



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

Laurynas KRASINSKAS

**PERSPEKTYVIŲ RADIONAVIGACIJOS TECHNOLOGIJŲ ORLAIVIŲ
SKRYDŽIŲ VALDYMUI TYRIMAS**

**PROMISING NAVIGATION TECHNOLOGY RESEARCH
FOR AIRCRAFT OPERATIONAL MANAGEMENT**

Magistro baigiamasis darbas

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Aviacinės elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H43002

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)
doc. dr. A. Jakučionis
2012 m. _____ mėn. ____ d.

Laurynas KRASINSKAS

**PERSPEKTYVIŲ RADIONAVIGACIJOS TECHNOLOGIJŲ ORLAIVIŲ
SKRYDŽIŲ VALDYMUI TYRIMAS**

**PROMISING NAVIGATION TECHNOLOGY RESEARCH
FOR AIRCRAFT OPERATIONAL MANAGEMENT**

Magistro baigiamasis darbas

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Aviacinės elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H43002

Vadovas	doc. dr. A. Jakučionis	_____	_____
	(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	(parašas)	(data)
Konsultantė	Regina Žukienė	_____	_____
	(pareigos, vardas, pavardė)	(parašas)	(data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Laurynas Krasinskas, 20064614

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Antano Gustaičio aviacijos institutas

(Fakultetas)

Aviacinė elektronika, AEfm-10

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2012 m. gegužės 30 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Perspektyvių radionavigacijos technologijų orlaivių skrydžių valdymui tyrimas“ patvirtintas 2011 m. spalio 25 d. dekanų potvarkiu Nr. 148ai, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Regina Žukienė. Mano darbo vadovas doc. dr. Algimantas Jakučionis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Laurynas Krasinskas

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Antano Gustaičio aviacijos institutas

Aviacijos prietaisų katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 2

Data 2012-05-31

Aeronautikos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **perspektyvių radionavigacijos technologijų orlaivių skrydžių valdymui tyrimas**

Autorius **Laurynas Krasinskas**

Vadovas doc. dr. A. Jakučionis

Kalba

☒ X

Lietuvių

☐

Užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekamas perspektyvių radionavigacijos technologijų orlaivių skrydžių valdymui tyrimas. Pirmojoje tiriamojo darbo dalyje apžvelgtos oro kelių stebėjimo priemonės, tai pirminiai ir antriniai radiolokatoriai. Trumpai aptarti jų veikimo principai. Aprašyti du pagrindiniai automatinio duomenų perdavimo tinklai ATIS ir VOLMET. Antrojoje dalyje didesnis dėmesys skirtas automatinio priklausomo sekimo sistemoms. Atliktais tyrimais palyginti du galimai perspektyvūs ADS-B žinučių perdavimo protokolai: 1090ES ir UAT. „Matlab“ sistemos terpėje sumodeliuoti 1090ES ir UAT protokolus atitinkantys signalai. Ištirtos UAT duomenų perdavimo sistemos sinchronizavimo charakteristikos. Gavus tyrimo rezultatus palygintos UAT imtuve priimamo signalo priklausomybės nuo imčių kiekio ir triukšmo lygio. Ištirta dviejų skirtingų pralaidumo juostų filtrų įtaka teisingo UAT signalo sinchronizavimui. Sinchronizavimo modeliui buvo naudojamas vienas iš Naikvisto filtrų. Darbe palyginta UAT ir 1090ES sistemų architektūra. Darbo pabaigoje aptartos ADS-B sistemos perspektyvos.

Darbo apimtis – 51 p. teksto be priedų, 22 iliustr., 4 lent. 27 bibliografinių šaltinių, 1 priedas.

Prasminiai žodžiai: ADS-B, ADS-A, radionavigacija, VOLMET, ATIS, Naikvisto filtras, UAT, 1090ES, VDL mode 4, duomenų perdavimo protokolai.

VilniusGediminasTechnicalUniversity
Antanas Gustaitis Aviation Institute
Department of Avionics

ISBN ISSN
Egz. sk. 2
Data 2012-05-31

Master thesis of study programme in Aerospace Engineering.

Title: **Promising navigation technology research for aircraft operational managment**

Author: **Laurynas Krasinsas**

Supervisor doc. dr. A. Jakučionis

Language

☒ Lithuanian
☐ Foreign

Annotation

The thesis made the promising navigation technology research for aircraft operational management. The first part outlines the research work of several air-monitoring instruments, the primary and secondary radar. Briefly discuss the principles of this system operation. This tiesis describe the two main automatic data transmission networks ATIS and VOLMET. The second part focuses on automatic dependent surveillance systems. Study compared two potentially veble ADS-B message transmission protocols: UAT and 1090ES. The "Matlab" software was used for simulating 1090ES and UAT signals. „Matlab“ was used to investigated the synchronization of UAT data transmission characteristics. Upon comparison of the results UAT receiver incoming signal dependence on sample rate and noise level. The influence of two different bandwidth filters was investigate for correct UAT signal synchronization. For synchronization model was used one of the Nyquist filter. The paper compared 1090ES and UAT systems architecture as well . At the end of this tiesis is discuss the ADS-B systems perspective.

Thesis consist of: 51 p. text without appendixes, 22 pictures, 4 tables, 27 bibliographical entries, 1 appendix.

Keywords: ADS-B, ADS-A, radionavigation, VOLMET, ATIS, Nyquist filter, UAT, 1090ES, VDL mode 4, digital data communication.

Turinys

1. Įvadas.....	7
2. Klasikinės orlaivių skrydžių valdymo priemonės	8
2.1. Pirminiai radiolokatoriai	8
2.2. Antrinis radiolokatorius	12
2.3. Automatinio priklausomojo sekimo sistema.....	15
2.3.1. Išplėstinis S , 1090 ES protokolas.	17
2.3.2. Universalios prieigos imtuvas – siųstuvas UAT	18
3. Oro eismo valdymo ryšio tinklai	21
3.1. Aeronautikos fiksuotojo tolimojo ryšio tinklas AFTN	21
3.2. Meteorologinės informacijos tinklai VOLMET, ATIS	22
3.3. Globali oro eismo valdymo sistema CNS/ATM.....	23
4. Automatinės priklausomojo sekimo sistemos (ADS-B) duomenų keitimosi protokų analizė ..	24
4.1. ADS-B sistemos duomenų perdavimo protokolai	24
4.1.1. 1090ES signalo kodavimo technika	25
4.1.2. 1090ES signalo generatoriaus projektavimas.....	26
4.1.3. Signalų moduliavimas	27
4.1.4. 1090ES signalo generavimas.....	28
4.2. 1090ES duomenų perdavimo sistemos veikimo nuotolis	29
4.3. UAT duomenų keitimosi sistemos sinchronizavimo tyrimas	30
4.3.1. Sinchronizavimo procesas	31
4.3.2. Sinchronizavimo charakterizavimas.....	32
4.3.3. Netikro pavojaus signalo lygis	38
4.4. UAT imtuvo jautrumo tyrimas	40
5. UAT ir 1090ES sistemų palyginimas	42
5.1. ADS-B borto sistemos architektūros palyginimas: 1090ES ir UAT	43
6. ADS-B diegimo perspektyvos	46
7. Išvados.....	47
Naudota literatūra	49
Priedai	51

1. Įvadas

Augant žmonių gyvenimo tempui gerokai padaugėjo ir orlaivių, skraidančių erdvėje, išaugo jų greičiai. To pasekmė – griežtinami reikalavimai, užtikrinantys skrydžio saugumą ir tikslų skrydžių valdymą, net ir esant prastoms meteorologinėms sąlygoms. Taigi augant orlaivių apimčiai turi tobulėti ir užtikrinanti skrydžių saugumą aparatūra.

Skrydžių valdymas – tai orlaivių skrydžių planavimo, koordinavimo, nustatyto skrydžio režimo kontrolės kompleksas. Skrydžių valdymui gali būti naudojamos įvairios radionavigacinės priemonės: radiolokatoriai, automatiniai skrydžio valdymo įrenginiai, tūpimo pagal prietaisus sistemos.

Aviacijos pradžioje dėl nedidelio orlaivių skaičiaus užtekdamo vizualinio orientavimosi erdvėje, tačiau, pradėjus vystyti aviacijai ir prasidėjus skrydžiams pagal prietaisus, ėmė didėti orlaivių srautai, pradėtos diegti įvairios radionavigacijos priemonės: radijo švyturiai, radiolokatoriai, tūpimo pagal prietaisus sistemos. Srautui vis augant buvo pradėta mąstyti apie tai, kaip būtų galima tikslingiau panaudoti oro kelius ir išvengti žmogaus klaidų. Tokiu tikslu pradėtos diegti automatizuotos skrydžių valdymo sistemos, kurios įgalintos ne tik priimti informaciją apie orlaivio padėtį, aukštį ir jo numerį, bet ir daug efektyviau išnaudoti oro erdvę.

Norint kuo efektyviau išnaudoti oro erdvę ir užtikrinti skrydžių saugumą net ir labai sudėtingomis meteorologinėmis sąlygomis, į orlaivių valdymą reikia žiūrėti kaip į organizacinių, techninių bei technologinių priemonių visumą.

Šio baigiamojo magistro darbo tema – perspektyvių radionavigacijos technologijų orlaivių skrydžių valdymui tyrimas. Pirmiausia apžvelgiama su darbo tema susijusi literatūra, išnagrinėtos dažniausiai naudojamos skrydžių valdymui priemonės.

2. Klasikinės orlaivių skrydžių valdymo priemonės

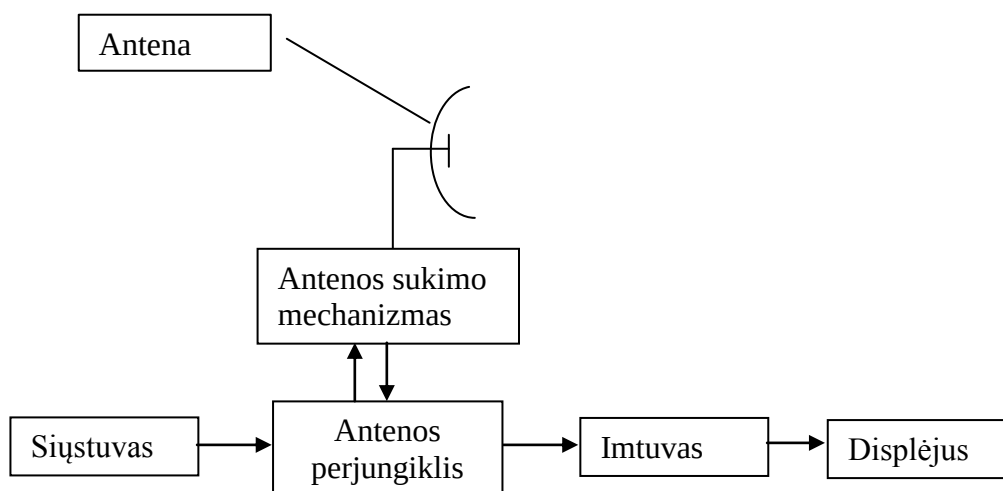
Šiuo metu egzistuoja dvi pagrindinės skrydžių valdymo priemonės. Pirmoji – pirminis radiolokatorius. Pirminiai radiolokatoriai dirba principu, kai priimamas nuo objekto (reljefo ar orlaivio) atspindėtas signalas, kurį išsiunčia radiolokatorius. Antroji – antrinis radiolokatorius. Šio tipo radiolokatoriai gali ne tik išmatuoti azimutą ar atstumą iki objekto, bet ir gauti papildomos informacijos apie objektą. Papildoma informacija gali būti:

- Orlaivio skrydžio aukštis;
- Orlaivio reiso numeris;
- Avariniai signalai.

Smarkiai populiarėjanti skrydžių valdymo priemonė yra automatinio priklausomojo sekimo sistema – ADS (angl. *automatic dependent surveillance*). Ši sistema gali būti dviejų pagrindinių tipų: ADS – A ir ADS – B. Šių tipų sistemas plačiau aptarsime tolesniuose skyriuose.

2.1. Pirminiai radiolokatoriai

Kaip jau buvo minėta anksčiau, pirminiai radiolokatoriai, siųsdami ir priimdami nuo objekto atspindėtas bangas, priešingai nei antriniai radiolokatoriai, nenaudoja aktyvaus atsakymo metodo, todėl juos galima vadinti pasyviaisiais radiolokatoriais. Šio tipo radiolokatoriai matuoja orlaivio azimutą ir pasvirąjį atstumą iki jo. Supaprastinta blokinė pirminio radiolokatoriaus schema pavaizduota paveiksle (1 pav.).



1 pav. Blokinė pirminio radiolokatoriaus schema

Radaro siųstuvas sugeneruoja mažos trukmės, didelės galios radijo impulsus, kurie per anteną išspinduliuojami į erdvę. Pirminio radiolokatoriaus siųstuvas generuoja radijo impulsus, kurių trukmė gali būti nuo 1–3 μ s. Projektuojant radiolokatorių siųstuvus jiems yra keliami nemažai reikalavimų[2]:

- Siųstuvas turi generuoti reikiamos galios radijo bangas ir esant reikalui generuoti maksimalios galios signalus;
- Siųstuvas turi turėti tinkamą dažnių juostos plotį;
- Generuojamasis signalas turi būti aukšto stabilumo;
- Siųstuvo signalas turi būti lengvai moduluojamas, kad būtų gauta reikiama signalo forma;
- Siųstuvas turi būti patikimas, lengvai prižiūrimas, ilgaamžiškas bei pigus.

Siųstuvai pagal veikimo principą skirstomi į du pagrindinius tipus[2][3]:

- Vienas iš pagrindinio tipų yra raktinio generatoriaus (angl. *keyed oscillator*) principu dirbantys siųstuvai. Tokio tipo siųstuvuose pirmuoju etapu dažniausiai magnetronas formuoja radijo impulsus. Tokie siųstuvai vadinami galios generatorių siųstuvais (angl. *power oscillator transmitter*). Galios generatorių siųstuvai yra nekoherentiniai arba pseudokoherentiniai;
- Galios stiprintuvo siųstuvas (angl. *power amplifier transmitters*) yra antro tipo siųstuvas. GSS dažniausiai naudojamas naujos gamybos radiolokatoriams. Veikiančiuose tokiu principu radaro siųstuvuose siunčiamieji impulsai yra generuojami nedidelės galios generatoriuose. Nedidelės galios signalas yra siunčiamas į galios stiprintuvą (amplitronas, klistronas ir pan.). Tada sustiprintas signalas perduodamas į aplinką per anteną.

Galios generatorių siųstuvams bei galios stiprintuvo siųstuvams gali būti naudojami įvairūs didelės galios generatoriai arba stiprintuvai. Elementai ir jų palyginimas pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Aukštadažnių generatorių ir stiprintuvų palyginimas

Elementas		Maks. dažnis	Maks./vid. Galia	Stiprinimas	Dažnių juostos plotis
GGS	Magnetronas	95 GHz	1 MW / 500 W	-	fiksuota.....10%
	IMPATT diodas	140 GHz	30 W / 10 W	-	fiksuota.....5%
	Išplėstinės sąveikos generatorius	220 GHz	1 kW / 10 W	-	0.2% (elekt.) 4% (mech.)
GSS	Sraigtinė bėgančios bangos lempa	95 GHz	4 kW / 200 W	40....60dB	Oktava/ multioktava
	Išplėstinės sąveikos klystronas	280 GHz	1 kW / 10 W	40....50dB	0.5....1%
	Klystronas	35 GHz	50 kW / 5 kW	30....60dB	0.1....2% (elekt.) 1....10% (mech.)
	Aukštadažniai tranzistoriai	5GHz	300 W / 30 W	5...10dB	10...25%
	GaAs lauko tranzistoriai	30 GHz	15 W / 5 W	5...10 dB	5...20%
	Magnetroniniai stiprintuvai	18 GHz	500 kW / 1 kW	10...20dB	5...15%
	Žiedinė bėgančios bangos lempa	18 GHz	8 kW / 400 W	40...60dB	5...15%

Signalas, paruoštas siuntimui, patenka į anteninį perjungiklį. Anteninis perjungiklis reikalingas tada, kai viena antena norima ir išsiųsti, ir priimti signalus. Anteninis perjungiklis būna prijungęs prie antenos siųstuvą impulso siuntimo laikui, o visą kitą siunčiamų impulsų laiką anteną perjungia prie imtuvo. Anteninis perjungiklis dar vadinamas diplekseriu.

Atspindėtas nuo objekto signalas yra priimamas antena tuo metu, kai anteninis perjungiklis būna prisijungęs prie imtuvo. Radiolokatoriaus antenos kryptinė diagrama horizontalioje plokštumoje yra siaura (1° – 3°), o vertikalioje – plati: apima vietos kampus nuo $0,2^{\circ}$ – 30° . Antenos sukimo mechanizmas suka kryptinę anteną pastoviu kampiniu greičiu. Antenos sukimo periodas yra kelios sekundės. Pirminiams radiolokatoriams dažniausiai naudojamos dviejų tipų antenos:

- Parabolinė antena;
- Masyvinė antena.

