Identity
- KE Control (ELM)
- MB Message (Comm-B)
- MD Message (Comm-D)
- ME Message (ES)
- MV Message (ACAS)
- ND # D segments
- PI Parity/Identity
- RI Reply information
- SL Sensitivity
- UM Utility message
- VS Vertical status

3 pav. ADS-B paketo duomenų lauko sandaros dalys [13]

Įprastai siunčiamas signalas yra ribojamas iki 2 MHz juostos pločio, todėl aiškūs, diskretūs impulsai yra stipriai paveikiami žemų dažnių filtro ir praranda savo statumą.



4 pav. Apriboto dažnių spektro ADS-B signalo pavyzdys [14]

Pateiktoje iliustracijoje 4 pav. matomas realaus, demoduliuoto ADS-B signalo pavyzdys. Dekodavus signalo simbolius gaunamas duomenų paketas su 3 pav. pavaizduota struktūra. Dekodavus vidinius duomenis gaunama lėktuvo informacija apie jo poziciją, greitį ar kitas savybes. Tokie duomenys yra laisvai prieinami svetainėse kaip Flightradar24 [15], o tyrėjai naudoja nemokamas ir atviras duomenų bazes kaip OpenSky Network [16].

Šiuose internetiniuose resursuose pateikiami jau dekoduoti duomenys ir jų pradiniai paketų baitai. Dėl tokio formato tyrėjai šiuos duomenis naudoja skridimo tendencijų analizei, apsimetinėjimo ar kitų anomalijų detekcijai. Šiems tyrimams užtenka turėti duomenų baitus, bet norint analizuoti aparatinius priėmimo sluoksnius – būtina turėti neapdorotų duomenų masyvus, todėl šio darbo tikslams tokio tipo duomenų bazių duomenys yra netinkami.

Šiame darbe bus analizuojami būtent skirtingi ADS-B priėmimo ir dekodavimo būdai, todėl reikalinga analizuoti signalo fizinę sandarą.

Viena iš pagrindinių signalo atpažinimo dalių – jo preambulė. Ji leidžia imtuvui susisinkronizuoti su siųstuvu ir ateinančiuose etapuose sėkmingai atskirti duomenų bitus vieną nuo kito. ADS-B signalo pavyzdyje (4 pav.) matoma, kad ADS-B preambulę sudaro 8 μ s laiko tarpe išsidėstę keturi impulsai. Ją galima palyginti su kitomis panašiomis technologijomis:

- *WiFi 802.11a* preambulę sudaro irgi 8 μ s, bet joje telpa 10 simbolių po 0,8 μ s [17]. Kiekvienas simbolis atitinka vieną impulsą, todėl gaunama 2,5 karto daugiau aptinkamų signalo ypatybių lyginant su ADS-B;
- *LoRa* – 8 simbolių preambulė, dėl naudojamo dažninio simbolių kodavimo pasireiškia pasikartojančiu dažnių kilimu – dažnių ašyje sudaro pjūklo signalo vaizdą. Kadangi turi varijuojamą greitį – ši 8 impulsų seka gali trukti nuo nepilnos iki kelių dešimčių milisekundžių.

Palyginus ADS-B ir kitų telekomunikacijų signalų preambules matoma, kad ji yra gana paprasta. Turint ilgesnę preambulę galima atlikti patikimesnį, bet sudėtingesnę aptikimą. Pavyzdžiui, turint daugiau simbolių preambulėje aptikimo algoritmas turi žymiai daugiau bruožų signalo atpažinimui, tas pats galioja ir ilgesniam preambulės laikui - atsiradęs trumpas atsitiktinis triukšmo impulsas nesugadins visos preambulės atpažinimo, o tik mažą jos dalį. Algoritmas aptikęs dalinę preambulę gebės iš triukšmo nepaveiktų dalių atstatyti sinchronizaciją.

Preambulės aptikimas yra vienas iš svarbiausių veiksnių nusakant tinkamą duomenų dekodavimo etapą, bet ADS-B preambulės formos paprastumas įneša didelį jautrumą triukšmui. Tai yra didelė problema, kuriai tyrėjai mokslinėse publikacijose ir kituose darbuose siūlo kelis sprendimo algoritmus.

1.3. ADS-B signalo detektavimo algoritmai

Žinant ADS-B signalo ypatybes matoma, kad tokios paprastos formos preambulė yra lengva priimti, bet taip pat ir pamesti triukšmo fone. Šiame skyriuje apžvelgiami pagrindiniai mokslinėje literatūroje aptariami ADS-B aptikimo ir dekodavimo būdai, koncentruojantis į metodų atsparumą bei pritaikymą įvairaus triukšmo aplinkose. Populiariausi metodai yra:

1. įvairūs skaitiniai rodikliai;
2. koreliacija;
3. hibridiniai variantai.

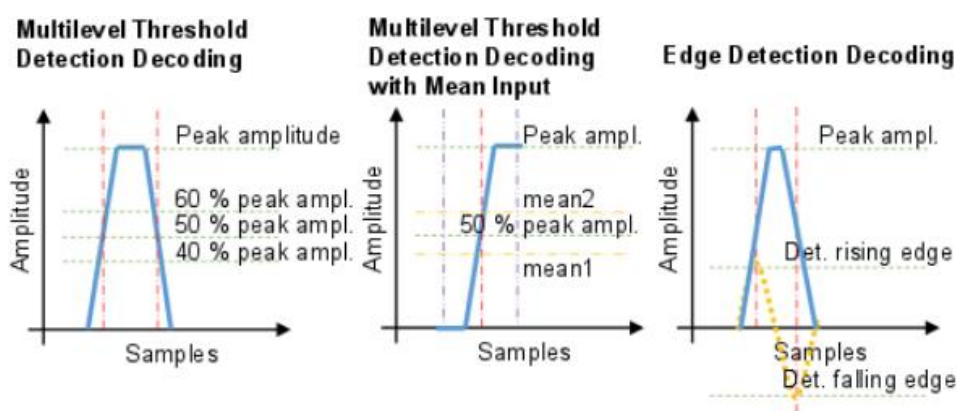
Toliau detaliau bus aptartos kiekvieno metodo ypatybės, jų pritaikomumas, atsparumas ir kiti aspektai, kurie yra svarbūs šiam darbui.

1.3.1. Skaitiniai rodikliai

Skaitiniai rodikliai – įvairių metodų, analizuojančių signalo formą grupė. Jų taikymai neturi bendros krypties – galima analizuoti įvairius amplitudės, laiko postūmio ar signalo fazės bruožus siekiant aptikti paketą, todėl plačiai eksperimentuojama su aptikimo sąlygomis. Dėl šių priežasčių įvairių mokslinių straipsnių apžvelgiami metodai nėra itin panašūs tarpusavyje.

Kadangi preambulę sudaro keturi impulsai – įvairiais būdais bandomas jų aptikimas, o juos suradus vykdomas tarpusavio laiko skirtumų patikrinimas. Svarbiausia sugebėti aptikti reikiamus impulsus ir tai gali būti atlikta keliais būdais:

- frontų detekcija – staigus signalo amplitudės pasikeitimas, kartu aptinkamas ir kylantis ir krentantis frontai taip patikrinant impulsų pločius ir laiko tarpus tarpusavyje [18, 19]. Siekiama, kad signalo pokytis būtų virš $48 \text{ dB}/\mu\text{s}$ tarp dviejų greta esančių atskaitų [20].
- kelios slenkstinės vertės – nuo nustatytos statinės slenkstinės vertės indikuojančios aukštą lygį atidedama 50 % amplitudė, perkopus ją indikuojamas aukštas, žemiau jos – žemas lygis. Taip pat įnešami dar du lygiai – 60 ir 40 % siekiant įvertinti destruktivos ir adityvios interferencijos įtaką [18];
- kelios slenkstinės vertės su vidurkiu – skaičiuojami du slenkamieji vidurkiai, vienas ilgo kitas trumpo laiko tarpo. Kai trumpasis perkopia ilgojo reikšmę – indikuojamas aukštas signalo lygis. Galioja 10 % leistina paklaida norint įvertinti atsitiktinį triukšmą [18].



5 pav. Trijų aptartų impulsų atradimo metodų iliustracijos [18]

Aptikus impulsus ir patikrinus jų laiką tarpusavyje galima spręsti, ar jie atitinka preambulės sandarą ar ne. Vykdam patikrinimą svarbu įvertinti ir impulsų laiko nuokrypį - preambulės impulsų frontus, kurie kartojasi kas $0,5 \mu\text{s}$ siūloma vertinti su $\pm 0,21 \mu\text{s}$ paklaida [18].

Kadangi šie sprendimai nėra itin tikslūs – vykdomi papildomi veiksmai rezultatus priimti arba atmesti:

- aptikto impulso lygis turi būti pastovus viename lygyje su leidžiama $\sim 2 \text{ dB}$ paklaida;

- atradus visus keturius impulsus - tikrinama jų amplitudė. Išvedamas jų vidutinis energijos lygis ir tikrinama ar bent du impulsai patenka į ± 3 dB paklaidos ribas šiam lygiui. Jei taip – atrasta preambulė ir atskaitinis energijos lygis naudojamas tolesniam bitų dekodavimui;
- norint tolesnio patvirtinimo – imami penki duomenų bitai ir tikrinami jų frontai, jei jie randami su ± 1 atskaitos paklaida bei jų aukštų lygių amplitudė nenukrenta žemiau 6 dB atskaitinio lygio – preambulė galutinai patvirtinama [21].

Šie aprašyti metodai skiriasi nuo koreliacijos taikymo, nes remiasi kelių sąlygų išpildymu, kam realizuoti reikalinga sudėtingesnė sistema. Visuose variantuose bandoma realizuoti algoritmus keturių preambulės impulsų atradimui pasinaudojama jų amplitudės lygiu ar frontų statumu kartu pritaikant ir pakartotinį amplitudžių lygių bei impulsų tarpusavio išsidėstymo laiko patikrinimą.

Šių metodų didžiausias privalumas – lengva pridėti papildomų sąlygų pastebėjus galimybę sistemos pagerinimui, bet kartu kyla rizika per daug pritaikyti algoritmą turimiems signalų pavyzdžiams, kurie ne visada gali atitikti kintančias realybės sąlygas.

1.3.2. Koreliacija

Koreliacijos arba suderinto filtro naudojimas (angl. *Matched Filter*) parodo dviejų signalų panašumą.

Koreliacijai apskaičiuoti reikalinga turėti du masyvus – signalo, kurį norime rasti bei signalo, kuriame ieškome panašumo, atskaitų. Kuo signalai panašesni – tuo gaunama įvertinimo vertė yra didesnė. Koreliacijos rezultatas yra tolygus, vien iš pavienių verčių apie signalų panašumą pasakyti negalima, reikalinga koreliacijos vertės interpretuoti laike – ieškoti viršūnių arba iš anksto žinoti koreliacijos vertės amplitudę, kuri patenkintų suformuluotą kriterijų.

Geriausias rezultatas – kai per visą matavimo laiką užfiksuotas vienas koreliacijos vertės šuolis, nes tai reiškia, kad signalas minimaliai panašus į save. Tokiu atveju vieną šuolį lengva užfiksuoti bei tiksliai pasakyti apie panašaus signalo pasirodymą. Realybėje – skaitmeniniai signalai dažnai yra į save panašūs, todėl vienos koreliacijos vertės viršūnės paieškos ap sunkėja, nes per visą signalo matavimo periodą jų galim būti kelios. Tam išspręsti reikalinga padaryti signalo ieškomą dalį kuo nepanašesnę į kitas signalo dalis. Geriausias tokio signalo pavyzdys – atsitiktinis triukšmas, kurį koreliuojant su juo pačiu (darant auto-koreliaciją) signalų panašumas bus indikuotas tik vienoje vietoje. Skaitmeninių signalų atpažinimui padidinti naudojamos įvairūs papildomi požymiai, kaip RLL (angl. *Run-length limited*) kodai.

Paprasčiausias koreliacijos skaičiavimas vykdomas slenkant koreliacijos kaukę ant kito, tiriamo signalo. Kiekvieno žingsnio metu sudedant atskaitų sandaugos vertes jų bendra suma indikuos dviejų signalų panašumo lygį. Išreikšus skaičiavimus formule gaunama:

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t - \tau)dt; \quad (1)$$

čia:

C_{xy} – koreliacijos rezultatas;

x – tiriamas signalas;

y – koreliacijos kaukė;

τ – kaukės poslinkio atskaita.

Koreliacijos skaičiavimą taip pat galima atlikti naudojant Furjė transformaciją. Šiuo atveju naudojamas realus signalas (x) bei laiko ašyje apsuksa koreliacijos kaukė (y_{rev}). Šių dviejų elementų laiko ašies konvoliucija arba dažnių ašies sandauga yra lygi jų koreliacijai [22]:

$$C_{xy}(t) = x(t) * y_{rev}(t); \quad (2)$$

$$C_{xy}(f) = x(f)y_{rev}(f); \quad (3)$$

Toks skaičiavimo būdas gražintų lygiai tokį patį rezultatą, kaip ir kaukės stūmimo per visas signalo atskaitas. Furjė transformacijos skaičiavimas pasižymi geresniu laiko kompleksiškimu – $O(N\log(n))$ prieš $O(N^2)$, bet gali padidinti aparatinių resursų sąnaudas naudojant trumpų sekų analizei [23], kas ypač svarbu įterptinių sistemų taikyme.

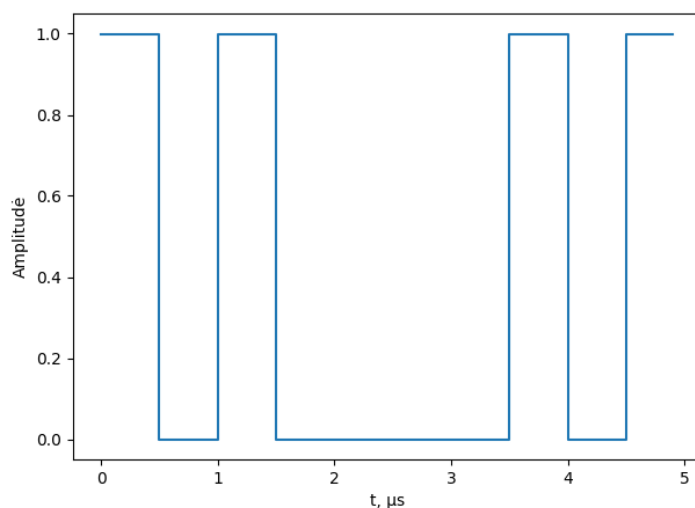
Bet koku būdu skaičiuojant koreliacijos vertes jos savybė parodyti signalų panašumą puikiai tinka preambulės paieškai signale, o nedideli sunaudojami resursai tai leis atlikti realiu laiku. Naudojant šį metodą aktualūs du parametrai:

- koreliuojamos kaukės forma, į kurią įeina jos koeficientai bei jų kiekis. Ji pasako koreliacijos rezultato formą;
- koreliacijos slenkstinė vertė. Turint tik koreliacijos rezultato formą negalima tiksliai pasakyti, kur priimta preambulė. Tam reikalinga vertė, kurią koreliacijos skaičiavimo rezultatui perlipus galima teigti, kad priimtas ieškomas signalas.

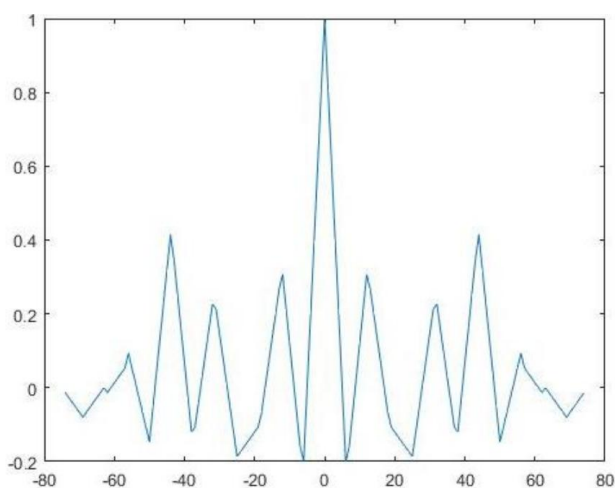
Šie du dydžiai apsprendžia visą sistemos veikimą, kartu ir triukšmo daromą įtaką, todėl analizuojant kaukės formą bei slenkstinės vertės nustatymą galima susidaryti geresnį vaizdą apie metodo ypatybes.

1.3.3. Koreliacijos kaukės forma

Pats intuityviausias ir paprasčiausias sprendimas - taikyti idealios 5 μ s ADS-B preambulės formos kaukę, kuri prasideda ties pirmu ir pasibaigia ties ketvirtu preambulės impulsu.



6 pav. Idealios formos preambulės grafikas



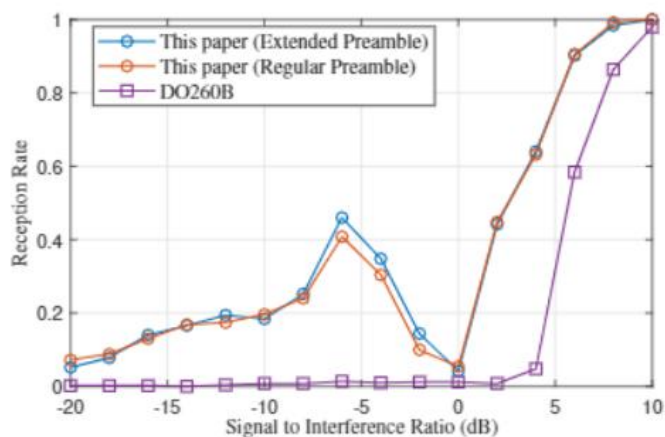
7 pav. Idealios preambulės autokoreliacijos rezultatas [24]

2.2 skyriuje bus aptarta, kad idealios preambulės formos kaukė – neefektyvi, nes lengvai pasiduoda atsitiktiniams triukšmo impulsams. Prie mažų SNR reikšmių pasireiškia mažas skirtumas tarp triukšmo ir naudingo signalo generuojamo rezultato. Kadangi koreliacijos skaičiavimas yra signalo energijos įvertinimas – turint ilgesnę kaukę ir panaudojant ilgesnį signalo tarpą gaunamos didesnės reikšmės, taip padidinant dinaminį diapazoną ir palengvinant koreliacijos skaičiavimo maksimumo aptikimą.

Kaukės ilgį galima padidinti dvejais būdais:

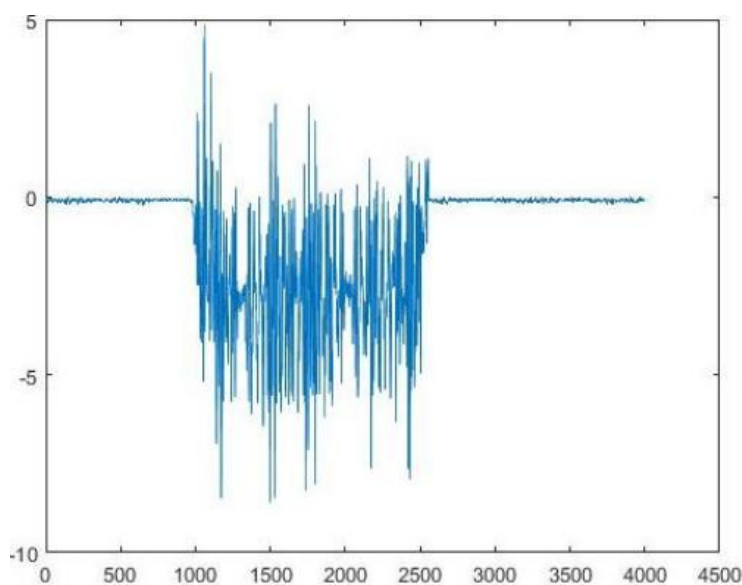
1. įskaičiuojant duomenų bitus. Tai yra galimas variantas, siūlomas publikacijoje [25], kadangi pirmi penki duomenų bloko bitai nusako duomenų formatą, o jis parodo, kokio tipo žinutė siunčiama (žr. 3 pav.). Skirtingos vertės paskirsto žinutes į kelias kategorijas: antžeminių stočių išsiųstų apklausų atsakymus arba savavališkas *ADS-B Out* transliacijas. Nors visos iš jų siunčiamos iš lėktuvo ir gali pasakyti apie jo egzistavimą artimoje erdvėje, bet tik paskutinio tipo yra aktualiausios, kadangi perduoda daugiausia informacijos ir yra siunčiamos reguliariai.

Dėl tokios priežasties dalis tyrėjų praplečia koreliacijos kaukes aptikti tik *ADS-B Out* atsakus, kuriuose penki DF bitai visada bus 10001 [25]. Taip preambulė laike išplečiama virš dviejų kartų iki 13 μ s lyginant su pradiniu 5 μ s kaukės variantu. Daugiau duomenų duoda patikimesnį rezultatą, sumažinama triukšmo įtaka, galima tikėtis iki 20 % MTL pagerėjimo – signalo lygio kai sėkmingai aptinkama 90 % visų paketų [26]. Kituose tyrimuose pastebimas geresnis priėmimo efektyvumas prie neigiamų SNR atvejų – šiuo atveju efektyvumas kyla iki 6% [25].



8 pav. ADS-B sėkmingo paketų priėmimo koeficientas lyginant DO260B standarto aprašytą metodą bei išplėstą ir įprastą preambulės [25].

- tuščių koeficientų pakeitimas neigiamais. Šis būdas gali būti taikomas ir idealios kaukės modifikacijai bei jos prailginimui. Tai reiškia kai nesitikima signalo – koreliacijos koeficientai iš 0 virsta į -1. Toks sprendimas neignoruoja atskaitų o neigiamai vertina bet kokią amplitudę atsiradusią tarpuose tarp preambulės impulsų. Taip į koreliacijos rezultatą įskaičiuojama daugiau atskaitų nei naudojant bazinį variantą – iš signalo nuskaitoma daugiau energijos informacijos leidžiant padidinti skaičiavimų rezultato kontrastą tarp ieškomo signalo sutapimo ir kitų laiko tarpų [24, 27].



9 pav. Neigiamų koeficientų kaukės koreliacijos rezultato forma [24]

Neigiamų koeficientų įvedimas išdanko koreliacijos rezultato formą, kadangi vertės gali būti neigiamos stipraus triukšmo atveju, todėl reikia į tai atkreipti dėmesį slenkstinės vertės nustatymui, kuris gali reikalauti sudėtingesnių skaičiavimų ir daugiau resursų [27].

Nors prailgintos kaukės geriau reaguoja mažų signalo lygių aplinkoje, bet sąlygoms gerėjant skirtumas su idealia preambule krenta. Galų gale ilgesnių ir įmantresnių kaukių naudojimas neparodo matomų privalumų o žiūrint į aparatinę įrangą tik pasunkina skaičiavimus bei reikalauja daugiau resursų [19].

1.3.4. Preambulės aptikimo koreliacija slenkstinė vertė

Slenkstinė vertė skirta nusakyti, kada koreliacijos būdu buvo atrastas ieškomas signalas.

Vienas iš paprasčiausių sprendimų – statinė slenkstinė vertė, kuri nekinta. Tai duoda panaudojimo lengvumo, nereikalingi papildomi skaičiavimai. Didžiausia problema - sunku statinę vertę pritaikyti skirtingų signalų stiprumams, kadangi ji turi būti ne per žema, kad nepriimtų triukšmo, bet ir ne per aukšta, kad visiškai nepriimtų silpnesnių signalų.

Kadangi koreliacijos vertė priklauso nuo priimamo signalo lygio, siūloma susieti šiuos du dydžius tarpusavyje įvertinant naudingo signalo energiją. Adaptyvus nustatymas gali remtis keliais žingsniais:

1. prieš įtaiso veikimą įrašomas ilgas duomenų masyvas ir iš jo nustatomas vidutinis triukšmo lygis;
2. pagal jį nustatoma signalo atpažinimo slenkstinė vertė, kuri gali būti iki 10 kartų didesnė už triukšmo generuojamas vertes [24].

Toks adaptyvus sprendimas gali pasižymėti geresniu veikimu skirtingomis triukšmo sąlygomis.

Apibendrinant, gauti geriausią rezultatą koreliacijos skaičiavimu keičiami du pagrindiniai parametrai: koreliacijos kaukės forma bei slenkstinė vertė. Keičiant koreliacijos kaukės formą o kartu ir ilgį siekiama gauti didesnę koreliacijos skaičiavimų rezultato vertę ties ieškamu signalu, o slenkstinę vertę bandoma pritaikyti, kad ji patikimai parodytų aptikto signalo vietas, bet kartu ir sumažintų netikrų atpažinimų (angl. *False Positive*) skaičių.

