



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACINIŲ PRIETAISŲ KATEDRA

Rimas Ambrakaitis

GBAS sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybių tyrimas

Analysis of Possibilities of GBAS System Application for Lithuanian Aviation

Baigiamasis magistro darbas

Aviacinė elektronika studijų programa, valstybinis kodas **621H43002**

Aeronautikos inžinerija studijų kryptis

Vilnius, 2013

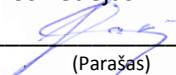
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas


(Parašas)

Algimantas Jakučionis

(Vardas, pavardė)

2013-06-04

(Data)

Rimas Ambrakaitis

GBAS sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybių tyrimas

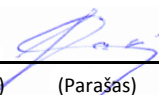
Analysis of Possibilities of GBAS System Application for Lithuanian Aviation

Baigiamasis magistro darbas

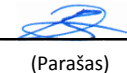
Aviacinė elektronika studijų programa, valstybinis kodas **621H43002**

Aeronautikos inžinerija studijų kryptis

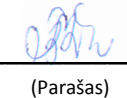
Vadovas

dr. doc. Algimantas Jakučionis  2013-06-04
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas

dr. Darius Rudinskas  2013-06-05
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Regina Žukienė

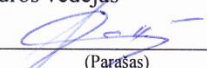
 2013-05-31
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

Aeronautikos inžinerija studijų kryptis
Aviacinė elektronika studijų programa, valstybinis kodas 621H43002
Aviacinė elektronika specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(Parašas)
Algimantas Jakučionis
(Vardas, pavardė)
2012-10-23
(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei)

Rimui Ambrakaičiui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **GBAS sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybių tyrimas,**

patvirtinta 2012 m. spalio 23 d. dekanų potvarkiu Nr. 159-ai

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. gegužės 30 d.

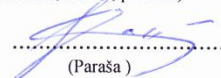
BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Apžvelgti palydovinėmis technologijomis pagrįstos antžeminės patikslinimo sistemos (GBAS) struktūrą ir veikimą, palyginti jos parametrus bei galimybes su antžeminėmis tūpimo pagal prietaisus sistemomis (ILS). Surinkti duomenis apie GBAS įteisinimą, bandymus ir panaudojimus įvairiuose oro uostuose. Atlikti GBAS potencialaus tikslumo analizę, pagrįsti galimybes ir tikslingumą panaudoti GBAS Lietuvos oro uostuose artimiausioje perspektyvoje.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

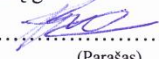
.....
.....
.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas


(Paraša)

doc. dr. A. Jakučionis
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau


(Parašas)
Rimas Ambrakaitis
(Vardas, pavardė)
2012-11-05
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir
baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos
aprašo 2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rimas Ambrakaitis, 20063200

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Antano Gustaičio aviacijos institutas

(Fakultetas)

Aviacinė elektronika, AEfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. birželio 3 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „GBAS sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybių tyrimas“ patvirtintas 2012 m. spalio 23 d. dekanų potvarkiu Nr. 159ai, 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: dr. Darius Rūdinskas. 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)

Rimas Ambrakaitis

(Vardas ir pavardė)

(the document of Declaration of Authorship in the Final Degree Paper)

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

RimasAmbrakaitis, 20063200

(Student's given name, family name, certificate number)

AntanasGustaitis' Aviation Institute

(Faculty)

Avionics, AEfm-11

(Study programme, academic group no.)

**DECLARATION OF AUTHORSHIP
IN THE FINAL DEGREE PAPER**

June 3, 2013

I declare that my Final Degree Paper entitled „Analysis of Possibilities of GBAS System Application for Lithuanian Aviation“ is entirely my own work. The title was confirmed on October 23, 2012 by Faculty Dean's order No. 159ai. I have clearly signalled the presence of quoted or paraphrased material and referenced all sources.

I have acknowledged appropriately any assistance I have received by the following professionals/advisers: Dr Darius Rudinskas.

The academic supervisor of my Final Degree Paper is Assoc Prof Dr Algimantas Jakučionis.

No contribution of any other person was obtained, nor did I buy my Final Degree Paper.



(Signature)

Rimas Ambrakaitis

(Given name, family name)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacijos prietaisų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Aviacinės elektronikos** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **GBAS sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybių tyrimas**

Autorius **Rimas Ambrakaitis**

Vadovas **doc. dr. Algimantas Jakučionis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos palydovinės tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybės. Aptartos palydovinės navigacijos sistemos tikslumą įtakančios paklaidos, jų šaltiniai. Nagrinėjama GBAS sistemos struktūra, veikimo principas, paklaidų eliminavimo būdai. Išnagrinėtos šios sistemos panaudojimo galimybės (infrastruktūros ir ekonominiu požiūriais) tarptautiniuose Vilniaus, Kauno, Palangos ir Šiaulių oro uostuose. Atlikti bandymai Vilniaus tarptautiniame oro uoste, įvertinant potencialias GPS paklaidas bei įvertinant GBAS sistemos tikslumo ir tinkamumo galimybes. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius tyrimo rezultatus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai.

Darbą sudaro 9 dalys: įvadas, analitinė dalis, palydovinės radijo navigacinės sistemos antžeminė patikslinimo sistema, diferencinės pataisos, tikslaus artėjimo tūpti GBAS sistema, tiriamoji dalis, rezultatų apibendrinimas, literatūros sąrašas, priedai.

Darbo apimtis – 63 p. teksto be priedų, 40 iliustr., 11 lent., 34 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai

Diferencinės stotys, GBAS, GPS, ILS, navigacinės sistemos, paklaidos, palydovas, tūptinė.

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis' Aviation Institute
Department of Avionics

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Avionics** study programme Final Thesis

Title **Analysis of Possibilities of GBAS System Application for Lithuanian Aviation**

Author **Rimas Ambrakaitis**

Academic supervisor **Assoc Prof Dr Algimantas Jakučionis**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

This master's thesis explores possibilities of satellite precision instrument landing application for Lithuanian aviation. At the first part of the thesis satellite navigation errors affecting its accuracy and their sources were examined. GBAS system structure, its operation and error elimination methods were reviewed. Further explored were possibilities of implementing the analyzed system (infrastructure and economic terms) in international Vilnius, Kaunas, Palanga and Šiauliai airports. Tests were carried out in Vilnius international airport aiming for assessment of potential GPS signal errors and estimation of GBAS systems accuracy and fitness opportunities, followed by theoretical and practical examination of the analysis data collected. Based on the examination results final thesis conclusions and recommendations are formulated and provided at the ending of this thesis.

Structure: introduction, analytical part, ground based augmentation system, differential corrections, precision landing GBAS system, exploratory part, conclusions and suggestions, references.

Thesis consists of: 63 p. text without appendixes, 40 pictures, 11 tables, 34 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords

Differential stations, GBAS, GPS, ILS, navigation systems, error, satellite, glide path.

TURINYS

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	10
1. ĮVADAS.....	11
2. ANALITINĖ DALIS.....	12
2.1. Globaliosios navigacijos sistemos veikimo principas.....	12
2.1.1. Atstumų apskaičiavimas	13
2.2. Globali navigacijos sistema	15
2.2.1. GPS struktūra.....	15
2.2.1.1. Dirbtiniai žemės palydovai.....	15
2.2.1.2. Antžeminės palydovų veikimo ir kontrolės stotys.....	16
2.2.2. GPS signalai.....	16
2.2.3. GPS koordinačių sistema	17
2.3. GPS paklaidų šaltiniai.....	18
2.3.1. Dominuojančios paklaidos.....	18
2.3.2. Antriniai paklaidų šaltiniai	19
2.4. Patikslinamosios sistemos	20
3. PALYDOVINĖS RADIO NAVIGACINĖS SISTEMOS ANTŽEMINĖ PATIKSLINIMO SISTEMA (GBAS)	20
3.1. Antžeminė posistemė	21
3.1.1. Imtuvas	22
3.1.2. Apdorojimo įrenginys	22
3.1.3. Siųstuvas.....	23
3.2. GBAS veikimo principas	23
4. DIFERENCINĖS PATAISOS	24
4.1. Diferencinis metodas	24
4.2. Pseudo atstumų korekcijų apskaičiavimas	26
4.3. Pseudo atstumų korekcijų pritaikymas.....	27
4.4. Patikslintų pseudo atstumų paklaidos.....	28
4.5. Vietos nustatymo tikslumas.....	29
4.6. Vietos nustatymo paklaidos vietinėje koordinačių sistemoje	31
5. TIKSLAUS ARTĖJIMO TŪPTI GBAS SISTEMA	33
5.1. Tūpimo pagal prietaisus kategorijos.....	33
5.2. Galutinės artėjimo tūpti atkarpos apibrėžimas	34
5.3. Nuokrypos nuo tūptinės	35

5.3.1. Horizontalios nuokrypos.....	35
5.3.2. Vertikalios nuokrypos	36
5.3.3. Apsaugos lygiai	37
5.3.4. Įspėjimo ribos	38
6. TIRIAMOJI DALIS	41
6.1. GBAS sistema ekonominiu požiūriu	41
6.2. GBAS panaudojimo privalumai didžiausiuose Lietuvos oro uostuose.....	42
6.3 GPS signalų panaudojimo galimybių tyrimas.....	45
6.3.1 GPS duomenų rinkimas skrydžio metu.....	46
6.3.2. GPS ir EGNOS duomenų rinkimas.....	49
6.4. Bandymo duomenų apdorojimas	49
6.5. GPS bandymo rezultatai	49
6.6. GPS ir EGNOS bandymo rezultatai.....	54
6.7. Bandymų rezultatų analizė	58
6.7.1. GBAS taikymo galimybės	59
6.7.2. GBAS bandymų rezultatų palyginimas su Vilniaus oro uoste atliktais GPS bandymais.....	61
7. REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	62
LITERATŪROS IR INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	63

Priedai

1. Priedas. GPS bandymo rezultatai.....	67
2. Priedas. GPS ir EGNOS bandymo rezultatai	71
3. Priedas. Straipsnis „GBAS sistemos taikymo Lietuvos aviacijoje galimybių tyrimas"	75

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

ACU-išilgai tako, skersai tako, virš tako.
CAT-I/II/III-tikslaus tūpimo pagal prietaisus kategorijos.
DDM-moduliacijos gylio skirtumas.
DGPS-diferencinė palydovinės radijo navigacijos stotis.
EGNOS-Europos geostacionari palydovinė sistema.
FAS-galutinė artėjimo tūpti atkarpa.
FASLAL-horizontali tūptinės įspėjimo riba.
FASVAL-vertikali tūptinės įspėjimo riba.
FPAP-skrydžio trajektorijos išlyginimo taškas.
FTP-menamo kilimo-tūpimo tako slenksčio taškas.
GBAS-GNSS antžeminė patikslinimo sistema.
GERP-palydovinės tūpimo sistemos atskaitos taško aukštis.
GNSS-globali palydovinės navigacijos sistema.
GPA-tūptinės nuolydžio kampas.
GPIP-tūptinės susikirtimo taškas su kilimo-tūpimo taku.
GPS-globali vietos nustatymo sistema.
ICAO-Tarptautinė civilinės aviacijos organizacija.
ILS-tūpimo pagal prietaisus sistema.
KTT-kilimo, tūpimo takas.
LKS94-Lietuvos koordinačių sistema.
LPL-horizontalus apsaugos lygis.
LTP-kilimo, tūpimo tako slenksčio taškas.
NSE-navigacinės sistemos paklaida.
SARPs-standartai ir rekomendacijos.
TCH-slenksčio perskridimo aukštus.
VHF-labai aukštas dažnis.
VKS-vietos koordinačių sistema.
VPL-vertikalus apsaugos lygis.
WGS84-pasaulinė geodezinių koordinačių sistema.

1. ĮVADAS

Palydovinės radijo navigacinės sistemos antžeminė patikslinimo sistema (GBAS) –sudėtingi techniniai įrenginiai, tačiau labai svarbūs orlaivio valdyme, turintys užtikrinti patikslintos palydovinės radijo navigacinės informacijos perdavimą, neatsižvelgiant į skrydį lydinčias sąlygas.

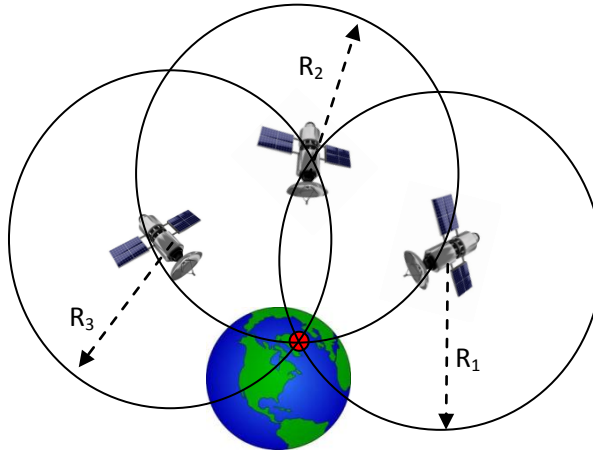
GBAS-labai plačiai naudojama šiuolaikinė radijo navigacinė priemonė, sumažinanti orlaivio koordinatų nustatymo paklaidas, perduodant paklaidų mažinimo signalus iš antžeminių diferencinių stočių.

Šios sistemos skirtos aptarnauti orlaivius oro uosto teritorijoje 43 km spinduliu. Jos naudojamos orlaivių navigacijai oro uosto prieigose sudėtingiausiuose skrydžio etapuose: artėjimui tūpti, tūpimui, pakilimui ir judėjimui oro uosto teritorijoje.

2. ANALITINĖ DALIS

2.1. Globaliosios navigacijos sistemos veikimo principas

Globaliosios navigacijos sistemos veikimas (GPS) remiasi tokiu principu: objekto vieta nustatoma vienu metu matuojant atstumus (R) iki kelių palydovų, kurių vieta matavimo momentu tiksliai žinoma (2.1 pav.)[1].

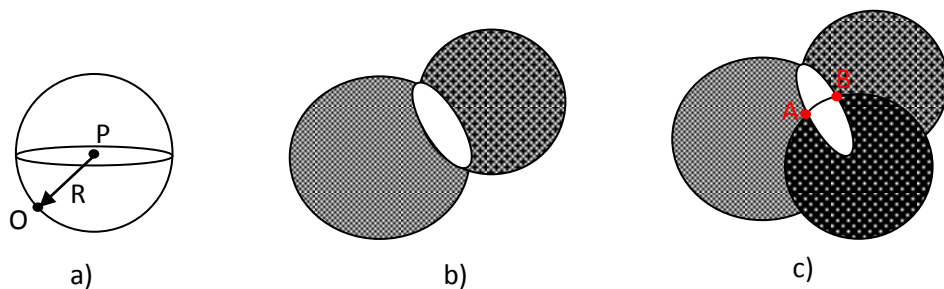


2.1 pav. GPS veikimo principas

Kiekvienas palydovas siunčia koduotus signalus su informacija apie palydovų vietas erdvėje, tikslų laiką, palydovų veikimo būklę, siunčiamų duomenų tikslumą.

Imtuvai priima šiuos signalus, juos dekoduoja. Išmatavę atstumus iki palydovų apskaičiuoja savo padėtį erdvėje: geografinę platumą, ilgumą ir aukštį virš jūros lygio[1].

Kad būtų galima nustatyti orlaivio vietą erdvėje, būtina žinoti atstumus iki trijų palydovų, kadangi nuo palydovo į visas puses yra labai daug taškų, nutolusių tokiu pat atstumu kaip orlaivis. Šių taškų visuma sudaro sferą (2.2 pav. a). Kitas palydovas nutolęs kitokiu atstumu nuo orlaivio. Aplink šį palydovą galima taip pat įsivaizduoti sferą, kurios spindulys lygus atstumui iki orlaivio [1]. Šių sferų susikirtimo linija yra apskritimas (2.2 pav. b). Orlaivio vieta bus kažkuriame to apskritimo taške.