Radaro imtuvas yra heterodininis. Pagrindiniai reikalavimai projektuojant imtuvą yra tokie:

- Sustiprinus priimamąjį signalą būtų įnešta kuo mažiau triukšmo ir kuo mažiau būtų iškraipomas signalas;
- Parinkti kuo tikslesnį dažnių juostos plotį;
- Parinkti kuo didesnę dinaminę diapazoną;
- Naudojami filtrai turi būti kiek įmanoma tikslesni, kad būtų atmesti trukdžio signalai ir gaunama reikiama informacija.

Pirminių radiolokatorių indikatoriai yra elektroniniai vamzdžiai, kurių spindulio skeistinė prasideda tokio vamzdžio ekrano centre sykiu su zonduojančiojo impulso išspinduliavimu. Vamzdžio ekrane skeistinės spindulys juda link ekrano pakraščio tokiu greičiu, kad atitinkamu masteliu spindulio momentinė padėtis atitinka atstumą, proporcingą maksimalaus matuojamojo atstumo daliai. Maksimalus matuojamasis atstumas atitinka kraštinę spindulio padėtį. Radiolokatoriaus signalo atspindžiai nuo objektų indikatoriaus ekrane matomi kaip šviesesnės dėmės. Kadangi radiolokatoriaus antena erdvei apžvelgti yra sukama sykiu tokiu pat kampiniu greičiu, koku juda antenos kryptinė diagrama, indikatoriaus ekrane sukasi ir skeistinės spindulys.

Pagrindiniai pirminių radiolokatorių parametrai yra:

- Skiriamoji geba pagal azimutą. Skiriamoji geba pagal azimutą nusakoma minimaliu kampu tarp orlaivių, esančių vienodu atstumu nuo radiolokatoriaus, kai atspindžių signalus dar priima radiolokatorius;
- Skiriamoji geba pagal atstumą. Skiriamoji geba pagal atstumą nusakoma minimaliu atstumu tarp orlaivių, kai atspindžių signalus dar priima radiolokatorius.

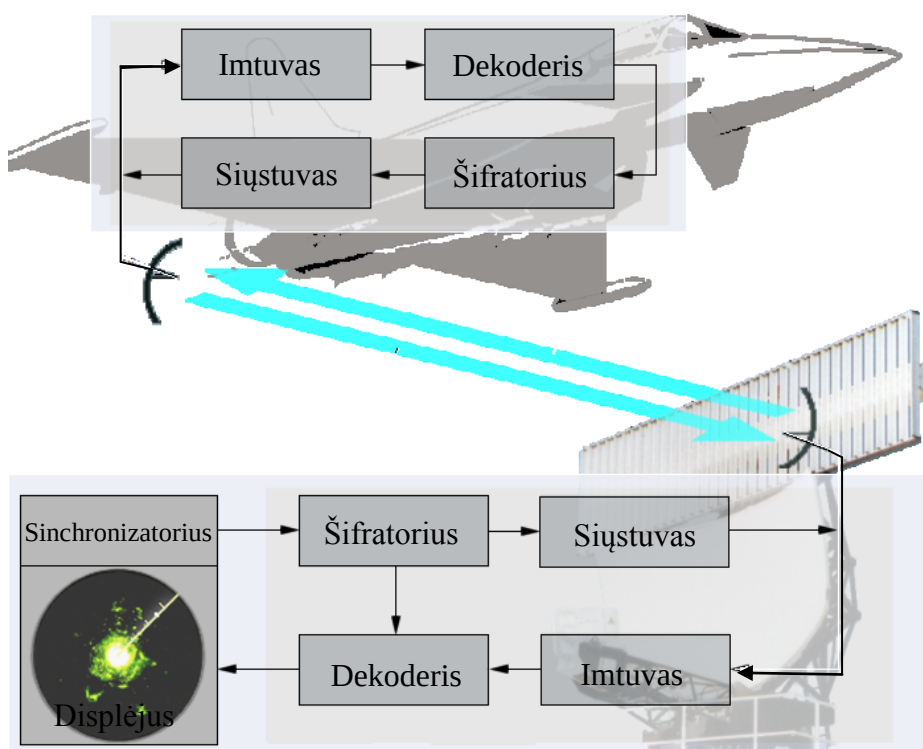
Pirminio radiolokatoriaus maksimalus veikimo nuotolis apskaičiuojamas pagal formulę [1][4]:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot S_A^2 \cdot S_x}{P_{prmin} \cdot 4\pi \cdot \lambda^2}}; \quad (1)$$

2.2. Antrinis radiolokatorius

Pirminių radiolokatorių pagrindinis trūkumas yra tas, kad jis neišduoda informacijos apie orlaivio skrydžio aukštį, orlaivio reiso numerį ar kitos svarbios informacijos.

Šie trūkumai yra išspręsti antriniame radiolokatoriuje. Antrinis radiolokatorius – tai lokatorius, dirbantis aktyvaus atsakymo principu. Lokatorius siunčia aktyvius užklausimus orlaiviui, o orlaivio borto aparatūra suformuoja atsakymo signalą su užšifruota reikiama informacija ir siunčia atgal į lokatorių. Antrinis radiolokatorius yra daug atsparesnis trukdžiams bei turi didesnę veikimo nuotolį. Antrinių radiolokatorių nuotolis gali siekti nuo 200 iki 300 km. Antrinio radiolokatoriaus sistemą sudaro du pagrindiniai blokai – tai antžeminė stotis ir borto aparatūra[2]:



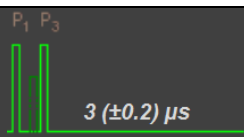
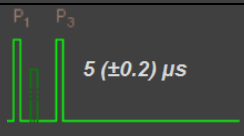
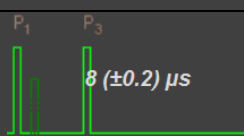
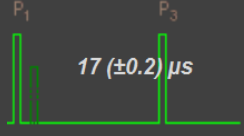
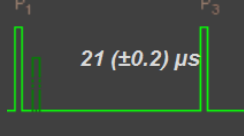
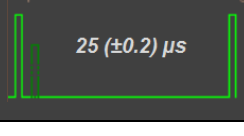
2 pav. Blokinė antrinio radiolokatoriaus schema

Antrinio radiolokatoriaus antžeminė dalis (klausiklis) pasiunčia informacinį paklausimą, kuris moduluojamas 1030 MHz dažnio. Priėmusi signalą orlaivio borto aparatūra jį iškoduoja, nustato, kokią informaciją reikia perduoti atgal. Reikiamą informaciją užkoduoja ir išsiunčia lokatoriui. Lokatoriaus antena priima grįžusį signalą, jį sustiprina ir iškoduoja. Iš koduota informacija vaizduojama displėjuje. Iš atsakiklio išsiųsto signalo dažnis yra 1090 MHz. Atsakiklio užklausimo apdorojimas trunka tiksliai nustatytą vėlinimo laiką. Orlaivio atstumas išmatuojamas pagal vėlinimo laiką tarp atsakymo gavimo ir išsiuntimo[3][5].

Antrinis radiolokatorius yra atsparesnis trukdžiams nei pirminis radiolokatorius. Taip yra todėl, kad antrinis radijo lokatorius dirba su dviem skirtingais dažniais: vienu dažniu siunčia paklausimą, o kitu jį priima.

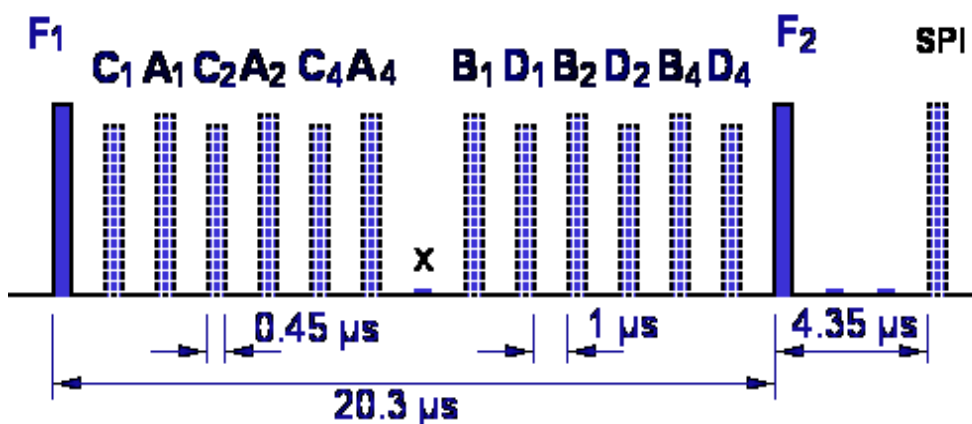
Antrinio radiolokatoriaus klausiklio siunčiamas signalas yra gana paprastas: informacija jame koduojama dviem impulsais (P_1 ir P_3). Šių impulsų plotis – $0,8 \mu s$, tarp šių impulsų yra dar vienas laiko impulsas. Centrinis impulsas nusako sistemos kodo šifrą. Lentelės apačioje parodyta karinių ir civilinių užklausiamųjų signalų formos, dirbant įvairiais režimais (2 lentelė).

2 lentelė. Užklausiamųjų signalų formos

Režimai		Atstumas tarp P_1 ir P_3	Režimo aprašymas
Karinis	Civilinis		
1			Karinį režimą 1 sudaro 32 kariniai identifikacijos kodai, kurie gali siusti informaciją apie misijos nurodymus ir panašiai. Šis režimas nėra plačiai taikomas
2			Kariname režime 2 yra apibrėžti 4096 identifikavimo kodai, naudojami kariniams tikslams. Šis režimas dažniausiai naudojamas nustatyti konkretaus orlaivio numerį.
3	A		Šis režimas tiek kariniams, tiek civiliniams tikslams suteikia 4096 orlaivio identifikavimo kodus. Tai dažniausiai naudojamas režimas
	B		Rezervinis (nenaudojamas)
	C		Šis režimas naudojamas, kai norima gauti barometrinį (tikrąjį) aukštį
	D		Rezervinis (niekad nenaudotas)

Atsakiklis, gavęs užklausimo signalą, suformuoja atsakymą. Atsakymo signale yra du pagrindiniai impulsai F_1 ir F_2 . Laiko tarpas tarp impulsų F_1 ir F_2 visada yra konstanta ir yra lygus

20.3 μs ($\pm 0.1 \mu\text{s}$). Esant reikalui gali būti įterptas ir trečiasis atpažinimo impulsas SPI, perduodamas po 4,35 μs po F_2 impulso. Tarp impulsų F_1 ir F_2 yra 1,45 μs intervalais einančios laiko žymės, kuriose suformuojami informaciniai bitai. Informacinio bito trukmė – 0.45 μs ($\pm 0.1 \mu\text{s}$).



3 pav. Duomenų žodžio struktūra

$A_4, A_2, A_1, B_4, B_2, B_1, C_4, C_2, C_1$ ir D_4, D_2, D_1 impulsais perduodama skirtinga informacija, priklausomai nuo paklausimo režimo. Kai paklausimas nustatomas A režimu, tada informacija siunčiama aštuntainiu kodu. C paklausimo režimo atveju aukštis yra užkoduotas specialia Grėjaus kodo forma, žinoma kaip Gillhamo kodas[5].

Žymiai tobulesnė antrinio radiolokatoriaus karta yra S režimu (angl. – *S mode*) dirbantys lokatoriai. S režimu dirbantys radiolokatoriai buvo sukurti siekiant išvengti kelių radiolokatorių darbo zonų persidengimo. Šis režimas padeda išvengti tų atsakymų, kurie nebuvo užklausti konkretaus lokatoriaus. Tai įgyvendinama išplečiant identifikavimo žodį. S režimo lokatoriuose identifikavimo kodą sudaro 24 bitai, o tai leidžia orlaiviams suteikti iki 1677724 unikalių adresų. Tokio tipo radiolokatorius dirba vienu iš dviejų režimų – neadresuotuoju arba adresuotuoju. Neadresuotuoju paklausimu dirbantis lokatorius savo užklausimus siunčia nuolat, bet kuris S režimu dirbantis atsakiklis gali priimti šį užklausimą ir nusiųsti atsakymą su savo 24 bitų identifikacijos kodu. Adresuotuoju režimu dirbantys atsakikliai gali atsakyti į užklausimą tik tuo atveju, kai lokatorius paklausimą siunčia būtent tam orlaiviui, t. y. turi tokį patį identifikacijos kodą, kokio reikalauja klausiklis.

Kai orlaivio maršrutas eina per kelias skrydžių valdymo informacines zonas (angl. – FIR), jam įskridus į kitą FIR, šitas „lokauto“ režimas gali išlikti, nes jo adreso ir kiti duomenys gali būti perduoti kito FIR klausikliui duomenų perdavimo linijomis. Todėl kitas klausiklis gali siųsti adresuotus paklausimus iš karto, kai perimamas skrydžių valdymas kitoje zonoje.

2.3. Automatinio priklausomojo sekimo sistema

Nors šio tipo sistemos nėra tapusios klasikinėmis, tačiau jos vis sparčiau diegiamos moderniuose oro uostuose. Automatinio priklausomojo sekimo sistemos yra dviejų pagrindinių tipų: ADS-A (angl. – *automatic dependent surveillance – addressable*) ir ADS – B (angl. – *automatic dependent surveillance – broadcast*).

Mažiau aptinkamo tipo sistema yra ADS–A. Šio tipo sistema dažniausiai naudojama orlaivių valdymui virš vandenynų ar kitų didelių vandens telkinių. ADS – A darbas yra apibrėžiamas duomenų mainais tarp orlaivių ir antžeminių stočių. Pirminės ADS –A charakteristikos apibrėžia tai:

- Duomenys yra perduodami tik tada, kai antžeminė stotis patvirtina leidimą keisti duomenimis. Kelios nepriklausomos „sutartys“ gali būti palaikomos su skirtingomis antžeminėmis stotimis;
- Antžeminė stotis nulemia transliavimo dažnį bei jo parametrus;
- Yra dvi pagrindinės technologijos, be kurių orlaivis negali bendrauti su ADS–A antžemine stotimi: ateities oro navigacijos sistema FANS-1/A arba aeronautikos tele ryšių tinklas ATM.

ADS–A sistema gali būti perduodami įvairūs duomenys: orlaivio kodas, skrydžio aukštis, orlaivio koordinatės, orlaivio greitis bei kita svarbi informacija.

Plačiau paplitusi sistema yra ADS–B. ADS–B sistema yra oro eismo priežiūros ir valdymo technologija, leidžianti skrydžių vadovams ir kitų orlaivių pilotams stebėti orlaivių judėjimą. Naudojantis šia sistema nereikalingi įprastiniai radarai. Orlaivio padėties duomenys yra gaunami panaudojant pasaulinį palydovinį navigacijos tinklą, tačiau kartais ši informacija gaunama ir iš orlaivio inercinių sistemų. ADS–B gali dirbti panaudodamas kelias skirtingas duomenų perdavimo technologijas: išplėstinį S režimą (1090 ES), veikiantį 1090 MHz dažniu, UAT (angl. *Universal Access Transceiver*), dirbantį 978 MHz dažniu, ir VDL (angl. *VHF Data Link*)[8].

ADS–B sistema susideda iš trijų dalių:

- Iš siųstuvo bloko, kuris yra sumontuotas orlaivyje. Šis blokas atlieka siuntimo žinučių generavimo ir išsiuntimo funkcijas;
- Iš duomenų perdavimo protokolo, pvz., VDL, 1090ES, arba UAT;

- Iš imtuvo, kuris priima išsiųstas žinutes, jas apdoroja ir perduoda kitiems lėktuvams, skrydžių vadovams ar kitiems vartotojams, turintiems prieigą prie šios sistemos.

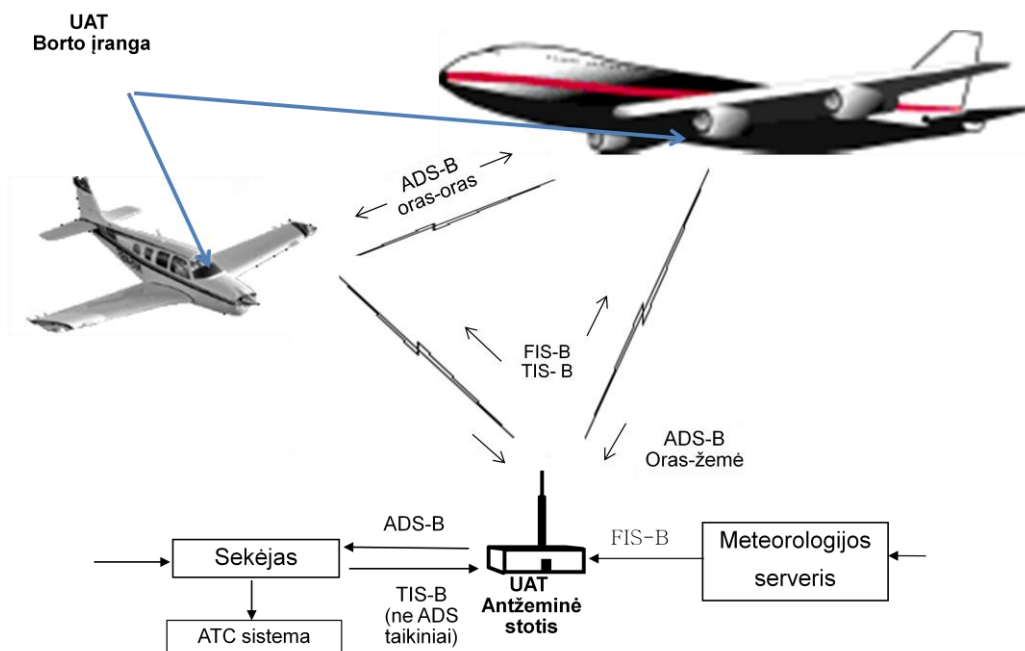
Vienas didžiausių ADS–B sistemos privalumas – tai, kad orlaivis gali siųsti duomenų paketus su informacija apie savo poziciją, identifikavimo kodą, aukštį, greitį ir kitus duomenis ypač greitais intervalais. Dirbant kartu su 1090ES sistema ADS–B duomenis transliuoja kas pusę sekundės. Dažniausiai transliuojama tokia informacija [9]:

- Skrydžio numeris;
- ICAO 24-bitų orlaivio adresas;
- Pozicija (platuma/ilguma);
- Barometriniai ir geometriniai aukščiai;
- Vertikalus greitis (aukštėjimas/žemėjimas);
- Greitis žemės atžvilgiu;
- Avariniai signalai.