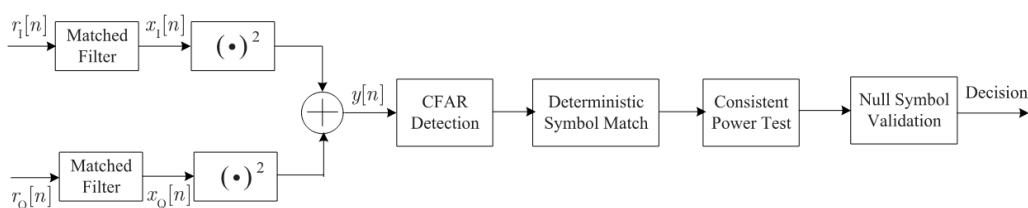
1.3.5. Hibridiniai variantai

Galimas ir koreliacijos bei skaitinių metodų panaudojimas vienu metu. Dažniausiai taikomas koreliacijos skaičiavimu gauto rezultato patvirtinimas papildomai patikrinant impulsų amplitudės panašumą ar frontų laikus.

Kitas metodas, paremtas koreliacijos skaičiavimu – CFAR (angl. *Constant False Alarm Rate*). Tai - adaptyvus algoritmas, naudojamas radaruose aptikti signalo atspindžius triukšmo ar stiprios interferencijos sąlygomis [28]. Šis metodas puikiai tinka ir ADS-B signalo atveju, kadangi irgi bandoma aptikti signalą didelio triukšmo aplinkoje.

Egzistuoja keli CFAR metodai ir visų jų esmė – įvertinti foninio triukšmo įtaką. Tai yra vykdoma koreliacijos skaičiavimo metu, kai apdorojant atskaitą kartu yra įvertinamos gretutinės signalo vertės. Išrinktos šalia esančios signalo amplitudės vertės apytikriai įvertina triukšmo lygį, kurį žinant galima nusakyti koreliacijos aptikimo slenkstinės vertės dydį.

Vienas mokslinis straipsnis [29] šį metodą pritaiko ADS-B signalo atvejui ir pateikia naudotą signalo nuskaitymo schemą bei apdorojimo algoritmą:



10 pav. CFAR algoritmo pritaikyto ADS-B signalui aptikti diagrama su papildomais impulsų galios patikrinimais [29]

Algoritmo esmė – nustatyti interferencijos lygį ir pagal jį spręsti apie naudingo signalo egzistavimą. Algoritmo aprašymas pateikiamas toliau.

1. skaičiuojama koreliacija ir laiko momente gaunama vertė k_0 , kuri ieškomo signalo aptikimo atveju būtų aukščiausias grafiko taškas;
2. imamos penkios kitos atskaitos, kurios pagal idealią preambulės koreliacijos rezultato formą turėtų būti minimumai (žr. 11 pav.);
3. skaičiuojama testavimo statistika T , kuriai perkopus statinį laiptelį – indikuojamas preambulės priėmimas [29]:

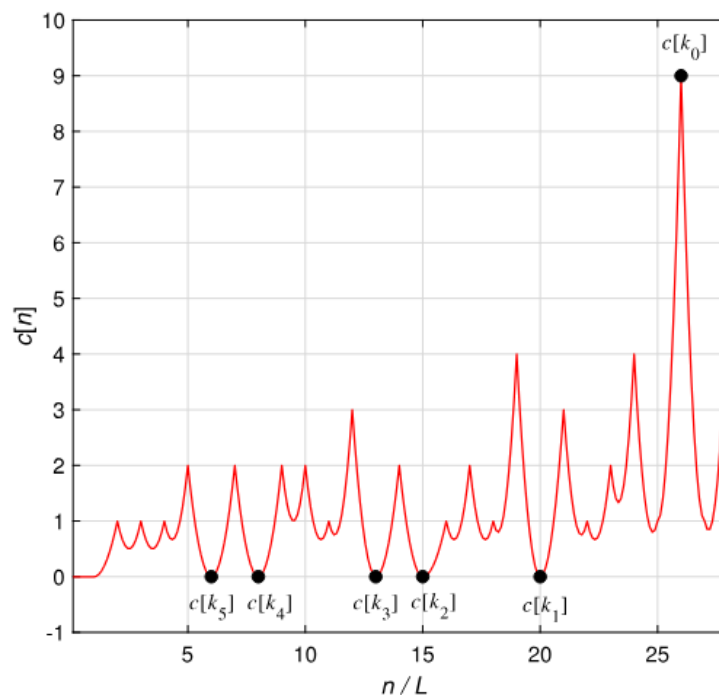
$$T = \frac{c[k_0]}{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 c[k_i]}; \quad (4)$$

čia:

$c[k_i]$ – iš koreliacijos rezultato paimtos penkios žemiausios amplitudės vertės (žr. 11 pav.);

$c[k_0]$ – paskutinė apskaičiuota koreliacijos vertė (žr. 11 pav.).

Šis skaičiavimo būdas ne tik įvertina pagrindinės koreliacijos viršūnės amplitudę, bet ir minimumo taškus, kurie atstoja triukšmo ir interferencijų lygį. Signalas bus laikomas aptiktu tik jei koreliacijos vertė bus fiksuotu dydžiu didesnė už triukšmą, kuris yra įvertinamas nuolat su naujomis atskaitomis, o ne vieną kartą įrenginiui įsijungiant.



11 pav. CFAR algoritmu imami koreliacijos taškai [28]

Hibridiniai variantai dažnai naudojami, kai koreliaciniu metodu aptinkama preambulė, o skaitiniais – frontų detekcija, kelių slenkstinių verčių metodai skiriami individualių bitų dekodavimui [18].

Įvairūs iš aptartų metodų – skaitinių ir koreliacijos taip pat turi galimybę prisidėti prie klaidų korekcijos efektyvinimo. Sekant ir duomenų bitų amplitudės vertes išrenkami bitai su mažiausiu patikimumu – mažiausia koreliacijos reikšme, mažiausiomis amplitudėmis ar blogais signalo lygiais, jei naudojami slenkstinių verčių metodai [20]. Jei iš siunčiamo paketo CRC kodo detektuojama klaida – keičiant po vieną iš šių išrinktų bitų galima perskaičiuoti CRC, tikintis sėkmingo rezultato. Lyginant su atsitiktiniu klaidų taisymo metodu (angl. *brute force*) toks procesas efektyviau aptinka ir ištaiso bitų aptikimo klaidas [24].

Literatūroje taip pat plačiai aptariami būdai sumažinti FRUIT (angl. *False Replies Uncorrelated In Time*) interferencijos įtaką. Tai įvyksta kai kanalas daug naudojamas ir keli paketai transliuojami vienu metu ir persidengimo tarpe negalima teisingai dekoduoti duomenų. Šiai problemai spręsti reikia atskirti du signalus (paketus) vieną nuo kito taip atgaunant abiejų arba bent vieno pilną duomenų seką.

Vieni tyrėjai siūlo naudoti kelių antenų sistemą panaudojant principinių komponentų analizę – PCA (angl. *Principal Component Analysis*). Ši sistema priima signalą su keliais nepriklausomais persidengusiais ADS-B paketais, turint kelias kopijas iš skirtingų antenų apskaičiuojama kovariacijos matrica. Panaudojant PCA algoritmą atsižvelgiama į signalų panašumą ir mažiausiai panašios dalys yra išskaidomos į skirtingas matricos eilutes, kurios atstoja atskirtus signalus. Šis metodas nuo kitų daugiakanalių sistemų skiriasi tuo, kad jam nereikalinga „žinoti“ apie signalo priėmimo kryptį ar lėktuvo poziciją taip palengvinant sistemos integraciją. Lyginant DO-260B standarto siūlomą sprendimą su PCA algoritmu gaunama dvigubai daugiau sėkmingai atskirtų signalų [30].

Kiti tyrėjai siūlo naudoti nepriklausomų komponentų analizę – ICA (angl. *Independent Component Analysis*), kuri atskiria signalo komponentes. Ji vykdoma cikliniu procesu, kai naudojant netiesinę funkciją, siekiama sukurti atskyrimo matricą, kuri išryškintų pradinio sumaišyto signalo nukrypimus nuo standartinio skirstinio pasiskirstymo. Per kelis etapus gaunami atskirti ADS-B signalai turintys mažiausią statistinę priklausomybę vienas kitam [31]. Taip gavus du signalus, galima jiems abiem taikyti pasirinktą detektavimo algoritmą. Kaip ir PCA taikymui nereikalinga žinoti signalo sklaidimo krypties ir turint bent 1.5 μ s nepersidengusio signalo, jau gaunamas atskyrimo efektyvumas virš 90 % prie 20 dB SNR bei apie 50 %, kai SNR nukrenta iki 12 dB [31].

Svarbu paminėti ir dirbtinio intelekto pritaikymą ADS-B signalų apdorojimo sferoje, jis daugiausia naudojamas signalų klasifikavime – signalų priskyrimui atskiriems lėktuvams. DI taip pat gali būti taikomas ADS-B paketo atskyrimui nuo kitų panašių signalų tame pačiame dažnių ruože, kaip pavyzdžiui ACARS [32].

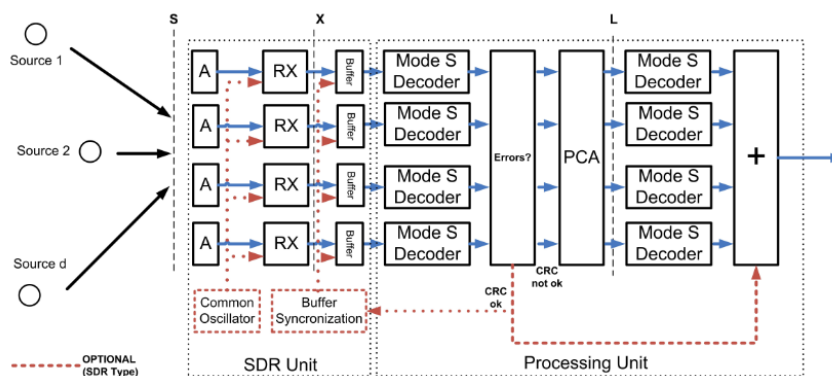
Susieti ADS-B ar kokį kitą signalą su jo siuntėju svarbu ir iš saugumo perspektyvos – dėl nešifruotų duomenų lengvai galima „apgauti“ imtuvą, imituojant realaus lėktuvo siunčiamą signalą. Tam vykdoma siunčiamo signalo analizė ir koncentruojamasi į siųstuvo specifinius bruožus – dažninius ir laikinius nukrypimus. Kadangi šiuos bruožus sunku įvertinti, skaičiavimui pasitelkiami neuroniniai tinklai. Viename tyrime [33] pateikiama vienos dimensijos neuroninio tinklo struktūra, kuri iš signalui apskaičiuotos Furjė transformacijos geba išrinkti atskiras signalų savybes ir jas priskirti individualiems lėktuvams. Bandymai vykdomi klausantis nuo 10 iki 50 lėktuvų signalų vienu metu ir geriausi rezultatai siekia 97 % tikslumą [33]. Teigiama, kad šis sprendimas geresnis už alternatyvius skaitinius metodus, kadangi atpažinimo tikslumas krenta mažiausiai pridėdant daugiau skirtingų orlaivių [33].

1.4. Aparatiniai sprendimai

Apžvelgus literatūros šaltinius ADS-B signalo detektavimo algoritmams prieš pereinant prie tolesnio tyrimo svarbu įvertinti, kokia aparatinės įrangos konfigūracija bus vykdomas praktinis tyrimas.

Pagal atliktą mokslinių šaltinių analizę, galima pastebėti, kad daugiausiai sutinkami du variantai:

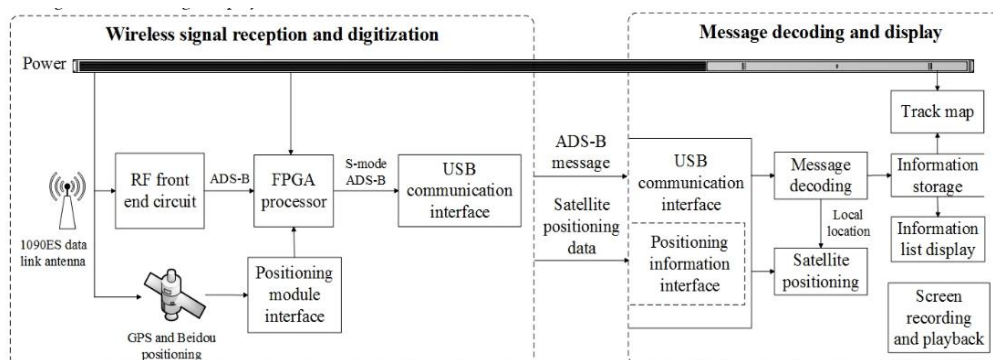
1. programuojamas radijo imtuvas (angl. *Software Defined Radio*) – populiariausias sprendimas dėl panaudojimo paprastumo ir integruotumo. Rinkoje platus įrenginių ir jų bibliotekų skirtų ADS-B signalo apdorojimui pasirinkimas, o skirtingiems apdorojimo algoritmų taikymams gali būti panaudojami dideli (lyginant su įterptinėmis sistemomis) kompiuterio resursai.



12 pav. SDR imtuvo pavyzdinė struktūrinė diagrama [34]

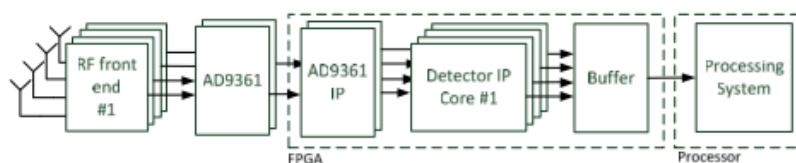
Vienintelis trūkumas – sistema neveikia realiu laiku, todėl negalima taikyti pasyvaus radaro pritaikymams, kuriems reikalinga tiksliai žinoti laiko atskaitą;

2. Įterptinės sistemos – paremtos mikrovaldiklių ar programuojamų loginių matricių panaudojimu.



13 pav. Įterptinių sistemų ADS-B imtuvo pavyzdinės struktūrinė diagrama [35]

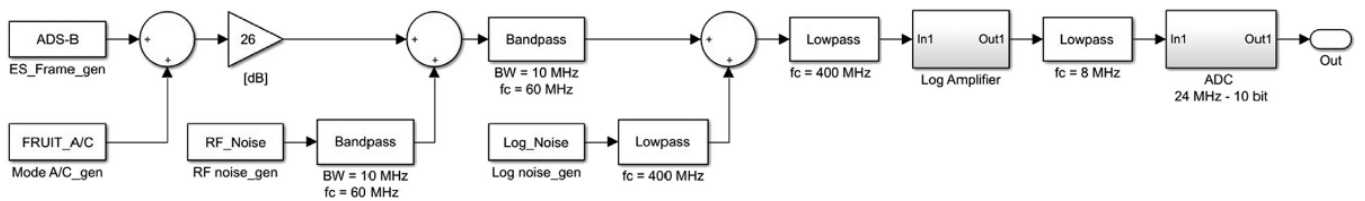
Mažiau populiarus sprendimas, bet turi didelį privalumą – gali būti panaudoti realaus laiko sistemoje, kuri leistų nustatyti tikslų priimtų paketų priėmimo laiką bei taip realizuoti pasyvaus radaro funkcionalumą. Didžiausias trūkumas, kad didelis vystymo laikas – reikalinga realizuoti RF grandines, programuoti procesorių ar programuojamos logikos matricią, kas dėl sudėtingų aparatinės įrangos aprašymo kalbų reikalauja dar daugiau kaštų. SDR šiuo atveju reikalingas tik kompiuteris ir žinios įprastose programavimo kalbose.



14 pav. FPGA pagrįsto ADS-B imtuvo pavyzdinė struktūrinė diagrama [36]

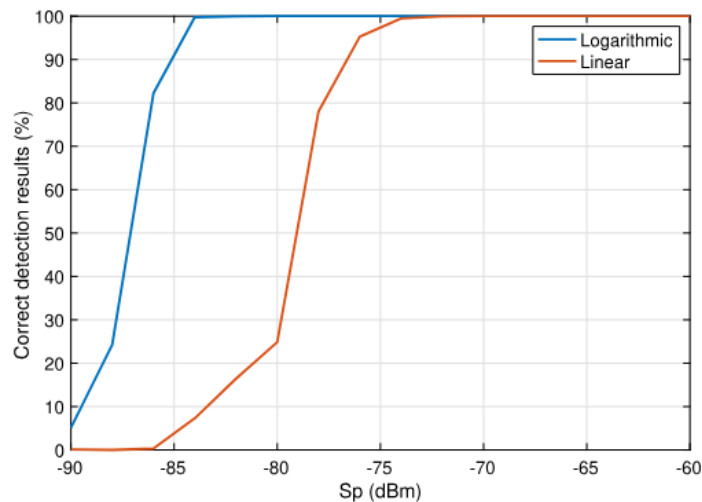
Turint šių dviejų sprendimų skirtumus matoma, kad įterptinių sistemų panaudojimas pasižymi lėtesniu išpildymo laiku, bet kartu duoda daugiau funkcijų. Jei būtų naudojamas šis sprendimas, tektų papildomai realizuoti ir radijo dažnių apdorojimo grandinę. SDR imtuvų panaudojimas apsiribotų tinkamos programos sudarymu, kadangi aparatinė dalis nmodifikuojama.

ADS-B signalo demoduliavimui atlikti dažniausiai naudojami galios detektoriai. Šie komponentai gali būti dviejų tipų: tiesiniai ir logaritminiai. Norint išrinkti geriausią galios detektoriaus tipą panaudojami aptarto tyrimo, analizuojančio pažangias ADS-B priėmimo technikas didelės interferencijos aplinkose, rezultatai [20]. Šiame tyrime, atliekant koreliacijos skaičiavimo sistemos analizę, kartu analizuojama tiesinių ir logaritminių galios detektorių įtaka aptikimo rezultatui.



15 pav. Logaritminio detektoriaus analizės schema su simuliuotais signalais [20]

Iėjimo duomenys – priimamas ADS-B signalas turi daug interferencijos su kitais duomenų paketais. Tiriama duomenys, kuriuose kiekvieną ADS-B paketą vidutiniškai perdenigia 5 FRUIT signalai, o interferuojančių paketų siuntimo dažnis siekia 40000 FRUIT/s greitį. Rezultatai konstatuoja, kad didinant naudingo paketo signalo lygį ir tiesinio, ir logaritminio detektoriaus sistemų nustatymo patikimumas didėja. Nors abiejų detektorių aptikimo patikimumo tendencija tokia pati, bet vienas nuo kito jie skiriasi MTL lygiu – logaritminis detektorius 90 % paketų aptikimo lygį pasiekia esant 10 dB mažesnio signalo lygiui lyginant su tiesiniu demoduliatoriumi [20].



16 pav. ADS-B preambulės atradimo patikimumas didinant naudingo signalo lygį (Sp) [20]

Nors naudotas tas pats detektavimo algoritmas, bet 10 dB aptikimo lygio skirtumas tarp rezultatų paaškinamas gauta signalo forma - logaritminis detektorius greičiau reaguoja į signalo pasikeitimą, todėl preambulės impulsai gaunami statesni ir glotnesni kas lemia patikimesnį jų nustatymą [20]. Šis demoduliacijos procesų skirtumas parodo, kad koreliacijai taikyti svarbus ne vien pasirinktas algoritmas, bet ir visa imtuvo radijo dažnių grandinė, todėl į tai būtina atsižvelgti praktinių tyrimų dalyje.

Apibendrinant apžvalginę dalį – aptartos kelios lėktuvų navigacijoje naudojamos sistemos akcentuojant jų pritaikymo sritį bei naudojamų signalų ypatybes.

Apžvelgta ADS-B sistema, pagrindinių tyrimų kryptys bei signalo sandara. Iš apžvalgos nustatyta, kad ADS-B signalai yra plačiai naudojami bei susiduria su didele slopinimo bei signalo lygio nepastovumo problema, kuri paveikia visas panašias skaitmenines komunikacijos sistemas. Atkreiptas dėmesys į ADS-B signalo struktūrą – preambulės keturių impulsų seką bei ribotą dažnių diapazoną (2 MHz juostos plotis). Toliau remiantis moksliniais darbais išnagrinėtos trys ADS-B signalo preambulės aptikimo metodų kryptys: skaitinių metodų taikymas, koreliacijos skaičiavimas bei hibridiniai variantai.

Skaitinių metodų dalyje apžvelgtos algoritmų dalys, kurios remiasi įtampų lygių, impulsų frontų aptikimu bei laiko periodų skaičiavimu. Koreliacijos metodo apžvalgoje išrinktos kelios skirtingos koreliacinės kaukės formos bei koreliacijos skaičiavimo metodai. Hibridiniuose variantuose apžvelgtas CFAR kriterijaus skaičiavimas.

Taip pat išnagrinėti ir keli naudojami aparatiniai sprendimai ADS-B signalui priimti. Aptarta, kad SDR imtuvai yra lengviausiai prieinami dėl savo mažos kainos bei žemo programavimo barjero. Specializuotos įterptinės sistemos pasižymi ilgu aparatinės įrangos tobulinimo etapu, bet taip pat duoda daugiau laisvės realizuoti realaus laiko sistemą. Šiose geriausia naudoti logaritminius detektorius signalui demoduliuoti, jais bus pasiekiamas geresnis frontų aptikimas lyginant su tiesiniais variantais.

2. Metodinė dalis

Apžvelgus ADS-B signalų apdorojimo būdus, pereinama prie tyrimų etapo. Šiame skyriuje pristatomi tyrimo atlikimo metodai, formuojamos hipotezės. Jų pagrindimui atkartojami aprašyti algoritmai, siekiant išnagrinėti jų veikimą bei pasiūlyti savas idėjas. Visi variantai palyginami tarpusavyje išrenkant perspektyviausius sprendimus.

Tyrimo rezultatui pasiekti vykdomi teoriniai skaičiavimai ir modeliavimai, kurių rezultatai perkeliama į aparatinę įrangą. Programuojamoje loginių elementų matricoje vykdomas algoritmų realizavimas bei jų efektyvumo įvertinimas.

2.1. Tyrimo atlikimo metodika

Siekiant palyginti kelis algoritmus tarpusavyje reikia sukurti tyrimų aplinką, kuri pasižymėtų:

- atkartojamumu – tyrimo bandymai nepriklauso nuo pašalinių, nevaldomų veiksnių;
- stabilumu – identišką signalo pavyzdį galima išanalizuoti keliais algoritmais taip gebant jų rezultatus palyginti tarpusavyje.

Turint omenyje pagrindinius aplinkos požymius ji turėtų gebėti:

- siųsti testavimo ADS-B paketą bet kokių laiko momentu;
- lengvai reguliuoti signalo parametrus – triukšmo lygį, naudingo signalo amplitudę;
- sukaupti statistinę informaciją, bandymą kartojant daug kartų.

Šių funkcijų užtikrinimas leis atlikti tikslesnį tyrimą ir pasiekti tinkamus rezultatus – gebėti tinkamai palyginti skirtingus signalų apdorojimo metodus tarpusavyje.

Algoritmų tarpusavio palyginimą galima atlikti tiesiogiai naudojant aparatinę įrangą, bet jos panaudojimas turi ir daug sunkumų – aparatinės įrangos pritaikymas, paruošimas bei pastovus įterptinės sistemos ar SDR imtuvo perprogramavimas užimtų daug laiko. Pasinaudojant kompiuteriniais resursais, dalį eksperimento galima atlikti imituojant aparatinę įrangą kompiuterine simuliacija. Kadangi siekiama bandyti tik skaičiavimo algoritmų įtaką – nėra aktualūs erdvės ar kiti veiksniai, todėl galima apsiriboti paprastais aritmetiniais skaičiavimais *Matlab* ar panašiose aplinkose.