2.2 pav. Orlaivio vietos nustatymas

Žinant atstumus nuo trijų palydovų iki orlaivio, gausime tris susikertančias sferas. Šių sferų susikirtimo vieta bus du taškai A ir B tame apskritime, vienodai nutolę nuo palydovų (2.2 pav. c). Vienas taškas atmetamas kaip nerealus, nes jis yra arba po žemės paviršiumi arba labai aukštai.

2.1.1. Atstumų apskaičiavimas

Radijo navigacijoje atstumai nustatomi matuojant signalo sklidimo laiką nuo radijo impulso išsiuntimo iki atsispindėjusio signalo sugrįžimo.

Palydovinėje navigacijoje atstumas taip pat nustatomas matuojant signalo sklidimo laiką nuo palydovo iki orlaivio. Atstumas tarp orlaivio ir palydovo yra kelios dešimtys tūkstančių kilometrų, todėl orlaivį pasiekia labai silpnas palydovo signalas. Jis nuo orlaivio praktiškai neatsispindi, todėl palydovinėje navigacijoje taikomas kitas būdas atstumams nustatyti.

Labai tiksliai žinant signalo išsiuntimo laiką iš palydovo ir jo priėmimo laiką orlaivyje, galima išmatuoti jo sklidimo laiką, kuris proporcingas atstumui tarp orlaivio ir palydovo.

Atsižvelgiant į palydovo i koordinatas (x_i, y_i, z_i) trimatėje Dekarto koordinačių sistemoje ir atstumą r_i nuo palydovo iki vartotojo, vartotojo koordinatės (x_u, y_u, z_u) gali būti išreikštos toje pačioje koordinačių sistemoje pasinaudojant navigacijos lygtimis[2]:

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} \\ r_4 = \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} \end{cases} \quad (2.1)$$

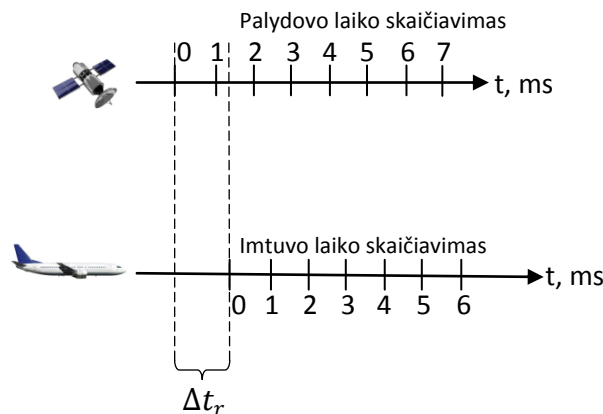
Taikant šias lygtis turi būti žinomos judančių signalų šaltinių padėtys ir jų atstumas iki vartotojo. Atstumas iki palydovo nustatomas pagal laiko intervalą tarp signalo išsiuntimo iš palydovo ir priėmimo imtuve. Šis laikas apibūdinamas signalo sklidimo laiku Δt , išreiškiamas darant prielaidą, kad imtuvas žino tikslų laiką, kada buvo išsiųstas signalas iš palydovo, ir gali tiksliai nustatyti signalo priėmimo laiką. Šiuo būdu atstumas iki palydovo apskaičiuojamas pagal formulę [3]:

$$r_i = c \cdot \Delta t_i \quad (2.2)$$

čia: c – šviesos greitis vakuume.

Tačiau prielaidos, kuriomis formulė pagrįsta (2.2) gali tapti reikšmingų paklaidų apskaičiuojant atstumus priežastimi. Nors imtuvas ir gali nustatyti tikslų signalo priėmimo laiką, tačiau netiksliai nu-

statyti laiko intervalą, per kurį signalas buvo perduotas. Tai yra, todėl, kad palydovo ir imtuvo laikrodžių laiką skaičiuoja atskirai, dėl to gali atsirasti laiko nesutapimas (2.3 pav.).



2.3 pav. Palydovo-imtuvo laiko nesutapimas

3 pav. pavaizduotoje palydovo ir imtuvo laiko nesutapimo skalėje, imtuvo skaičiuojamas laikas atsilieka nuo palydovo laiko skalės, dėl to signalo sklidimo laiko trukmė apie 1 milisekunde trumpesnė nei tikrasis sklidimo laikas, todėl, remiantis formule (3.2), atsiranda 300 km atstumo matavimo paklaida. Todėl navigacijos lygtis (3.1) papildoma:

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \\ \rho_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \\ \rho_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \\ \rho_4 = \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r \end{cases} \quad (2.3)$$

Lygtis papildžius laiko skirtumo (Δt_r), atsirandančio dėl laiko skalių pradžios nesutapimų, apskaičiuojamas pseudo atstumas ρ .

Šiems matavimams atlikti būtini bent 4 palydovai, kadangi reikia surasti keturis nežinomuosius: imtuvo 3 dimensijų koordinatas (platumą, ilgumą ir aukštį) ir sinchronizuoti laiką tarp palydovo ir imtuvo. Imtuvas pirma išmatuoja savo koordinatas, naudodamas duomenis iš trijų palydovų, o po to vieną iš naudotų palydovų pakeičia ketvirtuoju ir vėl išmatuoja koordinatas. Jei imtuvo laikrodis eina netiksliai, pirmojo ir atrojo matavimo rezultatai nesutaps. Tada imtuvo laikrodžio koregavimo schema pradeda skubinti ar vėlinti laikrodį ir vėl atlieka matavimus naudojant duomenis iš vieno trijų, po to iš kitų trijų palydovų [3]. Matavimo rezultatai sutaps tik vienu atveju, kai matavimo laikrodis pradės eiti tiksliai. Taip ketvirtojo palydovo signalais tikslinimas laikrodis.

2.2. Globali navigacijos sistema

Globali navigacijos duomenų nustatymo sistema valdoma Jungtinių Amerikos Valstijų vyriausybės. Ši sistema sukurta kariniais tikslais 1970-ųjų metų pradžioje. Civiliniams tikslams GPS pradėta naudoti gerokai vėliau-1983 m.. Palydovinės navigacijos naudojimas civilinėje aviacijoje buvo ribojamas. Tik 1991 m. ICAO leido naudoti GPS priemones kaip papildomą įrangą greta su kitomis navigacijos priemonėmis. Pirmieji GPS orlaivių imtuvai buvo skirti orlaivių, skrendančių virš vandenynų, navigacijai. Nuo 2000 m. GPS signalai nebekoduojami palydovinių signalų trukdžiais, mažinančiais civilinių ir su JAV karinėmis tarnybomis nesusietų organizacijų bei privačiųjų imtuvų tikslumą. Nuo to laiko eiliniams vartotojams skirtų GPS imtuvų vietos nustatymo tikslumas padidėjo kelias dešimtis metrų.

2.2.1. GPS struktūra

GPS sistemą sudaro trys grupės įrenginių[3]:

1. Dirbtiniai žemės palydovai.
2. Antžeminės palydovų veikimo ir kontrolės stotys.
3. Palydoviniai imtuvai.

2.2.1.1. Dirbtiniai žemės palydovai

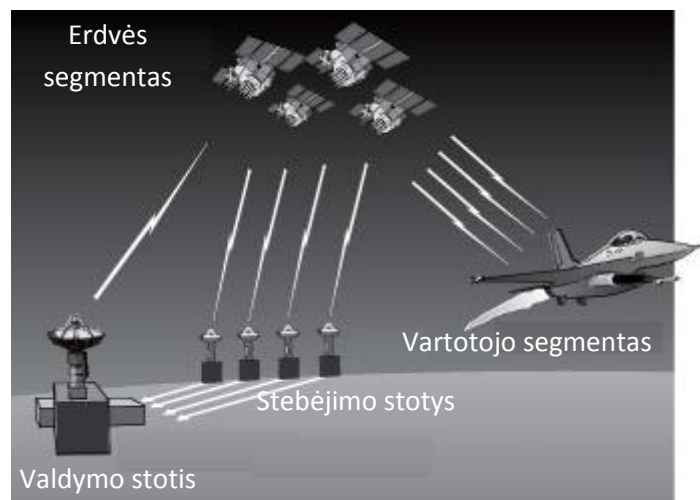
GPS sudaro 24 veikiantys palydovai. Sistemos palydovai tolygiai išdėstyti 6 orbitose po keturis kiekvienoje orbitoje (2.4 pav.). Esant tokiam palydovų pasiskirstymui apie žemę nuo 4 iki 10 palydovų signalai imtuvą pasieks bet kurioje pasaulio vietoje [3].



2.4 pav. GPS

2.2.1.2. Antžeminės palydovų veikimo ir kontrolės stotys

Kontrolės segmentą (2.5 pav.) sudaro sekimo stočių tinklas visame pasaulyje. Palydovų stebėjimo stotys naudodamos GPS imtuvus seka visus matomus palydovus, renka duomenis apie jų vietas orbitoje. Surinktus duomenis persiunčia į pagrindinę valdymo stotį, iš kurios reguliariai kas 8 valandas palydovams siunčiami signalai, kuriais paderinami palydovų kompiuteriai, kad jie antžeminiams imtuvams artimiausiomis valandomis siųstų tikslius duomenis apie palydovo vietą, ir patikslina palydovų laikrodžius.



2.5 pav. GPS kontrolės segmentas

2.2.2. GPS signalai

Kiekvienas GPS palydovas siunčia į žemę du signalus $L1 = 1575,42$ MHz ir $L2 = 1227,6$ MHz. Šių signalų nešantysis dažnis moduluojamas skaitmeniniu kodu ir navigacinės informacijos duomenimis. $L1$ signalas vadinamas pagrindiniu ir turi du atstumui matuoti skirtus „tariamai atsitiktinius“ kodus: apytikslį kodą C/A ir tikslųjį kodą P. $L2$ dažnis moduluojamas tik P kodu, numatyta galimybė papildomai moduluoti šį dažnį Y kodu, kurį gali iššifruoti tik GPS imtuvai su specialiomis mikroschemomis.

C/A kodas susideda iš 1023 simbolių ir siunčiamas kas 1 milisekundę. Kiekvienam palydovui priskirtas unikalus C/A kodas, kuris leidžia GPS imtuvams atskirti, kuris palydovas siunčia signalą.

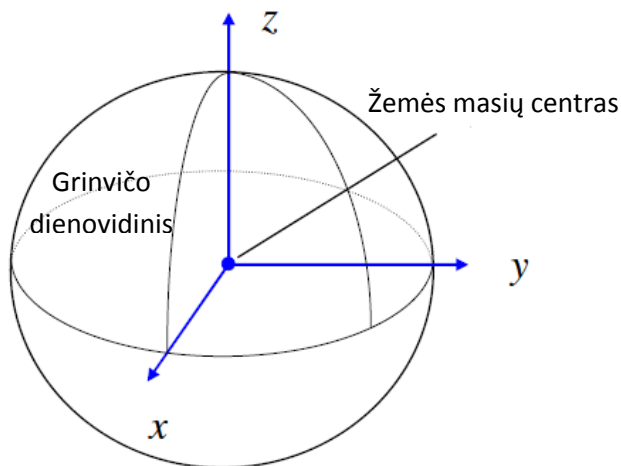
Tikslusis P kodas yra labai ilga tariamai atsitiktinių impulsų seka. Kodo ilgis 266 paros, seka padalinta į 38 segmentus, kiekvienas segmentas yra 7 parų ilgio, kiekvienas kodo segmentas priskirtas atitinkamam palydovui [1]. Kiekvienas palydovas identifikuojamas pagal jam priskirto P kodo segmentą.

Dviejų dažnių pseudoatstumų matavimas žymiai pagerina sistemos tikslumą. Nors abu kodai yra viešai prieinami, tačiau P kodas užšifruotas ir prieinamas tik naudotojams, turintiems specialius leidimus.

Palydovo signale, moduluotame tariamai atsitiktiniu kodu PRN yra navigacinė žinutė. Šioje žinutėje yra informacija apie palydovo koordinates, jo būklę, datą, tikslų laiką (efemeridės), duomenys apie visų palydovų padėtis orbitose (almanachas) ir duomenys apie radijo bangų sklaidimo pro jonosferą prognozė. Kiekviename pranešime perduodamos ne visų, o tik kelių palydovų koordinatės. Visam almanachui perduoti reikia 25 pranešimų [1]. Almanacho duomenys reikalingi imtuvui, kad jis galėtų pasirinkti tuo metu matomus geriausiai išsidėsčiusius palydovus.

2.2.3. GPS koordinačių sistema

GPS atraminė koordinačių sistema WGS-84 yra stačiakampė geocentrinė koordinačių sistema susieta su Žeme: Z ašis eina per Žemės masių centrą ir šiaurės polių, X ašis eina per Grinvičo meridianą, Y ašis statmena XZ plokštumai. Visos trys ašys sudaro dešininę koordinačių sistemą (2.6 pav.).



2.6 pav. WGS-84 koordinačių sistema

2.3. GPS paklaidų šaltiniai

Padėties nustatymo tikslumas palydovine navigacijos sistema priklauso nuo kelių sąlygų. Šios sąlygos dažniausiai identifikuojamos kaip pseudoatstumo matavimo paklaidos atsiradusios dėl kintančios signalų šaltinio padėties ir palydovų išsidėstymo. Pseudoatstumo matavimo paklaidos šaltinis veikia vartotojo padėties nustatymą, įvesdamas klaidingus duomenis į (2.3) navigacijos lygčių sistemą, taip veikdamas ne tik klaidingą vartotojo padėties apskaičiavimą, bet taip pat ir laiko paklaidos didėjimą.

Šie paklaidų šaltiniai gali būti suskirstyti į dvi pagrindines grupes: dominuojančius ir antraeilius paklaidų šaltinius. Dominuojančių paklaidų šaltiniai yra tie, kurie veikia pseudoatstumo matavimus tokiu pačiu būdu ir toje pačioje vietoje. Antraeiliai paklaidų šaltiniai yra tie, kurie nesusiję tiesiogiai su ryšiu tarp vartotojų.

2.3.1. Dominuojančios paklaidos

Dominuojančiais paklaidų šaltiniais įtakojančiais pseudoatstumo matavimą laikomi tie, kurių poveikis matavimo tikslumui visą laiką yra daugmaž tas pats (2.1). Šios paklaidos susidaro tarp GPS siųstuvo ir imtuvo. Tai pat yra paklaidų, kurios daro įtaką matavimo tikslumui tiksliai tokiu pačiu būdu: palydovo laikrodžio netikslumas ar orbitos paklaidos, atmosferos poveikis.

$$\Delta\rho_{dominuojančių} = \Delta t + \Delta orb + \Delta jono + \Delta tropo \quad (2.1)$$

Palydovo laikrodžio paklaidos Δt . Siekiant palaikyti palydovo laiko skaičiavimą kuo artimesnį visos sistemos laiko skaičiavimui, palydovuose įrengiami atominiai laikrodžiai, kurie yra labai tikslūs. Tačiau atominio laikrodžiopaklaida per dieną gali siekti 10 nanosekundžių, tai yra gana didelė paklaida apskaičiuojant pseudoatstumą. Todėl būtina įvertinti palydovo laikrodžio nuokrypą ir siųsti laiko skaičiavimo pataisas į palydovo kompiuterį [3].

Orbitos paklaidos Δorb . Tiksliam vartotojo vietos nustatymui būtina tiksliai žinoti siųstuvo padėtį. Navigaciniai duomenys priklauso nuo nešlio signalo dažnio pokyčio, kuriame įterpta informacija reikalinga nustatyti palydovų orbitas ir jų vietas kaip laiko funkciją. Tačiau dėl nukrypimų nuo orbitos palydovų vietą galima apskaičiuoti 2-5 metrų tikslumu.