Antžeminių stočių veikimo nuotolis priklauso nuo orlaivio aukščio ir reljefo nelygumų. Tačiau daugumos ADS–B antžeminių stočių veikimo nuotolis gali viršyti 250 jūrmylių.

1090ES palaiko išplėstinio siuntiklio pranešimų siuntimą. Toks siuntiklis periodiškai siunčia orlaivio padėtį, kursą, laiką ir kitus duomenis. Norint, kad atsakiklis siųstų išplėstines žinutes, jo atsakiklis turi būti tinkamas ir į jį turi patekti reikiama informacija. Šias žinutes priima reikiamai suderinta įranga. Tai gali būti tiek antžeminės stotys, tiek kiti orlaiviai.

Universalios prieigos imtuvas – siųstuvas UAT. Ši technologija buvo sukurta specialiai ADS-B sistemoms. Ši technologija turi didesnę pralaidumo juostą, be to, yra pigesnė. Svarbu ir tai, kad UAT yra vienintelė, kuri tikrai yra dvikryptė, taigi UAT vartotojai turi galimybę gauti aeronautinę informaciją iš antžeminių stočių[10].



4 pav. ADS-B sistemos, dirbančios su UAT protokolu, struktūrinė schema

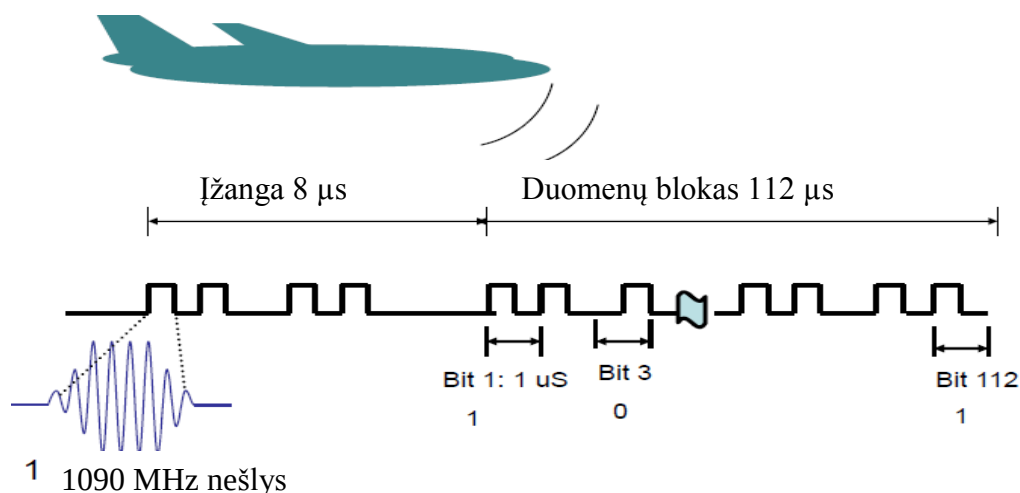
VDL 4 režimu dirbanti sistema naudoja STDMA protokolą. Ši sistema skirta aptarnauti didelį kiekį klausiklių, tačiau trumpomis informacinėmis žinutėmis. VDL 4 režimu sistema buvo pritaikyta dirbti su ADS-B sistemomis, tačiau bėgant laikui ją visiškai nukonkuravo išplėstinio S režimo protokolas, todėl VDL sąsaja ADS-B sistemoje beveik nebenaudojama.

Australija yra pirmoji šalis, kurioje visą valdomą skrydžių erdvę visiškai uždengia ADS-B sistema. Tačiau šiuo metu šią sistemą skrydžių valdymui bent iš dalies naudoja ir daugiau valstybių, tokių kaip: Kanada, Kinija, Švedija, Jungtinės Amerikos Valstijos ir Jungtiniai Arabų Emiratai. ADS-B sistemos ir toliau yra tobulinamos. Be kita ko, tobulinamos tiek antžeminės stotys, tiek orlaivių aparatūra. Kuriamas vis patogesnė naudojimui skrydžių vadovų įranga. Kuriami naujos kartos atsakikliai, kurie palengvina lakūnų darbą. Tokios sistemos įdiegimas orlaivyje leidžia atsisakyti įprastų radiolokatorių[10].

2.3.1. Išplėstinis S , 1090 ES protokolas.

2002 metais federalinė aviacijos administracija išplatintame pranešime paskelbė, kad išplėstinis 1090ES protokolas yra oficialus ADS-B duomenų perdavimo protokolas Jungtinėse Amerikos Valstijose. Nors Europa dar nėra apsisprendusi, kurį iš protokolų naudoti, tačiau Eurocontrol „Cascade“ programoje yra naudojamas būtent išplėstinis 1090ES protokolas.

Kaip jau buvo minėta, 1090ES palaiko išplėstinių pranešimų siuntimą. 1090ES siunčia pranešimus 1090 MHz dažniu. Išplėstinio siuntiklio protokolo duomenų žodį sudaro 112 bitų (5 pav.) [15].



5 pav. 1090ES protokolo informacinio žodžio struktūra

Paveikslo viršuje matyti, kad visas atsakomasis duomenų paketas susideda iš dviejų dalių – įžangos ir duomenų bloko. Įžangos dalis reikalinga priimamo signalo sinchronizacijai. Antrajame bloke yra užšifruota visa informacija. Antrasis blokas savo ruožtu susideda dar iš keturių segmentų (3 pav.): kontrolės, S režimo adreso, ADS žinutės ir pariteto bitų segmento.

Kontrolė (8 bitai)	Atsakiklio adresas (24 bitai)	ADS žinutė (56 bitai)	Pariteto bitai(24 bitai)
-----------------------	----------------------------------	-----------------------	-----------------------------

6 pav. 1090ES protokolo informacinio žodžio formatas

Kontrolės segmentas apibūdina, kokio tipo žinutė yra siunčiama: ADS–B, TIS–B, karinė ir panašiai.

Atsakiklio adresas – tai individualus kiekvieno orlaivio adresas, kuris yra išduodamas ICAO.

ADS žinutėje. priklausomai nuo kontrolės segmento, yra visa šifruojama informacija – tai gali būti informacija apie orlaivio tipą, aukštį, padėtį erdvėje, greitį ir t. t.

Pariteto bitai skirti išvengti klaidų žinutėje.

2.3.2. Universalios prieigos imtuvas – siųstuvas UAT

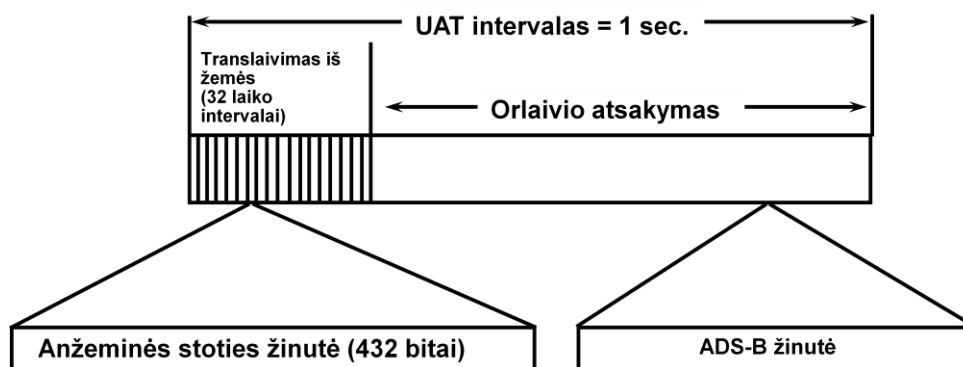
Skrydžio metu, kai kuri informacija perduodama ADS-B sistemos kinta labai greitai (pvz. orlaivio padėtis ir greitis), o kai kuri praktiškai yra statiška (pvz. orlaivio tipas). Reglamentas DO-

242A apibrėžia įvairaus tipo informaciją, kuri turi būti perduodama ADS-B kanalais, žinutės perdavimo laiko intervalu, bei informaciją apie patikimus duomenis.

Paprasta ADS-B duomenų žinutė susideda iš antraštės ir orlaivio būsenos vektoriaus. Tuo tarpu ilga ADS-B žinutė susideda iš antraštės, būsenos vektoriaus ir papildomos informacijos kurią apibrėžia pirmasis žinutės bitas.

Universalios prieigos imtuvas – siųstuvas (angl. *Universal Access Transceiver* – UAT). UAT transliuoja informaciją 978 MHz dažniu su 1,041667 Mbps moduliacijos dažniu. Kiekvino simbolio imties periodas yra lygus 0,96 μ s. UAT informaciniai pranešimai yra transliuojami kartą per vieną sekundę. Be to, UAT pranešimai gali būti vienu iš dviejų pagrindinių tipų [19]:

- Paprastasis UAT pranešimas;
- Ilgasis UAT pranešimas.



7 pav. UAT protokolo informacinio žodžio struktūra

UAT ADS–B žinutės yra sudarytos iš tokių elementų, išdėstytų tokia tvarka:

- Bitų sinchronizacija;
- Informacinės žinutės duomenų blokas;
- Pariteto bitai – FEC (angl. *Forward Error Correction*).

Pirmasis elementas – bitų sinchronizacija, tai pirmasis elementas, sudarytas iš 36 bitų sinchronizavimo sekos. UAT ADS–B žinutės seka atrodo taip:

111010101100110111011010010011100010

Antrasis blokas – informacinės žinutės duomenų blokas, tai antrasis elementas. Kaip jau buvo minėta, jis gali būti dviejų tipų: paprastasis UAT pranešimas su 144 bitų informaciniu žodžiu ir ilgasis UAT pranešimas su 272 bitų informaciniu žodžiu.

Paskutinyasis blokas – tai pariteto bitai. Tai svarbus viso informacinio žodžio elementas, jis padidina informacinio žodžio atsparumą trukdžiams ir interferencijai. FEC pariteto bitų generavimas yra paremtas specialiu kodų masyvu.

SYNC	Informacinės žinutės duomenys	FEC pariteto bitai
36	144/272	96/112

UAT informacinės žinutės duomenų paketas savo ruožtu susideda iš tokių skilčių (3 lentelė).

3 lentelė. UAT informacinės žinutės elementai

Informacinės žinutės duomenų skiltis	Skilties dydis
Antraštė (HDR)	4 bitai
Būsenos vektorius (SV)	13 bitų
Režimo statusas (MS)	12 bitų
Pagalbinis būsenos vektorius (AUX SV)	5 bitai
Taikinio būseną (TS)	4 bitai
Trajektorijos pokytis +1 (TC +1)	12 bitų
Trajektorijos pokytis +0 (TC +0)	12 bitų

Siųstuve duomenys yra moduluojami naudojant dvejetainę, tolydžios fazės dažninę manipuliaciją - CPFSK (angl. *Continuous phase frequency shift keying*). Siųstuvo moduliacijos indeksas $h = 0,6$, tai reiškia, kad skiriamasis dažnis tarp loginio „1“ ir loginio „0“ yra [24]:

$$\Delta f = h \cdot R_b; \quad (2)$$

čia R_b – moduliacijos sprata.

Gauname, kad signalo moduliacijos spektre loginis vienetas bus pasislinkęs nuo centrinio nešlio dažnio per $+\Delta f/2$ (+312,5 kHz), o loginis nulis $-\Delta f/2$ (-312,5kHz) [20].

Apsaugai nuo trukdžių yra naudojamas Rydo-Solomono (angl. *Reed-Solomon*) kodas, kuris yra 48 bitų.

3. Oro eismo valdymo ryšio tinklai

Didėjant pasaulinei kompiuterizacijai ir tobulėjant tiek duomenų apdorojimo aparatūrai, tiek didėjant duomenų saugojimo galimybėms, buvo pradėti kurti bendri kompiuterizuoti oro erdvės valdymo tinklai. Tokie tinklai labai pagerina skrydžių vadovų darbo kokybę, jie gali greičiau dirbti, nes visa reikiama informacija yra sukaupta vienoje vietoje ir ja bet kada galima pasinaudoti. Naudojantis tokiais tinklais gali būti keičiamasi planavimo duomenimis, skrydžių grafikais, meteorologine informacija ir panašiai.

3.1. Aeronautikos fiksuotojo tolimojo ryšio tinklas AFTN

AFTN (angl. *Aeronautical Fixed Telecommunication Network*) yra pasaulinis fiksuotas telekomunikacijos tinklas, skirtas siųsti įvairaus tipo žinutes arba dalytis įvairaus tipo informacinėmis žinutėmis. AFTN tinklu yra siunčiami tokie pranešimai:

- Nelaimės pranešimai;
- Skubūs pranešimai;
- Skrydžių saugumo pranešimai;
- Meteorologiniai pranešimai;
- Skrydžių reguliavimo pranešimai;
- Oro navigacijos informaciniai pranešimai;
- Administraciniai pranešimai.

Šiais tinklais gali naudotis skrydžių vadovai. Tiek esantys pačios šalies teritorijoje, tiek ir kitose šalyse, kurios yra ICAO narės. Pranešimai yra perduodami telefono, telegrafo ryšiu bei duomenų perdavimo linijomis. Pranešimai yra perduodami specialiai nustatytu formatu. Pranešimų perdavimo formatas yra aprašytas ICAO reglamento dešimtajame priede – „aeronautikos telekomunikacijos antras tomas“[13].

AFTN pranešimą sudaro antraštė, žinutės tekstas ir pabaiga. Antraštė susideda iš antraštės eilutės, adreso ir šaltinio. Antraštės linija yra žinutės pradžios signalas. Šis signalas sudarytas iš keturių simbolių ZCZC. Adresas susideda iš dviejų prioriteto žymens raidžių ir aštuonių raidžių, kurios apibūdina adresatą. Pirmos keturios aštuonių raidžių grupės raidės nusako ir lokalizuoja adresatą. Paskutiniųjų keturių raidžių kombinacija iš aštuonių raidžių grupės yra departamento arba skyriaus adresas.

Adreso grupę sudaro aštuonios raidės, identifikuojančios žinutės siuntėją.

Siunčiamos žinutės pabaigą indikuoja pabaigos signalas. Pabaigos signalas susideda iš keturių simbolių – NNNN.

3.2. Meteorologinės informacijos tinklai VOLMET, ATIS

ATIS (angl. *Automatic Terminal Information Service*) nuolat transliuoja iš anksto įrašytą informaciją. ATIS transliuoja tik esminę informaciją – tai gali būti vyraujančios meteorologinės sąlygos, informacija apie tai, kokie kilimo–tūpimo takai yra aktyvūs ir panašiai. ATIS buvo sukurta tam, kad būtų palengvintas skrydžių vadovų darbas. ATIS duomenys yra nuolat atnaujinami. Šie duomenys pagal nustatytus normatyvus turi būti atnaujinami ne rečiau kaip kas 30 minučių. Jei yra reikalas, būtina pranešti apie ekstremalias sąlygas ar perduoti kitą labai svarbią informaciją, tada toks pranešimas ištransliuojamas iš karto, o kitas tekstas kartojamas eilės tvarka[11].

Šiuolaikinės ATIS sistemos yra kompiuterizuotos. Kompiuterizavimas leidžia dar labiau pagreitinti šios sistemos darbą. Informacinio teksto nebereikia įrašinėti balsu. Informaciją galima įrašyti klaviatūra, o patentuotos programos tekstą sintetizuoja ir paverčia roboto balsu, kuris ir yra ištransliuojamas.

Orlaivių įgulos privalo išklaudyti ATIS pranešimus prieš skrydį – prieš įjungiant variklius ir atskridus iki aerodromo zonos ribos, ir apie tai pranešti skrydžių vadovui artimiausio ryšių seanso metu. Skrydžių vadovas tuomet pateikia duomenis apie meteorologinės informacijos pasikeitimus, kurių nespėta įrašyti į ATIS pranešimus[11].