2.1.1. Simuliavimo aplinka

Kompiuterinės simuliacijos aplinka tyrimui atlikti turi būti sukurta ir individualiai pritaikyta šio darbo kryptčiai. Tyrimui atlikti reikalinga, kad simuliacijos aplinka gebėtų atlikti:

- ADS-B signalo sintezavimą – gebėti iš duomenų baidų masyvo sukurti idealios formos ADS-B signalą. Jame turi būti realizuota tinkama preambulės forma, Mančesterio koduotės duomenų masyvas ir automatiškai užpildomas CRC kodas;
- galimybę paketą pakeisti pagal užduotas sąlygas – varijuoti signalo diskretizavimo dažnį, amplitudės raišką, triukšmo lygį, amplitudę. Šiuos parametrus pritaikyti prie ateityje naudojamos aparatinės įrangos specifikacijų norint tiksliau atkartoti rezultatus;

- detektoriaus blokas – galimybė sugeneruotam signalui pritaikyti pasirinktą detektavimo algoritmą. Šis algoritmas turėtų veikti realaus laiko sistemos principu – analizuoti signalą kas atskaita ir atlikti skaičiavimus tik iš anksčiau buvusių atskaitų neįvertinant viso signalo;
- statistinių duomenų sukaupimas – galimybė sintezės ir detektavimo procesus automatiškai kartoti daug kartų taip išbandant algoritmus esant skirtingiems triukšmo išsidėstymams ir / arba skirtingų parametrų konfigūracijoms. Bandymų metu reikia išsaugoti tam tikrus pasisekimo kriterijų rezultatus ar kitas signalų ypatybes;
- vizualizavimas – detektavimo ir kitų rezultatų išvedimas grafiniu pavidalu siekiant palengvinti metodų pirminį palyginimą tarpusavyje;
- rezultatų eksportavimas – galimybė išsaugoti surinktus duomenis ir grafikus vėlesniam panaudojimui.

Sudarant šią programinę aplinką reikia atkreipti dėmesį į tai, kad kitame tyrimo etape algoritmai bus išbandyti realioje aparatinėje įrangoje siekiant įvertinti jų pritaikymą realiomis sąlygomis, todėl reikalinga pritaikyti jau turimas tokios sistemos specifikacijas:

- diskretizuoto signalo amplitudės kvantavimo raiška – iki 10 bitų;
- diskretizavimo dažnis – iki 100 MHz. Siekiant suvaldyti duomenų srautą pagrindiniame apdorojimo įrenginyje, programuojamų loginių elementų matricoje, pasirenkama naudoti 10 MHz diskretizavimo dažnį, duodantį 10 atskaitų per bitą arba 5 atskaitas per Mančesterio koduotės fazę.

Diskretizavimo dažnio nustatymą į 10 MHz lemia resursų sąnaudos, didesnis diskretizavimo dažnis generuoja daugiau signalo atskaitų, kurias reikia saugoti atmintyje bei apdoroti. Naudojama programuojamų loginių elementų matrica turi ribotus resursus. Joje, be signalo nuskaitymo grandinės turi tilpti komunikacijos tvarkyklės bei pasyvaus radaro elementai skirti tikslios laiko bazės užtikrinimui. 10 MHz diskretizavimo dažnis taip pat duos 100 ns ADS-B paketo nuskaitymo laiko rezoliuciją, kuri svarbi aukštam trilateracijos skaičiavimo tikslumui užtikrinti;

- demoduluotas signalas – skaitmeniniu filtru apribota 2 MHz pločio dažnio juosta.

Šiuos reikalavimus įvykdyti galima keliose aplinkose.

- su SDR imtuvais dažnai naudojama *GNU Radio* aplinka leidžianti simuliuoti imtuvo duomenis juos skaitant iš failo ar integruotos Python programos. Taip pat randama atskirų projektų duodančių paruoštas ADS-B sintezavimo funkcijas [37];
- *Python* programavimo kalba plačiai taikoma įvairiems uždaviniams spręsti ir kartu gali būti pritaikyta signalams analizuoti. Šia kryptimi įvairiuose internetiniuose šaltiniuose yra prieinama daug literatūros ir kodo pavyzdžių. Pasitelkiamos bibliotekos kaip *numpy* ir *scipy* vykdyti matematinius veiksmus ir skaičiavimus, *crc* automatiniam klaidų kodui generuoti. Taip pat prieinamos bibliotekos kaip *pyModeS* skirtos pilnam ADS-B funkcijų paketui realizuoti – duomenų sekai dekoduoti, CRC patikrinimui ir generavimui, taip pat ir realių signalų priėmimui iš išorinio šaltinio;

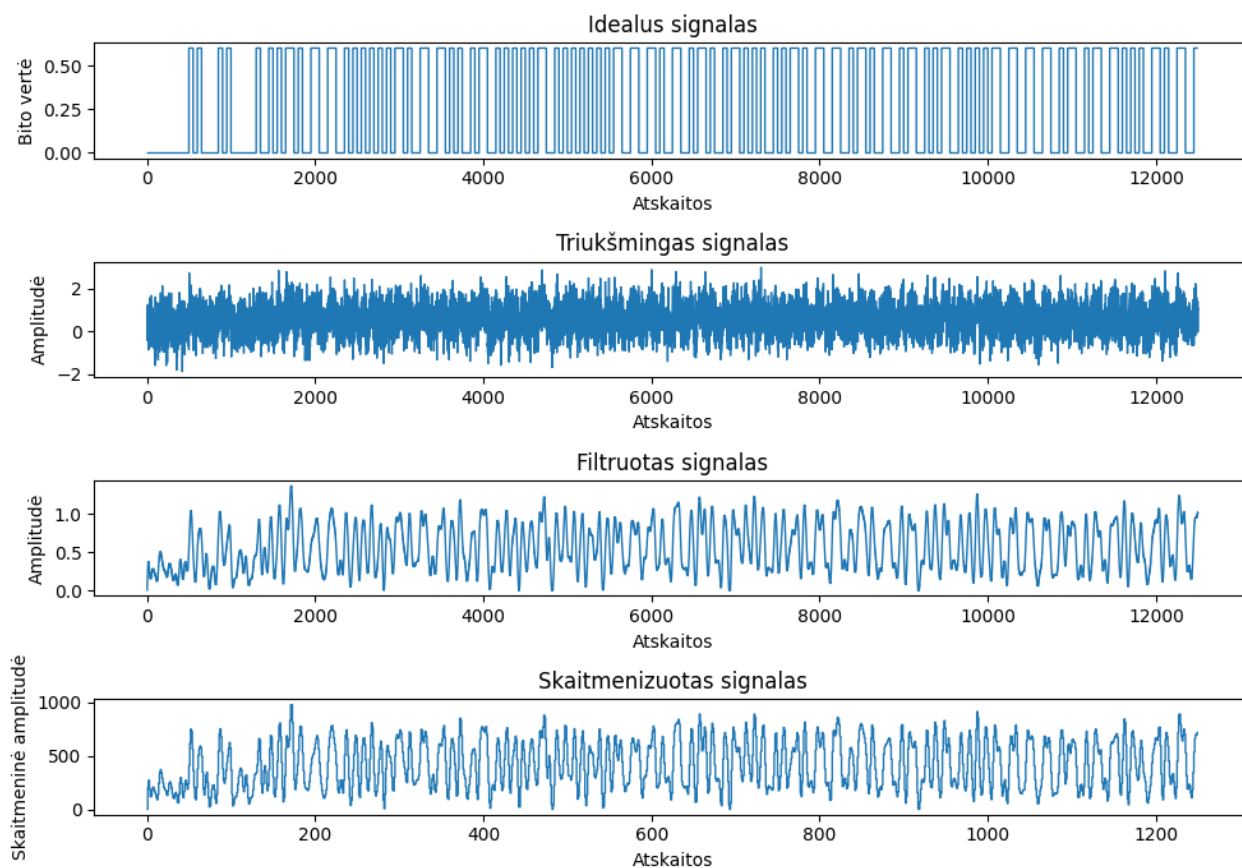
- *Matlab* – viena populiariausių aplinkų moksliniams skaičiavimams atlikti. *Matlab* integruoja specifinę programavimo kalbą, kurios privalumas – daug integruotų funkcijų aritmetiniams, matricų bei kitiems skaičiavimams atlikti. Interaktyvios funkcijos leidžia lengvai skaičiavimų rezultatus pateikti grafiškai. *Matlab* taip pat turi daug specializuotų įrankių įvairioms užduotims atlikti: elektrinių filtrų koeficientams skaičiuoti, nustatyti radijo dažnių moduliacijų perdavimo limitus ar tiesiogiai konvertuoti kodą į aparatinį elementų aprašymą programuojamų loginių elementų matricoms programuoti.

Analizę galima daryti bet kurioje iš šių aplinkų, šiame darbe pasirinkta naudoti Python su minėtų bibliotekų katalogu. Sprendimas padarytas dėl darbo autoriaus turimos patirties dirbant su Python programavimo kalba ir aplinka bei taip pat dėl to, kad ADS-B paketų tyrimams atlikti egzistuoja daugiausia resursų Python aplinkai.

2.1.2. ADS-B signalo simuliacija

Turint pradinį reikalavimą, pereinama prie ADS-B paketo sintezavimo. Šis procesas atliekamas pagal sekančią eilės tvarką.

1. pagal pavyzdį sudaromas 14 duomenų baitų masyvas [38], apskaičiuojamas ir eilės gale įrašomas CRC kodas;
2. pagal turimas vertes sudaroma idealaus ADS-B signalo reprezentacija amplitudėje 0–1. Pirma, signalas sudaromas aukštesniame diskretizavimo dažnyje, kad būtų galima tiksliau pritaikyti triukšmą bei tolesnį filtravimą. Tam pasirenkama signalą diskretizuoti 100 MHz dažniu, kas yra 10 kartų daugiau nei gaunamas galutiniame variante. Tokiu atveju gaunama 100 atskaitų vienam Mančesterio koduote užkoduotam bitui;
3. sugeneruojamas atsitiktinis normaliojo skirstinio triukšmas. Jo amplitudė laisvai keičiama pagal uždavinio reikalavimus. Triukšmas adityviai sumuojamas su idealia signalo reprezentacija;
4. turimas bendras signalas yra filtruojamas 2 MHz žemųjų dažnių filtru imituojant signalo realią formą, kokia būtų gaunama iš aparatinio demoduliatoriaus;
5. turimam signalui įvykdoma decimacija, kai diskretizavimo dažnis sumažinamas nuo 100 iki 10 MHz be jokio verčių vidurkinimo taip prilyginant jį prie aparatinės įrangos galimybių. Signalų amplitudė yra kvantuojama 10 bitų skyra su atskaitiniu 1,4 V lygiu.



17 pav. Sintezuoto pilno ADS-B paketo tarpiniai ir galutinis rezultatas

Viso proceso pabaigoje gaunamas signalas, artimas ADS-B signalui priimamam triukšmingoje aplinkoje realia aparatine įranga.

2.2. Simuliavimas programinėje aplinkoje

Turint galimybę sukurti bet kokios sandaros bei amplitudės signalą pereinama prie išanalizuotų tyrimo metodų pritaikymo dalies.

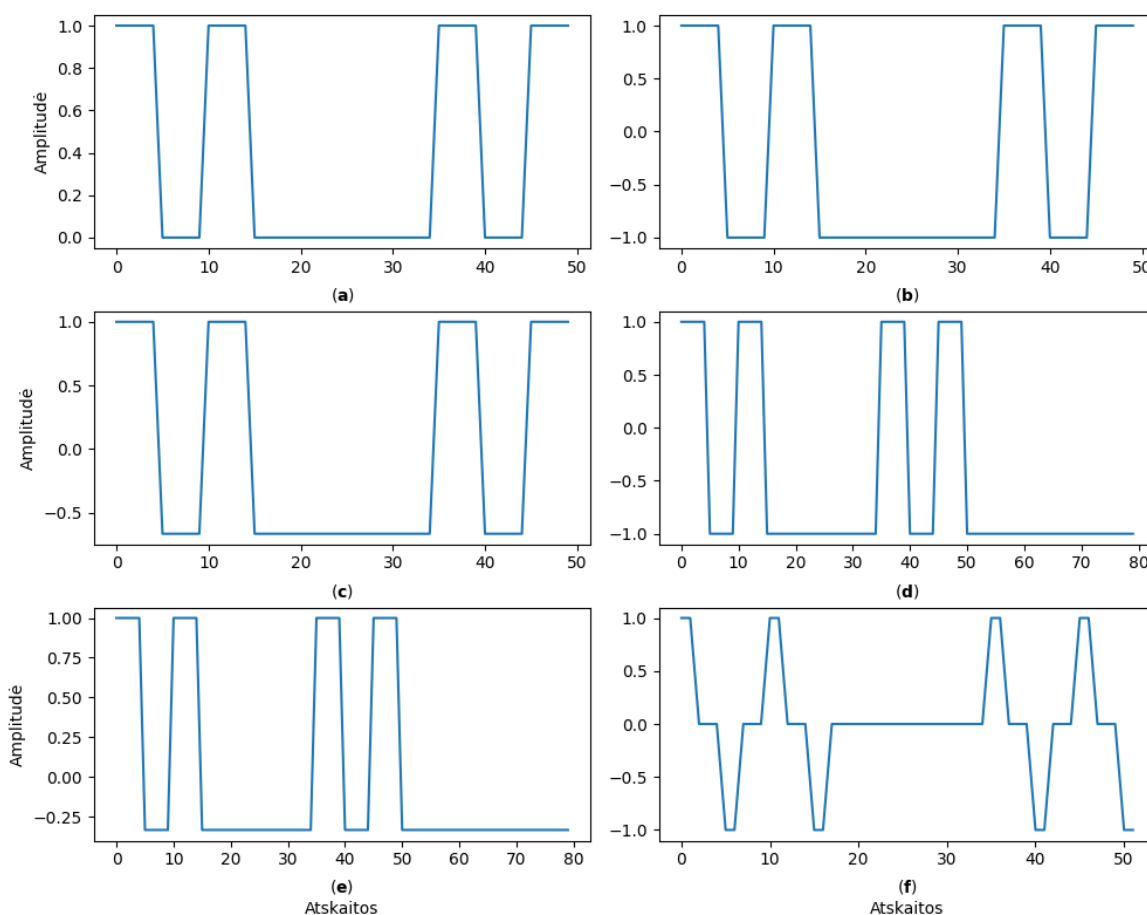
Kaip minėta apžvalgos dalyje – koreliacijos skaičiavimą galima keisti dviem aspektais – kaukės koeficientų kiekiu ir forma bei atskaitiniu lygiu. Pirmiausia išbandomas koeficientų keitimas siekiant įvertinti, kuris iš aptartų bei naujai sugalvotų metodų galėtų duoti geriausius parodymus.

Iš apžvalgos dalies žinomos trys naudojamos koreliacijos kaukių formos: ideali, neigiama ir išplėsta. Taip pat pridedamos darbo autoriaus pasiūlytos normalizuotų kaukių modifikacijos bei diferencijuota kaukė - šios unikalios preambulės koreliacijos kaukių formų idėjos kilo literatūros šaltinių analizės metu ir bus lygiagrečiai analizuojamos su kitomis kaukėmis. Pilnas bandomų koreliacijos kaukių sąrašas pateikiamas toliau.

1. ideali – ideali ADS-B signalo preambulės forma su iš eilės einančiais keturiais Mančesterio koduotės aukšto lygio bitais, kurių dvi poras skiria 2 μ s pauzė. Bendras signalo ilgis 5 μ s;
2. su neigiamais koeficientais – ideali, bet koeficientai „0“ pakeičiami į „-1“;
3. su neigiamais koeficientais normalizuota – antroji kaukės forma turi daugiau neigiamų nei teigiamų koeficientų, todėl teigiama, kad triukšmas daro didesnę įtaką koreliacijos rezultatui

nei naudingas signalas. Neigiamų koeficientų koreliacijos kaukėje yra 30, kai teigiamų tik 20. Padalinus skaičius gaunama, kad norint išlaikyti energijos balansą reikalinga neigiamus koeficientus nustatyti į aukštesnę $-0,66$ vertę;

4. išplėsta – būtų galima naudoti tokią pat kaip aprašyta literatūros šaltiniuose – įskaitant ir penkis duomenų bitus, bet šiame tyrime norima išlaikyti ir kitų paketų priėmimo galimybę pasyvaus radaro pritaikymui praplėsti. Dėl to naudojama modifikuota kaukės forma, vietoj 13 imama tik $8 \mu s$ preambulės ir kadangi paskutinės $3 \mu s$ turėtų būti nuliai – jie keičiami į -1 ir signalas kartu įgyja neigiamų koeficientų savybių;
5. išplėsta normalizuota – preambulė normalizuojama kaip antrame variante, bet taikoma išplėtam signalui. Išplėstas signalas turi 60 neigiamų koeficientų ir tik 20 teigimų, todėl neigiamas vertes reikia pakelti iki $-0,33$, kad susidarytų energijos balansas;
6. diferencijuota – akcentuojami frontai siekiant išskirti impulsus pagal jų amplitudės pokytį o ne vien lygį. Toks signalas bus koreliuojamas ne su įprastu, bet irgi diferencijuotu signalu. Bandymo metu bus naudojama dviejų atskaitų diferenciacija, kai iš priimtos atskaitos atimama prieš dvi atskaitas turėta reikšmė.



18 pav. Tyrimui naudojamų susintezuotų kaukių signalų pavyzdžiai: Ideali (a), neigiama (b), neigiama normalizuota (c), išplėsta (d), išplėsta normalizuota (e), diferencijuota (f)

Turint skirtingas kaukes, jas reikia panaudoti koreliacijos skaičiavimui atlikti. Tam tikslui sudaroma koreliacijos funkcija, kuri pagal duodamą kaukės tipą vykdo skaičiavimą ir atspausdina koreliacijos

rezultato grafiką. Skaičiavimas vykdomas kiekvieną signalo atskaitą imant X buvusių signalo atskaitų, kur X reiškia koreliacijos kaukės ilgį (jis kinta 50 – 80 atskaitų ribose, žr. 18 pav.).

Skirtingų kaukių koreliacijos skaičiavimai vykdomi su to paties sintezuoto ADS-B signalo atskaitomis.

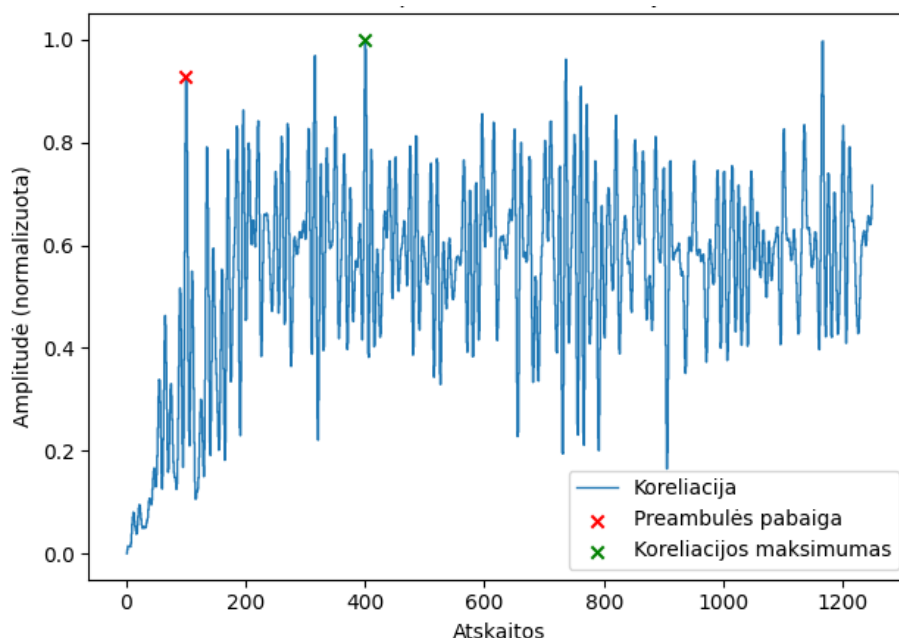
Ši tyrimo dalis siekia ištirti, kuri koreliacijos kaukės forma labiausiai išryškina preambulės pabaigos tašką koreliacijos rezultate (grafikuose indikuojama raudona spalva), todėl reikalinga atkreipti dėmesį į du aspektus:

1. kaip ryškiai matosi preambulės pabaigos taškas viso paketo koreliacijos skaičiavimo rezultatų kontekste. Turint aiškią maksimalią vertę ties preambulės pabaiga palengvina jos aptikimą ir indikuoja, kad daugiau signale panašesnių vietų į preambulę nėra. Tokį globalų maksimumą atradęs algoritmas gali tinkamai aptikti signalą, todėl viso paketo didžiausia vertė grafike papildomai indikuojama žalia spalva.

Jei raudonas ir žalias taškai sutampa – koreliacijos rezultato didžiausia vertė ten kur ir turėtų būti – ties preambulės pabaiga;

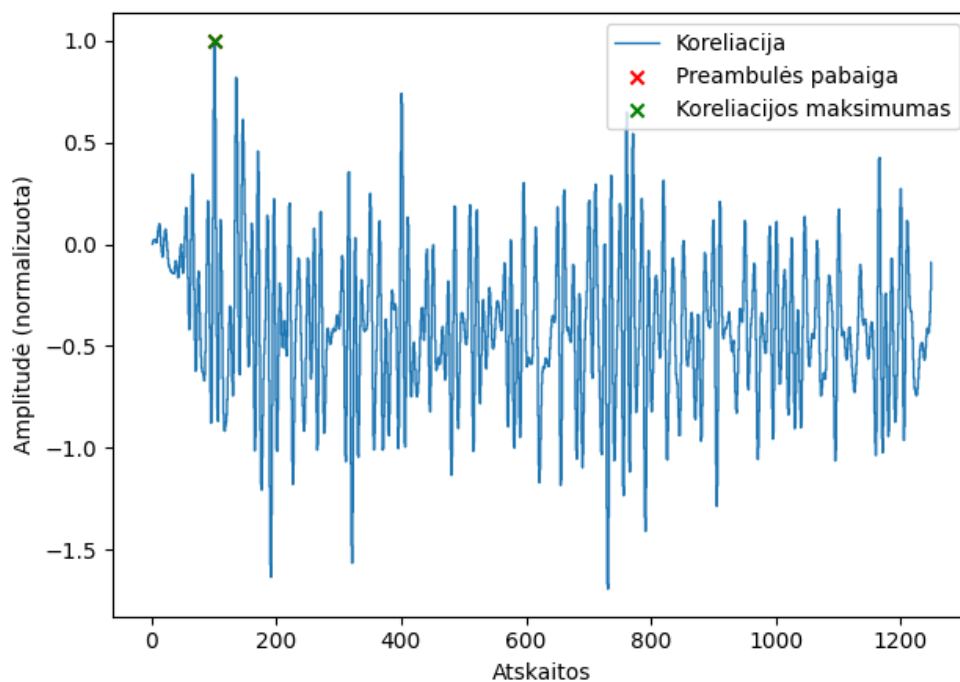
2. kaip preambulės pabaigos taškas išsiskiria iš artimiausios aplinkos - kuo skirtumas didesnis tarp jo ir aplinkinių viršūnių – tuo mažiau šalutinės viršūnės gali būti netinkamai indikuojamos kaip preambulės aptikimo taškai.

Toliau vykdomas koreliacijos skaičiavimas tam pačiam signalui su 6 skirtingomis aptartomis koreliacijos kaukės formomis.



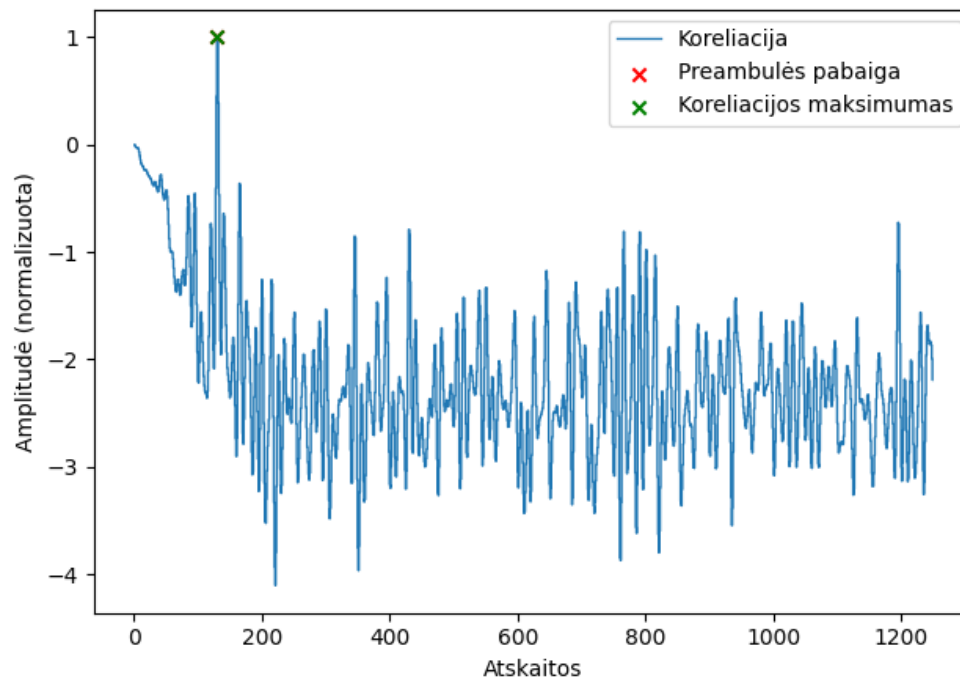
19 pav. Idealios preambulės (žr. 18 pav. (a)) koreliacijos rezultatas

Iš 19 pav. pateikto idealios preambulės kaukės pritaikymo matoma, kad nors raudonai pažymėtas preambulės pabaigos taškas išsiskiria, bet toliau laike, duomenų bitų vietoje, rezultatas gaunamas dar didesnis. Tai rodo, kad duomenų bitai, dėl savo dažno signalo aukšto lygio lokaliai tampa panašesni į preambulės kaukę, nei ji pati.