Jonosferos delsa $\Delta jono$. Jonosfera yra viena iš aukščiausiai esančių žemės atmosferos dalių. Ji prasideda 50 km aukštyje ir tęsiasi iki 1000 km. Šiame atmosferos sluoksnyje ultravioletiniai ir rentgeno spinduliai, sklindantys iš saulės, susiduria su šio sluoksnio dujų molekulėmis ir atomais-juos jonizuoja. Dėl dujų jonizacijos šiame sluoksnyje pasikeičia signalo sklaidimo greitis. Nors signalo kelio

prailgėjimas sukelia beveik nereikšmingą paklaidą, tačiau dėl signalo greičio pokyčio susidaro reikšminga paklaida, kuri dažniausiai siekia 5-15 m, tačiau, esant dideliame saulės aktyvumui, gali pasiekti 150 m..

Jonosfera yra vienas iš pagrindinių paklaidų šaltinių, veikiančių pseudoatstumo matavimą, tačiau jonosferos įtaka gali būti nesunkiai pašalinama panaudojant dviejų dažnių metodą, kadangi jonosferoje kinta signalo dažnis, jonosfera yra pagrindinė priežastis, kodėl naudojamas dviejų dažnių matavimų palyginimas, siekiant padidinti padėties nustatymo tikslumą.

Troposferos delsa Δt_{tropo} . Troposfera yra žemiausias atmosferos sluoksnis, kuris prasideda nuo žemės ir tęsiasi iki 50 km aukščio. Šis atmosferos sluoksnis sudarytas sausų dujų ir vandens garų, kurie pailgina sklaidimo kelią dėl elektromagnetinių bangų lūžimo. Signalo vėlinimas yra vietos lūžio indeksas, kuris priklauso nuo vietos temperatūros, slėgio ir santykinės drėgmės. Skirtingai nei jonosferos delsa, troposferos delsa nekeičia signalo dažnio ir negali būti eliminuota, panaudojant dviejų dažnių metodą.

2.3.2. Antriniai paklaidų šaltiniai

Pseudoatstumo matavimo antriniai paklaidų šaltiniai yra tokie, kurie susiję su vartotojo aparatu ir vieta.

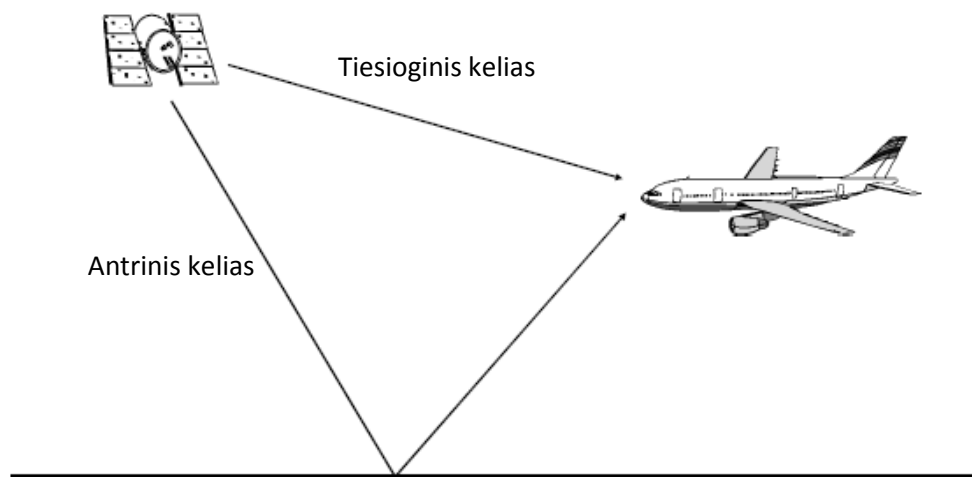
$$\Delta \rho_{antraeil\ es} = \Delta t_{imp.} + \Delta t_{ats} + \Delta t_{rik_{imp.}} \quad (2.2)$$

Imtuvo laikrodžio paklaidos $\Delta t_{imp.}$. GPS imtuvuose naudojami kvarciniai laikrodžiai, kurie yra kur kas mažiau tikslūs nei naudojami palydovuose ir tokiu būdu sudaromos daug didesnės paklaidos. Dažniausiai šios paklaidos sumažinamos įtraukiant imtuvo laiko paklaidas į navigacijos lygtis.

Imtuvo trikdžių įtaka matavimams $\Delta t_{rik_{imp.}}$. Imtuvo matavimo trikdžiai atsiranda dėl ribotų imtuvo elektronikos galimybių. Ši atstumo matavimo paklaida priklauso nuo imtuvo kokybės.

Atspindžiai Δt_{ats} . Atspindžių paklaidos atsiranda, kai antena priima signalą ne tik tiesiogiai siunčiamą iš palydovo, bet ir atsispindėjusį nuo kitų paviršių (2.7 pav.). Antriniai signalai iškraipo tiesioginį signalą ir taip paveikia laiko matavimo rezultatus.

Nenaudojant šių klaidų mažinimo priemonių, paklaidos dėl šio efekto pasiektų kelias dešimtis metrų. Naujausi metodai leidžia sumažinti šių paklaidų dydį iki kelių metrų.



2.7 pav. Atspindžių paklaidos dėl signalų atspindėjimo nuo žemės

2.4. Patikslinamosios sistemos

GPS patikslinamosios sistemos naudojamos siekiant padidinti palydovinės navigacijos sistemų tikslumą, kad šios atitiktų vartotojo vietos nustatymo sistemoms keliamus tikslumo reikalavimus..

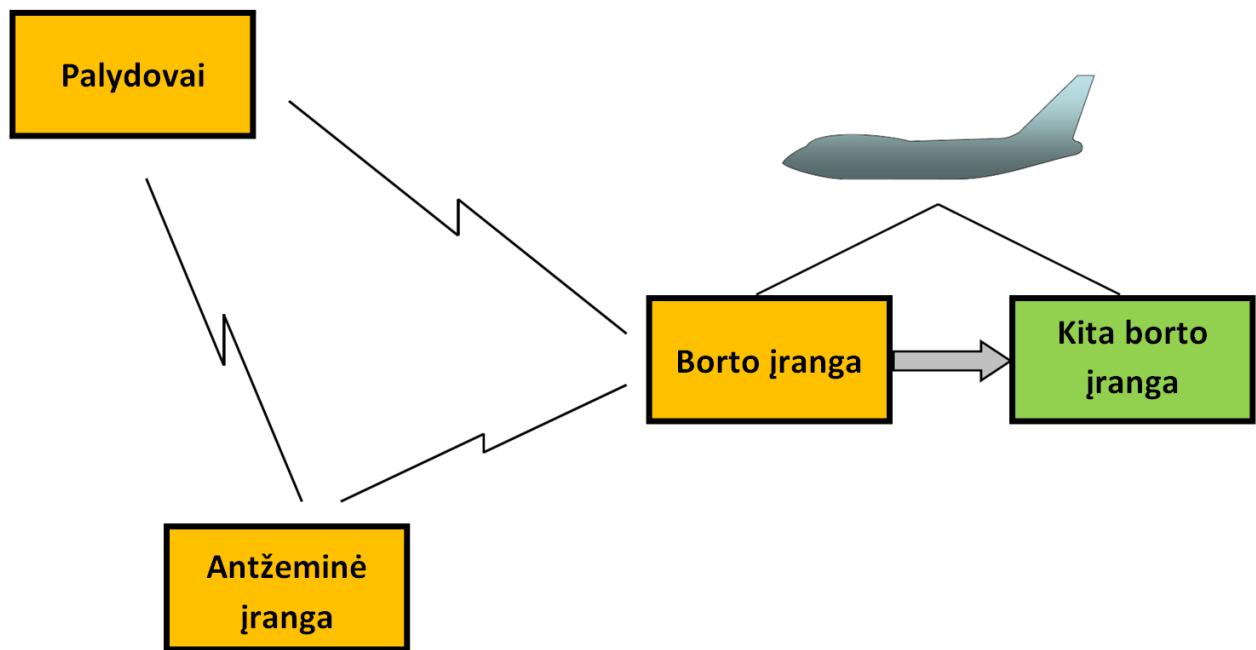
3. Palydovinės radijo navigacinės sistemos antžeminė patikslinimo sistema(GBAS)

GBAS sistema teikia vietos globalios palydovinės sistemos (GNSS) patikslinamuosius duomenis. Sistema sukurta aptarnauti visų kategorijų (nuo CAT-I iki CAT-III) tūpimo pagal prietaisus sistemas, išvykimą ir judėjimą oro uosto teritorijoje. Ši sistema teikia dvi skirtingas paslaugas[4]:

1. Tikslaus artėjimo tūpti, suteikdama nuolydį artėjimui tūpti.
2. Didesnį GNSS skrydžių padėties nustatymo tikslumą.

GBAS sistema susideda iš trijų pagrindinių posistemų(3.1 pav.):

1. Palydovų.
2. Antžeminės įrangos.
3. Borto įrangos.



3.1 pav. GBAS sistema

Palydovinė posistemė susideda iš GNSS signalo šaltinio, teikiančio atstumų matavimo signalus ir navigacines žinutes.

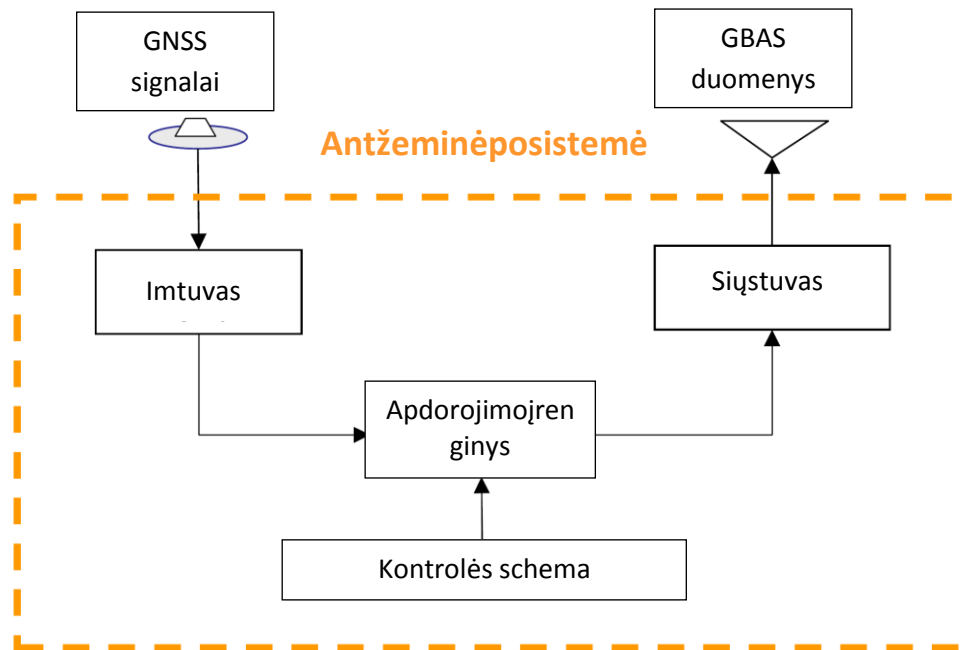
3.1. Antžeminė posistemė

Ši posistemė yra pagrindinė GBAS sistemos dalis. Viena tokia posistemė savo veikimo zonoje gali aptarnauti neribotą skaičių orlaivių. Šios įrangos įrengimo vieta laikoma GBAS sistemos atskaitos tašku.

Antžeminė įranga stebi visus matomus GNSS sistemos palydovus ir teikia duomenis vartotojams:

1. Pseudo atstumų pataisas.
2. Integralumo informaciją.
3. Artėjimo tūpti informaciją.

Antžeminė posistemė susideda iš trijų mažesnių sistemų ir funkcinio vientisumo kontrolės (3.2 pav.).



3.2 pav. Antžeminės sistemos funkcinė schema

3.1.1. Imtuvas

Imtuvo užduotis-priimti pseudo atstumo matavimo ir navigacinius duomenis iš visų matomų palydovų. Ši dalis susideda iš dviejų ar daugiau atskaitos taškuose įrengtų imtuvų, kurių įrengimo vieta žinoma dideliu geodeziniu tikslumu, taip pat laikrodžio paklaida bei juos supančios aplinkos charakteristikos.

Pagal ICAO rekomendacijas šie imtuvai turėtų būti įrengti vietovėje, kurioje nėra kliūčių, užstojančių GPS signalus, kad būtų galimybė priimti GPS signalus kaip galima mažesniu kampų. Antenų konstrukcija turi būti tokia, kad sumažintų atspindžių poveikį bei antenos turi būti įrengtos vietovėje, kurioje yra mažiausi atspindžiai.

3.1.2. Apdorojimo įrenginys

Būtinai pseudo atstumo matavimai, atlikti imtuvo, perduodami į apdorojimo įrenginį. Lyginant šią informaciją su turima apie imtuvų tikslią padėtį apskaičiuojamos reikiamos pataisos ir kita GBAS informacija, ir įterpiama į navigacinę žinutę (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. GBAS žinučių tipai [5]

Parnešimo tipas (MT) identifikatorius	Žinutės pavadinimas
0	Laisvas
1	Pseudo atstumo pataisos
2	GBAS duomenys
3	Rezervuota antžeminiams matavimams
4	Artėjimo tūpti duomenys
5	Matavimo šaltinio prieinamumas
6	Rezervuotas
7	Rezervuotas nacionalinėms reikmėms
8	Rezervuotas testams
9-255	Laisvas

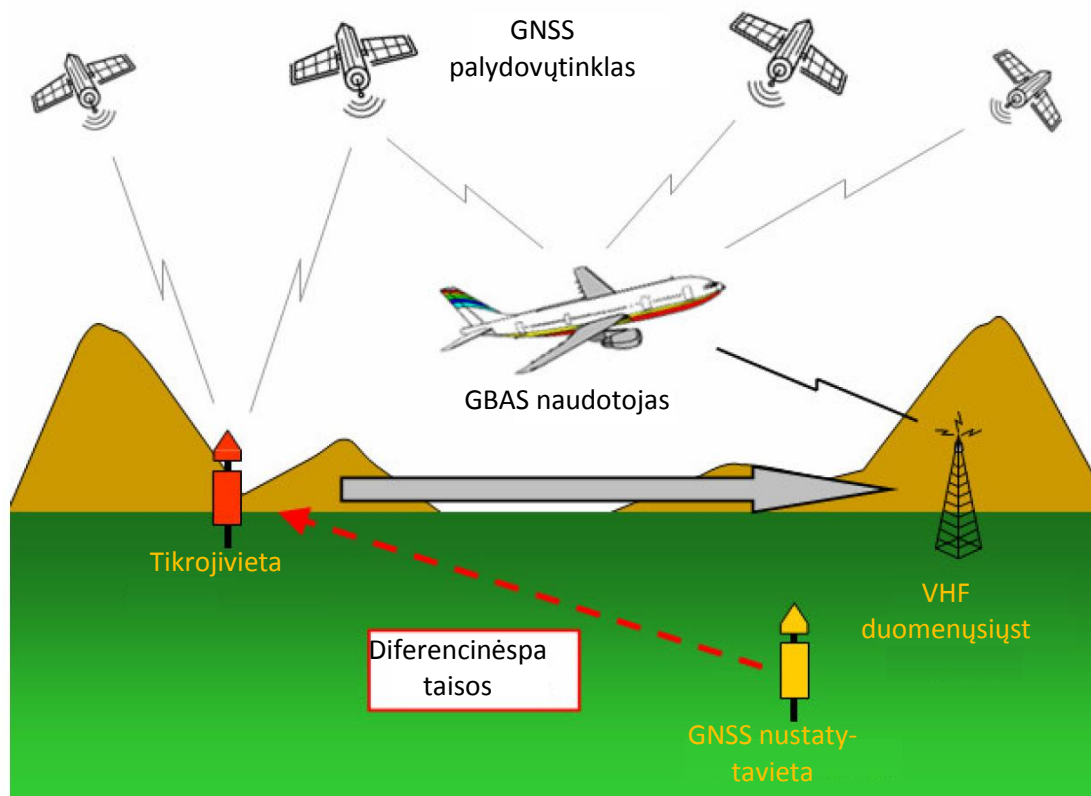
3.1.3. Siųstuvas

Siųstuvas duomenis siunčia labai aukštų dažnių (VHF) diapazone nuo 108 iki 117.95 MHz [5]. Minimalus pasirenkamas dažnis 108,025 MHz, didžiausias 117,950 MHz su 25 KHz intervalu tarp dažnių[5].