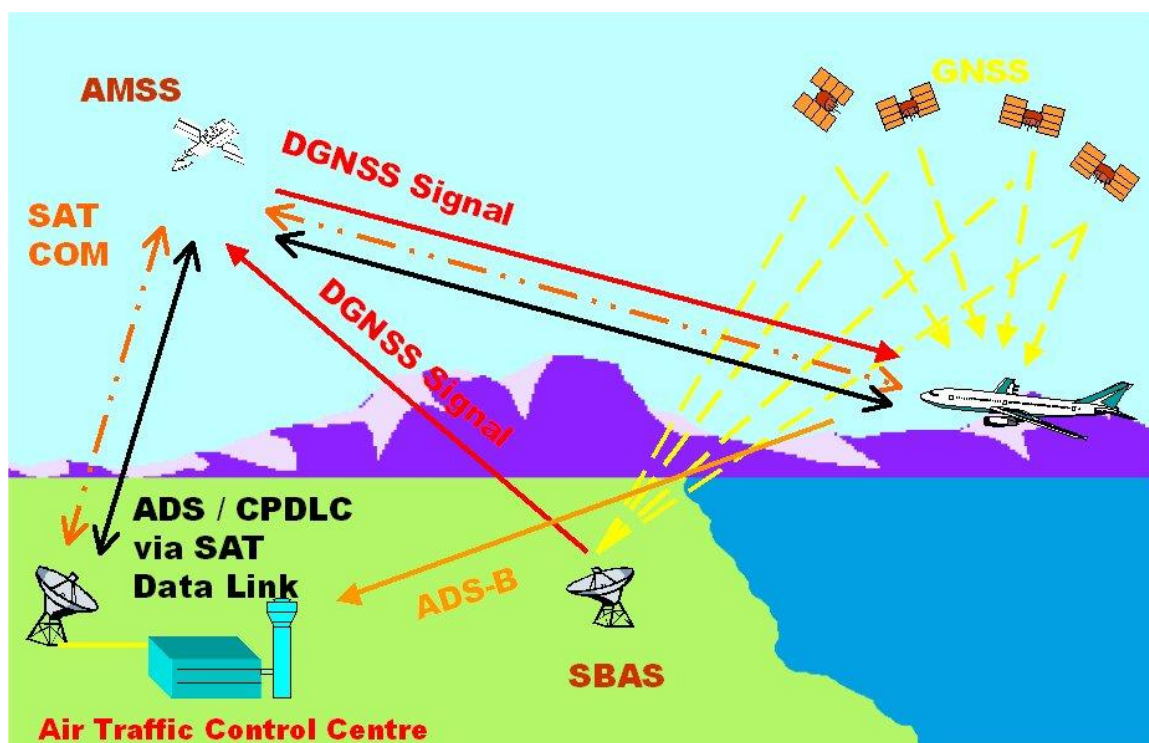
VOLMET yra sistema, skirta informuoti orlaivio įgulą skrydžio metu apie meteorologines sąlygas. VOLMET informaciją transliuoja trumpųjų bangų diapazone, tačiau kai kuriose šalyse ši informacija transliuojama ir labai aukštų dažnių diapazone. Ataskaitos apie meteorologines sąlygas yra siunčiamos naudojant automatizuotą balso perdavimo technologiją. VOLMET sistema glaudžiai dirba su AFTN arba su OPMET duomenų bazėmis. Iš šių duomenų bazių sistema gauna reikalingą informaciją transliavimui, ją išskodoja, sintetizuoja, o galutiniame etape yra transliuojamas pranešimas [12].

Pasaulinis VOLMET tinklas yra išskaidytas regionais. Individualios VOLMET stotys, priklausomai nuo regiono, transliuoja aktualią meteorologinę informaciją būtent tiems orlaiviams, kurie yra tame regione. Ši informacija yra transliuojama nustatytu kiekvienam regionui skirtingu laiku. Tai yra daroma tam, kad atskirų regionų VOLMET stotys netrukdytų viena kitai. Laikas nustatomas sudarant specialius tvarkaraščius. Tvarkaraštyje laikas yra padalytas penkių minučių intervalais, per kuriuos yra transliuojama informacija atskiriems regionams. Toks tvarkaraštis kartojasi kas valanda [12].

3.3. Globali oro eismo valdymo sistema CNS/ATM

CNS/ATM (angl. *Satellite-based Communications, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management*) yra sistema, jungianti komunikacines, palydovines, sekimo, navigacines sistemas bei įvairias skaitmenines technologijas į vieną visumą. Ši sistema buvo sukurta siekiant sukurti vientisą pasaulinę oro eismo valdymo sistemą. Tokia sistema leidžia planuoti išvykimo ir atvykimo laikus ir laikytis jų kuo glausčiau išlaikant didelį saugumo lygį [6].

CNS/ATM sistema pagerina duomenų saugojimo ir keitimosi jais galimybes. Taip pat padidina ir oro erdvės stebėjimo bei navigacijos oro erdvėje tikslumą. Kuriant šią sistemą yra siekiama kuo efektyviau išnaudoti oro erdvę (8 pav.) [7].



8 pav. CNS/ATM sistemos koncepcija

4. Automatinės priklausomojo sekimo sistemos (ADS-B) duomenų keitimosi protokų analizė

Nors šio tipo sistemos nėra tapusios klasikinėmis, tačiau jos vis sparčiau diegiamos moderniuose oro uostuose. Norint pasiekti aukščiausių rezultatų diegiant naujas sistemas aviacijoje, reikia jau egzistuojančias sistemas sujungti su naujomis sistemoms. Nepaisant to, dar reikia, kad nauja sistema būtų lengvai integruojama į jau egzistuojančių orlaivių prietaisų architektūrą. Kaip jau buvo minėta, ADS-B sistema gali naudoti kelias skirtingas ir jau egzistuojančias duomenų perdavimo technologijas: išplėstinį S režimą (1090 ES), veikiantį 1090 MHz dažniu, UAT (angl. *Universal Access Transceiver*), dirbantį 978 MHz dažniu, ir VDL mode 4 (angl. *VHF Data Link*).

Šiame skyriuje aprašomas 1090ES signalas, sumodeliuotas matematinių simuliacijų paketo „Matlab“ aplinkoje. Ši modeliacija gaunama, simuliuojant signalo parametrus, tokius kaip veikimo nuotolis, slopinimas, atsparumas trukdžiam ir panašiai.

Kitoje darbo dalyje aptariamas 1090ES signalo veikimo nuotolis.

4.1. ADS-B sistemos duomenų perdavimo protokolai

Labiausiai paplitę ADS-B sistemos siųstuvai yra paremti 1090ES duomenų perdavimo technologija. Visi moderniausių orlaivių gamintojai, tokie kaip *Boeing*, *Airbus* naudoja būtent šią technologiją paremtas ADS-B sistemas. Nuo 2010 metų tai yra pagrindinis duomenų keitimosi standartas visoje Europoje. Ši technologija taip pat yra privaloma ir Australijoje visiems skraidantiems aparatams, kurie skraido žemesniame nei 5400 metrų aukštyje.

Pagrindinis šios technologijos populiarumą lemiantis veiksnys yra ekonominis faktorius. Antrinis radijo lokatorius, kurio siųstuvai ir imtuvai yra instaliuoti praktiškai visuose civiliniuose orlaiviuose, naudoja šią technologiją duomenims iš orlaivio gauti. Taigi norint integruoti sistemą į egzistuojančius orlaivius, tereikia atlikti tik kelis nedidelius programinės įrangos pakeitimus.

Skaitmeninis duomenų keitimosi formatas *VDL mode 4* naudoja standartinį civilinės aviacijos dažnių diapazoną – nuo 108 iki 118 MHz, kai tuo tarpu UAT protokolas naudoja 978 MHz dažnį. Abu šie standartai turi savo privalumų bei trūkumų, tačiau jie visiškai neveikia vartotojo. Vienas iš pagrindinių šių technologijų trūkumų yra tas, kad jos nėra plačiai paplitusios, pavyzdžiui, *VDL mode 4* sistema praktiškai naudojama tik Švedijoje ir kaip eksperimentinė technologija – Rusijoje. UAT savo ruožtu tik Amerikoje ir yra skirta orlaiviams, kurie skraido mažame aukštyje.

Taigi galime daryti išvadą, kad didžioji dalis tiek senesnių, tiek ir naujų orlaivių jau yra aprūpintos ADS-B 1090ES sistema [1].

Atsiradus naujos oro erdvės kontrolės sistemos poreikiui ir nusprendus, kad viena perspektyviausių tokio tipo sistemų yra ADS-B sistema, buvo imtasi veiksmų nustatyti, kokį duomenų keitimosi protokolą reiktų naudoti. Vienas reikšmingiausių tokio tipo renginių buvo ICNS 2002 metais surengta konferencija-studija, kurios vienas iš tikslų buvo būtent pagrindinių ADS-B sistemos duomenų keitimosi protokolų analizė ir modeliavimas įvairiose aplinkose.

Studijos metu buvo modeliuojami pagrindinių trijų kandidatų: *VDL mode 4*, *1090ES* ir *UAT* parametrai.

Atsiradus naujos, oro erdvės kontrolės, sistemos poreikiui ir nusprendus, kad viena perspektyviausių tokio tipo sistemų yra ADS-B sistema, buvo imtasi veiksmų nustatyti kokį duomenų keitimosi protokolą reiktu naudoti. Vienas reikšmingiausių tokio tipo renginių buvo ICNS, 2002 metais surengta konferencija-studija, kurios vienas iš tikslų buvo būtent pagrindinių ADS-B sistemos duomenų keitimosi protokolų analizė ir modeliavimas įvairiuose aplinkuose.

Studijos metu buvo modeliuojami pagrindinių trijų kandidatų: *VDL mode 4*, *1090ES* ir *UAT*, parametrai.

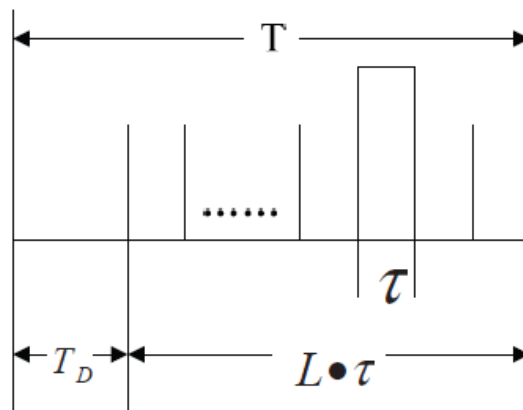
4.1.1. 1090ES signalo kodavimo technika

Taip vadinama impulsinė kodinė moduliacija (angl. *Pulse code modulation* – PCM) tai sudėtingas moduliacijos vyksmas, kuriuo analoginis signalas keičiamas į dvejetainį skaitmeninį impulsinį signalą. Informacija apie analoginio signalo momentines įtampų vertes yra talpinama skaitmeninio signalo impulsų sekų atkarpose. Kad iš analoginio signalo gautume skaitmeninį PCM signalą, reikia atlikti tris žingsnius:

- 1) Diskretizavimą – tolydinis įėjimo signalas verčiamas diskrečiuoju signalu laiko atžvilgiu, t. y. impulsų seka. Impulso amplitudė tam tikru laiko momentu tiksliai atitinka analoginio signalo įtampos akimirksninę vertę;
- 2) Kvantavimą – kiekvieno impulso amplitudė aproksimuojama sveiku skaičiumi tam tikrų elementarių laiptelių (kvantų). Iš esmės, tai taip pat „diskretizacija“, tačiau jau įtampų ašyje. Dabar informacijos nešliu apie analoginio signalo momentinę įtampą tampa kvantų skaičius;
- 3) Kodavimą – kvantų skaičius nusakomas impulsų sekos atkarpa. Konkreti impulsų sekos atkarpa (kodinė grupė) susiejama su kvantų skaičiumi (tuo pačiu

ir su analoginio signalo momentine įtampa) pagal tam tikrą atitikmių lentelę – kodą [2].

Impulsinės pozicionavimo moduliacijos (angl. *Pulse Position Modulation* – PPM) metodas naudoja santykinę impulso poziciją, kad būtų perduota informacija [7]. PPM principas yra paremtas tuo, kad M duomenų bitas yra padalytas į lygias L dalis ($L = 2^M$, M yra bito rezoliucija) ir priekyje jo yra pridodamas „apsaugos“ laiko vėlinimo tarpas T_D . Kiekvieno decilio laiko tarpas yra vadinamas „laiko langu“ (angl. *time slot*). Taigi PPM signalas susideda iš M „laiko langu“ ir apsauginio laiko dalių. PPM signalo konstrukcija pavaizduota 3 pav.



9 pav. PPM signal konstrukcija

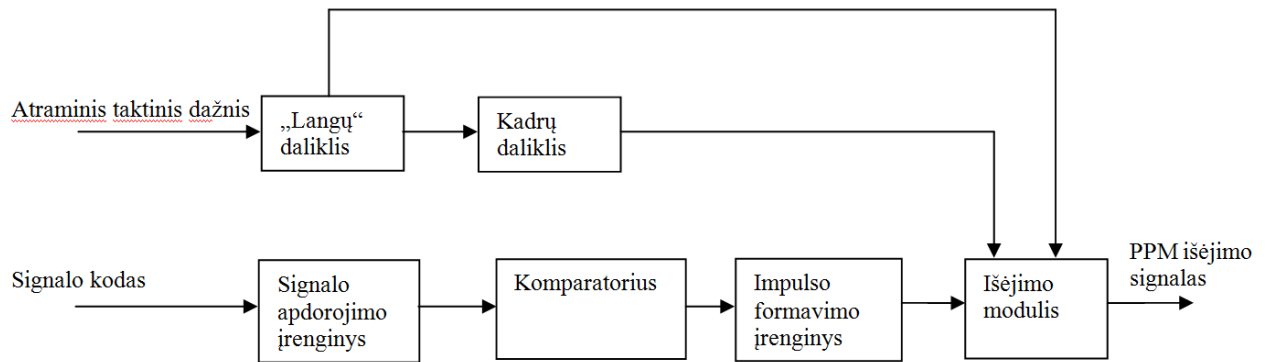
Sakykime, kad signalas yra siunčiamas T laiko tarpu, tada duomenų siuntimo greitis R gali būti apskaičiuojamas taip [7]:

$$R = \frac{\log_2 L}{T}; \quad (2)$$

4.1.2. 1090ES signalo generatoriaus projektavimas

Tolesniems tyrimams atlikti reikia sumodeliuoti erdvę, kurioje būtų galima tirti kiekvieno kandidato į ADS–B sistemos duomenų perdavimo standartizuotą protokolą savybes. Signalų simuliacijoms atlikti ketinama naudoti „Matlab“ ir „Simulink“ paketus“. Tam, kad būtų įmanoma kuo tiksliau sumodeliuoti signalų sklaidimo erdvėje parametrus, pirmiausia reikia „Matlab“ programos aplinkoje suprojektuoti kiekvieno iš protokolų generatorių, antenų ir imtuvų modelius.

Išanalizavus realių 1090ES signalų generatorių architektūrą, galima daryti išvadą, kad šio duomenų perdavimo protokolo signalo generatoriaus blokinė schema atrodo taip (10 pav.):



10 pav. PPM signalo formavimo schema

Tokios schemos principas yra toks: atraminio taktinio dažnio signalas yra siunčiamas į langų daliklį tam, kad būtų sugeneruoti standartinio laiko „lango“ impulsų segmentai. Impulsų segmentai yra nukreipiami į kadrų daliklį. Kadrų daliklis sugeneruoja duomenų kadrą remiantis dešimtaine moduliacija. Toks duomenų generavimas yra atliekamas skaičiuojant signalo „langus“, tada signalo skaičiaus ir prieš-moduliacinio skaičiaus reikšmės yra lyginamos tarpusavyje, pasinaudojant skaitiniu komparatoriumi. Jeigu šių dviejų reikšmių dydžiai yra vienodi, kadrų daliklis sugeneruoja savo išėjime impulsą. Tada sugeneruotas vieno kadro impulsas patenka į išėjimo modulį, kur sumoduliuoja PPM kodinį pranešimą.