20 pav. Preambulės su neigiamais koeficientais (žr. 18 pav. (b)) koreliacijos rezultatas

20 pav. pateiktame neigiamų rezultatų kaukės rezultate preambulės pabaiga ryškiai matoma ir yra aukščiausias taškas visame signale. Tai yra dėl neigiamų koeficientų, kurie duomenų bitų lauką vertina neigiamai, nes impulsai idealiai neatitinka kaukės formos. Duomenų bitų dalis matoma arti 0 amplitudės.



21 pav. Išplėstos preambulės (žr. 18 pav. (d)) koreliacijos rezultatas

Iš išplėstos preambulės koreliacijos rezultato grafiko (žr. 21 pav.) matoma signalo amplitudė dar daugiau krenta lyginant su neigiamų reikšmių kaukės rezultatu. Taip yra, nes ši kaukė turi daugiau koeficientų su neigiamomis reikšmėmis, todėl duomenų bitų masyvas vertinamas itin nepalankiai.

Tikrosios preambulės pabaiga ryškiai išsiskiria iš aplinkinių atskaitų ir gali būti lengvai identifikuojama.

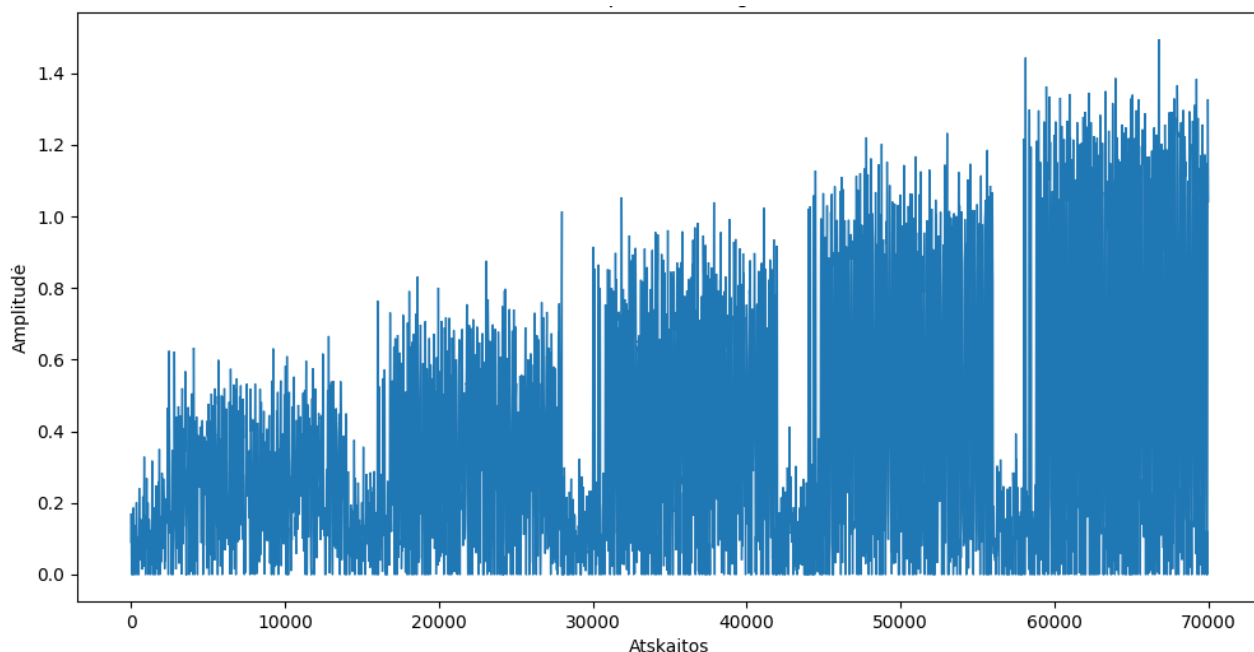
Iš pateiktų trijų įdomiausių rezultatų pavyzdžių (kitus rezultatus galima rasti **1 priedas**) matoma, kad stipriai skiriasi visų rezultatų grafikai, bet galutinių išvadų negalima daryti. Šiuose grafikuose pavaizduotas vieno signalo koreliacijos rezultatas – vieną kartą atsitiktinai sugeneruotas triukšmas gali pagelbėti vienam modeliui, bet pabloginti kitos koreliacijos kaukės rezultatą. Tam išvengti reikalinga atlikti daugelio signalų sintezę ir išbandyti kaukes su daugiau pavyzdžių išvedant vidutines – labiausiai tikėtinas vertes.

2.3. Koreliacijos slenkstinė vertė

Antras koreliacijos parametras – naudojama slenkstinė vertė, kurią koreliacijos vertei perlipus galima teigti, kad ieškomas signalas - preambulė - sėkmingai aptikta. Šioje dalyje siekiama išnagrinėti amplitudės įtaką koreliacijos rezultatui bei slenkstinės vertės nustatymo galimybes.

Praeitame skyriuje aptartuose rezultatuose pateikta normalizuota koreliacijos amplitudė neparodo tikrosios vertės. Koreliacijos skaičiavimas įvertina signalo energiją, todėl kuo signalas stipresnis – tuo amplitudė didesnė, nors rezultato forma išlieka tokia pati. Kuo signalas silpnesnis - koreliacijos vertė sumažėja iki aplinkinio triukšmo lygmens. Abejais atvejais koreliacijos maksimumo aptikimas sudėtingėja.

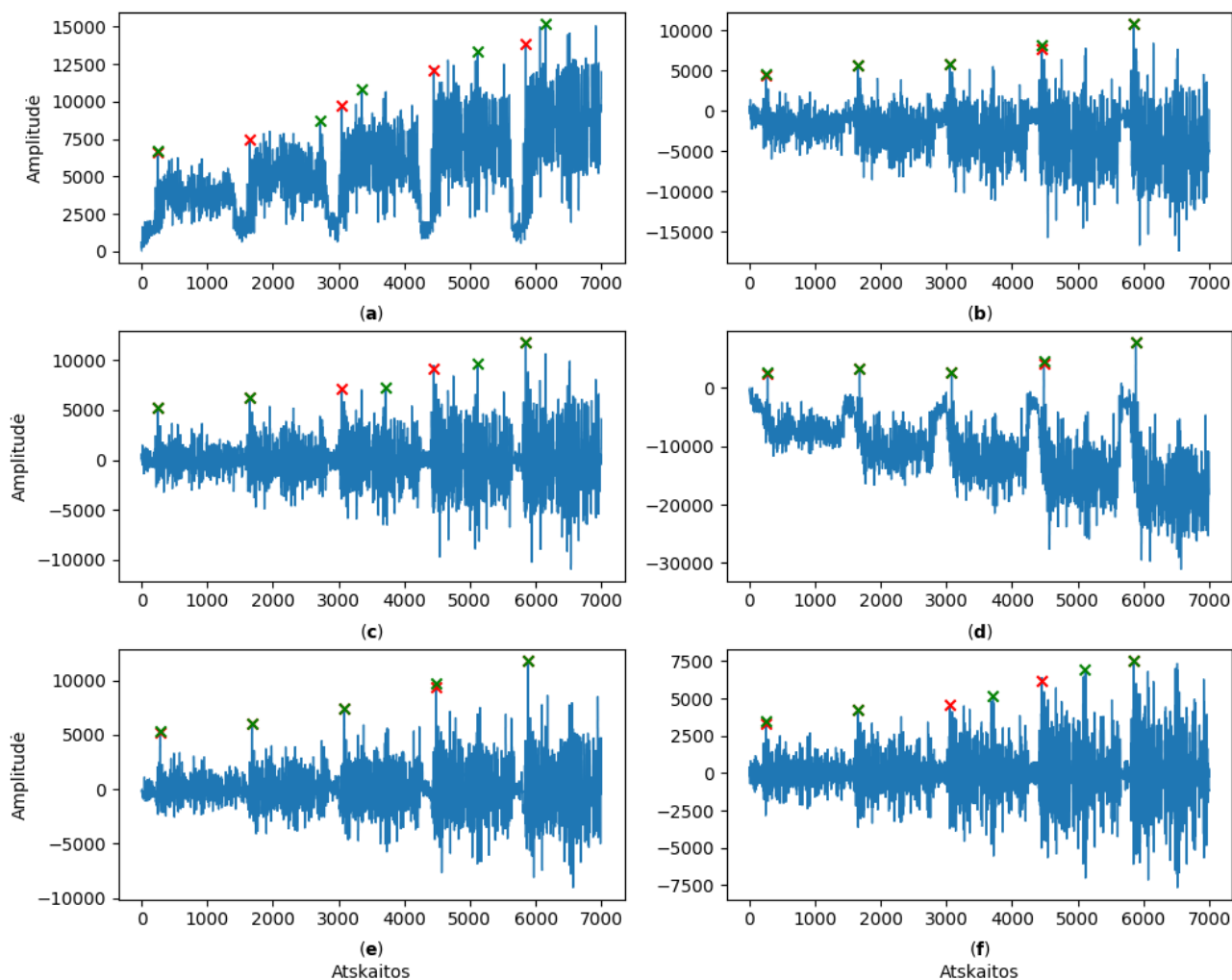
Koreliacijos amplitudei įvertinti sintezuojami penkių skirtingų amplitudžių ADS-B paketai, jų signalai atstoja 5, 9, 12, 14, 16 dB SNR lygį. Penki paketai sustatomi iš eilės vis didėjančia amplitude su mažu tarpu tarp jų:



22 pav. Penkių ADS-B signalų, sintezuotų su skirtingomis amplitudėmis, grafikas

22 pav. grafike pateikti penki sintezuoti signalai pasižymi skirtingomis amplitudėmis. Visų jų atveju adityvinio triukšmo amplitudė yra vienoda, bet dėl pamažėjusios naudingo signalo amplitudės krenta SNR lygis – triukšmas tampa didesne signalo dalimi.

Toliau analizuojama didėjančios signalo amplitudės įtaka koreliacijos amplitudei pritaikant ją šešioms aptartoms preambulės kaukės formoms:



23 pav. Didėjančio signalo amplitudės koreliacijos skaičiavimo rezultatai šešioms kaukėms: Idealiai (a), neigiamai (b), neigiamai normalizuotai (c), išplėstai (d), išplėstai normalizuotai (e), diferencijuotai (f). Žaliai pažymėti skirtingų signalų maksimumo taškai, raudonai – preambulės pabaiga

Nagrinėjant 23 pav. pateiktus koreliacijos rezultatus matoma, kad visų koreliacijos kaukių atveju koreliacijos rezultato vertės didėja su kylančiu signalo lygiu. Koreliacijos formos, kurios turi daugiau neigiamų koeficientų rodo vis didėjančią skirtumą tarp maksimumo taško ir aplinkinių atskaitų. Taip yra dėl padidėjusių neigiamų koeficientų įtakos, kurie duomenų bitų neatitikimą preambulės formai pastiprina ir rezultatą stipriai nuleidžia žemyn. Išplėstos preambulės kaukės koreliacijos formoje (žr. 23 pav. d) preambulės aptikimo taškai ryškiausiai išsiskiria iš aplinkinių atskaitų – akimi lengviausia aptikti preambulės pabaigos taškus.

Matomas signalo lygio kilimas parodo problemą – turėti nekintamą slenkstinį lygį preambulės aptikimui konstatuoti yra neoptimalu, nes didėjanč ar mažėjanč signalo lygiui kyla grėsmė, kad signalas bus per silpnas arba per stiprus ir bus aptikta daug netikrų preambulės pradžių. Norint išspręsti šią problemą reikalinga sukurti sistemą, kuri adaptyviai keistų slenkstinės vertės dydį.

Norint pritaikyti sistemą veikti bet kokio signalo stiprumo lygiui neužtenka įskaičiuoti triukšmo vertės, kaip siūlė pora aptartų straipsnių. Įskaičiuojant tik triukšmo įtaką stipresni signalai vis tiek

generuotų netikrus preamblelių atpažinimus. Nuspręsta bandyti įskaičiuoti bendrą signalo energiją ir pagal jos vertę nustatyti preambulės aptikimo slenksčio vertę. Toks sistemos veikimas paremtas algoritmu:

1. nuskaitomas priimtas signalas, suskaičiuojama jo koreliacijos vertė;
2. iš turimų signalo atskaitų masyvo (x), kurio ilgis atitinka koreliacijos kaukės ilgį, apskaičiuojama signalo energija pagal žemiau pateiktą formulę:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2; \quad (5)$$

3. pagal apskaičiuotą signalo energiją nustatomas adaptyvus koreliacijos slenksčio lygis;
4. jei koreliacijos vertė viršija slenksčio dydį – teigiama, kad preambulė yra sėkmingai aptikta.

Šis algoritmas pasižymi mažomis skaičiavimų resursų sąnaudomis, nes signalo energijai apskaičiuoti užtenka egzistuojančio koreliacijos skaičiavimo verčių masyvo. Bet, algoritme nėra žinoma pagrindinė dalis – trečiame punkte naudojama signalo energijos ir koreliacijos slenksčio lygio priklausomybė.

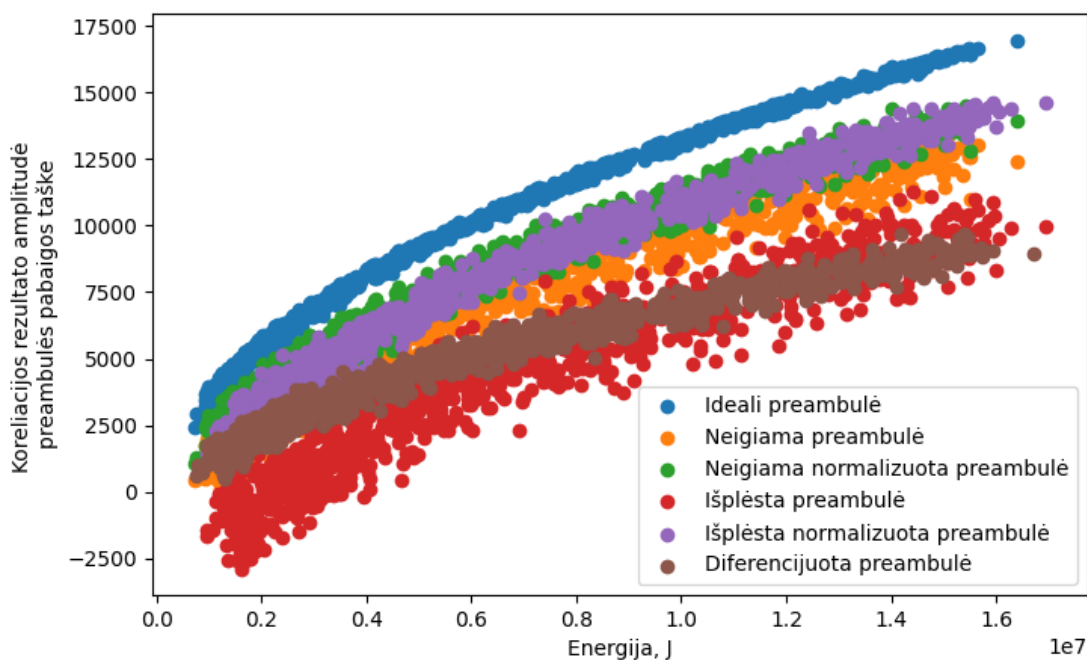
Iš koreliacijos skaičiavimų skirtingoms kaukėms galima spręsti, kad signalo energijos – koreliacijos slenksčio priklausomybė irgi priklausys nuo kaukės formos – koeficientų amplitudės bei kiekio. Priklausomybei rasti galima pritaikyti teorinius skaičiavimus ir tikėtiną koreliacijos lygį rasti panaudojant idealų signalą bei jam pritaikant koreliacijos skaičiavimą. Toks metodas turi trūkumą, kad nebus įskaičiuojama triukšmo įtaka signalui, kuri visada pasirodys realiame pasaulyje. Šiam kintamajam įvertinti siūloma pasinaudoti Monte Karlo metodu ir atlikti kompiuterines simuliacijas. Jų rezultatu siekiama atrasti signalo energijos ir koreliacijos slenksčio lygio priklausomybę.

Duomenų rinkimo bei apdorojimo procesas atrodo taip:

1. sukuriama masyvas signalo amplitudžių, kurioms tikimasi rasti tikėtinas koreliacijos rezultato amplitudės vertes. Šios signalo amplitudės padengia 0 – 15 dB SNR lygio diapazoną;
2. ties kiekviena signalo amplitudė sugeneruojama 1000 ADS-B signalų su unikaliu triukšmo išsidėstymu. Kiekvienam iš signalų atliekami visų koreliacijos kaukės formų koreliacijos skaičiavimai. Taip pat apskaičiuojama signalo energija. Šių dviejų skaičiavimų vertės ties signalo preambulės pabaiga yra išsaugomos;
3. surinkti duomenys yra apdorojami ir gaunamas bendras signalo energijos – koreliacijos vertės amplitudės taškų laukas;
4. gautų duomenų taškų laukui atliekama regresija siekiant rasti signalo energijos - koreliacijos vertės priklausomybę;
5. atlikus regresiją gaunama ieškomos priklausomybės skaitinė išraiška, kurios vienintelis nežinomasis – signalo energija. Pritaikant skaičiavimus naujai priimama signalui realiu laiku apskaičiuojama signalo energija, ji įrašoma į formulę ir rezultate gaunama dinaminio koreliacijos slenksčio vertė.

Šiems žingsniams atlikti naudojamos kompiuterinės simuliacijos toje pačioje *Python* aplinkoje, kaip ir ankstesni skaičiavimai.

Pirma atliekama duomenų generavimo dalis. Jos rezultatas – šeši signalo energijos ir koreliacijos verčių ties preambulės pabaiga masyvai. Kiekvieno masyvo ilgis – 1000 verčių. Šie masyvai dvejose ašyse atvaizduojami 24 pav., kuriame matoma, kad energijos ir koreliacijos vertės priklausomybė nėra tiesinė. Taip pat matoma skirtingų preambulės koreliacijos kaukių skirtumai ne vien koreliacijos amplitudėje, bet ir triukšmo įtakoje (taškų išsimėtymo aplink vidurkį diapazonas) bei amplitudės priklausomybėje nuo signalo energijos (kreivių išlinkimas).



24 pav. Sugeneruotų signalų koreliacijos rezultato amplitudės preambulės pabaigos taške priklausomybės nuo signalo energijos grafikas visoms koreliacijos kaukės formoms

Apskaičiavus standartinį taškų nuokrypį nuo prie vienos amplitudės generuotų verčių vidurkio gaunama, kad išplėsta preambulės kaukės forma turi didžiausią pasiskirstymą – jis 24 pav. matomas raudona spalva. Tai rodo, kad šios kaukės koreliacijos vertė yra pati nepastoviausia ir labiausiai kinta nuo pridėtinio triukšmo. Tai gali kilti iš didesnio kaukės ilgio (80 atskaitų lyginant su kitų kaukių 50) bei didesnių koeficientų. Ta pati kaukė su normalizuotais koeficientais turi beveik per pus mažesnę deviaciją.

Mažiausią verčių nuokrypį nuo vidurkio galima matyti ties idealios ir diferencijuotos formos preambulės kaukėmis, naudojant jas bus stebima mažiausia triukšmo įtaka koreliacijos rezultatui – galima tikėtis stabilesnių rezultatų.

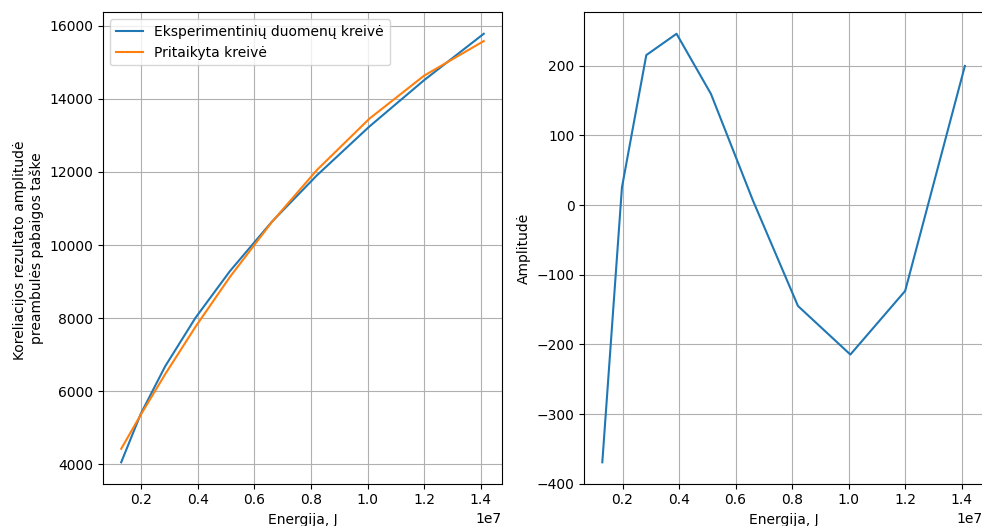
Toliau, turint taškų debesį reikalinga atlikti regresiją ir rasti energijos – koreliacijos vertės priklausomybę. Kadangi turima daug taškų reikalinga atrinkti, per kurią debesies vietą bus brėžiama priklausomybės kreivė. Brėžiant per taškų vidurkį pusė taškų liks po kreive, o tai reiškia, kad pusė sugeneruotų signalų neperlips dinaminio slenksčio lygio ir nebus aptikti. Apsisaugoti nuo šio reiškinių nuspręsta kreivės regresiją taikyti sudarytiems pasiskirstymams:

1. Pirmojo kvartilio (0.25);
2. Vidurkio (0.5);
3. Trečiojo kvartilio (0.75).

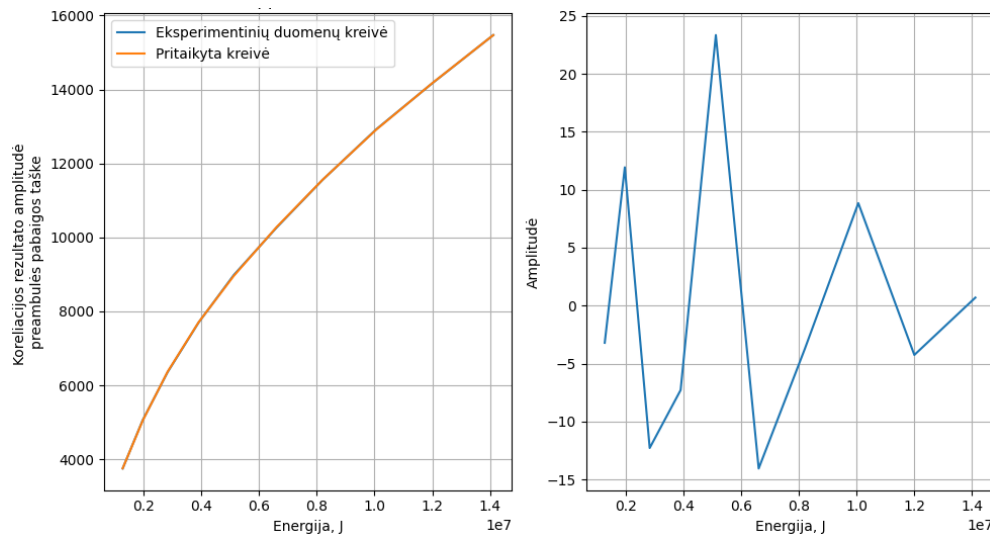
Iš kiekvieno taškų debesies (24 pav.) išrenkami trys skirstiniai ir pagal juos vykdoma regresija – kreivės pritaikymas. Kadangi energijos – koreliacijos amplitudės priklausomybė nėra tiesinė, nuspręsta kreivę aprašyti polinomu.