Siųstuvo antena turi būti įrengta taip, kad nebūtų trukdžių jos siunčiamiems signalams per visą sistemos aptarnaujamą teritoriją, kiekviena artėjimo tūpti kryptimi. Nominali šios sistemos dengiama teritorija turi būti nemažiau 23 jūrmylių (43 km), bet dažniausiai praktikoje išplečiama, kad orlaivio vietą būtų galima nustatyti didesnėje teritorijoje [5].

3.2. GBAS veikimo principas

Šios sistemos veikimo principas pagrįstas diferencinėmis pataisomis. GNSS naudotojai nustato savo vietą pagal išmatuotus atstumus iki matomų palydovų. Tačiau dėl palydovinę navigaciją veikiančių paklaidų šaltinių vartotojo vietos nustatymas yra tik apytikslis [3].



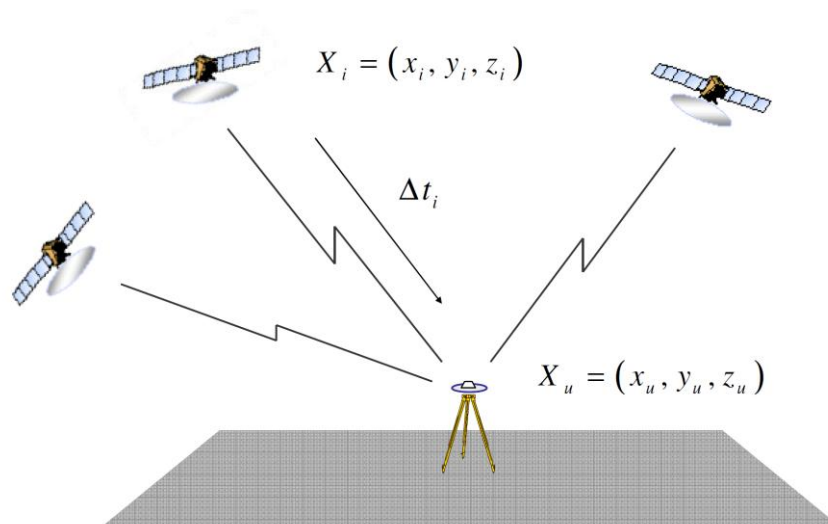
3.3 pav. GBAS diferencinės pataisos

GBAS veikimo principo esmė (3.3 pav.): tiksliai žinomame (raudono) imtuvo įrengimo taške, kurio koordinatės nustatytos dideliu geodeziniu tikslumu, gali būti apskaičiuojamos paklaidos, įtakančios, pseudo atstumo matavimą, palyginant tikrąjį atstumą su išmatuotuoju – skirtuminės paklaidos. Darant prielaidą, kad toje pačioje zonoje visus vartotojus veikia tokie patys paklaidų šaltiniai ir persiunčiant šias pataisas vartotojams padidinamas vietos nustatymo tikslumas, lyginant su GNSS vietos nustatymo tikslumu.

4. DIFERENCINĖS PATAISOS

4.1. Diferencinis metodas

Iš palydovo išsiunčiama navigacinė žinutė X_i su jo buvimo vieta išsiuntimo momentu i . X_u žinoma imtuvo vieta dideliu geodeziniu tikslumu. Imtuvo ir siųstuvo vietos išreikštos WGS84 koordinatinių sistemoje. Dydis Δt_i - laiko intervalas, kurio reikia iš palydovo išsiųstam signalui pasiekti imtuvą.



4.1 pav. Fiksuota imtuvo vieta

Pagal sistemos veikimo principą GNSS imtuvas nustato pseudo atstumą iki signalo šaltinio pagal signalo sklidimo laiką, padaugindamas jį iš šviesos greičio vakuume, c :

$$\rho_i = c \cdot \Delta t_i \quad (4.1)$$

Dėl paklaidų, aptartų prieš tai buvusiame skyriuje, naudojant šią formulę nebus gaunami tikslūs pseudo atstumo matavimai. Kadangi remiantis šia formule bus laikoma, kad signalas sklinda tiesiai ir pastoviu greičiu. Dėl šios priežasties (4.1) perrašoma įvertinant paklaidas:

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r - \Delta \rho_i \quad (4.2)$$

kur $\Delta \rho_i$ -pseudo atstumo paklaida susidaranti dėl 4.1 lygties panaudojimo. Atsižvelgiant į tai, kad fiksuotas vartotojas (4.1 pav.) turi labai tikslus duomenis apie savo padėtį ir laikrodžio paklaidą Δt_r , pertvarkius 4.2 lygtį, galima apskaičiuoti pseudo atstumo paklaidas, turinčias įtaką navigacijos lygtims:

$$\Delta \rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r - \rho_i \quad (4.3)$$

Kaip jau aptarta 2 skyriuje, paklaidų šaltiniai gali būti suskirstyti į dvi grupes:

$$\Delta \rho = \Delta \rho_{dominuojan\ čios} + \Delta \rho_{antraeil\ és} \quad (4.4)$$

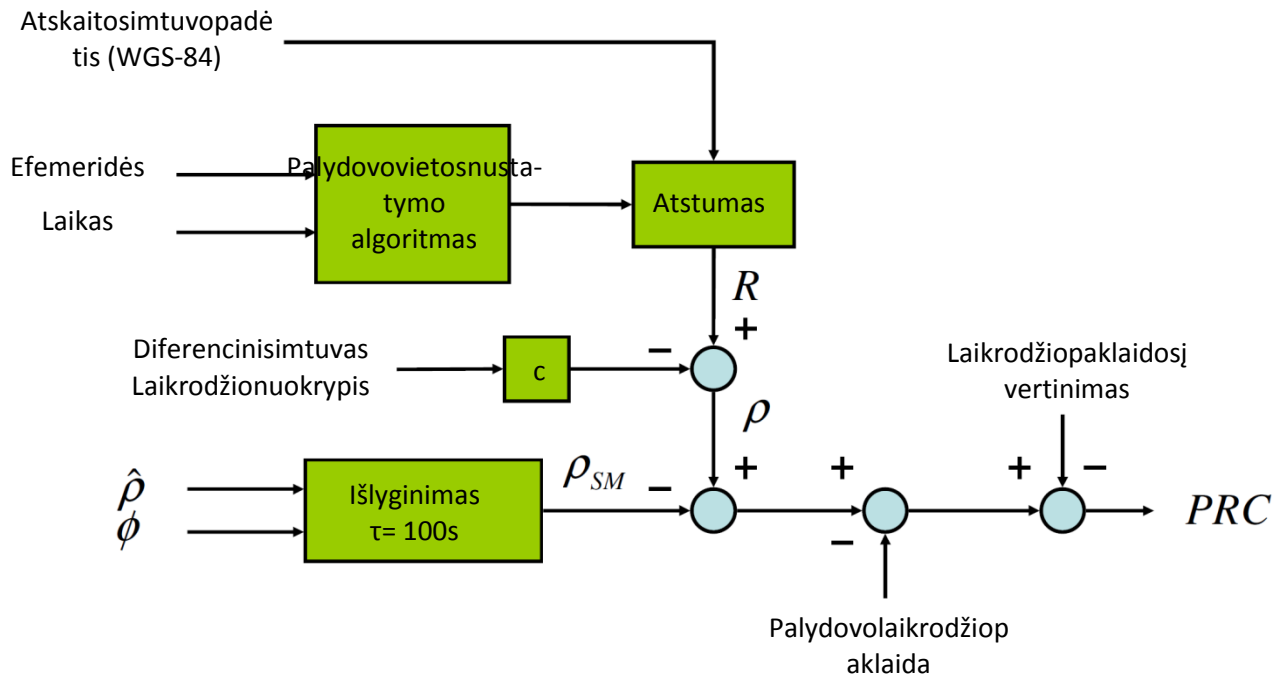
Atsižvelgiant į tai, kad pagrindinių stočių įrengimo vietos buvo tiriamos siekiant kiek galima sumažinti atspindžių poveikį, galima daryti prielaidą, kad imtuvui antraeiliai paklaidų šaltiniai $\Delta \rho_i$ daro kur kas mažesnę įtaką pseudo atstumų matavimui, nei dominuojančios, todėl:

$$\Delta\rho_i \approx \Delta\rho_{\text{dominuojančios}} = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta t_r - \Delta\rho_i \quad (4.5)$$

Tai reiškia, kad naudojant fiksuotą imtuvą, kurio vieta žinoma dideliu geodeziniu tikslumu, laikrodžio nuokrypa ir supančios aplinkos charakteristikos, galima eliminuoti dominuojančias paklaidas, įtakančias pseudo atstumo matavimus nuo bet kurio palydovo tam tikroje bazinės stoties signalais dengiamoje teritorijoje [6].

4.2. Pseudo atstumų korekcijų apskaičiavimas

Pseudo atstumų iki tam tikro šaltinio korekcijos (PRC) apskaičiuojamos remiantis ankstesniame skyriuje aptartu metodu. GBAS sistemos atveju antžeminė posistemė turi diferencinius imtuvus, kurie surenka pseudo atstumų matavimus iki palydovų, o sekančias procedūras atlieka apdorojimo įrenginys. Struktūrinė schema pseudo atstumų korekcijų apskaičiavimui pateikta [7] (4.2 pav.).



4.2 pav. Pseudo atstumo korekcijų apskaičiavimo funkcinė schema [7]

Iš 4.2 pav. matyti, kad pseudo atstumų korekcijų apskaičiavimui reikalinga keletas tarpinių žingsnių, pirmiausia apskaičiuojamas tikrasis (geometrinis) atstumas nuo diferencinio imtuvo iki palydovo. Šis žingsnis apima palydovo vietos nustatymo algoritmą. Sekantys žingsniai apima pseudo atstumo matavimo duomenų apdorojimą trukdžių filtrais, kartu su GPS SPS signalo nešančiąja faze ir

palydovo laikrodžio paklaidos apskaičiavimą, taip pat etaloninio imtuvo laikrodžio koregavimą. Pilnas šios procedūros aprašymas pateiktas [7].

Šis metodas gali būti realizuotas be jokių bendros sistemos (erdvės segmento) pakeitimų, todėl viena pagrindinė stotis gali apskaičiuoti pseudo atstumų paklaidas visiems savo darbo zonoje matomiems palydovams.

4.3. Pseudo atstumų korekcijų pritaikymas

Apskaičiavus pseudo atstumų pataisas visiems matomiems palydovams, informacija „sudedama“ į žinutę ir išsiunčiama sistemos vartotojams.

Pseudo atstumų korekcijos gali būti taikomos dviem skirtingais būdais. Aptartuoju ankstesniame skyriuje, kada iš antžeminės stoties siunčiamos pataisos ir tiesiogiai pritaikomos vartotojų – realaus laiko diferencinės pataisos.

Kitas pseudo atstumų korekcijų taikymo būdas yra po apdorojimo arba autonominė analizė, kur pseudo atstumų skaičiavimas ir taikymas atliekamas po duomenų surinkimo. Tačiau pseudo atstumų korekcijų taikymo procedūros analogiškos abiem atvejais.

Remiantis [8], diferenciškai pataisytas pseudo atstumas $\rho_{pat,i}$ iki signalo šaltinio i per laiko vienetą t apskaičiuojamas:

$$\rho_{pat,i}(t) = \rho_{SM_i}(t) + PRC_i(t_{zcount}) + RRC_i(t_{zcount}) \cdot (t - t_{zcount}) + c \cdot \Delta t_{sv_i} + TC_i \quad (4.6)$$

kur RRC-atstumo kitimo tempo paklaida, dėl kurios galima apskaičiuoti laikų skirtumą tarp pseudo atstumo apskaičiavimo ir pritaikymo, t_{zcount} ir t atitinkamai. Šis laikas taip pat turi būti išsiųstas antžeminės stoties ir apskaičiuojamas kaip:

$$RRC_n = \frac{PRC_n - PRC_{n-1}}{t_{zcount,n} - t_{zcount,n-1}} \quad (4.7)$$

Pseudo atstumo korekcijos nėra atliekamos per visą pseudo atstumo matavimą, o per sumažintą pseudo atstumą, gautą naudojant filtrą panašų į pateiktą 4.2 pav., kuris aprašytas [4].

Be atstumo kitimo tempo dar du parametrai įtraukti į (4.6) lygtį. Pirmasis, kurio pataisa susijusi su palydovo laikrodžio paklaida ir antroji troposferos pataisa. Troposferos vėlinimas gali tapti dominuojančios paklaidos šaltiniu, apytiksliai veikdamas artimus vartotojus, esančius apytiksliai viename kelyje, nes gali atsirasti žymūs troposferos gradientai sukeliantys skirtingus signalų vėlinimus šiame atmosferos sluoksnyje [9].

4.4. Patikslintų pseudo atstumų paklaidos

Pataisytas pseudo atstumas, gautas (4.6) lygtimi vis dar yra veikiamas keleto paklaidų, kurios pavirsta į vietos nustatymo paklaidas. Siekiant įvertinti padėties nustatymo paklaidas apskaičiuojamas padėties „apsaugos lygis“, taip pat būtina pasirinkti tinkamą modelį pseudo atstumų paklaidų korekcijoms.

Labiausiai tikėtinas paklaidų šaltinis, veikiantis vartotojo pataisytą pseudo atstumą yra antriniai paklaidų šaltiniai, kaip jau buvo aptarta 2 skyriuje, diferenciniu metodu paskaičiuojama tik dominuojančių paklaidų įtaka. Todėl antrinių paklaidų įtaka nebus kompensuojama.

Kartu su antriniais paklaidų šaltiniais vietos atmosferos gradientai taip pat padidins pataisyto pseudo atstumo paklaidas, todėl signalų vėlinimai jonosferoje ir troposferoje gali skirtis nuo esančių GBAS antžeminės stoties vietoje ir orlaivio vietoje.

Net ir parinkus GBAS antžeminės posistemės diferencinių imtuvų antenų vietas taip, kad būtų kaip galima mažesnis antrinių paklaidų poveikis, šių poveikių įtaka visiškai neišnyksta.

Atsižvelgiant į aptartus poveikius, pataisytas pseudo atstumas $\rho_{pat.}$ bus vėl perskaičiuojamas pagal tikrąjį pseudo atstumą su paklaidos komponente $\Delta\rho$:

$$\rho_{pat.} = \rho = \rho + \Delta\rho \quad (4.8)$$

Norint pašalinti pataisyto pseudo atstumo paklaidą, turi būti tam sukurtas matematinis modelis, atsižvelgiant į paklaidos šaltinį. Šiame darbe $\Delta\rho$ bus nulinis-vidutinis atsitiktinis Gauso kintamasis, kurio dispersija σ^2 :

$$\Delta\rho \sim N(0, \sigma^2) \quad (4.9)$$

Šio modelio pasirinkimas išplaukia iš Gauso modelio matavimo paklaidoms[14]. Pseudo atstumo paklaidos dispersija formuojama atsižvelgiant į paklaidos šaltinį, kuris veikia pataisytą pseudo atstumą. Atsižvelgiant svarstymus pateiktus šio skyriaus pradžioje σ^2 :

$$\sigma^2 = \sigma^2_{air.} + \sigma^2_{trop.} + \sigma^2_{jono.} + \sigma^2_{gnd.} \quad (4.10)$$

kur: $\sigma^2_{air.}$ - antrinės paklaidos įtakančios orlaivių pseudo atstumo matavimo paklaidos, $\sigma^2_{trop.}$ ir $\sigma^2_{jono.}$ - jonosferos ir troposferos likutinis neapibrėžtumas ir $\sigma^2_{gnd.}$ paklaida dėl antžeminės GBAS sistemos.