4.1.3. Signalas moduliavimas

Paprasčiausia skaitmeninės moduliacijos rūšis yra dviejų šaltinių juostų su pilnu nešliu amplitudinė moduliacija, kur moduliuojantis signalas yra dvejetainis signalas. Tokios moduliacijos atveju moduliuojantis signalas yra įprastinis dvejetainis signalas $= \pm 1$. Todėl 100 % moduliacijos atveju signalas yra arba jo nėra. Tokia moduliacija yra vadinama OOK moduliacija (angl. *On-off keying* –OOK) [16]

OOK moduliacijos signalas gali būti išreiškiamas sudauginus vienpoliarį stačiakampį impulsą su sinusoidiniu nešlio signalu. Matematiškai ši priklausomybė užrašoma taip (4) [26]:

$$e_0 = \left[\sum_n a_n g(t - nT_s) \right] \cos \omega_c t; \quad (4)$$

Čia T_s susako stačiakampio impulso trukmę, o a_n n-tojo simbolio lygis. N-tojo simbolio reikšmė nusakoma tokiu ryšiu:

$$A_n = \begin{cases} 0, \\ 1. \end{cases} \quad (5)$$

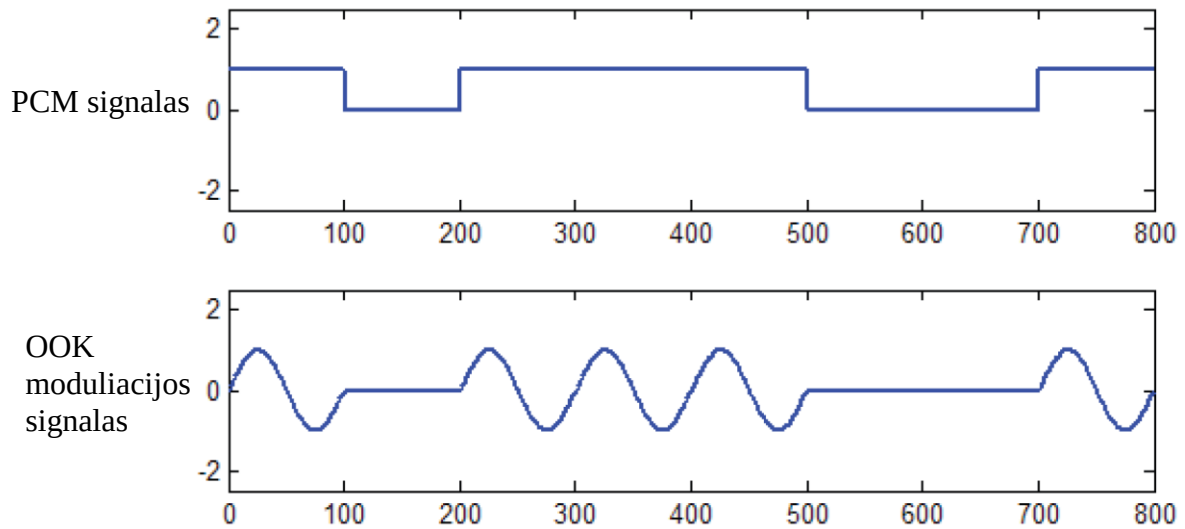
Tada gauname:

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \quad (6)$$

Iš formulės (4) gauname:

$$e_0(t) = s(t) \cos \omega_c t; \quad (7)$$

Tokiu principu sugeneruoto signalo laiko diagrama atvaizduota 11 paveiksle.



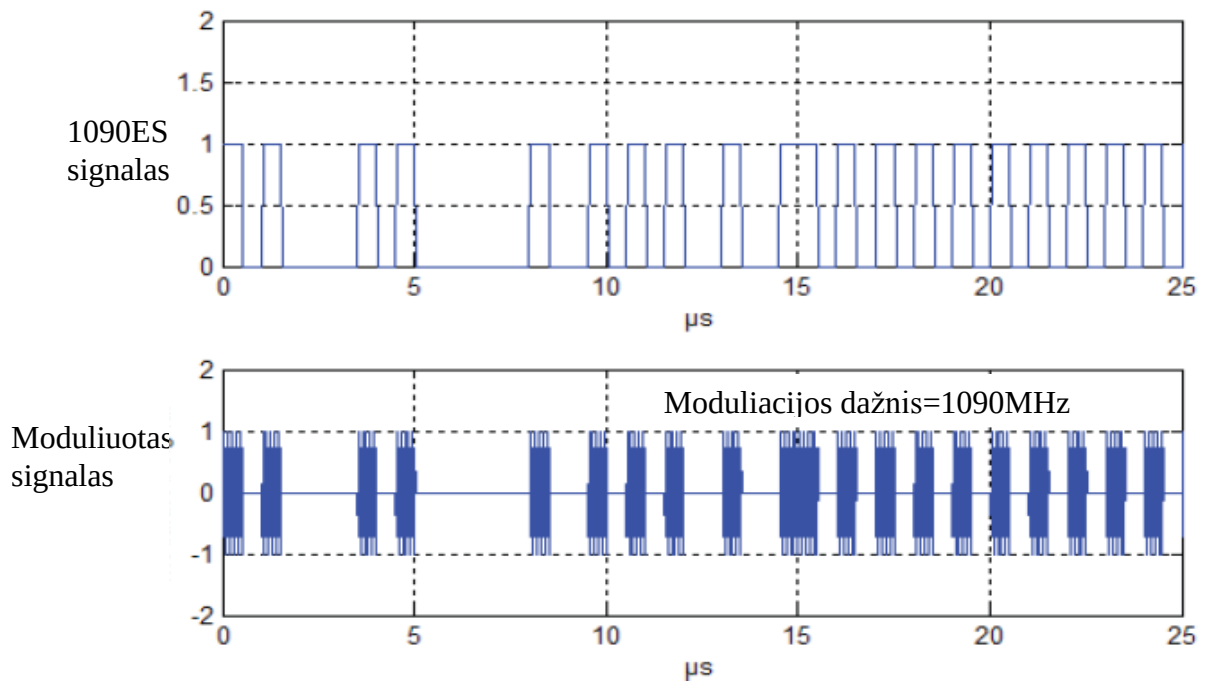
11 pav. Signalų simuliacija

4.1.4. 1090ES signalo generavimas

Dar kartą išanalizavus realių 1090ES generatorių struktūrą, signalui sumodeliuoti pasirinkti tokie jo parametrai:

- Analoginio signalo maksimumas – $M(t) \leq 4V$;
- Impulso kartojimo dažnis – $r_s = 0,125 \text{ MHz}$;
- Kvantavimo intervalas – $0,5V$;
- Bitų perdavimo sparta – $4r_s \cdot 2 = 1 \text{ MHz/bit/s}$;
- Sinusinis nešlio dažnis – $\omega_c = 1090 \text{ MHz}$.

Taigi pasinaudojus „Matlab“ matematinių simuliacijų paketu buvo sumodeliuotas 1090ES duomenų perdavimo protokolo signalas (12 pav.).



12 pav. 1090ES moduliuotas signalas

4.2. 1090ES duomenų perdavimo sistemos veikimo nuotolis

1090ES duomenų mainų formatas nėra visiškai naujas. Jis naudojamas ir moderniose radijo ryšio aktyviojo atsako sistemose. Šioje sistemoje radijo ryšys vyksta dviem kanalais – paklausimo ir atsakymo. Pirmajame signalai perduodami nuo klausiklio į atsakiklį dažniu $f_p = 1030 \text{ MHz} \pm 0,2 \text{ MHz}$, o antrajame – nuo atsakiklio į klausiklį dažniu $f_a = 1090 \text{ MHz} \pm 3 \text{ MHz}$. 1090ES taip pat duomenų transliavimui naudoja 1090 MHz dažnio signalus. Kadangi atsakikliuose paklausimo ir atsako kanalai yra atskirti. Taigi 1090ES protokolo veikimo nuotolį galime apskaičiuoti lygiai taip pat, kaip ir aktyviojo atsako sistemos.

Tarkim, kad ore yra du lėktuvai, su juose instaliuota ADS-B, įranga duomenų mainams naudoja 1090ES protokolą. Vienu metu vienas orlaivis dirba kaip siųstuvas, o kitas – kaip imtuvas. Siųstuvo impulso galia yra $P_{s,p}$. Patenkančio į anteną signalo galia bus mažesnė dėl nuostolių antenos signalų perdavimo linijoje ir sudarys $\eta_p P_{s,p}$, čia η_p – siųstuvo antenos signalų perdavimo linijos naudingumo koeficientas.

Srauto galios tankis nuotoliu r nuo siųstuvo kryptingumo diagramos maksimumo kryptimi bus nustatomas išraiška [1]

$$\Pi_p = \frac{\eta_p P_{s,p} D_p}{4\pi r^2}; \quad (8)$$

čia D_p – siųstuvo antenos kryptingumo koeficientas duomenų siuntimo metu. Tada atsakiklio imtuvo jėgimo signalo galia

$$P_{im.a} = \Pi_p A_a \eta_a; \quad (9)$$

čia A_a – efektyvusis imtuvo antenos plotas; η_a – imtuvo antenos signalų perdavimo linijos naudingumo koeficientas priimant signalą.

Irašę į (8) lygtį dydį Π_p iš (9) formulės ir efektyvųjį imtuvo antenos plotą $A_a = D_a \frac{\lambda_p^2}{4\pi}$, (D_a – imtuvo antenos kryptingumo koeficientas priimant signalą; λ_p – siųstuvo signalo bangos ilgis, rasime signalo galios dydį imtuvo įėjime [1]:

$$P_{im.a} = \frac{P_{s.p} \eta_p D_p D_a \eta_a \lambda_p^2}{(4\pi r)^2}. \quad (10)$$

Prilyginę signalo galios dydį imtuvo įėjime imtuvo jautrio dydžiui, $P_{im.a \min}$, iš (10) išraiškos gausime imtuvo maksimalų veikimo nuotolį:

$$r_{p\max} = \sqrt{\frac{P_{s.p} D_p D_a \eta_a \lambda_p^2}{P_{im.a \min} (4\pi)^2}}. \quad (11)$$

Iš pateiktos išraiškos matyti, kad 1090ES protokolo maksimalus veikimo nuotolis yra tiesiogiai proporcingas siųstuvo galios ir imtuvo jautrio santykio antrojo laipsnio šakniai. Prisiminus, kad paprastų radijo lokatorių veikimo nuotolis yra proporcingas analogiško santykio ketvirtojo laipsnio šakniai. Taigi 1090ES duomenų keitimosi protokolas turi didesnę veikimo nuotolį, tai reiškia, kad tuo pačiu nuotoliu patikimai veikia esant mažesnei siųstuvo galiai ir imtuvo jautriui.

Pateiktos formulės taikomos tik sistemos veikimo nuotoliui laisvojoje erdvėje. Realiomis sąlygomis šis nuotolis taip pat priklauso nuo žemės paviršiaus atspindžių bei elektromagnetinių bangų slopinimo atmosferoje. Šie veiksniai vertinami įvedant slopinimo koeficientą arba interferencinį daugiklį $\Phi(\beta)$.

4.3.UAT duomenų keitimosi sistemos sinchronizavimo tyrimas

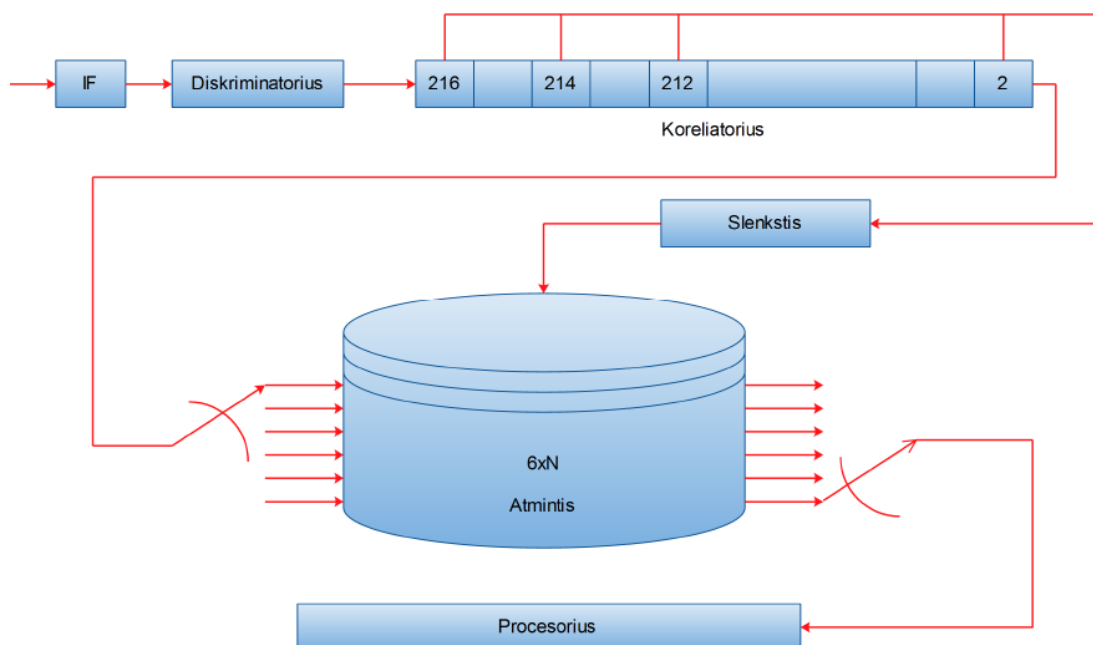
Pirminis uždavinys bet kokiam signalo sinchronizavimo procesui (įskaitant ir UAT signalą) yra kiek įmanoma tikslesnis signalo aptikimas reikiamu laiko momentu. Tai reikalinga sėkmingam signalo demoduliacijos procesui.

UAT signalo sinchronizavimui yra naudojama 36 bitų seka, kuri yra perduodama kiekvienos žinutės pradžioje. Supaprastintas sinchronizavimo procesas gali būti atliekamas lyginant etaloninę bitų seką su priimama bitu seka. Tokiu atveju, jei tam tikras skaičius (pvz. 31) bitų bus teisingas, galėsime teigti, kad priimtas signalas yra patikimas.

ADS-B UAT žinutės sinchronizavimą be kita ko apsunkina ir tai, kad kiekvienas orlaivis savo informacines žinutes siunčia pusiau atsitiktine tvarka, o dėlto padidėja signalų persidengimo tikimybė. Signalų persidengimas nėra pati didžiausia UAT signalo problema, nes šis signalas yra pakankamai atsparus autointerferencijai. Iš principo tai yra dėl to, kad šiam signalui yra naudojama skaitmeninė dažninė moduliacija [24].

4.3.1. Sinchronizavimo procesas

Viena iš galimybių sinchronizuoti UAT signalą yra panaudoti koreliacinio kodavimo sinchronizatoriaus schemą (paveikslas 13). Schemoje matyti, kad priimtas signalas praėjęs pro IF (angl. *intermediate frequency*) filtrą yra aptinkamas diskriminatoriaus grandinėje, kuris savo ruožtu sugeneruoja šešių loginių signalų seką kiekvienam priimtam simboliui. Sugeneruotas signalas keliauja į koreliatoriaus grandinę, kurioje nustatomas sinchronizavimo modelis. Iš koreliatoriaus grandinės išėjimas imčių srautas yra įrašomas į 6 N baitų atmintį. Bitai yra išdėstomi taip, kad kiekviena atminties eilutė yra atskirta nuo kitos laiko tarpu kuris yra lygus bito periodui. Slenksčio blokas nustato ar signalas yra ar ne, jei lyginimo rezultatas gaunasi teigiamas jis prideda vėliavėlę atitinkamoje atminties vietoje. Procesorius savo ruožtu nuskaito bitus iš atminties priklausomai nuo vėliavėlių padėties. Šis procesas leidžia procesoriui išvengti žinučių persidengimo.



13 pav. UAT priimamo signalo apdorojimas

Koreliatorius – tai paprasta segmentinė, vėlinimo linija, kuri geba išlaikyti $6 \cdot 36 = 216$ imčių. Segmentai yra išdėstyti taip, kad lygintų ateinančią sinchronizavimo seką su jau įrašyta etalonine seka. Kaip jau minėjau anksčiau laukiama seka susideda iš loginių vienetų ir nulių tripletų. Tokiu atveju kiekvieno segmento išėjime gaunama koreliacijos reikšmė, kuri gali kisti nuo 0 iki 108. Kai koreliacijos reikšmė yra lygi 108 tai reiškia kad visos imtys yra teisingos, o koreliacijos reikšmei esant lygiai 0 konstatuojama, kad visos imtys yra neteisingos. [25]

Slenksčio grandinė aptinka atėjusios sinchronizavimo sekos imtis, kurios yra aukščiau slenksčio reikšmės. Tam kad surasti optimalų, kiekvieno bito, imties tašką slenksčio detektorius pasirenka didžiausios amplitudės imtį ir pagal tai nustato bito pradžią. Išsirinkęs potencialų ADS-B žinutės pradžios tašką, slenksčio detektorius pažymi jį atitinkamoje atminties vietoje. [25]

Atmintis priima bitų imtis iš koreliatoriaus dažniu 6,25Mbps ir išskaido juos į šešias atskiras sekas. [25] Kiekviena atskiroji seka sudaro potencialų informacinių bitų seką. priklausomai nuo slenksčio detektoriaus, vėliavėlėmis pažymėti bitai patenka į apdorojimo grandinę, kuri yra pačios atminties viduje, šis veiksmas atliekamas tam, kad būtų sudaryta tikroji informacinės žinutės seka. Šioje grandinėje naudojama FIFO (angl. *First in First out*) atminties architektūra.

Procesoriaus grandinėje yra atliekamas realios žinutės apdorojimas. Kiekvienos žinutės apdorojimas prasideda nuskaitant realią žinutę iš atminties, priklausomai nuo slenksčio grandinės sudėtų žymių. Tada kiekviena žinutė, savo ruožtu yra iškoduojama naudojant Rydo Solomono dekoderį (angl. *ReedSolomon decoder*). Rydo Solomono dekoderis yra naudojamas dėl to, kad turi labai mažą neatpažinimo klaidos galimybę. Taigi persidengiančių žinučių apdorojimas yra ribojamas tik atminties dydžiu ir Rodo Solomono dekoderio galimybėmis apdoroti daugiau signalų.