Polinomo pagrindinis parametras – laipsnis pasako apie naudojamų koeficientų kiekį. Didesnio laipsnio polinomai leidžia pasiekti didesnę aproksimacijos tikslumą, bet taip pat reikalauja daugiau skaičiavimo resursų rezultatui apskaičiuoti. Turint omenyje apie polinomo pritaikymą realaus laiko sistemoje – resursų sąnaudos tampa realia problema. Reikalinga atrasti optimalų tašką, tarp kreivės pritaikymo tikslumo ir resursų sąnaudų, todėl toliau tyrime yra vykdoma analizė nuo 2 iki 5 eilės polinomams įvertinti.

Su kiekvienos preambulės koreliacijos kaukės formos taškais sugeneruojamos kreivės iš trijų taškų pasiskirstymų, jų rezultatai pavaizduojami grafiškai įvertinant pritaikytos kreivės nuokrypį nuo realios:



25 pav. Idealios preambulės, vidurkio pasiskirstymo rezultatų kreivės pritaikymo rezultatas (kairėje) ir jo paklaidos (dešinėje) naudojant antros eilės polinomą



26 pav. Idealios preambulės, vidurkio pasiskirstymo rezultatų kreivės pritaikymo rezultatas (kairėje) ir jo paklaidos (dešinėje) naudojant penktos eilės polinomą

Iš 25 pav. ir 26 pav. grafikų matoma, kad aukštesnio laipsnio polinomi geriau atkartoja kreivės formą – jų paklaidų amplitudė mažesnė iki 10 kartų. Tiksliau įvertinti nuokrypių lygį pasitelkiamas vidutinės kvadratinės paklaidos (angl. *Mean Squared Error*) kriterijus skaičiuojamas pagal formulę:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2; \quad (6)$$

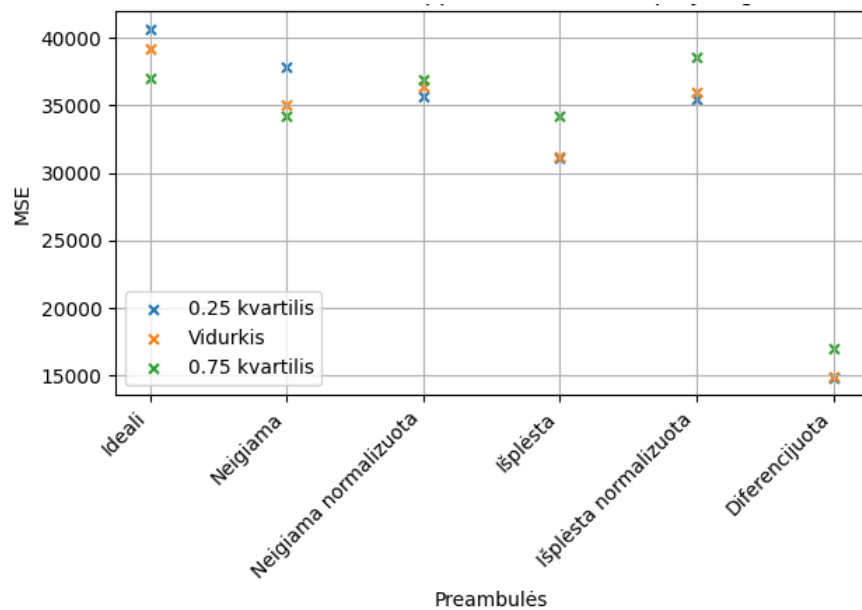
čia:

n – taškų kiekis;

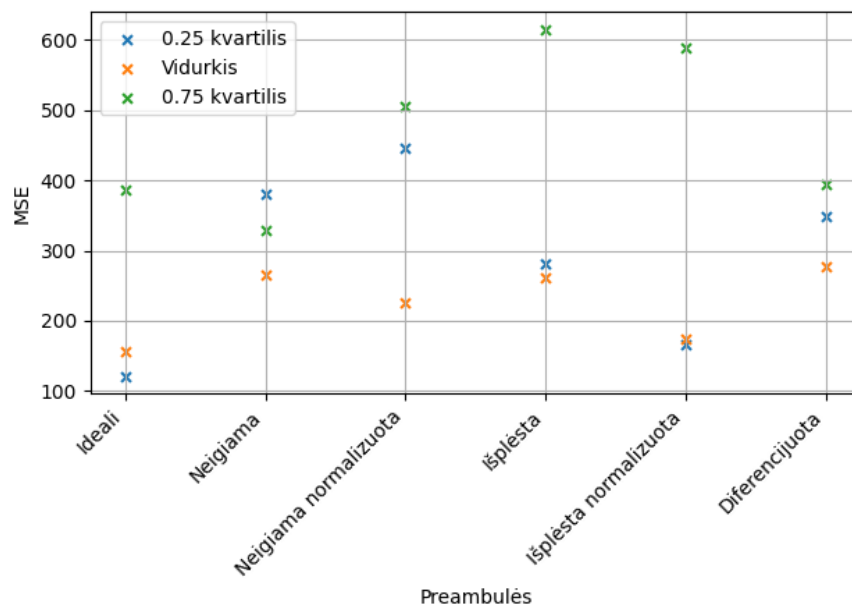
Y_i - tikrosios kreivės vertės;

\hat{Y}_i - pritaikytos kreivės vertės.

Apskaičiuotas MSE kriterijus pateikiamas visoms 6 analizuojamoms preambulės koreliacijos kaukės formoms ir trimis jų verčių skirstiniams:



27 pav. Visų preambulių antros eilės polinomų MSE paklaidų vertės



28 pav. Visų preambulių penktos eilės polinomų MSE paklaidų vertės

27 pav. ir 28 pav. grafikuose matoma, kad 5 laipsnio polinomi yra tikslesni, nes jų MSE įvertis yra iki 100 kartų mažesnis lyginant su 2 laipsnio polinomų rezultatais. Lyginant skirstinius matoma, kad dažnu atveju vidurkio skirstinio kreivės pritaikymas yra tikslesnis nei 0.25 ar 0.75 kvartilio, bet kartais vertės pasikeičia ir vidurkis nėra tiksliausias variantas.

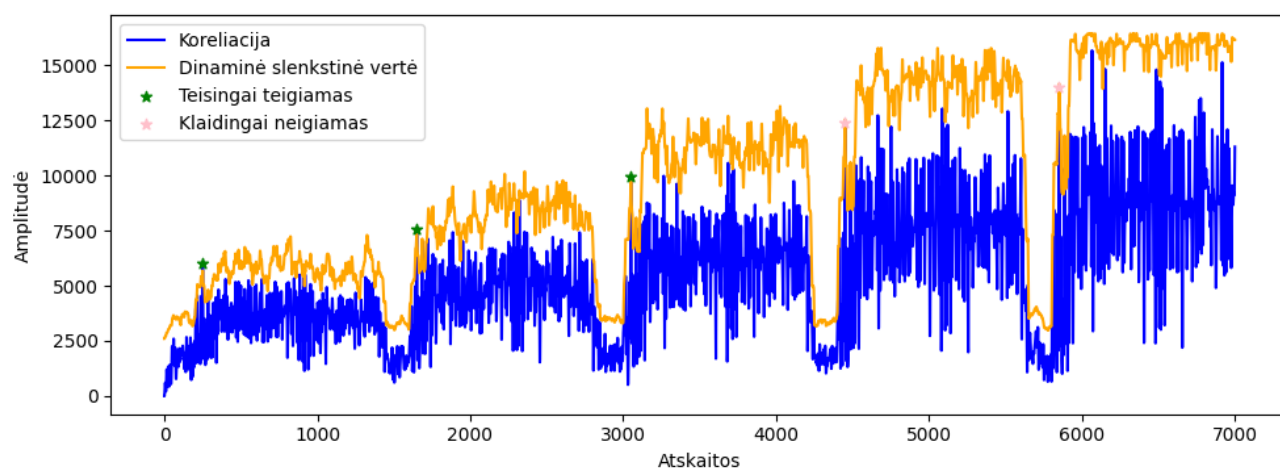
Aprašytuose etapuose buvo atliktas didelio kiekio signalų generavimas prie skirtingų ADS-B signalo lygių išrenkant koreliacijos lygio priklausomybės nuo energijos matmenis. Iš rezultatų apskaičiuota energijos - koreliacijos amplitudės priklausomybė pritaikant polinomą prie gautos taškų kreivės panaudojus tris - 0,25, 0,5 ir 0,75 verčių pasiskirstymus. Kreivės pritaikymo tikslumas išnagrinėtas paklaidų ir MSE kriterijais. Šių etapų rezultatas – gautas polinomas, kuris parodo tikimasi koreliacijos

skaičiavimo vertės priklausomybę nuo signalo energijos. Sekančiame etape šios gautos funkcijos išbandomos su kintančio lygio ADS-B signalais bei įvertinamas jų efektyvumas.

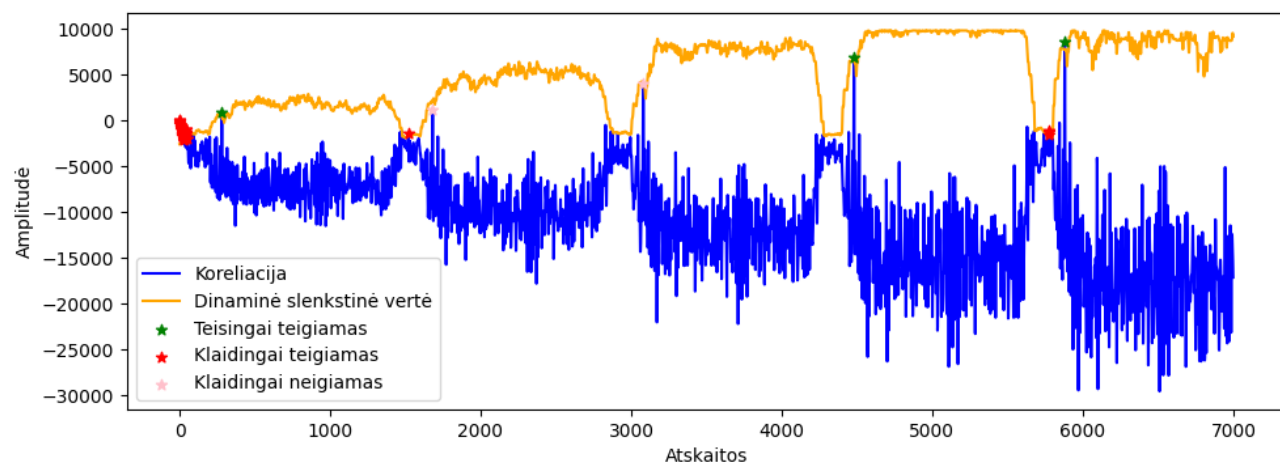
2.4. Koreliacijos dinaminės slenkstinės vertės pritaikymas

Turint dinaminės koreliacijos slenkščio skaičiavimo funkciją, išreikštą penkto laipsnio polinomu, atliekama ADS-B signalo analizė. Realaus laiko principu atliekamas koreliacijos bei dinaminio slenkščio skaičiavimas. Palyginus dvi kreives aptinkami taškai, kuriuose koreliacija viršija slenkstinę vertę. Šie taškai indikuoja apie algoritmo aptiktą preambulę. Gauti rezultatai palyginami su žinoma preambulės pozicija, taip įvertinant algoritmo sprendimo tikslumą.

Kompiuterinės simuliacijos aplinkoje generuojami penki ADS-B signalai su skirtingomis amplitudėmis ir apskaičiuojamos koreliacijos bei slenkstinės vertės amplitudės:



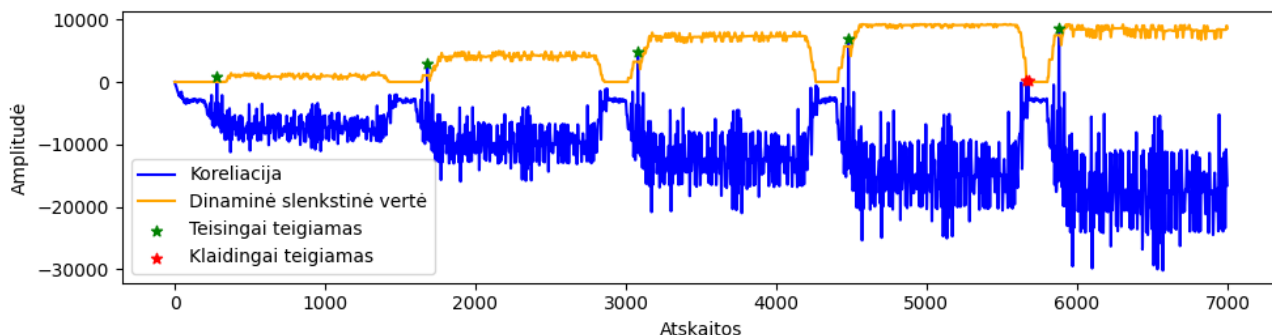
29 pav. Idealios preambulės, vidurkio pasiskirstymo aptikimo grafikas su apskaičiuotu adaptyviu slenkstiniu lygiu (geltona spalva) ir pažymėtais sėkmingais bei klaidingais preambulės aptikimo taškais



30 pav. Išplėstos preambulės, vidurkio pasiskirstymo aptikimo grafikas su apskaičiuotu adaptyviu slenkstiniu lygiu (geltona spalva) ir pažymėtais sėkmingais bei klaidingais preambulės aptikimo taškais

29 pav. ir 30 pav. grafikuose pavaizduoti dinaminio koreliacijos slenkščio pritaikymo rezultatai. Matoma, kad abu variantai sėkmingai aptiko tris preambules (pažymėta žaliai), dvi liko neaptiktos.

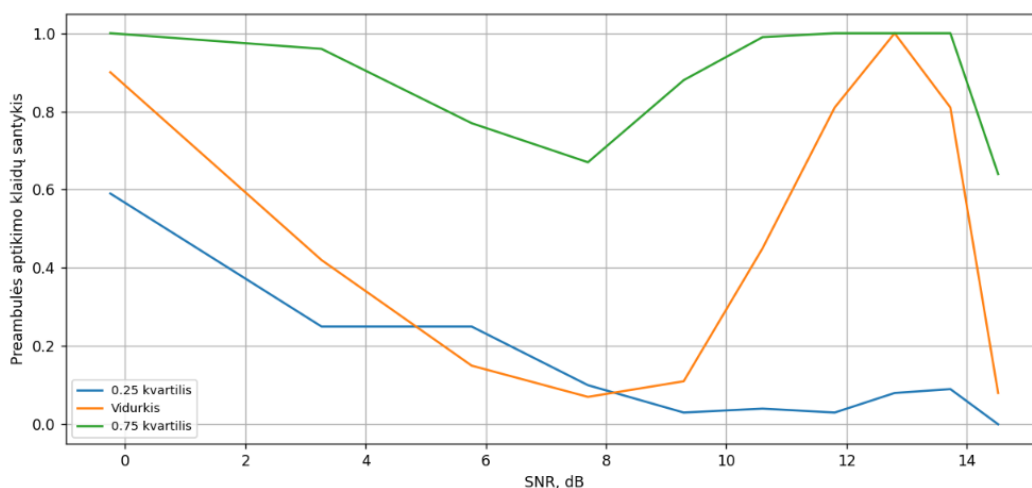
Taip pat matoma, kad kaukė su neigiamais koeficientais aptinka daug klaidingų taškų ties žemu signalo lygiu, kuris egzistuoja tarpe dviejų ADS-B signalo paketų. Šiai problemai išspręsti nuspręsta apriboti mažiausią dinaminio laiptelio vertę – pritaikyti „grindis“. Šis apribojimo lygis nustatomas į 0 ir rezultate matoma žymiai mažiau klaidingų aptikimų – aptiktos visos penkios preambulės tik su vienu klaidingu tašku:



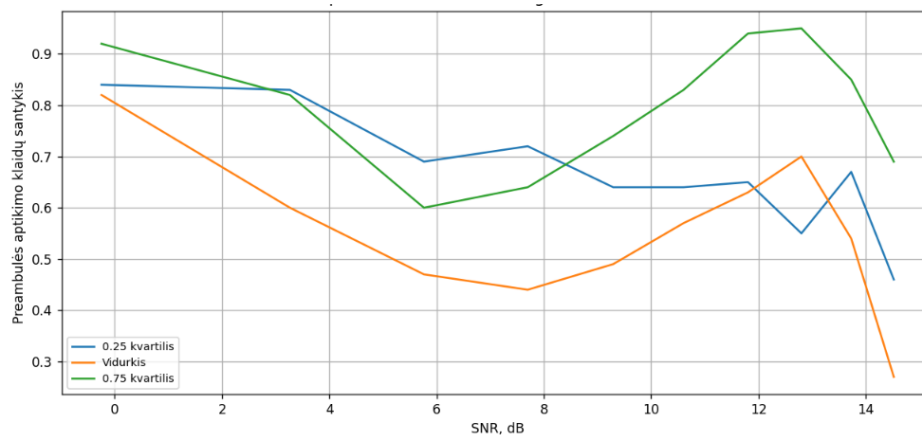
31 pav. Išplėstos preambulės su apribotomis grindimis aptikimo grafikas su apskaičiuotu adaptyviu slenkstiniu lygiu (geltona spalva) ir pažymėtais sėkmingais bei klaidingais preambulės aptikimo taškais

Sugeneruotuose grafikuose pateikiamas signalas su vieno varianto triukšmo išsidėstymu, norint tiksliau įvertinti rezultatus reikalinga procesą atlikti daugeliui signalui taip išbandant algoritmus prie skirtingų signalo triukšmo išsidėstymų.

Nuspręsta analizę atlikti su 1000 signalų ties 10 skirtingų signalo amplitudės lygių. Iš rezultatų apskaičiuojamas preambulės aptikimo klaidų santykis – bito klaidų santykio (angl. *Bit Error Rate*) atitikmuo. Klaidos skaičiuojamos kiekvienam signalui atskirai. Klaida indikuojama jei preambulės taškas nebuvo aptiktas arba prieš jį buvo aptiktas kitas, neteisingas taškas. Surinkti duomenys pateikiami grafike visiems trimis naudojamiems skirstiniams:



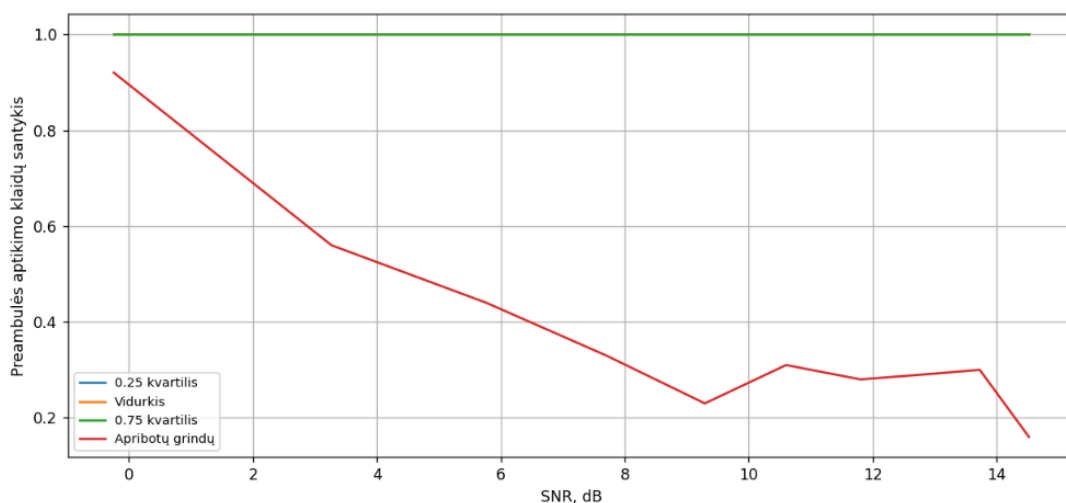
32 pav. Idealios preambulės kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio



33 pav. Neigiamos normalizuotos preambulės kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio

Visuose gautuose grafikuose (žr. 32 pav. ir 33 pav., kitus grafikus galima rasti **2 priedas.**) matoma, kad klaidų kiekis didėjant signalo lygiui krenta. Taip pat matoma nepastovi kreivių forma. Ties ~ 13 dB SNR lygiu matomas staigus algoritmo preambulės aptikimo klaidų padidėjimas. Ši anomalija kyla iš 2.3 skyriuje aptarto polinomo sudarymo paklaidų. Analizuojant paklaidų grafikus (žr. 25 pav. ir 26 pav.) matoma, kad kreivės pritaikymo paklaidų pasiskirstymas nėra vienodas – vienos vietose jis yra teigiamas, kitose neigiamas. Ties aukštesne signalo energija, kur paklaidos yra neigiamos, pritaikyta kreivė aplenkia tikrąją priklausomybę iš viršaus, kas reiškia, kad aptikimui užfiksuoti tikimasi aukštesnės koreliacijos vertės nei ji iš tikrųjų yra. Kuo mažesnės šios paklaidos – tuo mažesnis ir klaidų pakilimas, todėl abėjuose 32 pav. ir 33 pav. grafikuose matomas vieno pasiskirstymo mažesnis klaidų pakilimas, kol kiti du kyla stipriai.

Analizuojant preambulės kaukių su neigiamais koeficientais veikimą pastebima, kad 0,25, 0,5 ir 0,75 kvartilų variantai neaptinka sėkmingai beveik nė vieno paketo. To priežastis – klaidingai indikuoti aptikimai ties mažais signalo lygiais tarp atskirų ADS-B paketų. Tai patvirtina apribotų grindų rezultatas – jis parodo žymiai mažesnę klaidų kiekį ir ties 15 dB pasiekia ~ 0,17 klaidų dažnį:



34 pav. Išplėtos preambulės kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio

Analizuojant šiuos aptikimo klaidų grafikus matoma, kad geriausiai pasirodo idealios preambulės formos koreliacijos kaukė su 0,25 kvartiliu – ties 0 dB SNR turi ~ 0,6 klaidų tankį ir didėjant signalo lygiui pastoviai krenta kol pasiekia beveik 100 % aptikimą. Antras geriausias rezultatas – išplėtos kaukės su apribotomis grindimis. Šiuo atveju pradžioje klaidų santykis yra aukštesnis, ~ 0,9 ir krenta tik iki 0,15.

Preambulės formos analizės dalyje matyta, kad išplėtos preambulės koreliacijos grafiko forma viršūnę iškelia aiškiau nei idealios preambulės formos variantas, bet aptikimo klaidų santykio įvertinimas rodo atvirkščius rezultatus. Tai galima paaiškinti tuo, kad rezultatams didelę įtaką daro ne tik forma, bet ir triukšmo įtaka koreliacijos vertės pastovumui, kuri idealios preambulės kaukės formos atveju buvo parodyta, kad yra mažiausia (žr. 24 pav. analizę).

Iškilius ADS-B koreliacijos amplitudės lygio nepastovumo problemai atliktos Monte Karlo metodo kompiuterinės simuliacijos signalo energijos – koreliacijos amplitudės ties preambulės pabaiga priklausomybei rasti. Išreiškus priklausomybę polinomu gauta funkcija, kurią pritaikius prie sugeneruotų testavimo signalų pamatyta, kad ADS-B preambulę ties skirtingais signalo ar SNR lygiais geriausiai aptinka ideali bei išplėsta preambulės.

Toliau bus siekiama algoritmų veikimą išbandyti realia apretine įranga.

2.5. Signalų sintezavimas

Šiame skyriuje bus atliekami eksperimentai artimomis realioms sąlygomis. Siekiama iš erdvės priimti 1,09 GHz radijo kanalu atsiųstą ADS-B paketą su turima įterptine sistema, kurioje realizuotas vienas iš aptartų detektavimo algoritmų. Šį paketą priėmus ir apdorojus galima išvesti ne vien dekoduosius duomenis, bet ir tarpinius rezultatus – įvairių kintamųjų vertes siekiant išanalizuoti algoritmo veikimą realiomis sąlygomis.

Šiam testavimui reikalinga turėti patikimą ADS-B paketų šaltinį. Geriausia signalus gauti iš realių lėktuvų, bet neturint tokios galimybės galima sintezuoti patiems ir pasinaudojus mažos galios siųstuvu, laboratorinėmis sąlygomis siųsti testavimo signalus. Kaip aptarta anksčiau egzistuoja dvi ADS-B imtuvų ir siųstuvų rūšys – įterptinės sistemos ir SDR. Kadangi šiuo atveju signalas iš šios sistemos tik siunčiamas, todėl aplenkiamas didelis specializuotos aparatinės įrangos realizavimo barjeras ir pasirenkama naudoti programuojamą radijo siųstuvą/imtuvą (SDR).