4.5. Vietos nustatymo tikslumas

Naudojant pseudo atstumą, vieta apskaičiuojama naudojant navigacijos lygtis.

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot dT \quad (4.11)$$

kur: ρ_i – diferenciškai pataisytas pseudo atstumas iki šaltinio i ir (x_u, y_u, z_u) paskaičiuota vartotojo vieta WGS84 koordinatų sistemoje. Siekiant sumažinti paklaidas, gaunamas (4.11) formulėje:

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot dT + \Delta\rho_i \quad (4.12)$$

Iš (4.12) lygties išreškiamas $\Delta\rho_i$ – skirtumas tarp išmatuoto pseudo atstumo ir tikrojo atstumo:

$$\Delta\rho_i = \rho_i - \rho_i \quad (4.13)$$

kur ρ_i :

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot dT \quad (4.14)$$

Vartotojo vieta ir imtuvo laikrodžio paklaida lieka nežinoma, tačiau gali būti išreikšta:

$$\begin{aligned} x_u &= x_u + \Delta x_u \\ y_u &= y_u + \Delta y_u \\ z_u &= z_u + \Delta z_u \\ dT &= dT + \Delta t_u \end{aligned} \quad (4.15)$$

(4.14) lygtį išskleidus pirmos eilės Teiloro eilute:

$$\rho_i = \rho_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial x_u} \cdot \Delta x_u + \frac{\partial \rho_i}{\partial y_u} \cdot \Delta y_u + \frac{\partial \rho_i}{\partial z_u} \cdot \Delta z_u + \frac{\partial \rho_i}{\partial dT} \cdot \Delta t_u \quad (4.16)$$

kur :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial x_u} = -\frac{x_i - x_u}{R_i} = -a_{xi}$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial y_u} = -\frac{y_i - y_u}{R_i} = -a_{yi}$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial z_u} = -\frac{z_i - z_u}{R_i} = -a_{zi}$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial dT} = -c \quad (4.17)$$

ir:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} \quad (4.18)$$

Ištačius (4.16) į (4.13) gauname:

$$\Delta \rho_i = \rho_i - \rho_u = a_{xi} \cdot \Delta x_u + a_{yi} \cdot \Delta y_u + a_{zi} \cdot \Delta z_u + c \Delta t_u \quad (4.19)$$

Pseudo atstumų galutiniam apskaičiavimui:

$$\Delta P = \begin{Bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \vdots \\ \Delta \rho_n \end{Bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} a_{x1} a_{y1} a_{z1} & 1 \\ a_{x2} a_{y2} a_{z2} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ a_{xn} a_{yn} a_{zn} & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta x = \begin{Bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ c \cdot \Delta t_u \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

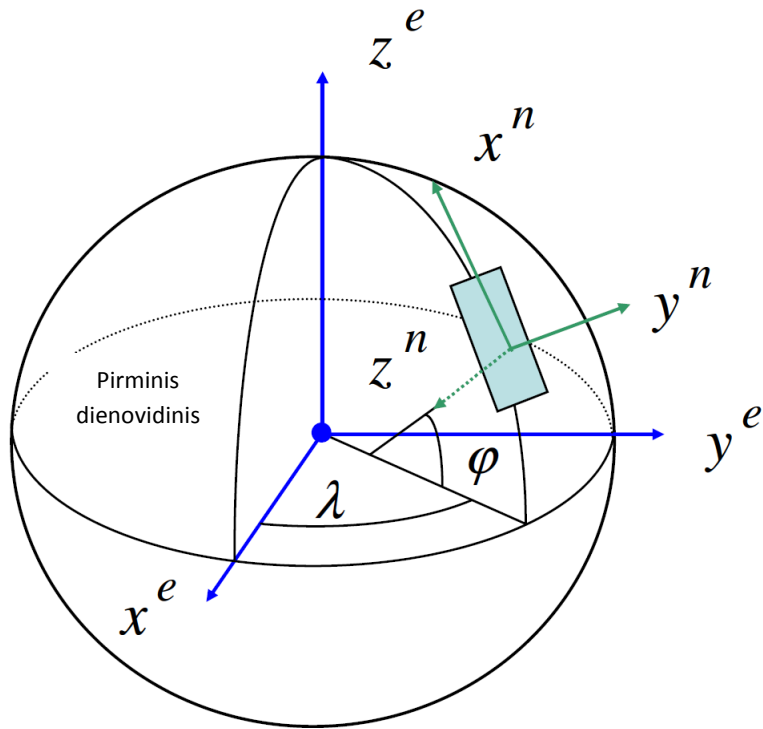
Sprendinys:

$$\Delta P = H^T \Delta x \quad (4.21)$$

Pseudo atstumų matavimo paklaidos modeliuojamos GNSS SARPs, kaip jos priklauso nuo palydovo padėties. Tai pagrįsta tuo, kad skirtingų matavimų paklaidos taip pat bus skirtingos.

4.6. Vietos nustatymo paklaidos vietinėje koordinačių sistemoje

Įvertinant navigacinės vietos nustatymo tikslumą, vietos paklaida (NSE) išreiškiama kaip horizontalios ir vertikalios padėties paklaidos (HPP ir VPP) [15]. VKS vietos liestinės plokštumoje suradimu. Dažniausiai VKS pasirenkama šiaurė/pietūs/lygis (ŠPL) koordinačių sistema (4.3 pav.) [10].



4.3 pav. Šiaurė/pietūs/lygis (ŠPL) koordinačių sistema

Paveikslėlyje 4.3 indeksai e ir n atitinka žymėjimą ECEF WGS84 sistemai ir NSE ir ŠLP ašis, kai φ ir λ atitinka geodezinę ilgumą ir platumą. NSE koordinačių sistema apibūdinama:

- z^n horizontali ašis didėjančia platumos kryptimi
- y^n horizontali ašis didėjančia ilgumos kryptimi
- z^n formuojant stačiakampę koordinačių sistemą

Norint surasti vietos paklaidas NSE koordinačių sistemoje, koordinatės turi būti pakeistos. Šis pakeitimas gali būti realizuotas pasukant koordinačių rėmelį, jeigu norima išreikšti paklaidos vektorių kitose koordinačių sistemoje. Šiam tikslui koordinačių rėmelio padėtis nesvarbi.

$$\Delta x_{NSE} = T_{WGS}^{NSE} \Delta x_{WGS} \quad (4.28)$$

kur: T_{WGS}^{NSE} matricos pokyčiai tarp WGS 84 ir NSE koordinatinių sistemų. Ši matrica sudaroma pagal geodezinius kampus [5]:

$$T_{WGS}^{NSE} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\cos\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi & 0 \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 & 0 \\ -\cos\varphi \cdot \cos\lambda & -\cos\varphi \cdot \sin\lambda & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

pritaikius (4.22) lygčiai:

$$\Delta x_{NSE} = T_{WGS}^{NSE} \Delta x_{WGS} = T_{WGS}^{NSE} K_{WGS} \Delta P = K_{NED} \Delta P \quad (4.30)$$

Praleidus tarpinius žingsnius Δx :

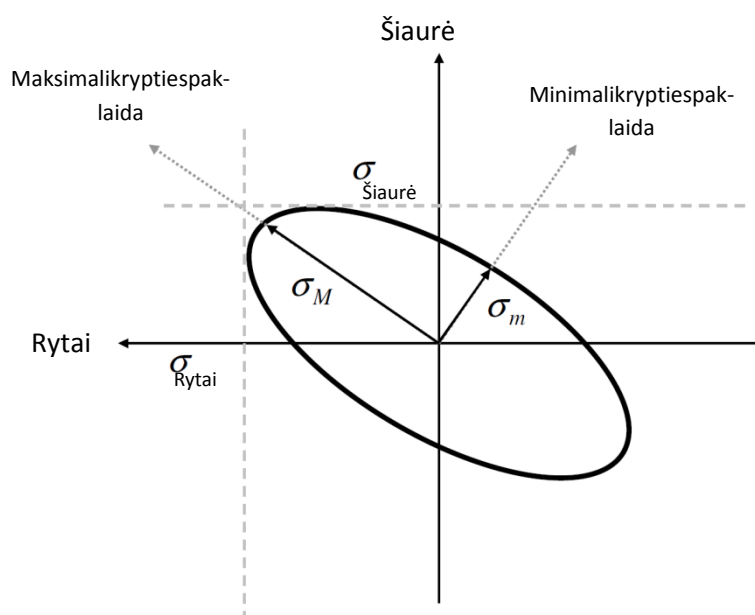
$$C = K_{NSE} W K_{NSE}^T = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & -\sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & c \cdot \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & c \cdot \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & -\sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & c \cdot \sigma_{zt}^2 \\ c \cdot \sigma_{xt}^2 & c \cdot \sigma_{yt}^2 & c \cdot \sigma_{zt}^2 & c \cdot \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Standartiniai nuokrypiai išreikšti NSE koordinatėmis:

$$\begin{cases} \sigma_{šiaurės} = \sigma_x \\ \sigma_{rytų} = \sigma_y \\ \sigma_{lygio} = \sigma_z \end{cases} \quad (4.32)$$

Vertikalios padėties paklaidos standartinis nuokrypis lygus σ_{lygio} ir horizontalios padėties paklaidos nuokrypis laikomas horizontalioje plokštumoje maksimaliu leistinu nuokrypiu σ_M (4.4 pav.) ir išreiškiamas:

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{2} \left(\sigma_{šiaurės}^2 + \sigma_{rytų}^2 + \sqrt{\sigma_{šiaurės}^2 - \sigma_{rytų}^2 + 4 \cdot \sigma_{šiaurės-rytų}^2} \right) \quad (4.33)$$



4.4 pav. Horizontali paklaida

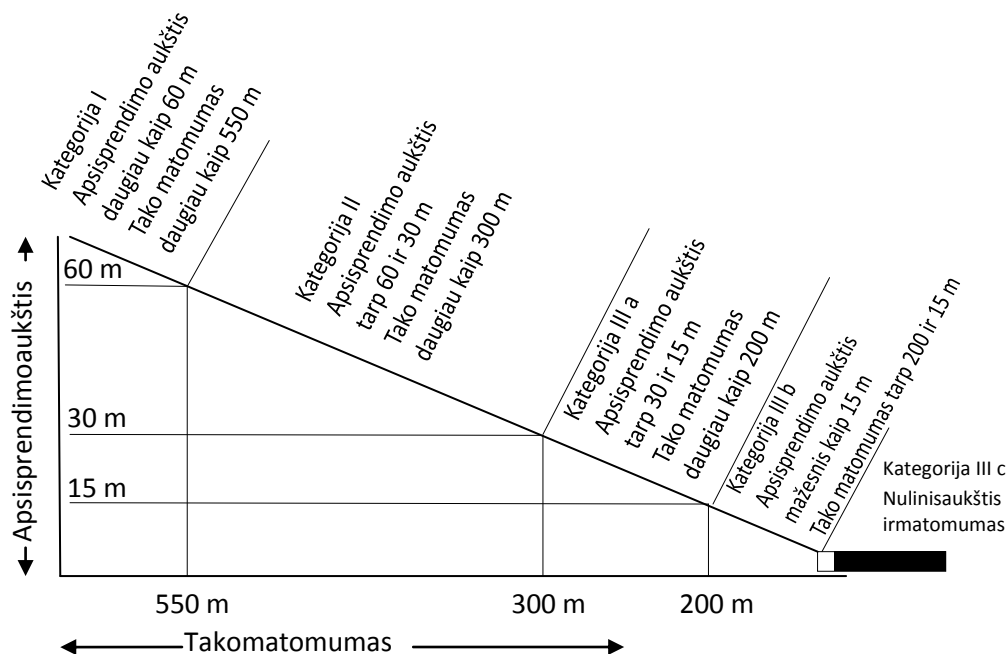
5. TIKSLAUS ARTĖJIMO TŪPTI GBAS SISTEMA

5.1. Tūpimo pagal prietaisus kategorijos

GBAS sistema sukurta aptarnauti visų kategorijų tikslaus artėjimo tūpti sistemas.

Pagal ICAO klasifikaciją tikslaus artėjimo tūpti įranga skirstoma į tokias kategorijas (5.1 pav.)[10]:

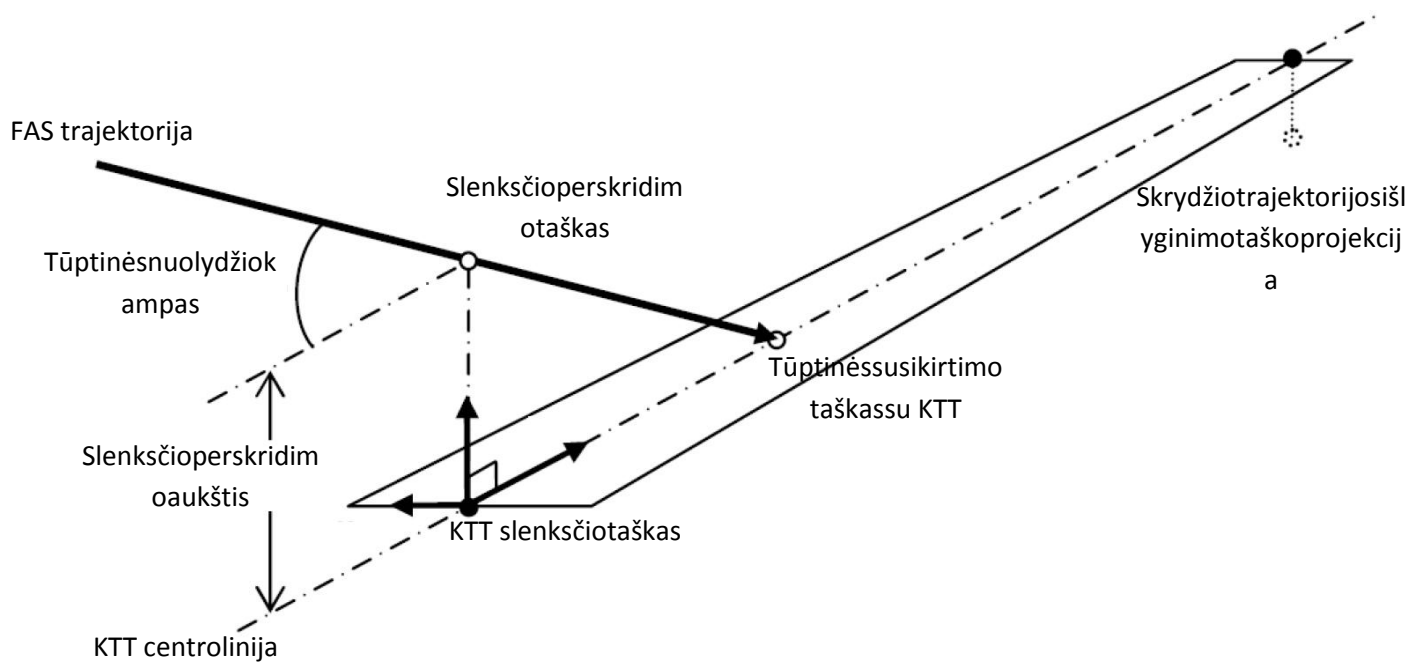
- 1 kategorija – apsisprendimo aukštis ne mažesnis kaip 60 m, matomumas nemažesnis kaip 800 m arba kilimo tūpimo tako matomumo nuotolis nemažesnis kaip 550 m;
- 2 kategorija – apsisprendimo aukštis mažesnis kaip 60 m, bet nemažesnis kaip 30 m ir kai kilimo tūpimo tako matomumo nuotolis nemažesnis kaip 350 m;
- 3 kategorija skirstoma į 3 grupes:
 - 3 A kategorija – apsisprendimo aukštis mažesnis kaip 30 m arba be apribojimų, o kilimo tūpimo tako matomumo nuotolis nemažesnis kaip 200 m;
 - 3 B kategorija – apsisprendimo aukštis mažesnis kaip 15 m arba be apribojimų, o kilimo tūpimo tako matomumo nuotolis mažesnis kaip 200 m, bet nemažesnis kaip 50 m;
 - 3 C kategorija – apsisprendimo aukštis ir kilimo tūpimo tako matomumo nuotolis neri-
bojami.