4.3.2. Sinchronizavimo charakterizavimas

Anksčiau aptartas sinchronizavimo procesas yra sumodeliuotas taip, kad būtų padidinta teisingos ir tikslios sinchronizavimo žinutės priėmimo tikimybė. Norint ištirti šį sinchronizavimo modelį būtina apibrėžti tai, kad sugeneruota sinchronizavimo bitų seka, prieš išsiunčiant yra išfiltruojama panaudojus Naikvisto filtrą (angl. *Nyquist filter*) ir moduluojama dažnine moduliacija. Šio filtro pagrindinė paskirtis yra apriboti siunčiamo signalo spektrą, kad būtų sumažinta interferencijos tikimybė su greta veikiančiomis sistemomis, tokiomis kaip DME. Taip pat šis filtras padeda išvengti tarpženklinės interferencijos (angl. ISI - intersymbol interference), tačiau visiškai išvengti stačiakampių impulsų išplatėjimo neįmanoma, nes stačiakampio impulso absoliutinis dažnių juostos plotis yra begalinis, o kanalo juostos plotis visuomet yra baigtinis [23].

Šiuo atveju naudosime vieną iš Naikvisto filtrų – teigiamo kosinuso dalies formos kryžio (angl. *Raised cosine roll off filter*). Kaip jau buvo minėta teoriškai šis filtras veiktų, kaip begalinės

impulsų reakcijos filtras (angl. IIR – *infinite impulse response*), tačiau apriboję signalą teigiamame ir neigiamame trijų bitų periode, gauname reikiamo filtro charakteristiką ir signalo formą. Norint sumodeliuoti šį filtrą pirmiausia turime matematiškai užrašyti paties stačiakampio, informacinio signalo išraišką. Šiuo atveju skaitmeninį signalą, kurį sudaro stačiakampiai impulsai galime užrašyti taip:

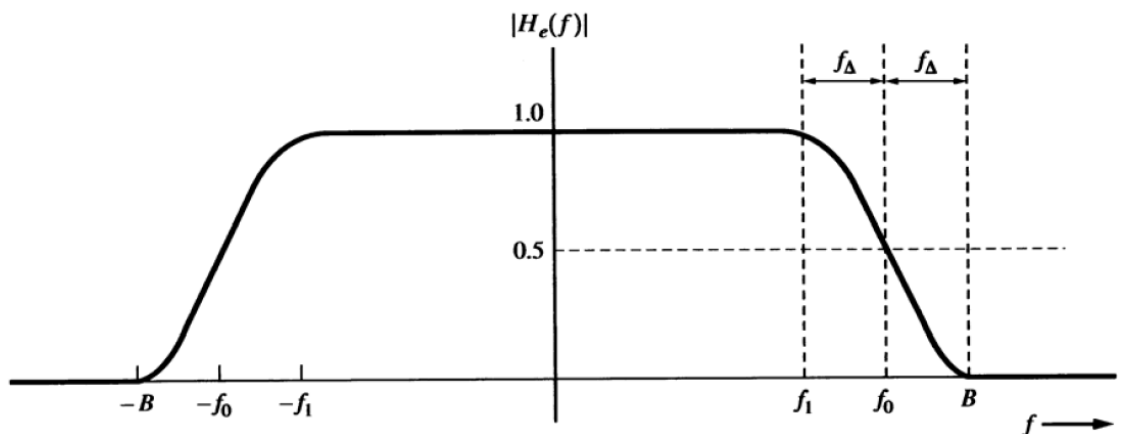
$$w_i(t) = \sum_n a_n h(t - nT_s); \quad (12)$$

čia a_n yra signalo lygiai (perduodamieji duomenys), T_s yra vieno simbolio perdavimo trukmė, o $h(t)$ yra T_s trukmės stačiakampis vienetinis impulsas:

$$h(t) = \Pi\left(\frac{t}{T_s}\right); \quad (13)$$

Taigi teigiamo kosinuso dalies formos kryžio filtro išėjimo signalo spektrą, kai įėjime yra vienetinis stačiakampis impulsas, kurio trukmė $T_s = 1/(2f_0)$, galime užrašyti taip [23]:

$$H_e(f) = \begin{cases} 1, & f < f_1 \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi(f - f_1)}{2f_\Delta} \right] \right\}, & f_1 < f < B \\ 0, & f > B \end{cases}$$



14 pav. teigiamo kosinuso dalies formos kryžio filtro dažninė amplitudės charakteristika.

čia B yra filtro absoliutinis dažnių juostos plotis, o parametrai f_1 ir f_Δ apibrėžiami sąryšiais

$$f_{\Delta} = B - f_0,$$

$$f_1 = f_0 - f_{\Delta}.$$

f_0 yra filtro 6 dB lygio dažnių juostos plotis. Dažnio juostos koeficientas (angl. *rolloff factor*) apibrėžiamas sąryšiu

$$r = \frac{f_{\Delta}}{f_0}; \quad (14)$$

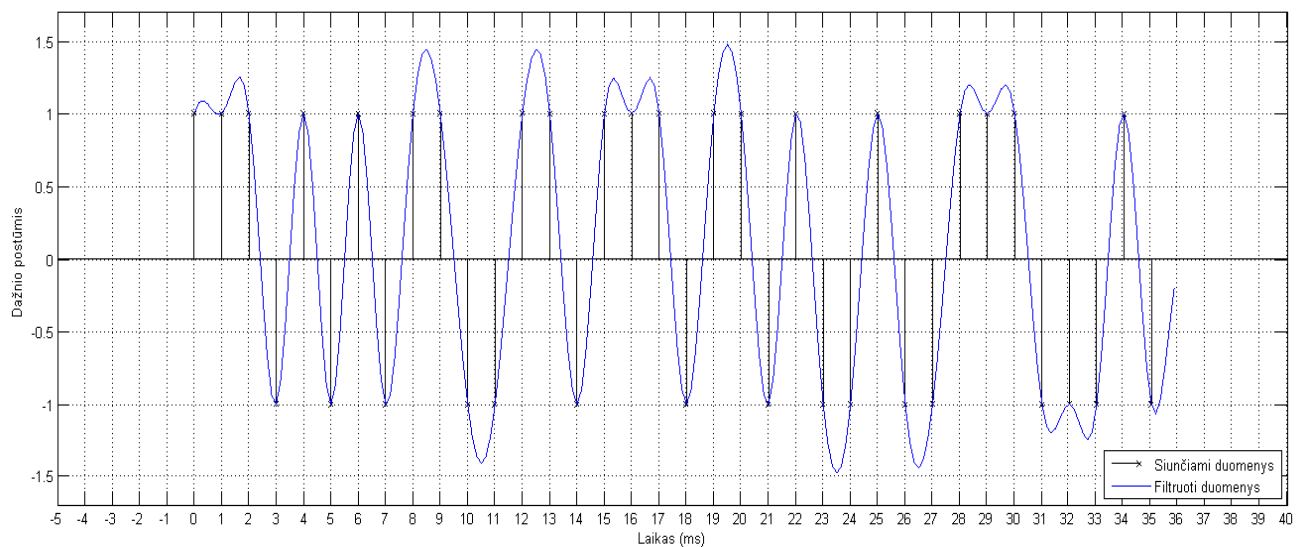
Iš šios išraiškos galime apskaičiuoti mums reikalingo filtro dažnio juostos koeficientą. Žinome, kad siųstuvo dažnių juostos plotis $f_0=312,5$ kHz, tada $f_{\Delta}=625$ kHz, gauname kad

$$r = \frac{f_{\Delta}}{f_0} = \frac{625}{312,5} = 2; \quad (15)$$

Kai sinchronizavimo seka pereina per šį filtrą gaunamas kintantis signalas, kuris gali būti naudojamas moduluoti siųstuvo dažnį. Realios UAT sinchronizavimo žinutės:

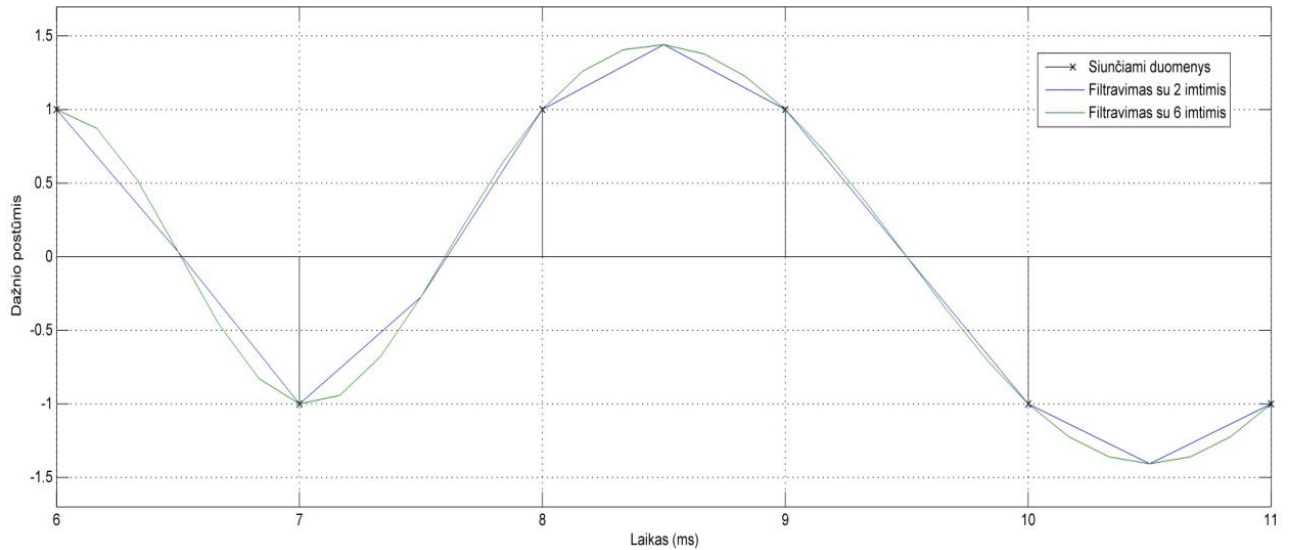
111 010 101 100 110 111 011 010 010 011 100 010

praėjusios pro filtrą, sumodeliuotos „Matlab“ paketo pagalba, charakteristika pavaizduota 15 paveiksle. Loginis vienas yra lygus 1, o loginis nulis -1. Praėjus pro filtrą signalo loginis vienetas yra pastumiamas aukštyjn dažniu f_0 , o loginis nulis pastumiamas žemyn taip pat dažniu f_0 .



15 pav. Filtruotas UAT sinchronizavimo signalas

Signalui perėjus filtrą, priklausomai nuo loginių lygių, dažnis dažniausiai svyruoja tarp idealių ėmimo taškų (angl. *Sampling points*). Taigi galime daryti išvadą, kad didžiausiais tokio signalo efektyvumas būtų naudojant tik vieną imtį vienam bitui, tačiau toks metodas apriboja, optimalaus bangos formos ėmimo taško, tikslų nustatymą. Paveiksle 16 atvaizduotas signalas su 2 ir 6 ėmimų taškais. Siekiant išspręsti šią problemą geriausia būtų naudoti būtų naudoti 6 ėmimus kiekvienam bito periodui. Toks pasirinkimas leistu sugeneruoti nuo 0 iki 108 teisingų bitų kiekvieno matavimo metu. Jeigu teigtume, kad centrinė imtis yra optimaliausioje bito periodo padėtyje, tai kito dvi, likusios imtys turės tą patį poliškumą [26].



16 pav. Filtruotas UAT sinchronizavimo signalas su skirtingomis imtimis

UAT sinchronizavimo signalas visada prasideda atitinkama ir iš anksto žinoma bitų seka. Norint ištirti prieš tai išsakytą teiginį, pirmiausia šią sinchronizavimo seką reikia užrašyti vektoriumi:

$$\vec{B} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_{36})$$

Visi šio vektoriaus komponentai yra arba +1 arba -1, priklausomai nuo to kokia yra loginio vieneto ar loginio nulio reikšmė. Prisiminę prieš tai padarytas išvadas, galime teigti, kad kas šešta imtis niekad nebus lygi 0, nes tai bus aukščiausia impulso dažnio vieta. Taigi dabar galime sudaryti naują vektorių $\vec{F}$, kurio visi komponentai bus lygūs nuliui išskyrus:

$$F_{6i} = b_i; (16)$$

Iš čia galima gauti dar vieną vektorių $\vec{T}$, kuris apibrėžia koreliatoriaus atvadų svorius (angl. *correlator tap weights*). Šio vektoriaus komponentus galime aprašyti taip:

$$T_i = F_i + F_{i+2} + F_{i+4}; \quad (17)$$

Taigi visi nelyginiai koreliatoriaus atvadų svoriai yra lygus nuliui, arba, kitaip sakant, turėsime 108 atvadų svorius, kurie nebus lygus nuliui. Tokiu atveju užrašius vektorių realiam UAT žinutės sinchronizavimo signalui, pagal anksčiau suformuluotą taisyklę gauname:

$$\vec{B} = (1,1,1, -1,1, -1,1, -1,1,1, -1, -1,1,1, -1,1,1, -1,1, -1, -1,1, -1, -1,1,1,1, -1, -1, -1,1, -1)$$

Tada,

$$\vec{T} = (0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0, -1,0, -1,0, -1,0 \dots \dots \dots)$$

Koreliacijos reikšmė, kuri skaičiuoja teisingų imčių skaičių iš galimų 108, gali būti apskaičiuojama taip [27]:

$$C = \frac{(108 + \sum_{n=1}^{108} T_{2n} S_{2n})}{2}; \quad (19)$$

čia S_n yra koreliatoriaus vėlinimo linijos atšakų skaičių: $n = 1$ iki 216.

Norėdami įvertinti, realų šio sinchronizavimo signalo ir visos sistemos našumą neužtenka apibrėžti, tik galimą teisingų bitų sumą. Bitai praeidami pro atitinkamus kodavimo ir perdavimo kanalus bet kuriuo atveju bus iškraipomi. Taigi, norint gauti konkretesnius rezultatus, reiktų įvertinti tai, kad visas galimas signalas susideda iš bitų sekos ir triukšmų. Šiuo atveju triukšmu laikysime baltąjį Gauso triukšmą. Dabar signalo, perėjusio Naikvisto filtrą, loginius lygius galime aprašyti taip:

$$S_i \text{ bus lygus } +1 \text{ tik tada, kai } x_i = \sum N_{ij} F_j + g_i \geq 0,$$

$$S_i \text{ bus lygus } -1 \text{ tik tada, kai } x_i = \sum N_{ij} F_j + g_i < 0.$$

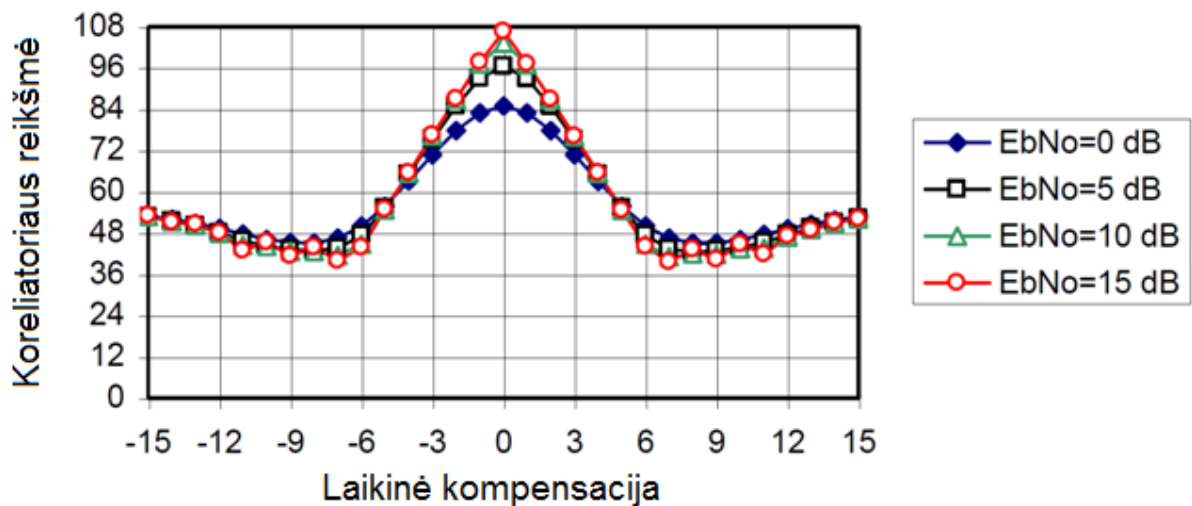
čia N_{ij} yra Naikvisto filtro koeficientas ir g_i yra Gauso triukšmų imtys.

Kaip matyti iš šių išraiškų jeigu nebus jokio triukšmo, atėjusi seka bus ideali ir koreliacijos reikšmė visada bus lygi 108. Su baigtiniu triukšmų lygiu koreliacijos reikšmę galime aproksimuotai užrašyti taip [27]:

$$C = 108 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{108} \operatorname{erfc} \left(T_{2i} x_{2i+m} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \right); \quad (20)$$

čia m yra sveikasis skaičius kuris nurodo santykinę laiko kompensaciją imčių periodo vienetais. γ yra triukšmo – signalo santykis, erfc yra papildoma klaidų kompensavimo funkcija[27]. Sumodeliuota koreliacijos reikšmių priklausomybė nuo signalas – triukšmas santykio yra pateikta 17 paveiksle.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt; \quad (21)$$



17 pav. Koreliacija naudojant tris imtis vienam bitui

Iš 17 paveikslo matome, kad kreivės įgauna tam tikrą, pageidaujamą funkciją. Praktiškai visos kreivės, kurios gaunamos naudojant koreliacinę vėlinimo liniją, susmaileję kai signalas – triukšmas santykis arba E_b/N_0 , yra didesnis už 5 dB. Ši savybė turėtų padėti lengviau nustatyti optimalų ėmimo tašką.