SDR siųstuvų modelius siūlo kelios įmonės, jie skiriasi savo parametrais bei pajėgumais. ADS-B signalo siuntimo atveju reikalinga, kad siųstuvas gebėtų pasiekti:

- siuntimo dažnį – 1090 MHz;
- dažnių juostą – bent 2 MHz;
- turėtų lengvai pritaikomą signalų sintezavimo aplinką.

Visus šiuos parametrus atitinka plačiai naudojamas ADALM-PLUTO modulis, kurio pagrindinės specifikacijos:

- siuntimo dažnis 325 – 3800 MHz;
- iki 20 MHz dažnių juosta;

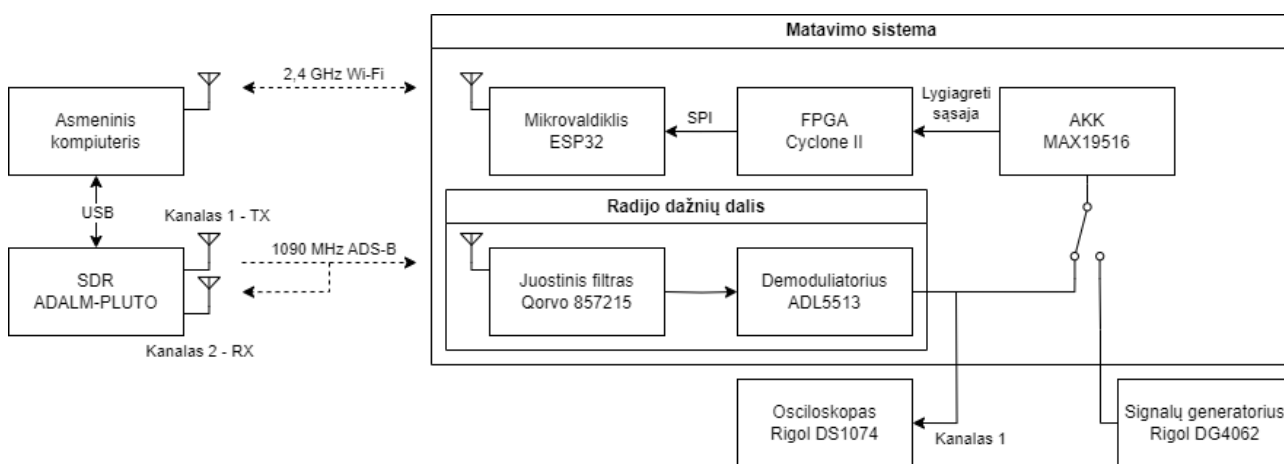
- du kanalai galintys veikti *full-duplex* režimu;
- integracija į plačią *GNU Radio* signalų sintezavimo bei analizės aplinką.



35 pav. ADALM-PLUTO SDR vaizdas (kairėje) bei vidinės struktūros diagrama (dešinėje) [39]

Šios specifikacijos puikiai tinka siųsti 2 MHz juostos pločio 1090 MHz dažnio ADS-B signalą, o tuo pat metu testavimui jį priimti antru kanalu. Egzistuojanti integracija į *GNU Radio* aplinką leidžia lengvai manipuluoti siunčiamo signalo forma, moduliacija bei kitais parametrais.

Žinant naudojamus komponentus, sudaroma eksperimento aparatinių dalių schema pavaizduota 36 pav.



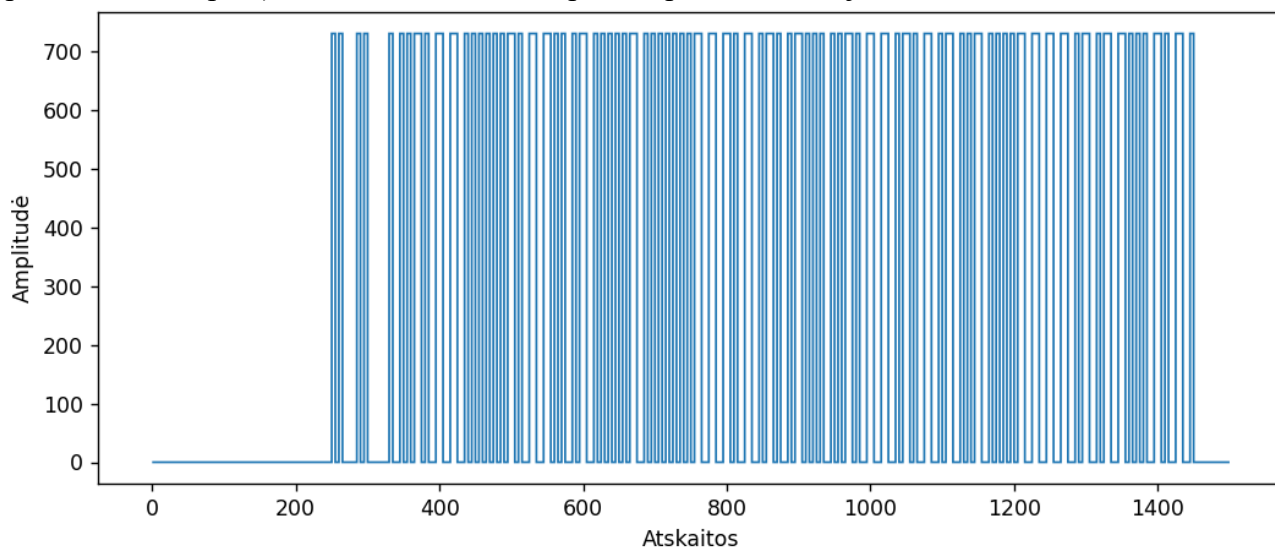
36 pav. Eksperimento struktūrinė schema

Eksperimente naudojami įrenginiai:

1. Asmeninis kompiuteris, kuriuo sintezuojamas ADS-B signalas. Taip pat priimami bei apdorojami duomenys iš matavimo sistemos.
Signalų baitų sudarymui naudojama Python programa, jų sintezavimui į radijo dažnius – *GNU Radio* aplinka. Duomenis priimti iš matavimo sistemos realizuotas internetinis serveris bei grafinė vartotojo sąsaja C# programavimo kalba;
2. ADALM-PLUTO SDR, prijungtas prie asmeninio kompiuterio skirtas ADS-B signalų spinduliavimui į erdvę. Tam apsiekti naudojami du kanalai, vienas ADS-B paketams siųsti, antras imtuvo režime pasitikrinti ar gaunamas tinkamos formos signalas;

3. Matavimo sistema, į jos sudėtį įeina radijo bangų priėmimo periferija, duomenų apdorojimui bei ADS-B dekodavimui skirti komponentai. Nuskaitytos atskaitos bei paketų turinys perduodami į asmeninį kompiuterį. Matavimo sistemą sudaro komponentai:
 1. Qorvo 857215 juostinis filtras išfiltruoti 1090 MHz dažnio signalą su 10 MHz pločio juosta;
 2. Logaritminis detektorius ADL5513 veikiantis kaip demodulatorius. Priimamas 1090 MHz ADS-B signalas demoduliuojamas ir komponento išėjime matomas bitų sekos signalas. Priklausant nuo prijungto kondensatoriaus galima reguliuoti išėjimo signalo dažnių juostą nuo 2 iki 10 MHz. Eksperimento metu nustatyta į 10 MHz;
 3. Analogas - kodas keitiklis MAX19516 skirtas demoduliuotam signalui užfiksuoti. Veikia iki 100 MHz diskretizavimo dažniu, pasirinkta naudoti 10 MHz dažnį;
 4. Programuojamų loginių elementų matrica Cyclone II skirta greito AKK duomenų srauto nuskaitymui. Kiekviena signalo atskaita iš AKK priimama lygiagrečiai 10 bitų magistrale.
Matricoje taip pat veikia ADS-B paketo preambulės aptikimo bei duomenų dekodavimo algoritmai;
 5. Mikrovaldiklis ESP32-S2 skirtas apdorotų duomenų iš FPGA nuskaitymui SPI sąsaja bei perdavimui į asmeninį kompiuterį bevieliu Wi-Fi ryšiu.
4. Osciloskopas Rigol DS1074. Naudojamas vienas kanalas prijungtas prie demodulatoriaus išėjimo tarpiniam signalo rezultatui išanalizuoti;
5. Signalų generatorius Rigol DG4062. Šiame eksperimente neprijungtas, bet gali būti naudojamas testavimui įterpti sintezuotą, demoduliuotą signalą į matavimo sistemos analogas-kodas keitiklio įėjimo kanalą.

Pirmas eksperimento žingsnis – realizuoti schemą signalų siuntimui. Tam pasiekti iš Python signalų sintezavimo kodo sudaroma programa ADS-B signalo atskaitų masyvui sugeneruoti (jo vertės pateikiamos 37 pav.) tinkamu *GNU Radio* aplinkai pavidalu - dvejetainio failo formatu.



37 pav. Sintezuoto ADS-B paketo įrašyto į failą atskaitų grafikas

Šis ADS-B signalas sudarytas pagal turimą pavyzdinę 112 signalo bitų seką, kuri yra: *0x8D406B902015A678D4D220AA4BDA*. Ji pilnai atitinka ADS-B standartą, o ja perduodamus duomenis galima patikrinti dekoduojant rankiniu būdu pasitelkus 3 pav. žinučių turinio lentelę, kurios

specifikacijos aprašytos DO-260B standarte. Ši veiksmą automatinio būdu galima padaryti pasinaudojus vienu iš daugelio internetinių šaltinių, integruojančių standarte aprašytą ADS-B paketo duomenų analizę. Vieno puslapio [40] sugeneruotas rezultatas pateikiamas 38 pav. ir indikuoja, kad žinutėje perduodama informacija yra: *0x406B90* ICAO adresas bei *EZY85MH* lėktuvo šaukinys.

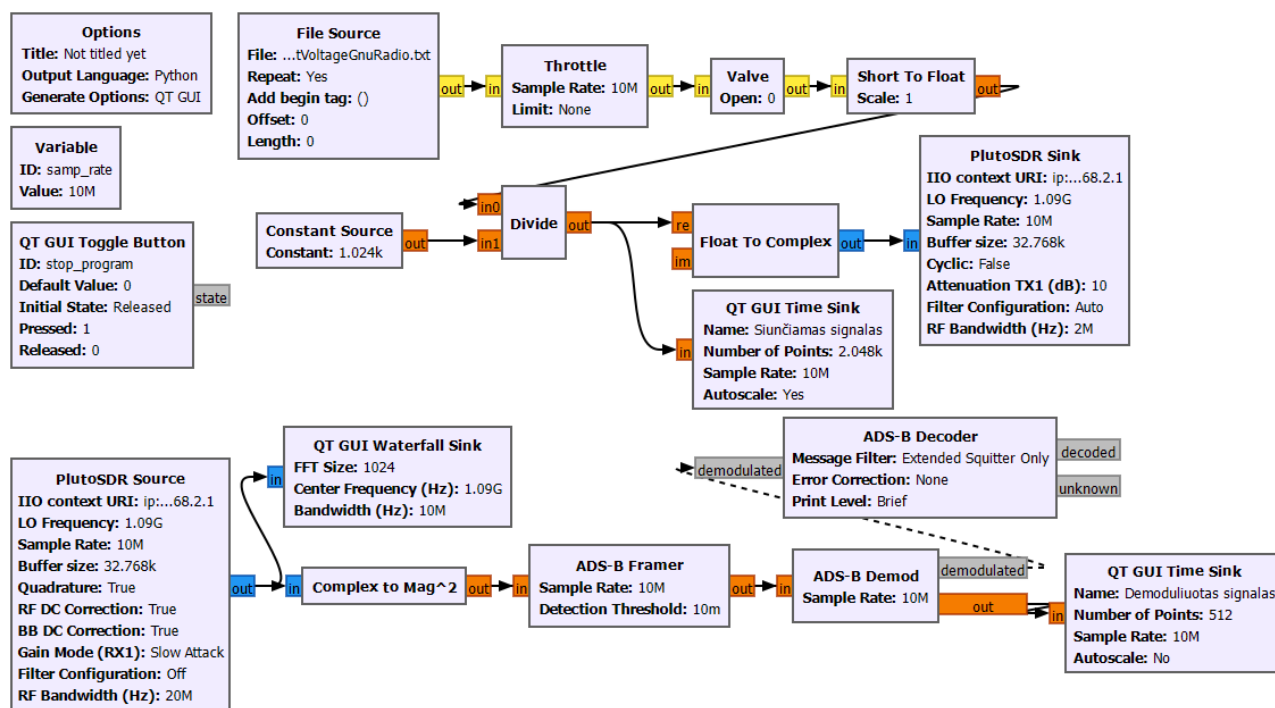
```

-- Mode-S Information --
From: 40 6B 90
Downlink Format:      17 - Extended squitter
Capability:           5 - Level 2 Airborne
AddressAnnounced:   40 6B 90
MessageExtendedSquitter: 20 15 A6 78 D4 D2 20
Version: 2
Message:              BDS 0,8 - Extended squitter aircraft identification and category
Format Type Code:    4
Category:             0 - No aircraft category information
Identification:       EZY85MH
    
```

38 pav. „ADS-B & Mode S Online Decoder“ tinklapio pagalba dekoduto ADS-B paketo pagrindinė informacija [40]

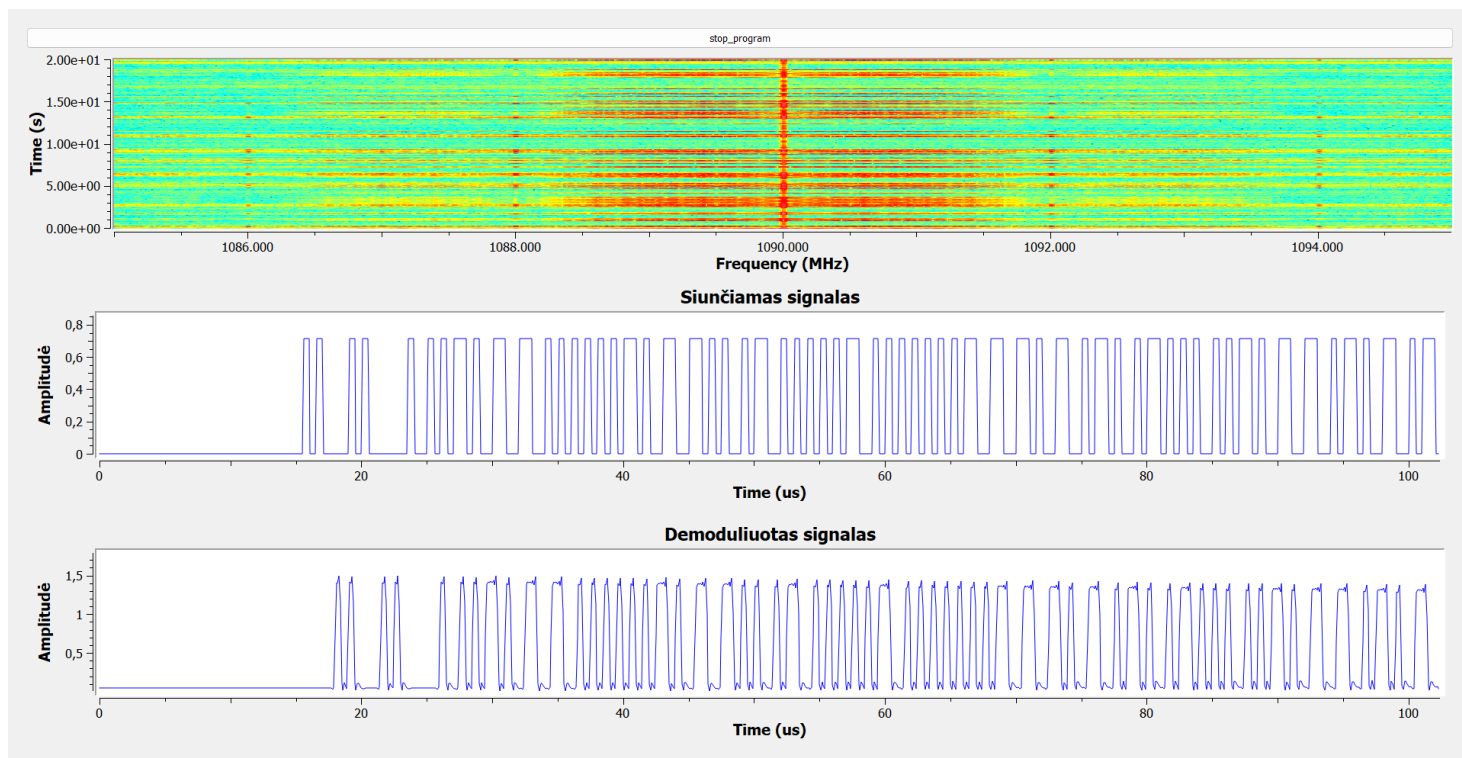
Sugeneruotas ADS-B signalo failas patalpinamas į *GNU Radio* aplinką kaip pagrindinis duomenų šaltinis (39 pav. „File Source“ blokas). Toliau realizuojamos signalo atskaitų formato konversijos su amplitudės sumažinimu (39 pav. „Short to float“ ir „Divide“ blokai), gautas rezultatas išvedamas grafiku (39 pav. „QT GUI Time Sink“ blokas). Šis signalas toliau paduodamas į SDR išėjimo bloką (39 pav. „PlutoSDR Sink“ blokas) su nustatytais ADS-B paketo dažniniais parametrais (1090 MHz dažnis, 2 MHz juostos plotis). Bendrai gaunama pulso pozicijos moduliacijos schema.

Antrasis *ADALM-PLUTO* SDR kanalas panaudojamas signalo priėmimui (39 pav. „PlutoSDR Source“ blokas). Neapdorotas signalas atvaizduojamas *waterfall* grafike (39 pav. „QT GUI Waterfall Sink“ blokas), demoduluotas atvaizduojamas laiko ašyje ir toliau dekoduojamas ADS-B paketui rasti (39 pav. „ADS-B“ blokai). Pilna *GNU Radio* aplinkoje sudaryta programa pateikiama 39 pav.



39 pav. Sudaryta *GNU Radio* struktūra ADS-B signalo sintezavimui ir išvedimui 1090 MHz dažnio kanalu

Ijungus *GNU Radio* programą kompiuteryje atsidaro langas rodantis siunčiamą nmoduliuotą paketą laiko ašyje, antro SDR kanalo priimtus bei demoduliuotus signalus 1090 MHz dažnyje. Languų vaizdai pateikiami 40 pav. ir 41 pav.



40 pav. *GNU Radio* aplinkoje matomas sintezuotas signalas bei jo priimtas vaizdas *waterfall* grafike

Time	ICAO	Callsign	Alt	Climb	Speed	Hdng	Latitude	Longitude	Msgs
			ft	ft/m	kt	deg	deg	deg	
14:42:06	406b90	EZY85MH							129

41 pav. *GNU Radio* lange matoma dekodavimo rezultato informacija

Iš šių grafikų matosi, kad ADS-B paketo siuntimo į erdvę procesas vyksta – *waterfall* grafike matomas signalo lygio padidėjimas ties 1090 MHz dažniu. 40 pav. viduriniame grafike atvaizduojamas siunčiamas signalas laiko ašyje, o apatiniame – priimto SDR demoduliuoto signalo vaizdas. Visų šių signalų formos atitinka Python programa sintezuoto signalo vaizdą.

41 pav. taip pat pateikiama *GNU Radio* ADS-B paketo dekodavimo rezultato langas, jame matomas indikuojamas lėktuvo ICAO adresas bei šaukinys. Palyginus rezultatus su išbandyta dekodavimo programa 38 pav. matoma, kad visa informacija tarp internetinio šaltinio bei *GNU Radio* atitinka – dekodavimas įvykdytas sėkmingai.

Toliau pereinama prie matavimo osciloskopu ir demoduliatoriaus įjungimo. Suderinus matavimo parametrus 42 pav. pateikiamas osciloskopo ekrane matomas demoduliuotas signalas.



42 pav. Osciloskopu stebimas demoduliacijos išėjimo signalas

Iš oscilogramos matoma, kad ji atitinka sugeneruotą signalą Python (žr. 37 pav.) o taip pat ir *GNU Radio* aplinkoje (žr. 40 pav.). Lyginant signalo formą matosi, kad impulsai matosi aiškiai, bet sugeneruotas triukšmas tarp jų yra žymiai didesnis nei sintezuota – pasireiškia SDR siųstuvo triukšmų ir logaritminio galios detektoriaus įtaka.

Iš šio rezultato galima matyti, kad signalo sintezė bei išsiuntimas per erdvę įvyko sėkmingai, o demoduliacijos atliko savo paskirtį ir 1090 MHz dažniu moduluotą signalą sėkmingai konvertavo į pradinę jo būseną.

2.6. Realizavimas programuojamoje loginių elementų matricioje

Šiame skyriuje siekiama perkelti koreliacijos bei adaptivaus slenksčio skaičiavimą į realią įterptinę sistemą taip patvirtinant jo galimybę veikti realiu laiku.

Skirtingai nuo praeito bandymo – čia bandoma sujungti pilną matavimo schemą bei priimtą signalą nuskaityti ne osciloskopu, o FPGA lustu ir perduoti į kompiuteryje veikiančią serverį. Tai sėkmingai realizavus ir patvirtinus, kad FPGA signalus priima sėkmingai – pereinama prie adaptivaus koreliacijos slenksčio algoritmo realizavimo programuojamoje loginių elementų matricioje. Veikimas pritaikytas ir išbandytas su pavyzdiniu ADS-B signalu, išsaugotos tarpinės vertės veikimo palyginimui su simuliacijos rezultatais.

2.2 - 2.4 skyriuose išanalizuoti ADS-B preambulės aptikimo algoritmai, programinių simuliacijų aplinkoje išbandytas jų efektyvumas. Taip pat sėkmingai sintezuoti pavyzdiniai ADS-B signalai bei išsiųsti į erdvę panaudojant SDR siųstuvą. Toliau siekiama išbandyti algoritmų veikimą realioje aparatinėje įrangoje siekiant patvirtinti teorinių skaičiavimų teisingumą. Koreliacijos algoritmų implementacija vykdoma programuojamų loginių elementų matricioje.

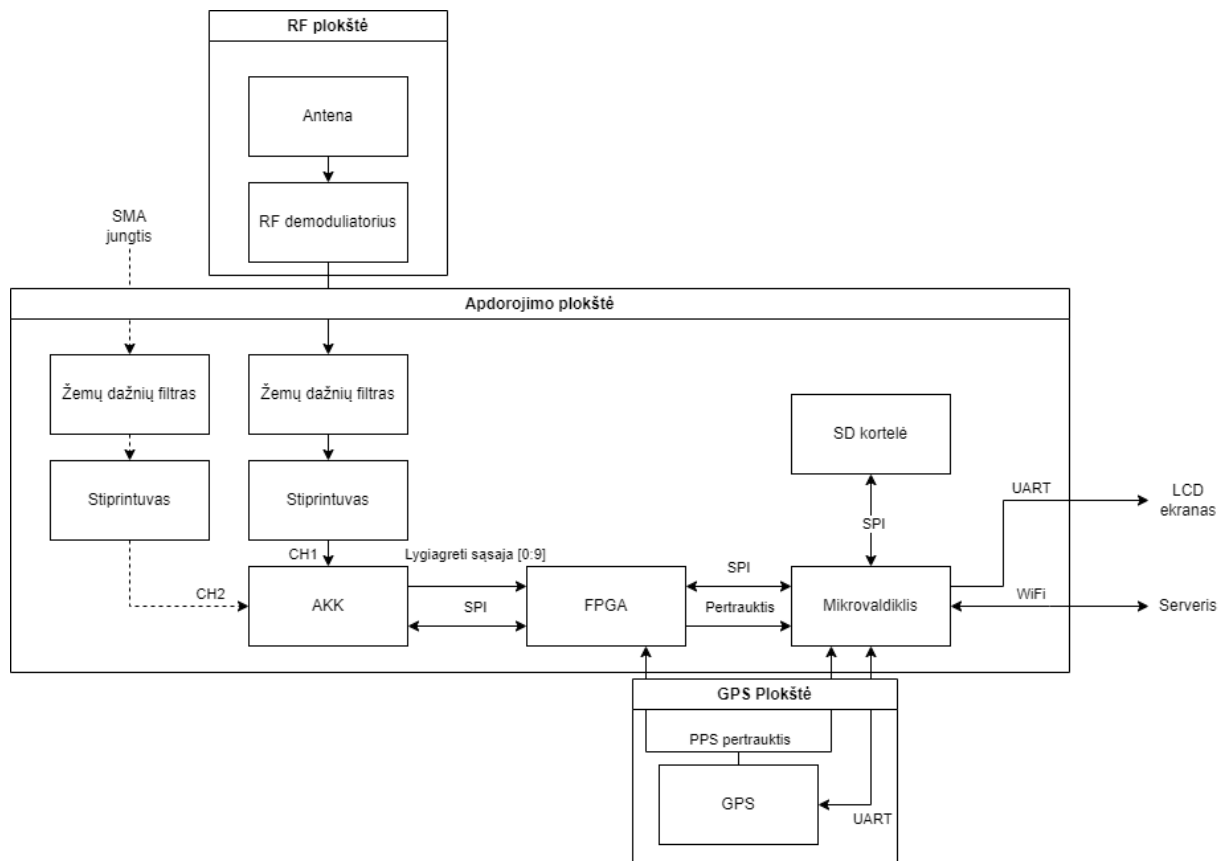
Vien FPGA lusto užduočiai atlikti neužtenka – reikalinga turėti pilna sistemą kuri gebėtų:

- priimti ADS-B 1090 MHz radijo dažnio signalą;
- demoduluoti radijo dažnių signalą iki 2 MHz dažnių juostos signalo;

- greitaeigiu analogas-kodas keitikliu skaitmenizuoti demoduliuotą signalą, apskaičiuoti koreliaciją su pasirinkta preambulės kauke bei pritaikyti adaptyvaus slenksčio kriterijų;
- išvesti aptiktų ADS-B signalų informaciją į asmeninį kompiuterį.