5.1 pav. Tūpimo kategorijos[1]

5.2. Galutinės artėjimo tūpti atkarpos apibrėžimas

Galutinė artėjimo tūpti atkarpa (FAS) – linija erdvėje, apibrėžta KTT slenksčio taško arba meno KTT slenksčio taško (LTP/FTP), skrydžio trajektorijos išlyginimo taško (FPAP), slenksčio perskridimo aukščio (TCH) ir tūptinės nuolydžio kampo (GPA) (5.2 pav.) [10].



5.2 pav. Galutinės artėjimo tūpti atkarpos apibrėžimas

KTT slenksčio taškas yra KTT ašinės linijos susikirtimo su slenksčiu (KTT pradžia) vieta ir taškas kuriame tūptinė praeina nustatytame slenksčio perskridimo aukštyje [10]. Skrydžio trajektorijos išlyginimo taško projekcija yra taškas tame pačiame aukštyje kaip ir KTT slenksčio taškas, kuris naudojamas tūptinės lygiavimui. Tūptinės nuolydžio kampas - kampas tarp tūptinės ir vietos horizontalios plokštumos, pagal kurią nustatomas tūptinės ir KTT susikirtimo taškas.

Be ankščiau minėtų naudojami dar du parametrai apibūdinantys galutinę artėjimo tūpti atkarpą [17]:

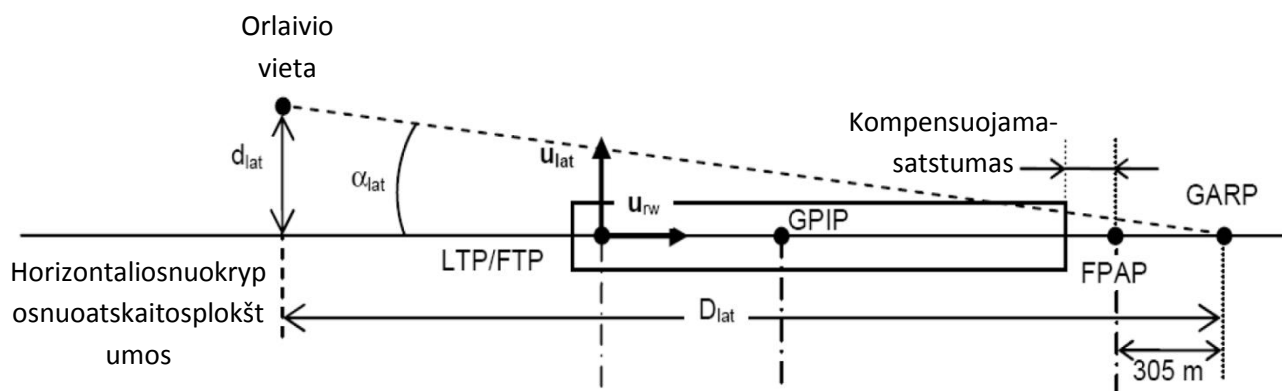
1. Kurso plotis, apibūdinantis šonines nuokrypas nuo tūptinės KTT slenksčio pločio ribose.
2. Atstumo kompensacija, atstumas nuo KTT „STOP“ taško iki skrydžio trajektorijos išlyginimo taško.

5.3. Nuokrypos nuo tūptinės

Naudojant diferenciniu metodu pakoreguotą poziciją, orlaivio posistemė apskaičiuoja vertikalės ir horizontalios nuokrypas nuo nustatytos tūptinės. Šie nuokrypiai išreiškiami Moduliacijos gylgio skirtumais (DDM), analogiškai kaip ILS sistemoje [17].

5.3.1. Horizontalios nuokrypos

Šoninės nuokrypos išreiškiamos kaip parodyta 5.3 pav. :



5.3 pav. Horizontalios nuokrypos nuo tūptinės

Norint apskaičiuoti horizontalias nuokrypas, apibrėžiamas GNSS tūpimo sistemos azmutas kaip taškas esantis horizontalioje KTT slenksčio plokštumoje ir kertantis šį tašką už 305 metrų, kur skrydžio trajektorija (FPAP) kerta šią plokštumą. Šiuo atveju horizontali nuokrypa išreiškiama [11]:

$$Lat_{DDM} = 0,155 \frac{\alpha_{lat}}{\alpha_{lat.FS}} \quad (5.1)$$

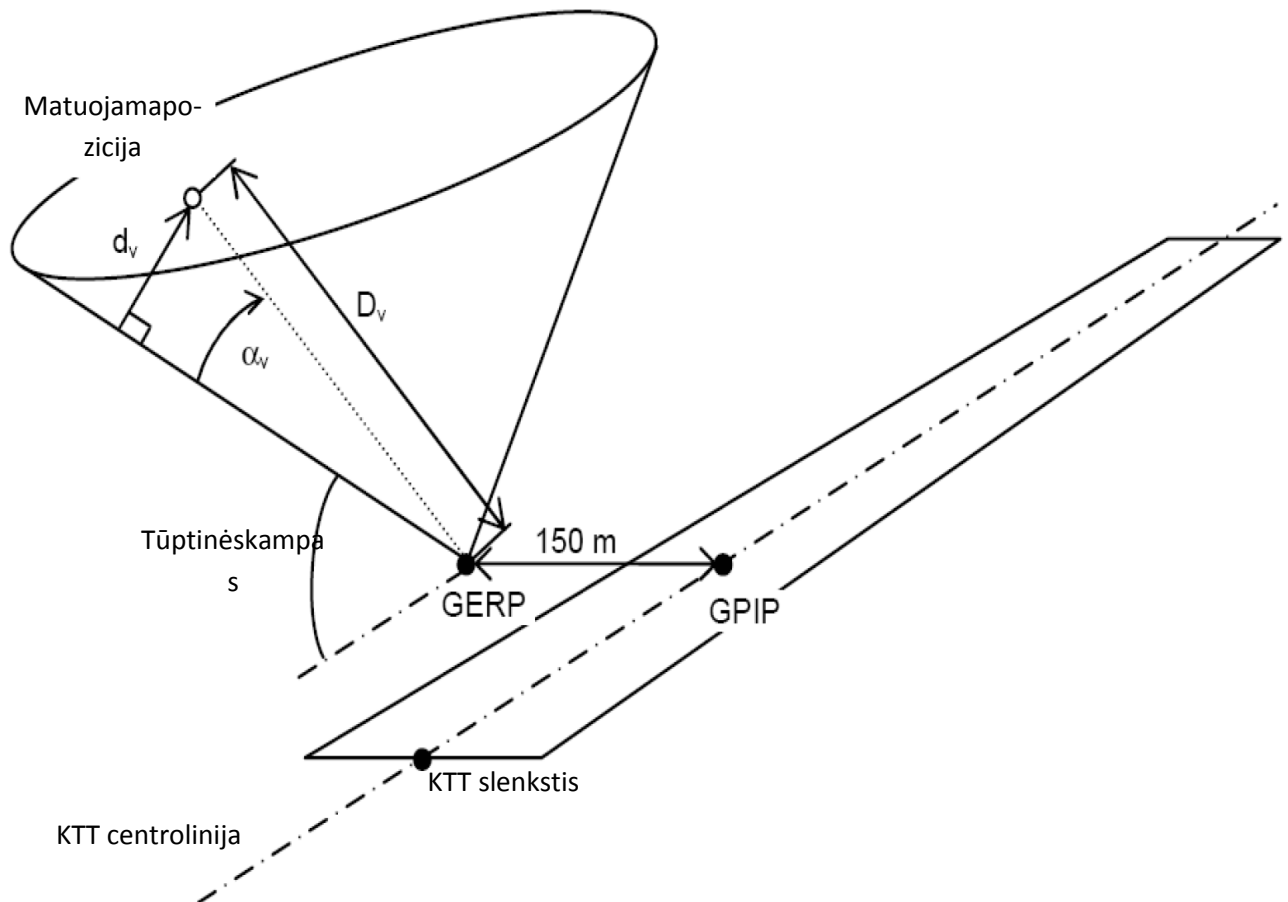
kur α_{lat} nuokrypos kampas horizontalioje plokštumoje, kampas kurio tangentas lygus atstumiui d_{lat} ir horizontalus atstumas nuo orlaivio iki azmuto taško, D_{lat} ir $\alpha_{lat.FS}$ kampas, parodantis bendrą nuokrypį per visą atstumą:

$$\alpha_{lat.FS} = \tan^{-1} \left(\frac{CW}{D_G} \right) \quad (5.2)$$

CW tūptinės kurso plotis horizontalioje plokštumoje ir D_G atstumas nuo KTT slenksčio taško iki azmuto taško.

5.3.2. Vertikalios nuokrypos

Vertikalios nuokrypos nustatomos atsižvelgiant į palydovinės tūpimo sistemos atskaitos taško GERP (angl.-„GLS Elevation Reference Point“) aukštį (5.4 pav) [18].



5.4 pav. Vertikalios nuokrypos nuo tūptinės

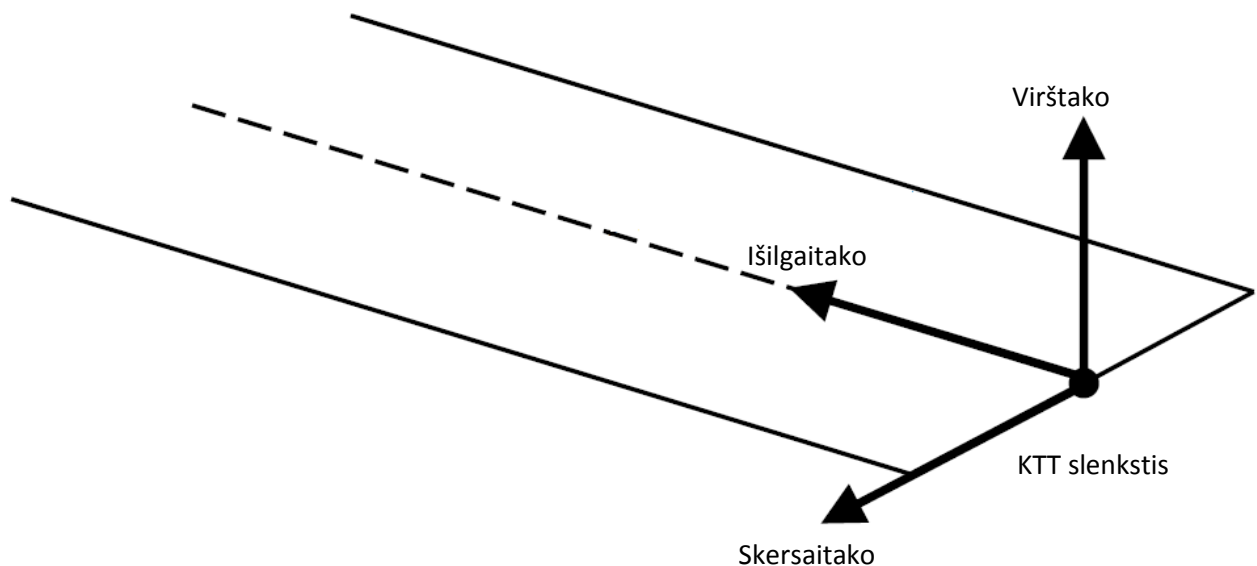
Palydovinės tūpimo sistemos atskaitos taškas gali būti toje pačioje tiesėje kartu su tūptinės susikirtimo tašku arba patrauktas į šoną kompensuojant fiksuotą palydovinės tūpimo sistemos atskaitos taško nuotolio vertę 150 metrų. Palydovinės tūpimo sistemos atskaitos taškas yra kūgio viršūnė, kurio kampas apibrėžtas tūptinės kampo nuo kurio apskaičiuojamos vertikalios nuokrypos. Vertikali nuokrypa apskaičiuojama [11]:

$$Vert_{DDM} = 0,7 \left(\frac{\alpha_v}{GPA} \right) \quad (5.3)$$

kur α_v nuokrypio kampas vertikaloje plokštumoje, kampas, kurio liestinė proporcinga vertikaliai tiesinei nuokrypai d_v , atstumas tarp apskaičiuotos orlaivio vietos ir palydovinės tūpimo sistemos atskaitos taško D_v .

5.3.3. Apsaugos lygiai

Apsaugos lygiai – yra aukšto patikimumo ribos pozicionavimo paklaidai. Apskaičiuojamos remiantis procedūra, aptarta ankstesniame skyriuje, kuriame buvo aptartas pozicionavimo paklaidos vietinėje koordinatinių sistemoje. Šiuo atveju naudosime išilgai tako, skersai tako ir virš tako (ACU) koordinatinių sistemą pavaizduotą 5.5 pav..



5.5 pav. ACU koordinatinių sistema

Šiuo atveju lygtis 3.29 perrašoma taip:

$$C = K_{ACU} W K_{ACU}^T = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & -\sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & c \cdot \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & c \cdot \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & -\sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & c \cdot \sigma_{zt}^2 \\ c \cdot \sigma_{xt}^2 & c \cdot \sigma_{yt}^2 & c \cdot \sigma_{zt}^2 & c \cdot \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

K_{ACU} išreiškiamas per:

$$K_{ACU} = T_{WGS}^{ACU} K_{WGS} \quad (5.5)$$

Šiuo atveju turime:

$$\begin{cases} \sigma_{išilgai\ tako} = \sigma_x \\ \sigma_{skersai\ tako} = \sigma_y \\ \sigma_{virš\ tako} = \sigma_x \end{cases} \quad (5.6)$$

Tikslaus artėjimo tūpti apsaugos lygiai apskaičiuojami remiantis standartinėmis nuokrypomis (5.6). Apibrėžiamas horizontalus apsaugos lygis (LPL) ir vertikalus apsaugos lygis (VPL). Apskaičiuojama remiantis dviem hipotezėm: nominalios sąlygos (hipotezė H0) ir kai yra vieno imtuvo gedimas (hipotezė H1). Tada LPL ir VPL išreiškiama:

$$LPL_{PA_HO} = K_{ffmd_hor} \cdot \sigma_{skersai_tako} \quad (5.7)$$

$$VPL_{PA_HO} = K_{ffmd_vert} \cdot \sigma_{virš_tako} \quad (5.8)$$

K_{ffmd} daugikliai apibrėžti [12] kaip daugikliai išreiškiantys tikimybę neaptikti gedimo, jie turi būti mažesni nei apsaugos lygio vientisumo rizika.

5.3.4. Įspėjimo ribos

Įspėjimo ribos, dėl kurių apsaugos lygiai tikslaus artėjimo tūpti sistemos lyginami su apibrėžtos orlaivio padėties funkcija [20]. Tikslaus tūpimo sistemos įspėjimo ribos apibrėžiamos pagal horizontalios tūptinės įspėjimo ribas (FASLAL) ir vertikalios tūptinės įspėjimo ribas. 5.1 ir 5.2 lentelėse pateiktos sąlygos vertikalių ir horizontalių įspėjimo ribų skaičiavimui [13].