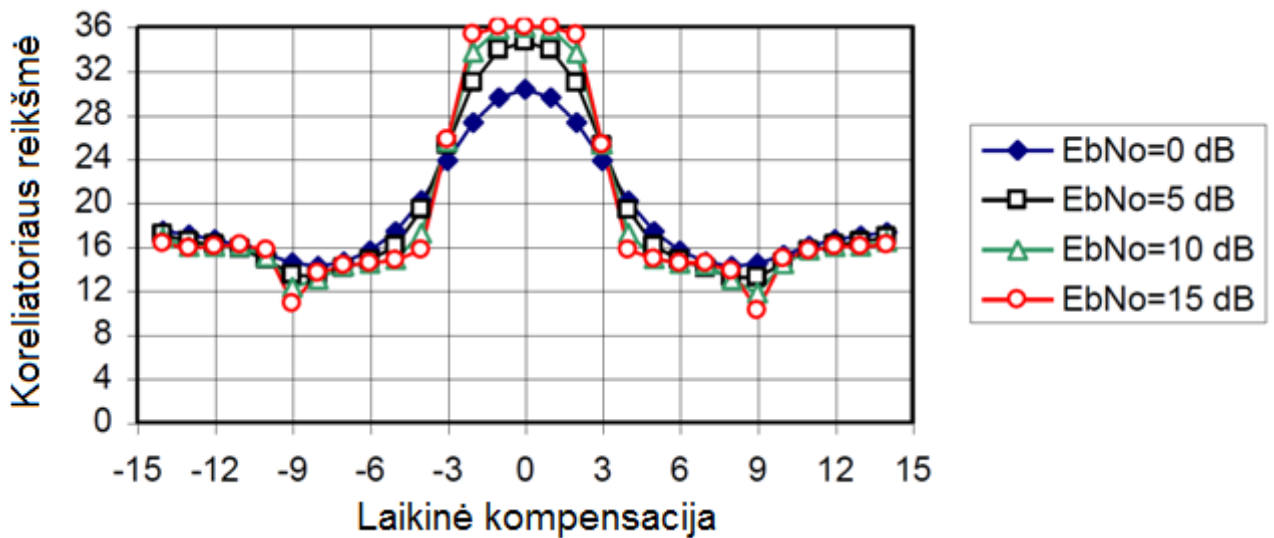
Palyginimui atliksiu tą pačią moduliaciją, tik su viena imtimi kiekvienam bitui. Tokiu atveju koreliacijos atvadų svorio vektoriaus elementai gali būti užrašomi taip:

$$T_i = F_i;$$

Tada koreliacijos reikšmės gali būti apskaičiuojamos taip [27]:

$$C = \frac{(36 + \sum_{n=1}^{36} T_{6n} S_{6n})}{2}; (22)$$

Pasinaudoję (22) formulę, tik 36 galimiems variantams gauname tokį koreliacijos reikšmės priklausomybės nuo Eb/No grafiką (18 paveikslas). Šiame grafike, kai naudotas tik viena imtis vienam bitui, matome, kad kreivių smaigaliu nebeliko, kreivės suplokštėjo. Taigi galime daryti išvadą, kad nepriklausomai nuo signalas – triukšmas santykio kelio imtys turės tuos pačius maksimalius taškus. Optimalaus taško aptikimas tokioje situacijoje, praktiškai yra nebeįmanomas. Taiga naudojant daugiau imčių galime pagerinti teisingo signalo aptikimo galimybę.



18 pav. Koreliacija naudojant viena imtį vienam bitui

4.3.3. Netikro pavojaus signalo lygis

Netikro pavojaus signalo lygis (angl. *False alarm rate*) gali atsirasti, slenksčio grandinėje, dėl triukšmų įtakos. Atsitiktinis triukšmas gali sukurti koreliacijos vertę, kuri viršija sinchronizavimo ribą. Netikro pavojaus signalo lygio sukeltos klaidos gali būti toleruojamos su sąlyga, kad imtuvas turi pakartotinio sužadavimo galimybę. Jeigu visos 108 imtys, kurios naudojamos sukurti koreliacijos vertę yra statiškos ir nepriklausomos, tada netikro pavojaus signalo lygio tikimybę galime užrašyti, pasinaudojus tikimybių teorija [26] [27]:

$$P_{np} = (0,5)^{108} \sum_{n=0}^{107-T} \frac{108!}{n! (108 - n)!}; (23)$$

Čia T yra sinchronizavimo slenksčio reikšmė. Iš formulės matyti, kad aukščiausia galima sužadavimo riba gaunama tada kai koreliacijos verte yra 107. Tokiu atveju, jeigu imtys yra imamos 6,25 MHz dažniu, klaidingo aptikimo dažnis bus lygus:

$$KAD = 6,25 \cdot 10^6 P_{np}; (24)$$

Šis metodas nėra visiškai teisingas, nes nesugeba įvertinti baigtinės pralaidumo juostos bendro sinchronizavimo proceso metu. Taip atsitinka dėl to, kad siaurajuostis IF filtras riboja signalo pralaidumo juostos plotį ir, kaip minėjau anksčiau, prideda po tris imtis kiekvieno bito perdavimo periode. Galima šio sinchronizavimo proceso interpretacija tokiu atveju galėtų būti, jeigu teigtume, kad sinchronizacija yra paremta 36 imtimis visai sinchronizavimo sekai. Tada klaidingo signalo aptikimo tikimybė bus lygi [23]:

$$P_{np} = (0,5)^{36} \sum_{n=0}^{36-(T+1)/3} \frac{36!}{n! (36-n)!}; (25)$$

Tada KAD [23]:

$$KAD = 1041667 P_{np}; (26)$$

Kaip buvo ištirta anksčiau, naudojant tik 36 imtis, yra praktiškai neįmanoma nustatyti optimalaus imties taško, tai reiškia, kad ir ši išraiška taip pat nebus teisinga. Kad gauti norimus rezultatus į tikimybių lygtį reikia įvesti naują parametą, kuris nusako nekonkretų efektyvių bitų skaičių, šį parametą įvardinau, kaip NE . Tada gauname:

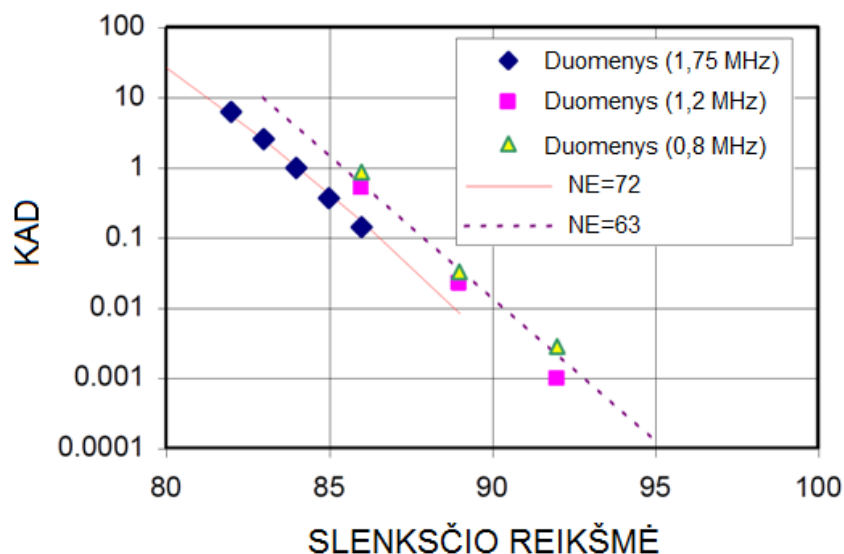
$$P_{np} = (0,5)^{NE} \sum_{n=0}^{NE(107-T)/108} \frac{NE!}{n! (NE-n)!}; (27)$$

Tada KAD:

$$KAD = 3,125 \cdot 10^6 (NE/108) P_{np}; (28)$$

Paveiksle 19 pateiktas KAD ir slenksčio reikšmės priklausomybės grafikas dviem skirtingom NE reikšmėm. Šiame grafike atidėtos ir skirtingų pralaidumo juostų reikšmės. Imtuvo

filtro nominalūs dažnių juostų pločiai prie 3dB yra 1,75MHz, 1,2MHz, 0,8MHz. Iš šio grafiko matyti, kad kuo daugiau pasirinkta imčių, tuo didesnis yra ir klaidingo aptikimo dažnis.



19 pav. KAD priklausomybė nuo slenksčio reikšmės

4.4.UAT imtuvo jautrumo tyrimas

Kaip jau buvome aptarę anksčiau, bitų klaidų tikimybė nekoherentiniai CPFSK moduliacijai gali būti apskaičiuojama pasinaudojus formule:

$$P(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}} \right); \quad (29)$$

čia γ yra signalas – triukšmas santykis.

Projektuojant realius UAT sistemos imtuvus yra siūloma naudoti siaurajuosčius filtrus, palyginus didelei bitų perdavimo spartai. Toks pasirinkimas gali padidinti tarpimbolinės interferencijos sukeltų klaidų tikimybę, o tai, savo ruožtu, gali iškraipyti vadinamąją akių diagramą (angl. *Eye diagram*). Bitų perdavimo sparta UAT signalui yra 1,04166 MHz, o galimų filtrų juostų pločiai yra 0,8 MHz ir 1,26 MHz.

Formulėje 29 esančią signalo – triukšmo santykio dedamąją galime išskaidyti į du atskirus komponentus, įvertinant tik terminį triukšmą. Tada gauname, kad [24]:

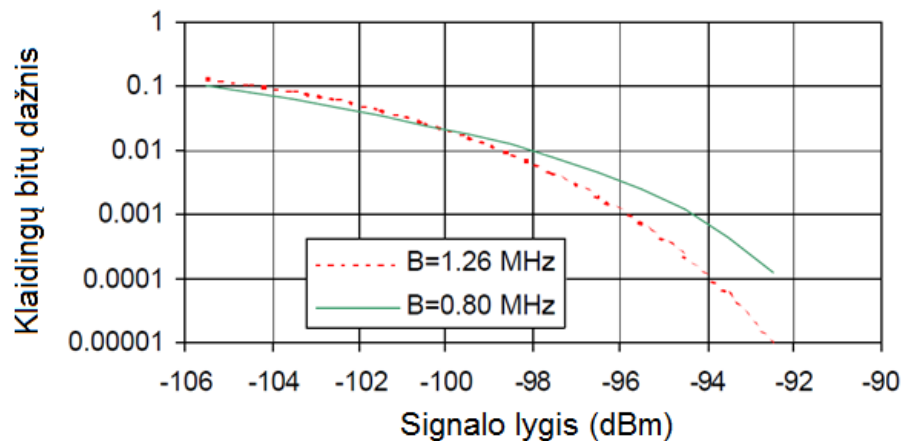
$$\gamma = \frac{S}{N} = \frac{LS_R}{FkT_0B}; \quad (30)$$

čia S_r – priimto signalo stiprumas, L - nuostolių faktorius (dB), F – priimto signalo triukšmo faktorius, kT_0 – triukšmo temperatūra, B – pralaidumo juostos plotis.

Išraiškoje 30 matome, kad signal ir triukšmo santykis yra proporcingas pralaidumo juostos pločiui. Pralaidumo juostos plotį galime išreikšti decibelais [24]:

$$B_{dB} = 10 \log(B_{Hz}); \quad (31)$$

Tokiu atveju gauname, kad B platesnės juostos filtrui bus 61dBHz ir 59 dBHz siauresnės juostos filtrui. Pasirinkę kitų parametrų dydžius: $kT_0 = -174$ dBm/Hz ir $F = 6,5$ dB , ir sumodeliavę signalą Matlab aplinkoje, gauname tokį bitų klaidos dažnio ir signalo lygio priklausomybės grafiką, (20 pav.)[24].



20 pav. Klaidingų bitų dažnio priklausomybė nuo signalo lygio

5. UAT ir 1090ES sistemų palyginimas

Ankstesnėje darbo dalyje buvo minėta, kad VDL mode 4 duomenų perdavimo sistema, nėra ir greičiausiai nebus naudojama ADS-B sistemose, kurios bus diegiamos europoje. Šį faktą taip pat patvirtina ir *Airbus* kompanijos atlikti tyrimai. Taigi lieka tik du kandidatai, 1090ES arba UAT. 1090ES standartas yra pripažintas tarptautiniu. Versijos 0 ir 1 yra pripažintos remiantis reglamentais DO-260/DO 260A ir DO-181C. Naujausia – antra versija vis dar kuriama, o ją reglamentuojantys dokumentai yra DO-260B ir DO-181E. Ši versija, be jokių išlygų, nuo 2020 metų bus naudojama visame pasaulyje, nepriklausomai nuo skrydžio aukščio.

UAT ir 1090ES sistemų parametrų palyginimo lentelė yra pateikta žemiau (4 lentelė)

4 lentelė. UAT ir 1090ES parametrų palyginimas

	1090ES	UAT
Veikimo Dažnis	1090 MHz	987MHz
Dažnio spektro sutapimas su kitomis sistemomis	Kelia nemažai rūpesčių; Tokia pat dažnis kaip Režimo S, ATCRBS/TCAS II, Režimo 4 ir Režimo 5.	Nekelia rūpesčių; papuola į DME dažnio diapazoną
Duomenų formatas	Toks pat kai <i>Režimo S</i> atsako	Unikalus
Veikimo apribojimai	Jokių apribojimų	Orlaiviams skraidantiems žemiau 18,000 pėdų.
Veiklos sritys	JAV, Kanada, centrinė Amerika, Europa, Azija.	Tik JAV
Naudotojai	Visi liektuvai turintis atsakiklius	Mokomieji lėktuvai

5.1. ADS-B borto sistemos architektūros palyginimas: 1090ES ir UAT

Suprasti, kiek kainuos ADS-B sistemos diegimas aviacijos kompanijoms, pirmiausia reikia išanalizuoti, kokius pakeitimus reikia padaryti jau egzistuojančioje sistemoje. Būtent kaina ir integravimo aspektai lems tai, kokį duomenų keitimosi standartą pasirinks Europa. Viso šio darbo metu buvo apžvelgiamos ADS-B sistemos, o šioje dalyje aptarsime, kaip atrodo UAT ir 1090ES sistemų architektūra.

Pirmiausia ko reikia orlaivyje, tai tikslaus navigacinio šaltinio. ADS-B didžiojoje aviacijoje šiam tikslui naudoja GPS imtuvus. GPS imtuvai šiais laikais nėra vieninteliai šaltiniai, tiekiantys tikslią navigacinę informaciją. Navigacinių duomenų šaltinio funkcijas gali atlikti ir kiti navigaciniai prietaisai, esantys orlaivyje, tačiau jie turi tenkinti reikalavimus, keliamus TSO-C146 reglamente. Didžiojoje aviacijoje, 2010 metų duomenimis, 17,86% orlaivių turėjo įrangą, atitinkančią šį standartą.

Naudojant orientavimosi informaciją, navigacinius duomenis, aukščio duomenis ir kitą informaciją ADS-B procesorius sugeneruoja informacinę žinutę. UAT sistemos architektūroje šią funkciją atlieka atskiras blokas, kai tuo tarpu 1090ES sistemoje tai įgyvendinama atsakiklyje. Procesoriaus blokai yra standartizuojami pagal TSO-154C (UAT sistemai) ir TSO-166b(1090ES sistemai). Didžiojoje aviacijoje, 2010 metų duomenimis, 0% orlaivių turėjo įrangą, atitinkančią TSC-154C standartą.

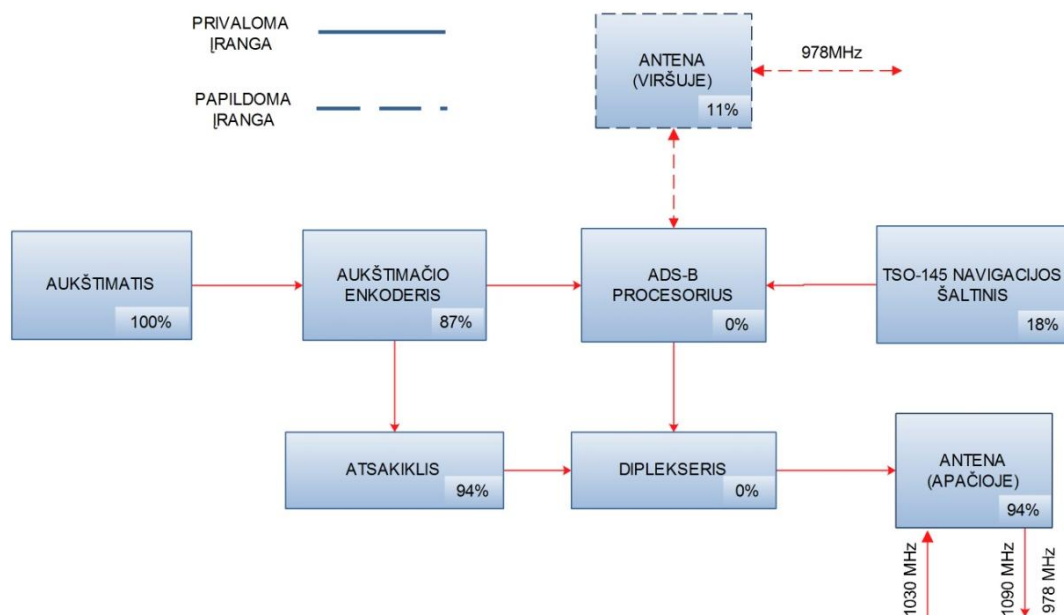
Atsakiklius naudoja beveik visi orlaiviai, visame pasaulyje. Tagi, naudojant 1090ES sistemą, jie gali atlikti procesoriaus funkciją ir generuoti ADS-B žinutes. Pasaulyje skraido 83,67% orlaivių, kurie turi A/C atsakiklius ir 10,51% aprūpinti *Režimo S* atsakikliais.