Šiems tikslams pasiekti naudojamas Bakalauro darbo metu sukurtas ADS-B signalų nuskaitymo įrenginys. Jį sudaro:

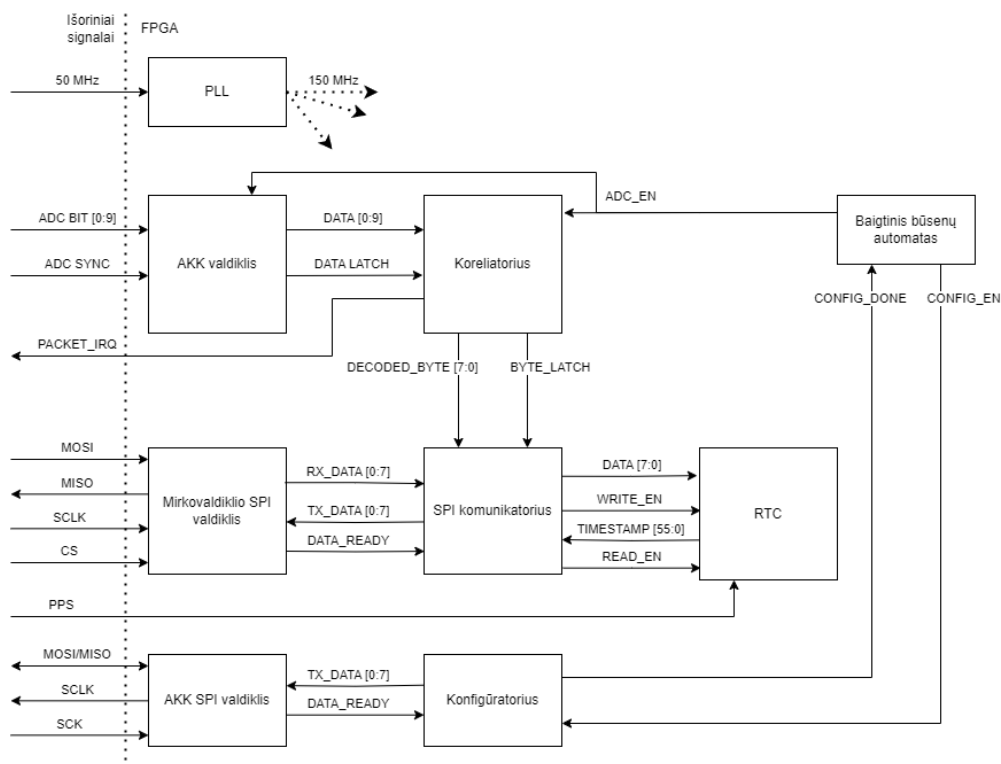
- radijo dažnių priėmimo traktas su 1090 MHz dažniui pritaikyta antena, logaritminiu galios detektoriumi atliekančiu ADS-B demoduliovimą, žemų dažnių filtru bei signalo stiprintuvu. Ši grandinė išbandyta praeito skyriaus dalyje – įrodyta, kad SDR siųstuvu išsiųstas sintezuotas ADS-B signalas sėkmingai demoduliuojamas (žr. 42 pav.);
- demoduliuoto signalo nuskaitymas MAX19516 AKK keitikliu veikiančiu 10 MHz diskretizavimo dažniu;
- analogas - kodas keitiklis ir Cyclone II EP2C5T144 programuojamų loginių elementų matrica sujungta lygiagrečia sąsaja. 10 bitų lygiagretus kanalas naudojamas 10 bitų raiškos atskaitoms perduoti. FPGA atlieka AKK modulio konfigūravimą papildoma SPI sąsaja;
- FPGA atlieka koreliacijos bei adaptyvaus slenksčio skaičiavimus;
- ESP32-S3 – mikrovaldiklis su *Wi-Fi* sąsaja priima FPGA nuskaitytą informaciją – aptiktų ir nuskaitytų ADS-B paketų informaciją – perduodamus duomenis, priėmimo laiką. Testavimo tikslams taip pat galima realiu laiku siųsti srautinius AKK nuskaitytų atskaitų ar koreliacijos tarpinių rezultatų duomenis. Jie yra perduodami į serverį veikiančią asmeniniame kompiuteryje, kuriame priimtas vertes galima atvaizduoti grafiškai bei atlikti tolimesnę veikimo analizę.



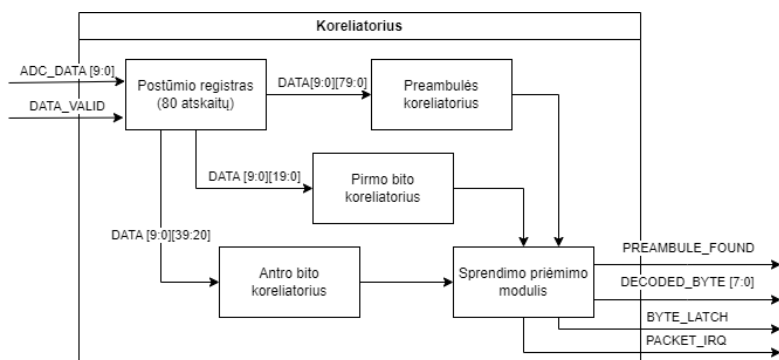
43 pav. Signalų nuskaitymo įrenginio su FPGA struktūrinė schema

FPGA lustas programuojamas naudojant Quartus II aplinką ir VHDL aparatinio aprašymo kalbą. Matrica yra taktuojama 50 MHz osciliatoriaus, o viduje PLL (angl. *Phase-Locked Loop*) generuoja vidinį 150 MHz taktinį dažnį. Didesnis taktavimo dažnis leidžia pagreitinti skaičiavimo procesą ir laikas nuo naujos atskaitos nuskaitymo iki koreliacijos rezultato gavimo trunka 18 taktų – 120 ns.

Matricoje taip pat realizuotos visos reikalingos sąsajų tvarkyklės bei tikslus laiko sekimo modulis. Visa programuojamos loginių elementų matricos struktūra pateikta žemiau.



44 pav. Pagrindinių FPGA modulių struktūrinė schema



45 pav. FPGA koreliatoriaus modulio detali struktūrinė schema

FPGA preambulės koreliatoriaus modulis praplečiamas adaptyvaus slenksčio skaičiavimo funkcija. Jai realizuoti reikalingas:

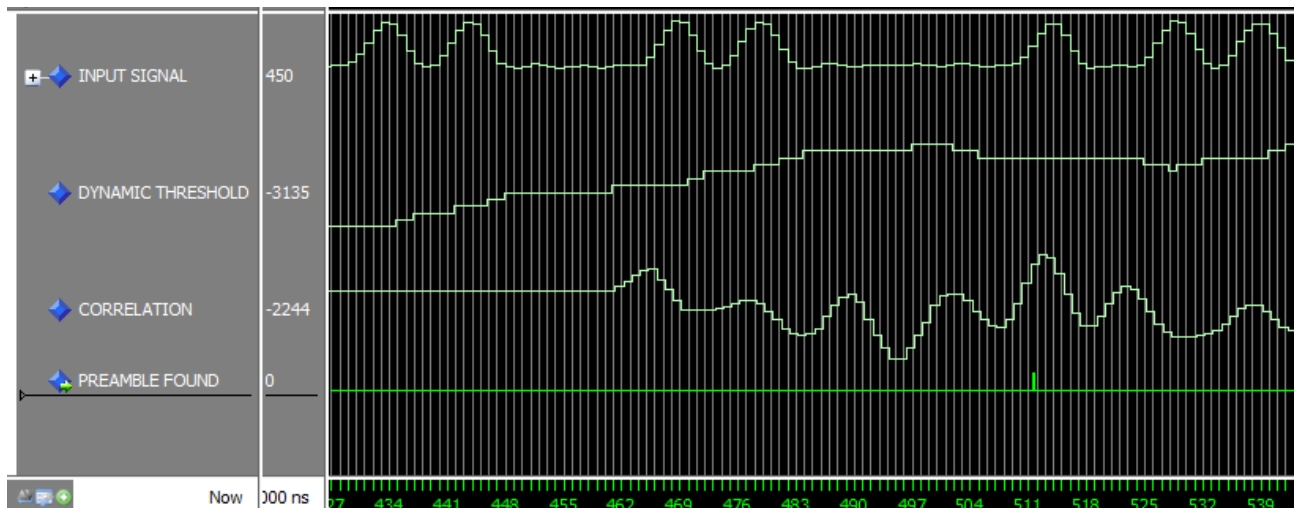
1. energijos skaičiavimas. Skaičiuojama signalo energija iš viso koreliacijos postūmio registro verčių. Skaičiavimus galima atlikti lygiagrečiai visam masyvui, bet norint sumažinti išnaudotų resursų kiekį pasinaudojamas FIFO (angl. *First In First Out*) principas – prie energijos kintamojo pridamos naujos iš AKK gaunamos vertės ir atimamos senos, kurios iš postūmio registro yra išstumiamos;
2. kintamo koreliacijos slenksčio nustatymas. Iš atliktų skaičiavimų *Python* aplinkoje išrenkami išplėtos koreliacijos kaukės, 2 eilės polinomo koeficientai: $-3.317314e-11$, $1.282381e-03$, $-3.156033e+03$. Programuojamų loginių elementų matricos veikia sveikųjų skaičių pagrindu,

norint dirbti su kintamo kabelio skaičiais reikalinga naudoti daug resursų užimančius IP blokus. Šiai problemai apeiti nuspręsta koeficientus transformuoti į sveikuosius skaičius padauginant iš statinio koeficiento, o gautą rezultatą tiek pat kartų sumažinti ir atgauti realią vertę. Pasirinkta visus koeficientus padauginti iš 2^{16} (naudojamas dvejetainis laipsnis, nes tai palengvina dalybos operaciją – ją galima pakeisti registro postūmiu per 16 bitų), todėl matricoje aprašyti koeficientai yra: 0, 84, -206833778.

Kaip matoma, pirmasis koeficientas yra labai mažas todėl net su papildoma daugyba nepasiekia sveikųjų skaičiaus, todėl bus prarasta šiek tiek tikslumo skaičiavimuose.

3. sprendimo priėmimas. Apskaičiuotas koreliacijos rezultatas palyginamas su kintamo slenksčio verte. Jei koreliacija viršija arba yra lygi vertei – vieno takto impulsu indikuojama, kad preambulė sėkmingai rasta ir galima pereiti į kitą etapą - duomenų bitų analizę.

Realizavus šiuos modulius ir sujungus su likusia nekeista FPGA sistema veikimas patikrinamas integruotos FPGA loginių elementų simuliacijos aplinkoje. Joje į simuliaciją paduodami išoriniai FPGA signalai kaip taktinis signalas ir AKK įėjimo duomenys o į ekraną išvedamos vidinių registų vertės:

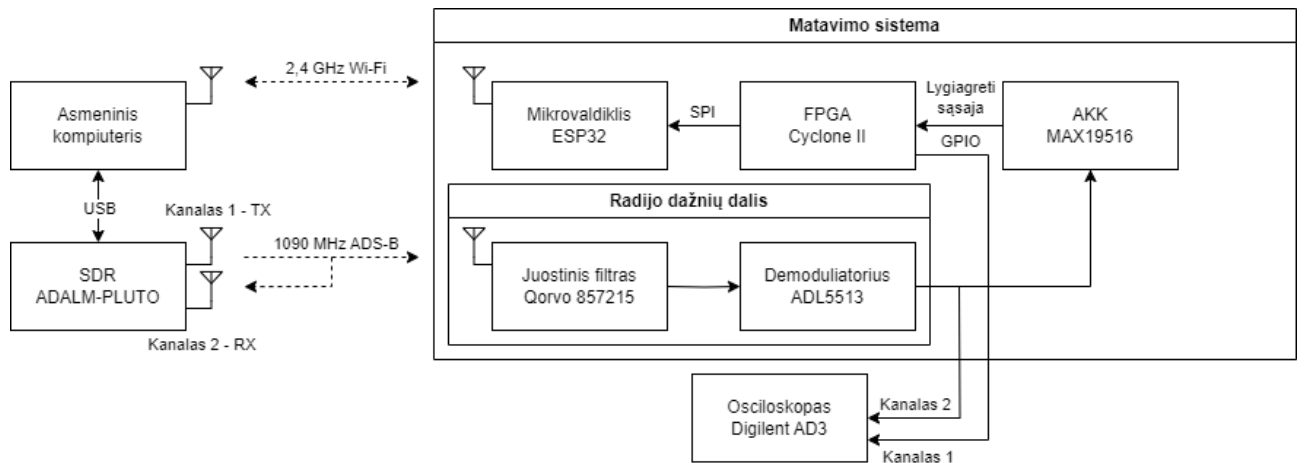


46 pav. ModelSim loginės simuliacijos FPGA signalų diagrama. Rodomi signalai nuo viršaus: įėjimo signalo, apskaičiuoto dinaminio slenksčio, koreliacijos rezultato ir preambulės atradimo indikacinio impulso

Matoma, kad 46 pav. atliktame FPGA loginių signalų simuliacijos rezultate sėkmingai indikuojama atrasta preambulė ties 511 μ s. Nuo preambulės pradžios iki atradimo taško praėjo 8,15 μ s.

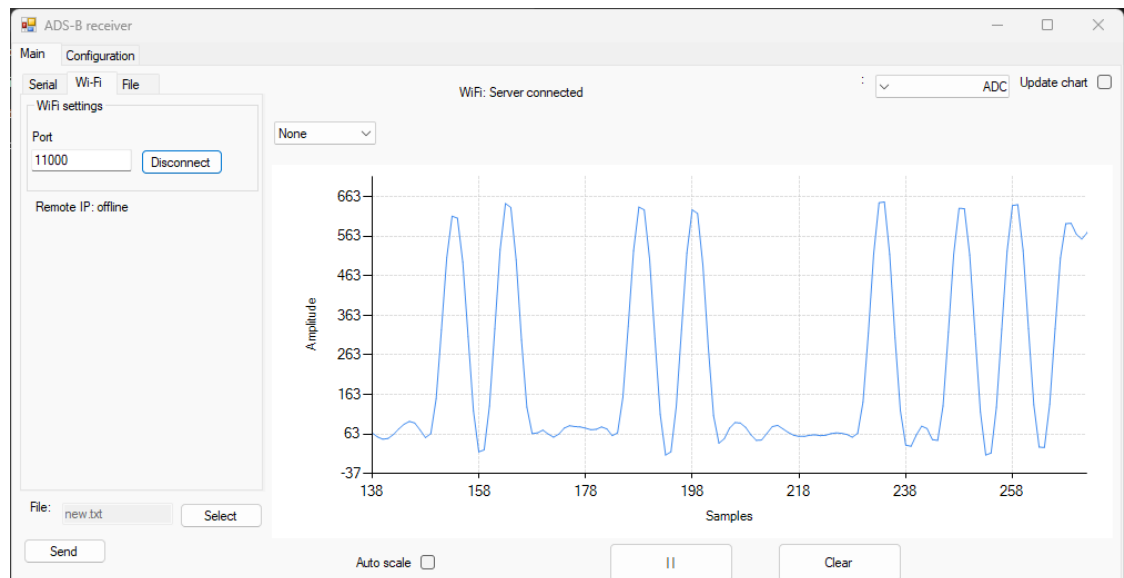
Simuliacija parodo, kad sėkmingai realizuotas ADS-B preambulės aptikimas panaudojant dinaminio koreliacijos slenkstį.

Toliau vykdomas sistemos patikrinimas realia aparatine įranga. Pakartojamas 36 pav. pateiktos schemos eksperimentas pilnai prijungus FPGA matricą veikimui su joje realizuotais išplėtos preambulės koeficientais bei dinaminio slenksčio skaičiavimo funkcija. Taip pat įrenginio veikimo analizei atlikti panaudojamas ESP32 mikrovaldiklis, *Wi-Fi* sąsaja bei asmeninio kompiuterio programinė įranga. Prijungtas papildomas osciloskopo kanalas (pirmas) preambulės aptikimo indikaciniam impulsui nuskaityti:



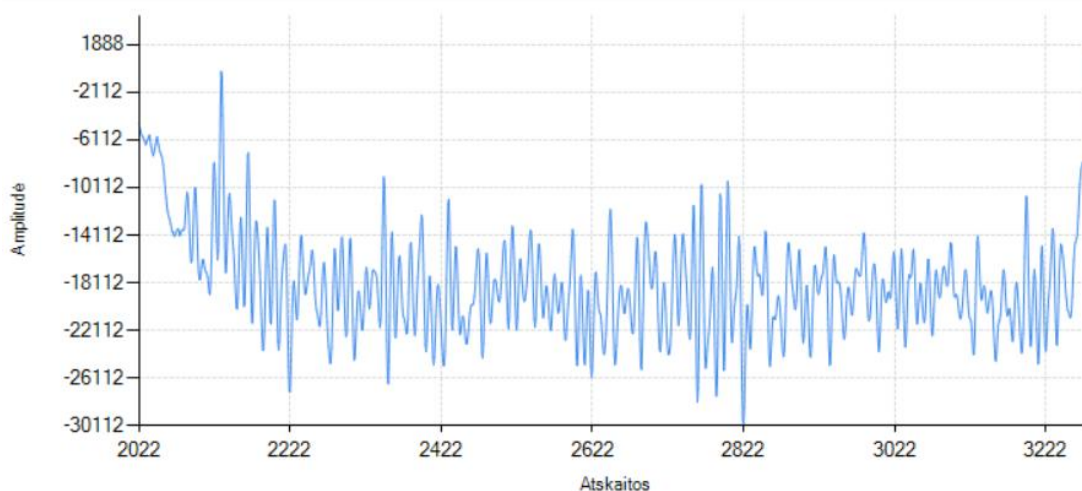
47 pav. Atnaujinta eksperimento struktūrinė schema

Pirma patikrinama, kokį AKK signalą nuskaityti FPGA plokštė. Tam įjungiamas „pralaidos“ (angl. *passthrough*) režimas, kuriuo FPGA tiesiogiai perduoda nuskaitytas atskaitas į mikrovaldiklį, o jis persiunčia į kompiuterį:



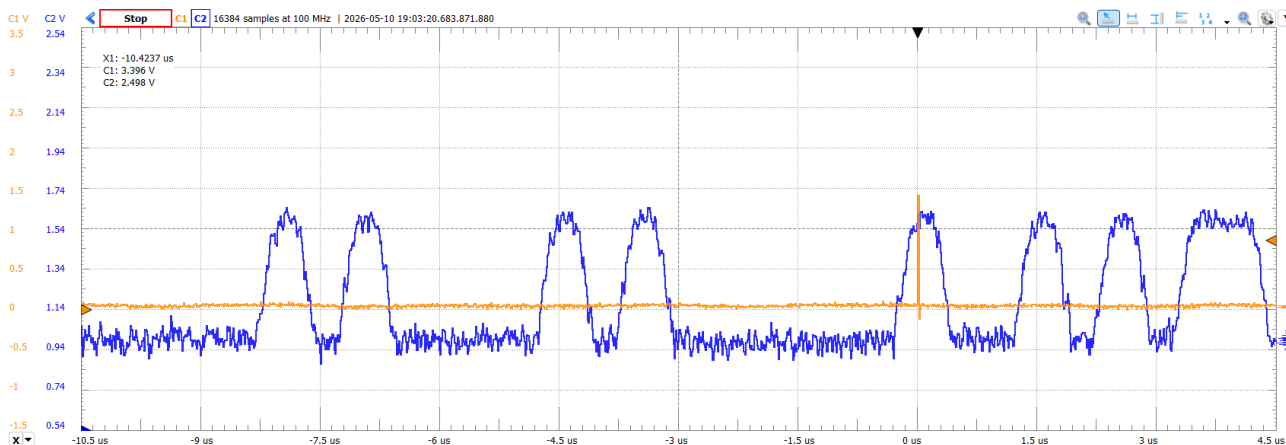
48 pav. FPGA iš AKK nuskaitymo signalo vaizdas kompiuterinės programos lange

Atskaitos iš AKK gautos geros – matoma puiki ADS-B signalo forma. Toliau išbandomas toks pat perdavimas, bet su koreliacijos vertėmis. Į ekraną išvedamas prailgintos koreliacijos kaukės rezultatas:



49 pav. Prailgintos koreliacijos kaukės rezultatas apskaičiuotas FPGA ir perduotas į kompiuterį

FPGA apskaičiuotos koreliacijos vertės atitinka matytą kompiuterinėse simuliacijose. Toliau išbandoma ar sėkmingai aptinkamas ADS-B preambulės signalas. Prie FPGA ir demoduliacijos išėjimų prijungiami osciloskopo kanalai siekiant išmatuoti signalų tarpusavio vėlinimą.



50 pav. ADS-B preambulės aptikimo eksperimento rezultato oscilograma. Pirmas kanalas (geltona) – preambulės aptikimo impulsas iš FPGA. Antras kanalas (mėlyna) – iš demoduliacijos ateinantis signalas.

Iš 50 pav. matoma, kad geltonas impulsas pasirodo iš karto po ADS-B preambulės kaukės signalo. Kadangi naudota 80 atskaitų prailginta koreliacijos kaukė – impulsas indikuojamas už preambulės kaukės 4 impulsų ir už 3 μ s pauzės intervalo. Stebima, kad impulsas taip pat pasirodo ties pirmojo duomenų bito viduriu, taip yra dėl vidinių FPGA skaičiavimų trukmės (120 ns.) bei AKK keitiklio vėlinimo (\sim 100 ns). Bendras laiko tarpas tarp preambulės pradžios ir jos aptikimo - 8,27 μ s, atitinka teorines simuliacijas.

Šiame skyriuje atliktas koreliacijos skaičiavimo algoritmo išbandymas realia aparatine įranga. Gautos oscilogramos ir vidinių skaičiavimų vertės rodo, kad turima sistema veikia. Taip pat sėkmingai pritaikytas išplėtos preambulės kaukės koreliacijos algoritmas su pritaikytu dinamiu slenksčiu - teisingai indikuoja preambulės pabaigos tašką. Šie rezultatai patvirtina atliktą kompiuterinės simuliacijos tikslumą – rezultatai atkartojami realiame pasaulyje.