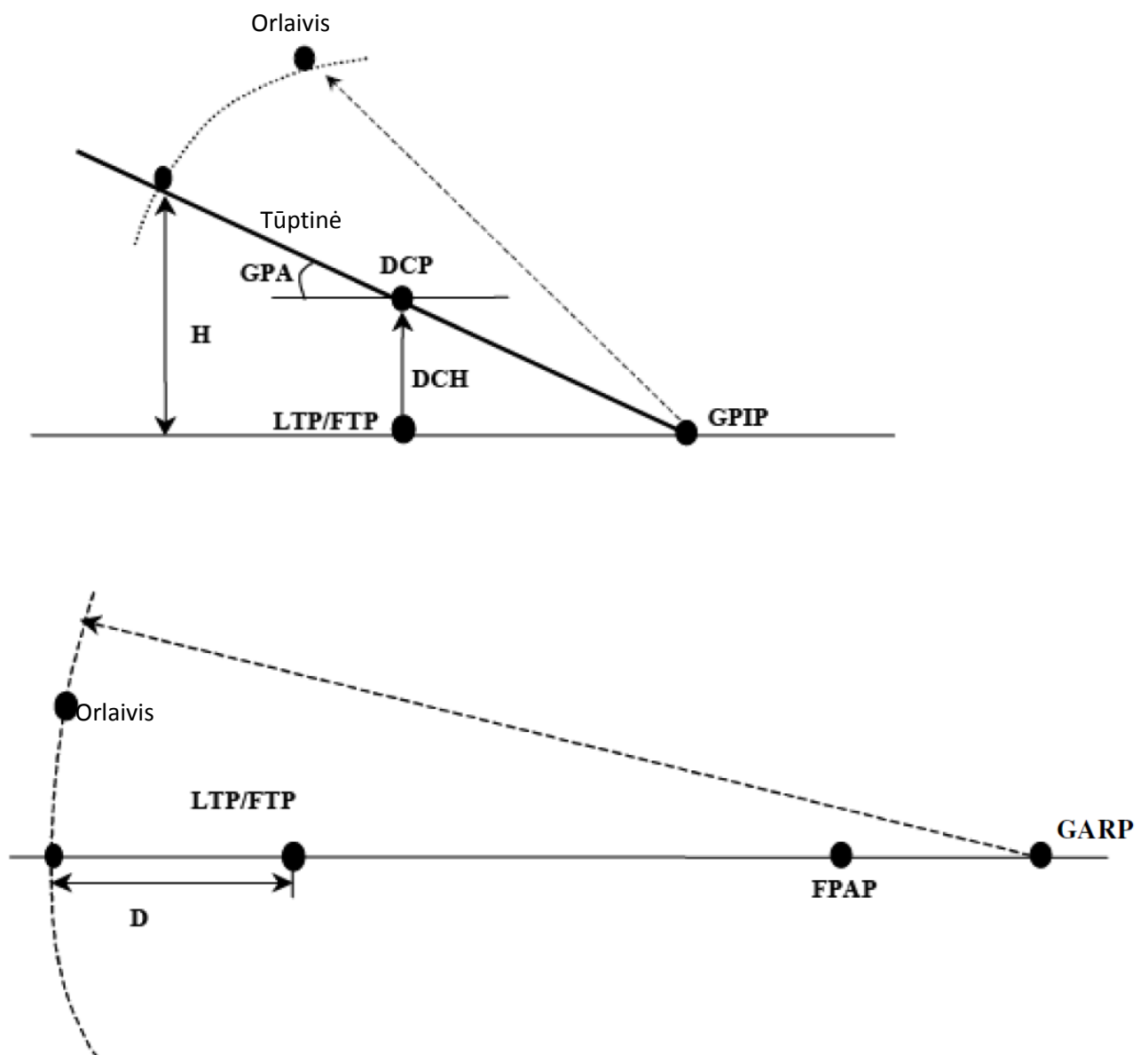
5.1 lentelė Tiklaus tūpimo LAL sąlygos [13][16]

Sąlygos (metrais)	Horizontalios įspėjimo ribos (LAL)
$D \geq 7500$	$FASLAL + 29,15$
$7500 > D \geq 873$	$0,0044 \cdot D + FASLAL - 3,85$
$873 \geq D$	FASLAL

5.2 lentelė Tiklaus tūpimo VAL sąlygos [13][16]

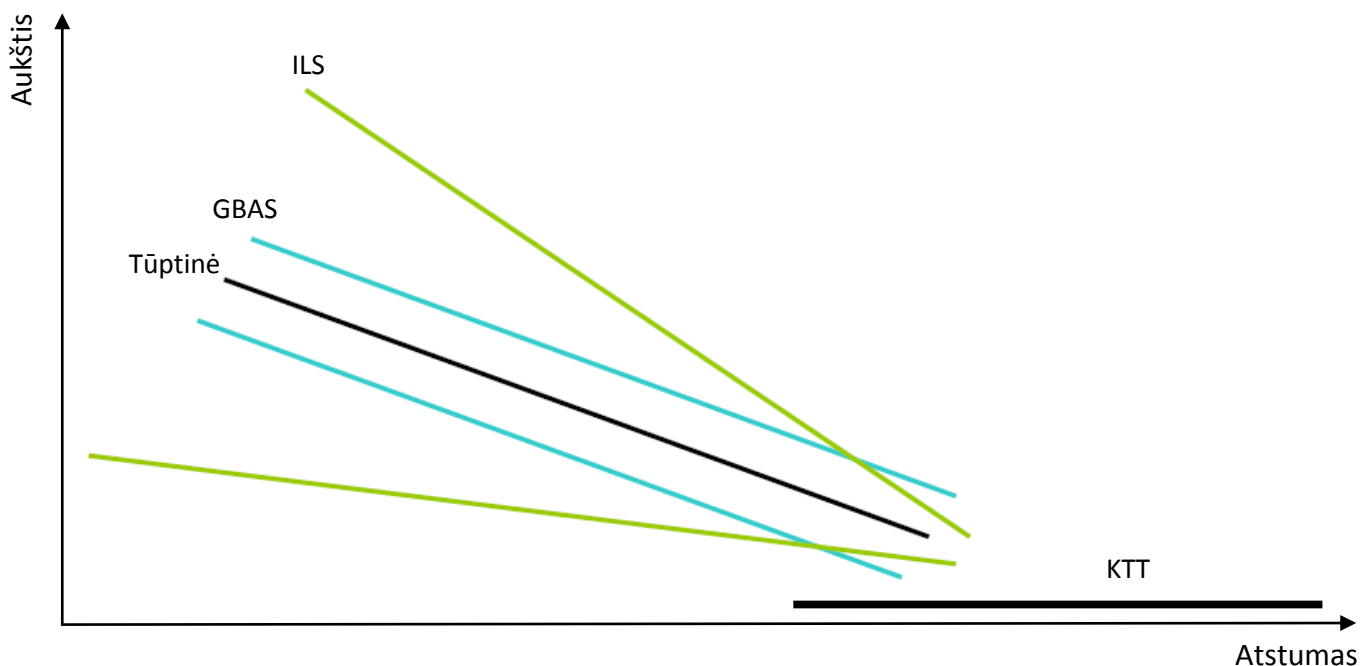
Sąlygos (metrais)	Horizontalios įspėjimo ribos (LAL)
$H \geq 408,432$	$FASVAL + 33,35$
$408,432 > H \geq 60,96$	$0,096 \cdot H + FASLAL - 5,85$
$60,96 \geq H$	FASLAL

Pirmoje lentelėje, atstumas D yra horizontalus orlaivio padėties atstumas nuo KTT slenksčio išilgai tūptinės ir H-aukštis virš KTT slenksčio tūptinėje (5.6 pav.)([17]).



5.6 pav. D ir H apibrėžimas [10]

Pagal schemą, pateiktą 5.1 ir 5.2 lentelėse, orlaiviui artėjant KTT slenksčio link, tikslumo reikalavimai griežtėja. Pagal šiuos apibrėžimus galima palyginti GBAS ir ILS sistemų charakteristikas (5.7 pav.).



5.7 pav. GBAS ir ILS charakteristikos [13]

6. TIRIAMOJI DALIS

6.1. GBAS sistema ekonominiu požiūriu

Oro eismo paslaugų teikėjui GBAS sistemos įgyvendinimo išlaidas sudaro: įrangos pirkimas, įrengimas ir jos eksploatacija. Pagal šaltinyje [10] pateiktus išlaidų pavyzdžius GBAS ir ILS įrangos, atitinkančios CAT-1 kategorijos įrengimui ir aptarnavimui, sudaryta 6.1 lentelė.

6.1 lentelė. GBAS ir ILS antžeminių sistemų įrengimo kainos [19]

Elementas	GBAS Kaina (€)	ILS Kaina (€)	Pastaba
Įrenginiai	500 000	336 000	Antžeminės stoties, siųstuvo, imtuvo.
Statybos darbai	44 000	195 000	Platformų, įvairių stočių ir antenų įrengimas.
Instaliavimas ir patikra	120 000	176 000	Parengiamieji darbai, tinklo sujungimas, įrengimas naujos įrangos ir patikrinimas.
Skrydžiųbandymai	30 000	30 000	Sistemos sertifikavimas
Eksploatavimo išlaidos (per metus)	43 000	79 000	Atsarginės dalys, įrangos aptarnavimas, personalo paruošimas, ir apskraidomoji kontrolė kartą per metus (tik ILS sistemai).

Infrastruktūros kaina, lyginant su CAT-II, CAT-III sistemos įrengimui yra didesnė nei GBAS CAT-I (apie 1000 000 € [19]). Palyginus pirmosios kategorijos GBAS sistemas su pirmosios kategorijos ILS pirmųjų metų įrengimo ir eksploatavimo išlaidas, pastarosios sistemos išlaidos didesnės 79 000 €. Didėjant sistemos sudėtingumui, kaip ILS CAT-III, didėja ir eksploatavimo kaina apie 105 000 € per metus [19], tačiau GBAS eksploatavimo kaina išlieka ta pati.

GBAS nereikalingi kasmetinei skrydžių bandymai, todėl šios sistemos eksploatacija lyginant su ILS, kuriai tai būtina atlikti kas metai tampa, dar pigesnė.

6.2. GBAS panaudojimo privalumai didžiausiuose Lietuvos oro uostuose

Lyginant didžiausiuose Lietuvos oro uostuose naudojamas ILS tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemas su naujos kartos palydovinės radijo navigacijos antžemine patikslinimo sistema, tiksliajam tūpimui pagal prietaisus GBAS, pastaroji turi keletą svarbių pranašumų. Vienas svarbiausių tas, kad priešingai nei ILS, kuri turi būti įrengta kiekvieno tūpimo-kilimo tako (KTT) gale, viena GBAS sistema gali teikti navigaciją tiksliam tūpimui pagal prietaisus ne tik visuose oro uosto KTT, kuriame įrengta, bet ir tikslųjį artėjimą tūpti aplinkiniuose mažesniuose oro uostuose, kurie nutolę ne toliau kaip 40 km.[5].

Didžiausiame Lietuvoje Vilniaus tarptautiniame oro uoste pagrindiniame KTT (6.1 pav.) naudojamos dvi ILS tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemos I ir II kategorijos. I kategorijos sistema įrengta 20 KTT, dėl žemės paviršiaus nelygumų, kurie sukelia atspindžius nuo žemės paviršiaus 02 kryptimi ir iškraipo ILS signalus. II kategorijos ILS sistema realizuota 02 KTT, kadangi žemės paviršius yra šiek tiek lygesnis. Atsarginiame KTT tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistema neįrengta.



6.1 pav. Vilniaus oro uosto ILS ir GBAS sistemų galimas panaudojimas

Realizavus palydovinės radijo navigacijos antžeminę patikslinimo sistemą, viena GBAS sistema aptarnautų visą oro uostą (6.1 pav.), t.y. nebereikėtų dviejų ILS sistemų pagrindiniame KTT take, taip pat būtų tikslaus artėjimo galimybė atsarginiame KTT, kuriame šiuo metu neįrengta jokia tūpimo pagal prietaisus sistema. Šiuo metu pagal ICAO reikalavimus [10] GBAS sertifikuota tik I kategorijos tūpimui pagal prietaisus, tačiau artimiausiu metu ketinama šią sistemą sertifikuoti II ir III kategorijų tūpimui pagal prietaisus [13], todėl 02 KTT tūpimo pagal prietaisus kategorija sumažėtų tik laikinai. Tačiau atsirastų vienas didžiausių sistemos pranašumų, tikslaus tūpimo pagal prietaisus paslaugomis galėtų naudotis aplinkiniai mažesni oro uostai (pvz., Kyviškių oro uostas, esantis GBAS sistemos veikimo zonoje t.y. iki 43 km atstumu). Taip pat 20 KTT, kuriame šiuo metu veikia I kategorijos tūpimo pagal prietaisus sistema, dėl anksčiau minėtų priežasčių, sertifikavus GBAS II arba III kategorijos, tūpimui pagal prietaisus šio KTT kategorija galėtų padidėti net iki III, kadangi ši sistema nėra jautri apie KTT esančio žemės paviršiaus nelygumams bei į jos veikimo zoną pakliūnantiems objektams [20].

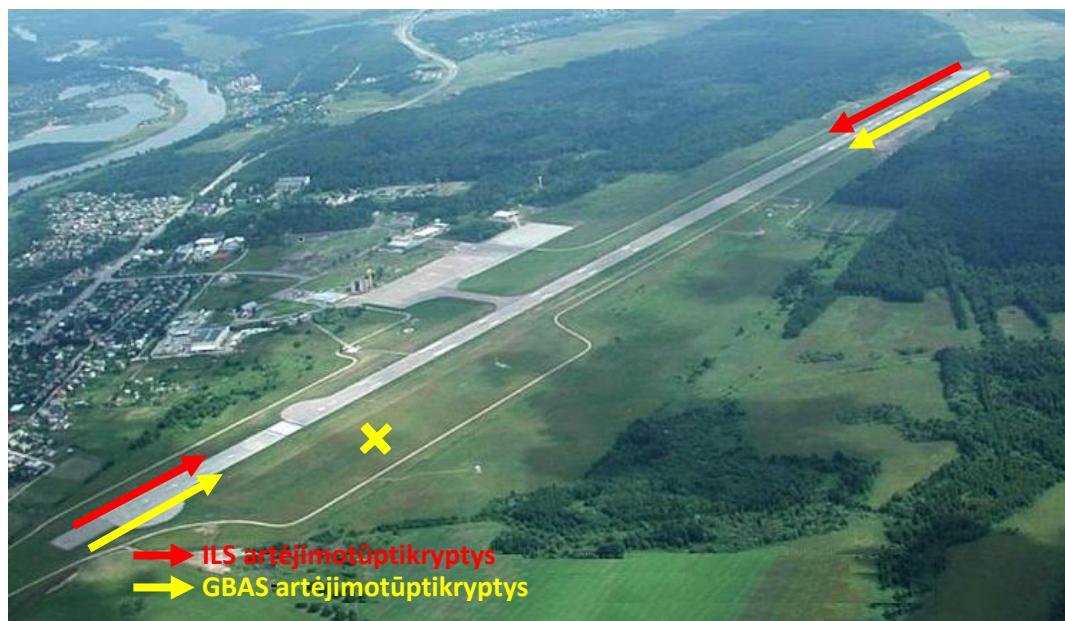
Šiuo metu naudojant ILS sistemą susiduriama ir su kitomis problemomis, kurių būtų išvengta įrengus GBAS. Kiekvienam KTT kuriame įrengta ILS reikalinga kiekvienai ILS priskirti atskirą dažnį, o tai oro uostuose sukelia problemų, kadangi galimų dažnių skaičius yra ribotas [20]. Veikimo sutrikimai atsiranda perjungiant ILS aptarnauti kitą KTT kryptį ir taip pakeičiant veikimo dažnį. Šios problemos išvengia GBAS, kadangi ši sistema visus KTT aptarnauja vienu VHF dažniu, todėl ribotas dažnių spektras išnaudojamas daug efektyviau [20].