Kaip jau žinome, norint išsiųsti ADS-B žinutę, reikalinga antena. Pagal anksčiau išleistus nurodymus orlaiviuose turėjo būti sumontuotos dvi antenos: viena viršuje, kita apačioje. Viršutinė antena turėjo būti naudojama bendravimui ore, tarp orlaivių. Apatinė bendravimui su antžeminėmis stotimis. Tačiau, atlikus išsamesnius tyrimus, buvo nuspręsta palikti tik vieną anteną, orlaivio apačioje. Toks sprendimas buvo priimtas, siekiant sumažinti ADS-B sistemos instaliavimo kaštus. FAA netgi priėmė sprendimą, leidžiantį UAT sistemai naudoti ta pačią anteną, kaip ir atsakiklio. Taigi, norint prijungti UAT sistemą, nereikia papildomos antenos, tereikia specialaus šakotuvo.

Kitas svarbus įrenginys, kuris siunčia informaciją apie esamą orlaivio aukštį, yra barometrinis aukštmatas. Dauguma barometrinių aukštimačių geba išduoti tik slėgio pokyčio reikšmes. Norint gauti skaitmeninį aukščio signalą, reikia barometrinį slėgį paversti elektriniu

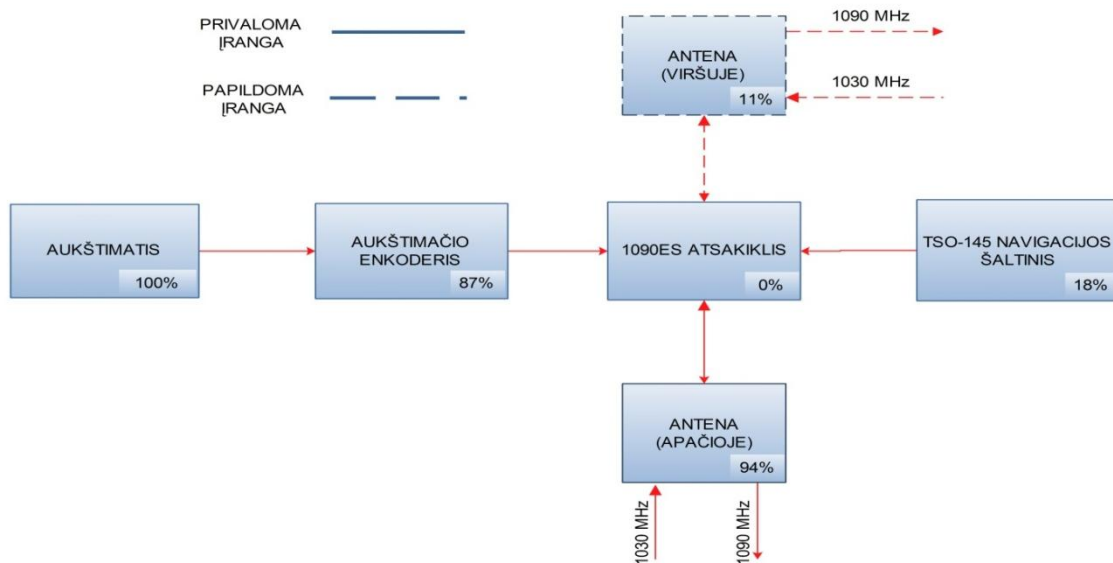
signalu. Tam tikslui yra naudojamas aukščio enkoderis. Aukščio enkoderis yra naudojamas 87,29% viso pasaulio orlaivių.

Paveiksle (21 pav.) pavaizduoti komponentai, kurie yra reikalingi sudaryti UAT ADS-B sistemą orlaivyje. Skaičiai, kiekvieno bloko kampe, procentais nurodo kiek orlaivių jau yra aprūpinti reikalinga įranga.



21 pav. UAT sistemos architektūra

Kitame paveiksle parodyta 1090ES sistemos blokinė diagrama (22 pav.)



22 pav. 1090ES sistemos architektūra

Kaip matyti iš šių blokinių schemų, 1090ES architektūrai reikia mažiau komponentų, kad būtų suformuota ADS-B sistema. Taip yra todėl, kad atsakiklis atlieka, praktiškai tą pačią funkciją, kaip ir ADS-B procesorius. Nenaudojant ADS-B procesoriaus, nereikalingas ir papildomas diplekseris. Šis faktas įtakoja pigesnę ADS-B sistemos integraciją. Blokinėse schemose matyti, kad 1090ES sistemoms nereikia jokių papildomų elementų, užtenka tik vidinės programos pakeitimų. Apibendrinant, architektūriškai geriau būtų naudoti 1090ES sistemą, nei UAT. 1090ES sistema yra pigesnė, jos integralumas didesnis, mažesni laiko ir žmogiškieji išteklių lėmia tai, kad ateities europoje turėsime būtent 1090ES ADS-B sistemą.

6. ADS-B diegimo perspektyvos

Didžiosios šalys, kurios priklauso ICAO bendruomenei iki 2012 metų yra numačiusios tokias priemones ADS-B sistemos diegimui:

- orlaivių stebėjimas maršrute sykiu su radiolokatorių sistemos vykdomu stebėjimu;
- orlaivių stebėjimas oro uosto zonoje;
- orlaivių stebėjimas zonose, kurių nesiekia radiolokatorių darbo zonos – ypač – aukštesniuose skrydžių lygiuose;
- tobulesnės informacijos atvaizdavimo priemonės apie situaciją oro uosto prieigose ir oro uosto teritorijoje;
- tobulesnės priemonės taisyklės „matau – vengiu“ įgyvendinimui;
- tobulesnės priemonės orlaivių tūpimo eiliškumui nustatyti.

Pagal FAA paskelbtus perspektyvinius planus iki 2010 metų visi orlaiviai skraidantys federalinės aviacijos administracijos zonoje privalės turėti įrangą leidžiančią orlaiviams bendrauti su antžeminėmis stotimis, naudojant ADS-B sistemą.

Pagal FAA skaičiavimus orlaivių skaičius, kurie naudoja ADS-B sistemą, per vienerius metus padidėja 0,9 procentais.

Europoje ADS-B sistemų panaudojimo galimybės taipogi sparčiai juda pirmyn. Kasdien atsirandant naujom technologijom vis daugiau orlaivių gamintojų diegia sistemas suderintas dirbti ADS-B aplinkoje. Avionikos gamintojai taipogi nesnaudžia ir yra pristatę, jau nemažą spektrą įrangos kuri leidžia orlaiviams įsilieti į ADS-B tinklą.

ADS-B įrangos gamintojai, kurie orientuojasi į kainą:

- NavWorx,Inc ADS-B įrangos kaina nuo 1 iki 3 tūkstančių dolerių
- FreeFlight Systems įrangos kaina nuo 5 iki 7 tūkstančių dolerių
- Radenna of Revere- ši kompanija siūlo įrangą, kurią prijungus prie išmaniojo telefono ar planšetinio kompiuterio būtų galima keisti informacija ADS-B tinklu. Šitokios įrangos kaina apie 2 tūkstančius dolerių.

7. Išvados

Darbe apžvelgtos plačiai naudojamos ir ateities oro eismo valdymo sistemos. Plačiau buvo aptartos klasikinės oro kelių stebėjimo priemonės, tai pirminiai ir antriniai radiolokatoriai. Aptartos jų funkcinės schemas, bei trumpai aptarti jų veikimo principai. Pirminis radiolokatorius – sena technologija. Pagrindiniai trūkumai, lyginat su antriniu radiolokatoriumi: negaunama informacija apie orlaivį, mažesnis atsparumas trukdžiams, mažesnis veikimo zonos nuotolis. Antriniai radiolokatoriai – daug pažangesnė technologija, tačiau jiems reikalinga papildoma, orlaivyje montuojama, įranga. Praktiškai tik dėl šitos priežasties vis dar praktikoje naudojami ir pirminiai radiolokatoriai.

Aprašyti automatinio duomenų perdavimo tinklai, kurie yra plačiai naudojami visame pasaulyje. Šiame darbe buvo aptarti du pagrindiniai tinklai ATIS ir VOLMET. ATIS tinklas transliuoja didesnio spektro pranešimus, kai tuo tarpu VOLMET tinklas transliuoja tik meteorologinio pobūdžio pranešimus.

Darbe plačiau nagrinėjama ir aptariama naujos kartos įranga. Tai ADS-B ir ADS-A sistemos. Šios sistemos dar nėra labai plačiai paplitusios, tačiau kai kurios didžiosios pasaulio šalys yra rimtai susidomėjusios šios sistemos diegimu. Pirmoji šalis pilnai uždengusi savo erdvę ADS-B technologija yra Australija.

Didesnis dėmesys buvo skirtas ADS-B sistemai. Buvo išanalizuota, dviejų pagrindinių kandidatų į Europoje planuojamos diegti ADS-B sistemos naudojančios duomenų perdavimo standartus (1090ES ir UAT) architektūra ir signalų ypatumai.

Naudojant “Matlab” matematinių skaičiavimų paktetą, analitiškai sumodeliuotas 1090ES signalas, bei ištirtas UAT duomenų perdavimo protokolą moduliuojančių žinučių vienas iš galimų sinchronizavimo modelių. Šis modelis gali būti naudojamas UAT sistemos imtuvuose sinchronizuoti ir demoduliuoti daugybę persidengiančių žinučių. Gauti tyrimų rezultatai įrodo, kad optimalus pasirinkimas, demoduliuojant priimamą signalą, naudoti šešias imtis. Tokiu atveju gaunamas aukštesnis sinchronizavimo patikimumas. Lengviau nustatyti optimalius imčių taškus. Kitu atliktu bandymu įrodyta, kad kuo daugiau pasirinkta imčių, tuo didesnis yra ir klaidingo aptikimo dažnis. Iš atlikto modeliavimo taip pat matyti, kad naudojant platesnės pralaidumo juostos filtrą, galimų klaidų tikimybė sumažėja.

Išanalizavus 1090ES ir UAT sistemų blokines schemas, galime daryti išvadą, kad 1090ES architektūra yra daug patrauklesnė. 1090ES sudėčiai reikia mažiau komponentų, kad būtų suformuota ADS-B sistema. Taip yra todėl, kad atsakiklis atlieka, praktiškai tą pačią funkciją, kaip ir ADS-B procesorius. Nenaudojant ADS-B procesoriaus, nereikalingas ir papildomas diplekseris.

Dėl to yra pigesnė ADS-B sistemos integracija. Blokinėse schemose matyti, kad 1090ES sistemoms nereikia jokių papildomų elementų, užtenka tik vidinės programos pakeitimų.

Remiantis duomenimis iš viso atlikto darbo, galime daryti išvadą, kad Europos ADS-B sistema turėtų naudotis 1090ES duomenų perdavimo protokolu. Žinoma, UAT duomenų perdavimo protokolas taip pat turi perspektyvų, tačiau jis yra ganėtinai naujas – mažai žinomas Europoje. Be kita ko, UAT yra greitesnis nei, 1090ES duomenų perdavimo protokolas. Pagrindinis aspektas yra kaina, o kaip matosi iš blokinių architektūros schemų 1090ES yra daug pigesnė ir lengviau integruojama į jau skraidančius orlaivius.

Naujausias ateities projektas oro kelių valdymui yra CNS/ATM sistema. Šios technologijos įgyvendinimas leistu visas komunikacines, palydovines, sekimo, navigacines sistemas sujungti į vieną bendrą – pasaulinį tinklą.

Darbo ištrauka buvo pristatyta tarptautinėje konferencijoje „Transporto priemonės 2011“ vykusioje Kaune. Ruošiantis šiai konferencijai buvo parašytas straipsnis kuris išspausdintas to pačio pavadinimo knygoje, straipsnis ir knygos viršelis pateiktas priede.

Naudota literatūra

1. Sitoni. *Skrydžių valdymo priemonės*: mokomoji medžiaga. Vilnius, Antano Gustaičio Aviacijos Institutas.
2. Radar tutorial (žiūrėta 2011 m. sausio 28 d.). Prieiga per internetą: <<http://www.radartutorial.eu>>
3. Merrill Skolnic. 1990. *Radar handbook second edition*. Boston, McGraw Hill.
4. George W. Stimson. 1998. *Introduction to Airborne Radar*. Mendham, SciTech Publishing, Inc..
5. David K. Barton, Sergey A. Leonov. 1998. *Radar technology encyclopedia*. Boston, Artech House.
6. CNS/ATM systems (žiūrėta 2011 m. sausio 15 d.). Prieiga per internetą: <<http://www.icao.int/icao/en/ro/rio/execsum.pdf>>
7. Satellite-based Communications, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management (CNS/ATM) System (žiūrėta 2011 m. sausio 15 d.). Prieiga per internetą: <<http://www.cad.gov.hk/english/cnsatmsys.html>>
8. Automated Dependent Surveillance (ADS) (žiūrėta 2011 m. kovo 10 d.). Prieiga per internetą: <http://www.aena.es/csee/Satellite?Language=EN_GB&Section=5&SiteName=NavegacionAerea&c=Page&cid=1043829981402&pagename=subHome>
9. Automatic dependent surveillance-broadcast (žiūrėta 2011 m. sausio 28 d.). Prieiga per internetą:< http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_dependent_surveillance-broadcast >
10. Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B). (žiūrėta 2011 m. vasario 10 d.). Prieiga per internetą:< <http://www.airservicesaustralia.com/projectsservices/projects/adsb/>>
11. Automatic Terminal Information Service (žiūrėta 2011 m. sausio 28 d.). Prieiga per internetą:< http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_Terminal_Information_Service>
12. VOLMET. Prieiga per internetą (žiūrėta 2011 m. lapkričio 20 d.):<<http://en.wikipedia.org/wiki/VOLMET>>
13. Aeronautical Fixed Telecommunication Network (žiūrėta 2011 m. lapkričio 20 d.):. Prieiga per internetą:< http://en.wikipedia.org/wiki/Aeronautical_Fixed_Telecommunication_Network>
14. International Civil Aviation Organization (ICAO), Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation - Aeronautical Telecommunications Volume II, Sixth Edition, 2001.

15. Victor Lavrov, Alexander Usoltsev, Anatoly Shilov, Sergey Trofimov. Global surveillance system based on 1090ES ADS-B and satellite-transmitter. EIWAC 2010.
16. Ping Jiang, Liping Jiang . PPM Base-bangs System Design and Implementation with FPGA. [J]. Experimental Technology and Managment. 2007
17. ADS-B for dummies
18. Standards and Recommended Practices for the Universal Access Transceiver (UAT) Draft Revision 5.0 (žiūrēta 2012 m. gegužės 20 d.): Prieiga per internetą:<[Http://www.icao.int/anb/panels/acp/wg/w/wgw01/ACP-WGW01-report%20on%20A.I.1-Appendix%20B%20-%20UAT%20SARPs.pdf](http://www.icao.int/anb/panels/acp/wg/w/wgw01/ACP-WGW01-report%20on%20A.I.1-Appendix%20B%20-%20UAT%20SARPs.pdf)>
19. Report on the Validation of the Requirements in the Manual on the Universal Access Transceiver (UAT) Detailed Technical Specifications, Edition 1. (žiūrēta 2012 m. gegužės 20 d.): Prieiga per internetą:< <http://www.icao.int/anb/panels/acp/WG/W/wgw01/ACP-WGW01-WP12-UAT%20Val%20Rpt%20Tech%20Man.pdf>>
20. RTCA DO-242A, Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)[S]. 2002.
21. RTCA SC-186.RTCA DO-282A:minimum operational performance standards for UAT automatic dependent surveillance-broadcast [S].2004.
22. Aeronautical Mobile Communications Panel(AMCP)Working Group D VDL Mode 4 Standards And Recommended ices AMCP/WG-D/11.Toulouse.1999.
23. Li Yao. Mode S ADS-B receiver decoders Research and Design. [D].Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China.2008-5.
24. Couch, Leon W., Digital and analog communication systems / Leon W. Couch. 6th ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001.
25. DO-242A
26. Steve White. Digital Signal Processing: A Filtering Approach. Delmar Cengage Learning; 1 edition. March 28, 2000.
27. Abramowitz, M., and I. A Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, Inc., New York.