Išvados

1. Darbo metu apžvelgtos lėktuvų navigacijos sistemos, jų signalų ypatybės. Nustatyta, kad aktualiausi - ADS-B, TCAS ir GNSS signalai pasižymi panašia forma bei preambulės egzistavimu, todėl nuspręsta nagrinėti ADS-B triukšmo įtaką su galimybe rezultatus pritaikyti ir kitoms sistemoms;
2. Padaryta mokslinių darbų apžvalga išryškino du pagrindinius ADS-B detekcijos variantus – koreliacijos ir skaitinių metodų panaudojimą. Skaitinių rodiklių metodas modifikuojamas keičiant algoritmų būsenas ar signalo sekamas savybes – dažnį, fazę, amplitudę ar aptiktų impulsų tarpusavio laiko skirtumus. Koreliacijos metode pagrindiniai varijuojami parametrai yra naudojamos koreliacijos kaukės koeficientai, jos ilgis bei naudojama slenkstinė vertė signalo aptikimui identifikuoti;
3. Išbandyti koreliacijos skaičiavimo metodai pritaikant šešias skirtingas koreliacijos kaukes. Kiekviena iš jų skiriasi savo forma, koeficientų amplitudė bei jų skaičiumi. Išnagrinėti jų ADS-B preambulės aptikimo efektyvumą sudaryta kompiuterinių simuliacijų *Python* aplinka;
4. Simuliacijų aplinkoje parodytos galimybės sintezuoti ADS-B paketus idealiomis bei triukšmo sąlygomis. Sukurtiems signalams atlikti koreliacijos skaičiavimai parodė koreliacijos formos skirtumus tarp skirtingų kaukių. Taip pat pastebėta, kad su didėjančiu ar mažėjančiu signalo lygiu koreliacijos amplitudė žymiai pakinta, todėl norint sėkmingai aptikti bet kokios amplitudės signalą reikalinga taikyti adaptyvios koreliacijos slenkstinės vertės skaičiavimą;
5. Adaptyvi koreliacijos slenkstinė vertė suskaičiuota pasinaudojant signalo energijos ir tikėtino koreliacijos amplitudės ties preambulės pabaiga priklausomybę. Ji gauta pasinaudojus Monte Karlo metodo kompiuterines simuliacijas. Ši priklausomybė aprašyta antro ir penkto laipsnio polinomais. Turint adaptyvios koreliacijos slenksčio skaičiavimo funkciją ji pritaikyta visoms koreliacijos kaukės formoms ir išbandyta generuojant skirtingos amplitudės signalus bei tikrinant preambulės aptikimo kriterijų. Išvesta preambulės aptikimo klaidų santykio metrika parodė, kad nors preambulės forma aiškiausia išplėtos kaukės formos, bet klaidų dažnis mažiausias idealios preambulės formos. Ties 0 dB ji rodo 0,6 klaidingų preambulės aptikimų santykį ir krenta kol ties 9 dB siekia 0,1. Antras geriausias variantas – išplėtos preambulės kaukės pradedant veikimą nuo 0,9 klaidų santykio ir pasiekiant 0,15 ties 14 dB. Geresnis idealios preambulės kaukės rezultatas aiškinamas mažesne triukšmo įtaka jos koreliacijos skaičiavimo rezultatui;
6. Siekiant išbandyti algoritmo pritaikymą realiame pasaulyje jis pritaikytas veikti programuojamoje loginių elementų matricoje. Pirma pasitelktas SDR siųstuvus siekiant išsiųsti sugeneruotą ADS-B paketą į erdvę ir išbandyti naudojamo ADS-B demoduliatoriaus veikimą. Patvirtinus sėkmingą funkcionalumą pereita prie FPGA programavimo dalies - realizuotas energijos skaičiavimas, polinomo pritaikymas bei slenksčio kriterijaus pritaikymas;
7. Teisingas skaičiavimų veikimas įrodytas FPGA simuliacijomis bei realia aparatine įranga. Išvesti ir išanalizuoti tarpiniai FPGA skaičiavimo rezultatai – nuskaityto signalo, koreliacijos bei dinaminio slenksčio signalo formos atitinka teorinius rezultatus. Tą patį indikuoja ir išvesti pagalbiniai signalai – FPGA sėkmingai indikuoja ADS-B preambulės kaukės aptikimą.

Literatūros sąrašas

1. Talia Belz, et al. *Air Travel Demand Outlook 2025: Steady Growth Despite Supply Constraints*. - 03-31, 2025 [viewed May 20, 2025]. Available from: <https://www.bcg.com/publications/2025/air-travel-demand-outlook>.
2. Federal Aviation Agency. Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B), 2024 [viewed May 20, 2025]. Available from: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afx/afs/afs400/afs410/ads-b.
3. *Lithuania: Country Records 300 Cases of Gps Jamming in One Month*. , Apr 1, 2025 Available from: <https://www.emis.com/php/search/doc?pc=UA&dcid=881389178&primo=1>.
4. International Civil Aviation Organization. *TECHNICAL SPECIFICATIONS ON NAVAIDS DME (Distance Measuring Equipment)*. , 02 02, 2000 [viewed May 5, 2026]. Available from: <https://www.airports.co.za/Documents/Annex%20B%20-%20DME%20Spec.pdf>.
5. International Civil Aviation Organization. *Aeronautical Telecommunications - Radio Navigation Aids*. , -07-01, 2018 [viewed May 5, 2026]. Available from: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-10-Aeronautical-Telecommunications-Vol-I-Radio-Navigation-Aids.pdf>.
6. International Civil Aviation Organization. *Specification for ILS Instrument Landing System*. [viewed May 5, 2026]. Available from: <https://www.etenders.gov.za/home/Download/?blobName=15405005-43e5-41b0-9263-5e7ae4267505.pdf&downloadedFileName=Appendix%20A%20-%20ILS%20Spec.pdf>.
7. Brent Aero. *ADS-B what is it?* 04, Feb, 2018 Available from: <https://brantaero.com/2018/02/04/ads-b-what-is-it/>.
8. E. BALMUS. *NavAids - an Introduction into the Signals of ILS, DME and VOR*. , 2019 [viewed Apr 13, 2025]. Available from: <https://www.skyradar.com/blog/navaids-a-technical-introduction-into-architecture-and-signals-of-ilsdme-and-vor>.
9. International Civil Aviation Organization. *Radio Navigation Aids. Aeronautical Telecommunications*, 2006, vol. 1 [viewed Apr 13, 2025]. Available from: <https://www.pilot18.com/wp-content/uploads/2017/10/Pilot18.com-ICAO-Annex-10-Volume-1-Radio-Navigation-Aids.pdf>.
10. Federal Aviation Administration. *Introduction to TCAS II*, 2011 [viewed May 20, 2025]. Available from: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/tcas%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf.
11. Flightradar24 — how does it work? Part 2, ADS-B protocol, 2019 Available from: <https://habr.com/en/articles/447078/>.
12. Yao Xiao and Xi zhang Wei. *Specific Emitter Identification of Radar Based on One Dimensional Convolution Neural Network*, 2020 [viewed May 11, 2025]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/342204291_Specific_emitter_identification_of_radar_base

ed on one dimensional convolution neural network/link/5ef37c9c299bf15a2e9d53f1/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoicHVibGljYXRpb24iLCJwcmV2aW91c1BhZ2UiOiJfZGlyZWN0In19 DOI 10.1088/1742-6596/1550/3/032114.

13. What's the relation between ADS-B and MODE S. -10-13, 2021 [viewed May 11, 2025]. Available from: <https://aviation.stackexchange.com/q/89700>.

14. MELTSOV, V.Y., LAPITSKY, A.A., LESNIKOV, V.A. and KUVAEV, A.S. *Features of Decoding Transponder Signal of an Aircraft using FPGA*. IEEE, Jan 2019 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8656910> DOI 10.1109/EIConRus.2019.8656910.

15. *Flight Radar*. Available from: <https://www.flightradar24.com/3d6b9182>.

16. *OpenSky Network*. Available from: <https://opensky-network.org/>.

17. TROYA, A., et al. Low-Power VLSI Implementation of the Inner Receiver for OFDM-Based WLAN Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Regular Papers*, Mar 1, 2008, vol. 55, no. 2. pp. 672–686. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4400058> CrossRef. ISSN 1549-8328. DOI 10.1109/TCSI.2007.913732.

18. BERNHART, S. and LEITGEB, E. *Evaluations of Low-Cost Decoding Methods for 1090 MHz SSR Signals*. IEEE, Jul 2018 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8443986> DOI 10.1109/COBCOM.2018.8443986.

19. DO, V.L., NGUYEN, H.P.K., TRAN, N.T. and NGUYEN, T.B. *TDOA-Based Passive Tracking of Multiple Civilian Airplanes*. Piscataway: IEEE, Dec 2019 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9008710> DOI 10.1109/ICSPCS47537.2019.9008710.

20. CHIOCCHIO, S., et al. Modeling and Evaluation of Enhanced Reception Techniques for ADS-B Signals in High Interference Environments. *Physical Communication*, Oct, 2020, vol. 42. pp. 101171. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101171> CrossRef. ISSN 1874-4907. DOI 10.1016/j.phycom.2020.101171.

21. HABIBI MARKANI, J., AMRHAR, A., GAGNÉ, J. and LANDRY, R.J. NextGen ADS-B Software-Defined Reception with Enhanced Techniques. *Applied Sciences*, Jan 1, 2023, vol. 13, no. 1. pp. 493. Available from: <https://www.proquest.com/docview/2761152099> CrossRef. ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/app13010493.

22. *Intro Reflection Seismics*. Available from: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Intro_reflection_seismics_Appendix_B_Correlation.pdf.

23. Fred J. Taylor. *Signal Processing, Digital*. , 2003.

24. Jun-xiang QIN and Jun YANG. Design and Implementation of Spaceborne ADS-B Message Detection Algorithm, 2018 [viewed May 13, 2025]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/327923801_Design_and_Implementation_of_Spaceborne_ADS-B_Message_Detection_Algorithm DOI 10.12783/dtetr/amee2018/25340.

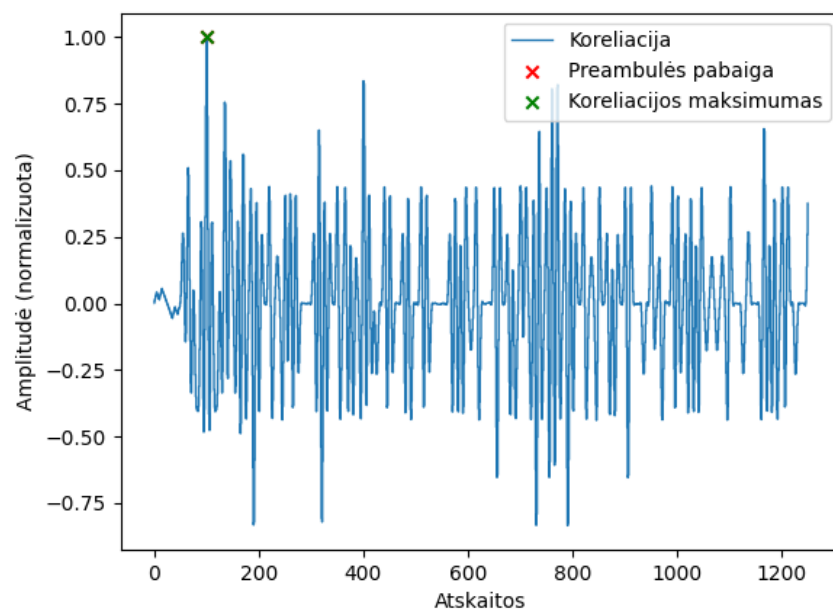
25. NEINDRE, F.L., et al. *Kernel Density Estimation for the Detection and Synchronization of Interfered Mode S / ADS-B Preamble*. Piscataway: IEEE, Apr 5, 2022 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9771481> DOI 10.1109/ICNS54818.2022.9771481.

26. NEINDRE, F.L., et al. *Aircraft Signal Detection in Heavy Co-Channel Interference Environment*. Piscataway: IEEE, Nov 18, 2020 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9282328> DOI 10.1109/LATINCOM50620.2020.9282328.
27. EROKHIN, V., MEZHETOV, M., PORTNOVA, T. and TURINTSEV, S. Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation Singapore: Springer, 2022 *Correlator of the Preamble of an Automated Dependent Surveillance Signal*, pp. 219–233. Available from: http://ebookcentral.proquest.com/lib/SITE_ID/reader.action?docID=7119907&ppg=220 ISBN 9811937877. DOI 10.1007/978-981-19-3788-0_20.
28. REN, P., WANG, J., YANG, S. and SONG, H. A Prototype of High-sensitivity Noncoherent Receiver for ADS-B Signals. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, Jul, 2020, vol. 38, no. 4. pp. 341–354. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002%2Fsat.1338> CrossRef. ISSN 1542-0973. DOI 10.1002/sat.1338.
29. REN, P., et al. A Novel Multi-Criteria Preamble Detection Algorithm for ADS-B Signals. *IEEE Access*, 2019, vol. 7. pp. 97319–97332. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8767962> CrossRef. ISSN 2169-3536. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2929830.
30. LEONARDI, M. and MAISANO, M. *Dejarbling Technique for Low Cost ADS-B Receivers*. Piscataway: IEEE, Jun 2019 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8869689> DOI 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869689.
31. ZHANG, Y., LI, W. and DOU, Z. *Performance Analysis of Overlapping Space-Based ADS-B Signal Separation Based on FastICA*. Piscataway: IEEE, Dec 2019 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9024653> DOI 10.1109/GCWkshps45667.2019.9024653.
32. CHEN, S., ZHENG, S., YANG, L. and YANG, X. Deep Learning for Large-Scale Real-World ACARS and ADS-B Radio Signal Classification. *IEEE Access*, 2019, vol. 7. pp. 89256–89264. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8750803> CrossRef. ISSN 2169-3536. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2925569.
33. XIAO, Y. and WEI, X.z. Specific Emitter Identification of Radar Based on One Dimensional Convolution Neural Network. *Journal of Physics. Conference Series*, May 1, 2020, vol. 1550, no. 3. pp. 32114. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1550/3/032114> CrossRef. ISSN 1742-6588. DOI 10.1088/1742-6596/1550/3/032114.
34. LEONARDI, M. and MAISANO, M. *Dejarbling Technique for Low Cost ADS-B Receivers*. Piscataway: IEEE, Jun 2019 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8869689> DOI 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869689.
35. LV, H., SHANG, Y., LIU, E. and LI, L. *A Portable ADS-B Receiver for Air Traffic Surveillance*. New York, NY, USA: ACM, Oct 20, 2020 DOI 10.1145/3424978.3425154.
36. BUDROWEIT, J., JAKSCH, M.P. and DELOVSKI, T. *Design of a Multi-Channel ADS-B Receiver for Small Satellite-Based Aircraft Surveillance*. IEEE, Jan 2019 Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8714514> DOI 10.1109/RWS.2019.8714514.

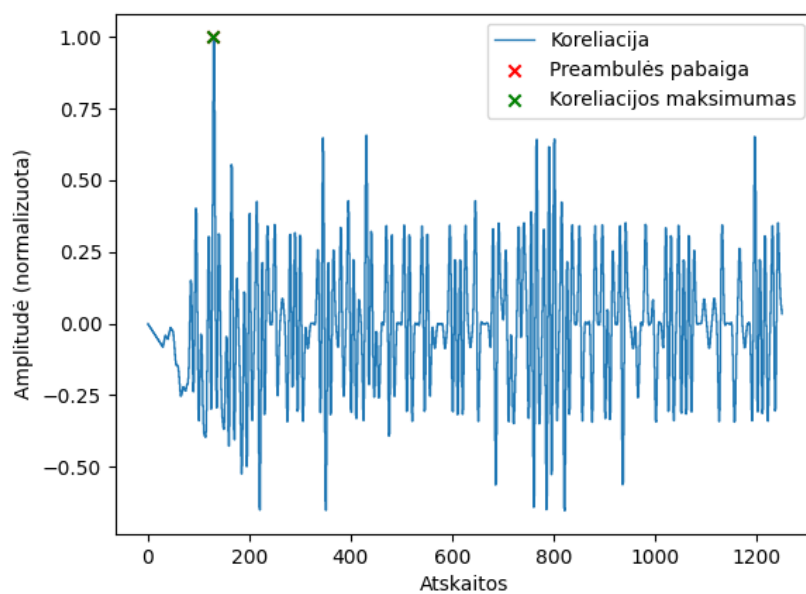
37. Harald Welte. *Osmocom ADS-B Test Signal Generator*. , 2015 [viewed May 20, 2025]. Available from:<https://gitea.osmocom.org/sdr/osmo-adsb-gen>.
38. Junzi Sun. The 1090 Megahertz RiddleElsevier, 2016 [cited May 12, 2025]. *Error Control in ADS-B*, pp. 409–455. Available from:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124076822000107> ISBN 9780124076822. DOI 10.1016/B978-0-12-407682-2.00010-7.
39. Analog Devices. *ADALM-PLUTO*. Available from:<https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html#eb-overview>.
40. *ADS-B & Mode S Online Decoder*. Available from:<https://ads-b.dev/?packet=8D406B902015A678D4D220AA4BDA>.

Priedai

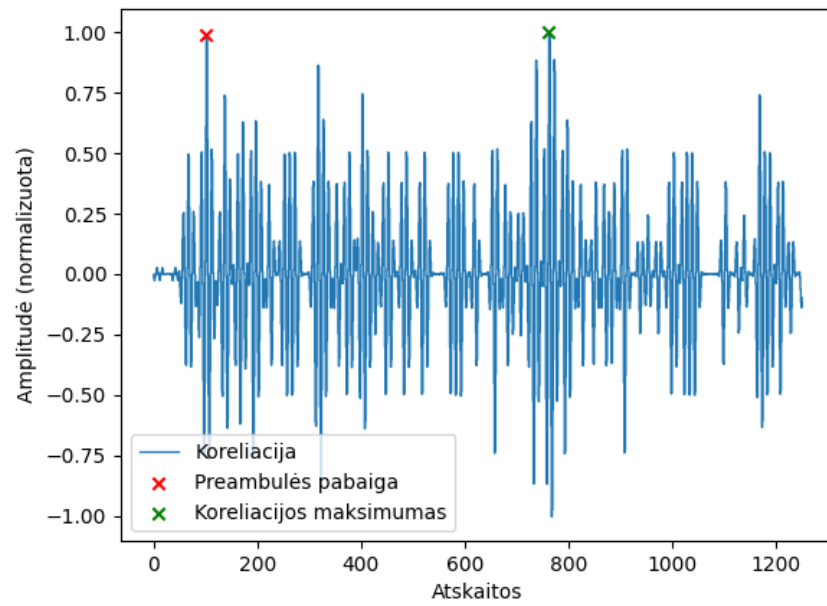
1 priedas. Preambulės kaukių koreliacijos rezultatai



51 pav. Preambulės su neigiamais normalizuotais koeficientais (žr. 18 pav. (c)) koreliacijos rezultatas

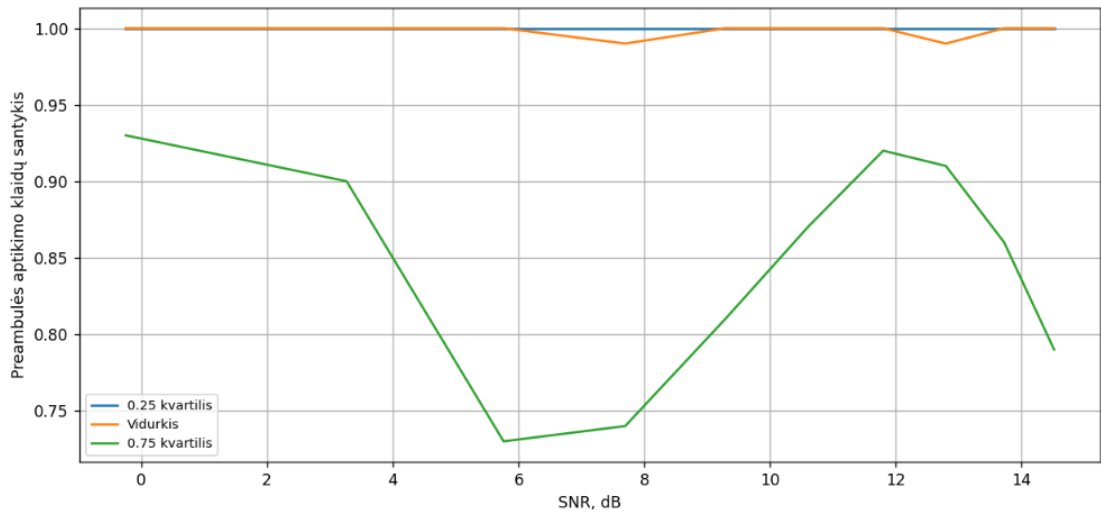


52 pav. Išplėstos normalizuotos preambulės (žr. 18 pav. (e)) koreliacijos rezultatas

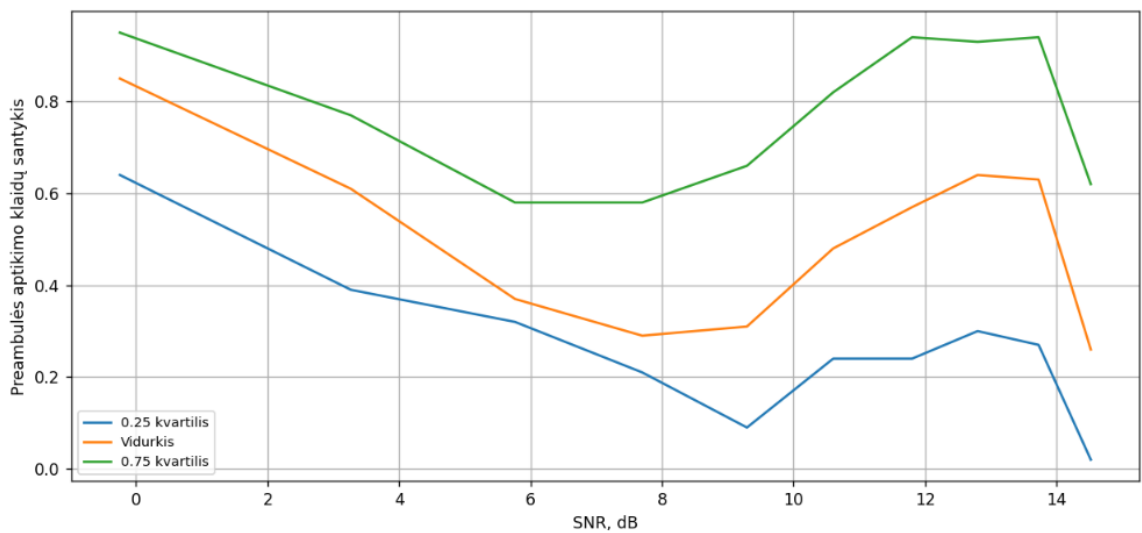


53 pav. Diferencijuotos preambulēs (žr. 18 pav. (f)) koreliācijas rezultāts

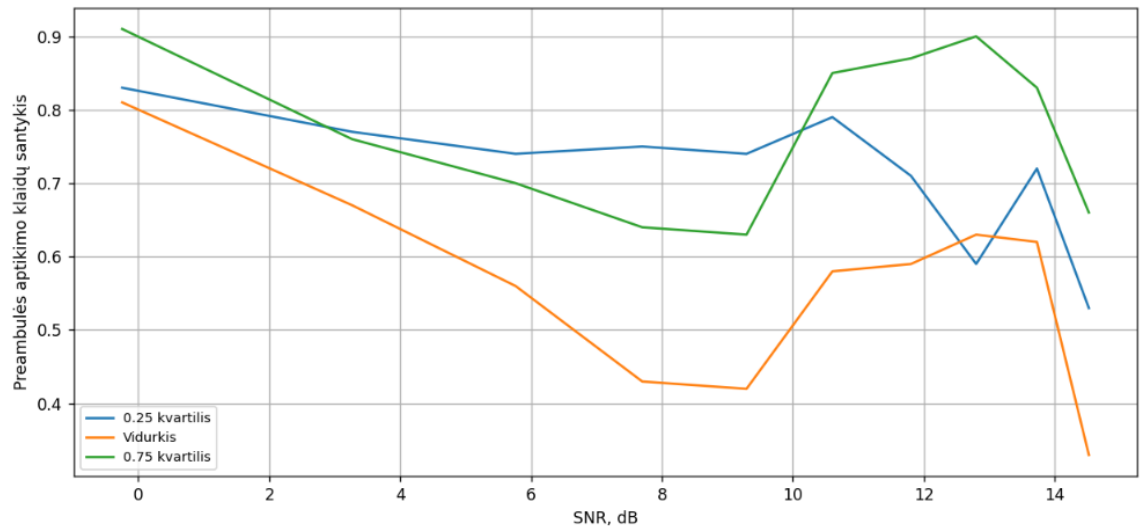
2 priedas. Preambulės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio naudojant adaptyvaus slenksčio skaičiavimus



54 pav. Neigiamos koreliacijos kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio



55 pav. Išplėtos normalizuotos koreliacijos kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio



56 pav. Diferencijuotos kaukės aptikimo klaidų santykio priklausomybė nuo SNR lygio