Saugumo požiūriu GBAS yra saugesnė nei ILS, kadangi GBAS antenos įrengiamos ne prie pat KTT. Nebelieka krypties radijo vedlio antenų KTT galuose, iškilusių ganėtinai aukštai virš KTT lygio, kurias orlaiviams būtina perskristi ir dėl šios priežasties tūpimo taškas pasislenka toliau nuo KTT slenksčio. Taip pat nėra šalia KTT nuolydžio vedlio antenos.

Kituose didžiuosiuose Lietuvos oro uostuose situacija yra analogiška aptartai anksčiau, todėl išsamiau neapšarinėjama.

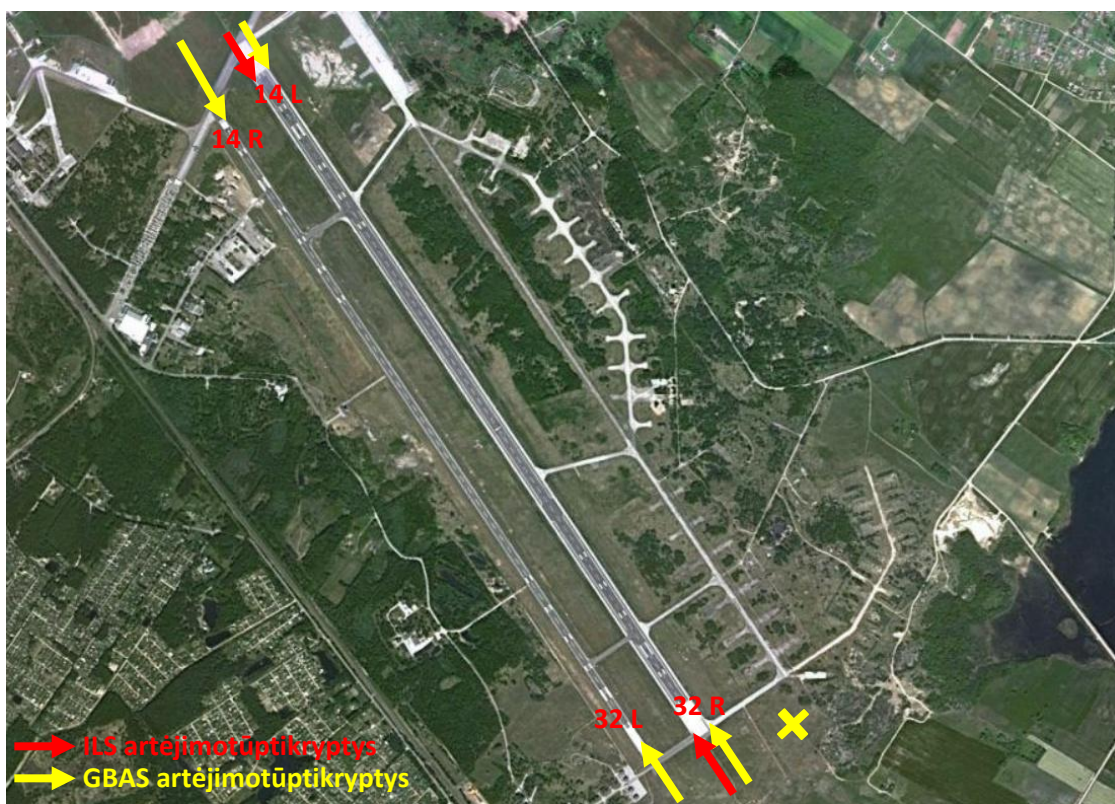
6.1, 6.2, 6.3, 6.4 pav. nurodyta viena iš galimų sistemos GBAS įrengimo vietų oro uoste pažymėta „X“. Reikalavimai įrengimo vietos parinkimui aptarti 3.1.1. ir 3.1.3. skyriuose.

Kauno oro uoste įrengtos dvi II kategorijos ILS sistemos (6.2 pav.).



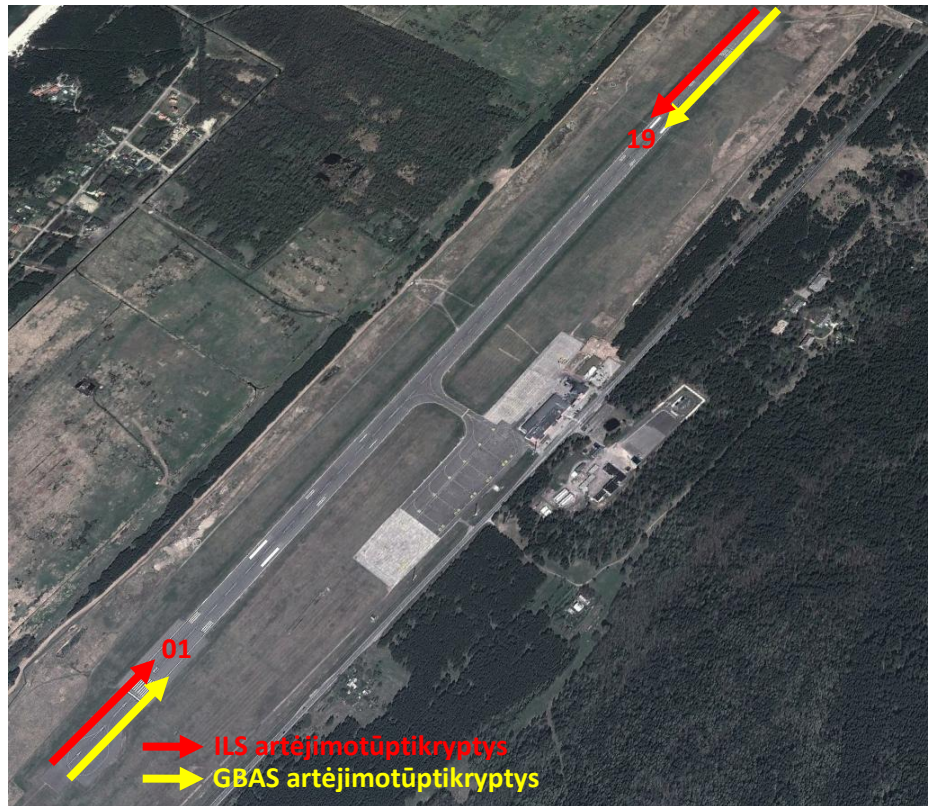
6.2 pav. Kauno oro uosto ILS ir GBAS sistemų galimas panaudojimas

Šiaulių oro uoste pagrindiniame KTT įrengtos dvi I kategorijos ILS tūpimo pagal prietaisus sistemos (6.3 pav.) [21]. Atsarginiame KTT neįrengta tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistema.



6.3 pav. Šiaulių oro uosto ILS ir GBAS sistemų galimas panaudojimas

Palangos oro uoste pagrindiniame 19 KTT įrengta I kategorijos ILS tūpimo pagal prietaisus sistema, 01 KTT tūpimo pagal prietaisus sistema neįrengta (6.4 pav.) [22].



6.4 pav. Palangos oro uosto ILS ir GBAS sistemų galimas panaudojimas

6.3 GPS signalų panaudojimo galimybių tyrimas

Šio tyrimo pagrindinis tikslas-atlikti GPS panaudojimo vertinimą GBAS tiksliam artėjimui tūpti, remiantis ICAO GNSS standartais ir rekomendacijomis [10].

Tyrimas atliekamas dviem etapais, pirmuoju etapu atliekamas tūpimas tarptautiniame Vilniaus oro uoste naudojantis II kategorijos ILS sistema ir įrašant tikslaus tūpimo pagal prietaisus trajektorijos duomenis naudojant GPS signalus. Antruoju etapu atliekamas tūptinės duomenų surinkimas skrydžio metu, tupiant Vilniaus oro uoste (VNO), naudojant GPS ir EGNOS signalus (GBAS sistemos bandymas nebuvo atliekamas, kadangi Lietuvoje nėra realizuota nei viena GBAS stotis, ir nebuvo galimybės turėti imtuvą, galintį priimti GBAS diferencines pataisas).

6.3.1 GPS duomenų rinkimas skrydžio metu

Šis bandymas atliekamas tarptautiniame Vilniaus oro uoste artėjant tūpti kryptimi 02, naudojantis II kategorijos tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemos ILS signalais. Iš viso atliekama 16 bandymų skirtingomis oro sąlygomis, 8-formuoti tūptinei ir 8-orlaivio kilimui naudojant GPS signalus.

Bandymo metu naudojamas Antano Gustaičio aviacijos instituto orlaivis Cessna 172, kuriame įrengti du skirtingų gamintojų GPS imtuvai: Garmin eTrex Venture HC (6.5 pav.) ir ArduPilot, naudojantis Media Tek GPS modulį (6.6 pav.) ir informacijos, gautos iš imtuvų, apdorojimo įrenginys. Abiejų imtuvų duomenų įrašymo dažnis 1 Hz. GPS imtuvų charakteristikos pateikiamos 6.1 ir 6.2 lentelėse.

6.1 Garmin eTrex Venture HC GPS imtuvo charakteristikos [23]

Kanalų skaičius	Vienu metu sekamų kanalų skaičius	Duomenų atnaujinimo dažnis	EGNOS	Tikslumas horizontalioje plokštumoje*	Tikslumas vertikalioje plokštumoje*	Tikslumas horizontalioje plokštumoje (DGPS)*	Tikslumas vertikalioje plokštumoje (DGPS)*
12	4	iki 10 Hz	Taip	<10m	+/- 1m	<3 m	+/- 1m

* Kaip įvertinta imtuvo paklaida, imtuvo aprašyme neaiškinama.

6.2 Media Tek GPS imtuvo charakteristikos [24]

Kanalų skaičius	Vienu metu sekamų kanalų skaičius	Duomenų atnaujinimo dažnis	EGNOS	Tikslumas horizontalioje plokštumoje*	Tikslumas vertikalioje plokštumoje*	Tikslumas horizontalioje plokštumoje (DGPS)*	Tikslumas vertikalioje plokštumoje (DGPS)*
66	22	iki 10 Hz	Taip	<3 m	<3 m	<2,5 m	<2,5 m

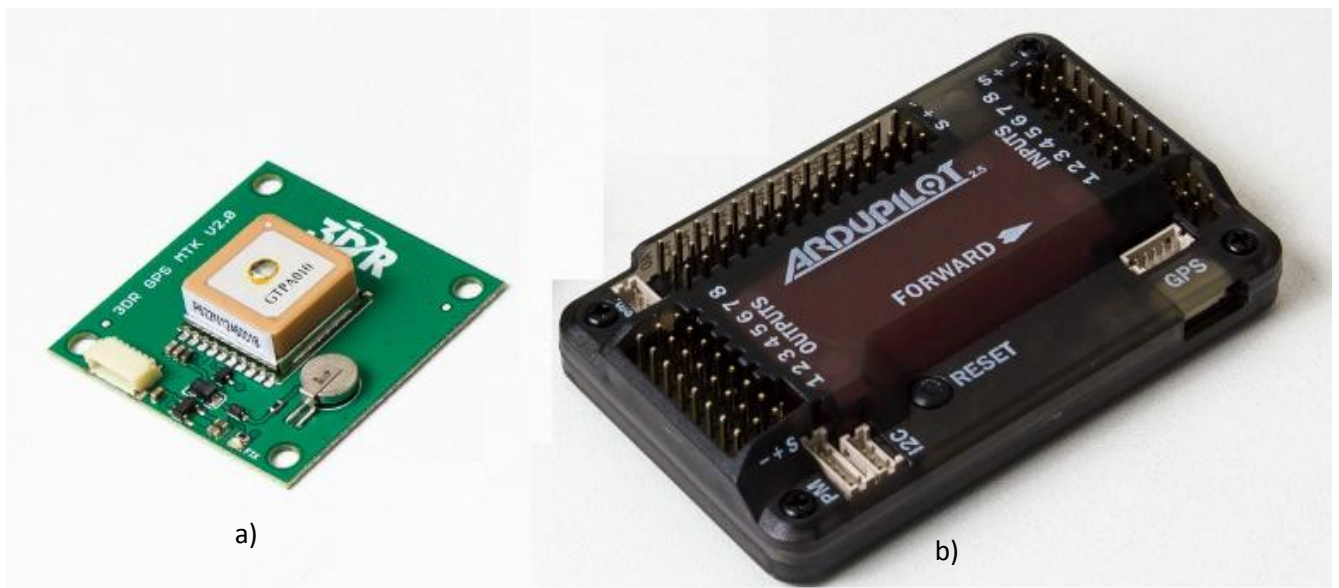
* Kaip įvertinta imtuvo paklaida, imtuvo aprašyme neaiškinama.

Dviejų skirtingų GPS imtuvų panaudojimas suteiks galimybę gautų duomenų palyginimui.

Garmin eTrex Venture HC panaudota įterptinė sistema duomenų perdavimui ir apdorojimui iš GPS imtuvo per RS232 duomenų magistralę į informacijos saugojimo ir apdorojimo įrenginį.

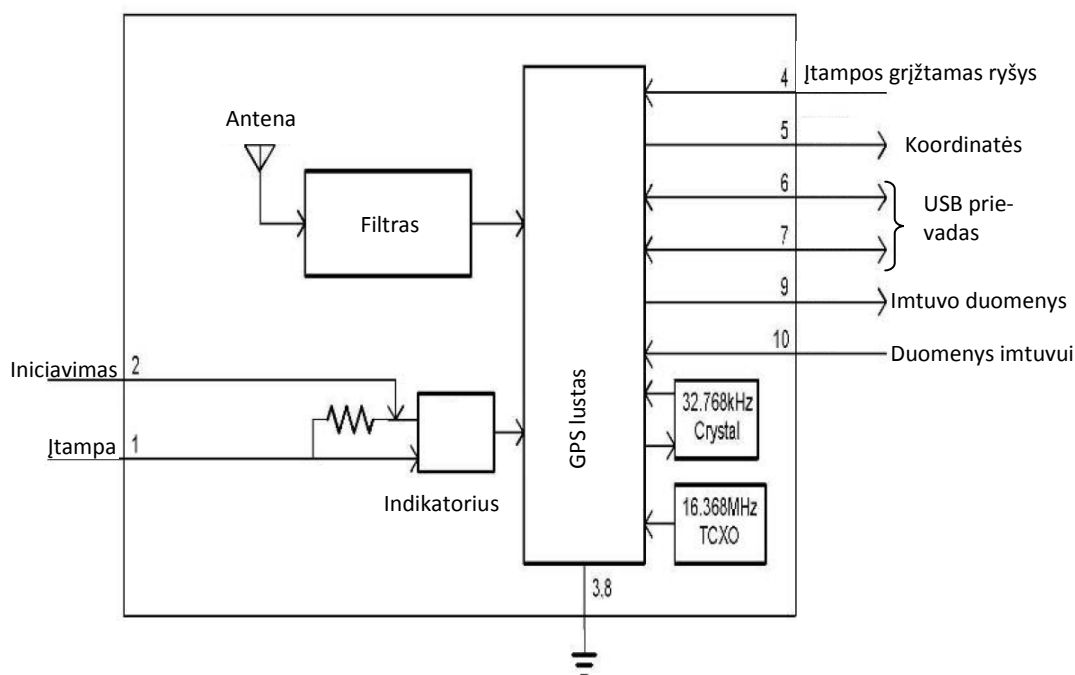


6.5 pav. Garmin eTrex Venture HC [23]



6.6 pav. ArduPilot (b) ir Media Tek GPS imtuvas (a) [25]

GPS signalų priėmimui naudojamo Media Tek modulio blokinė schema (6.7 pav.).



6.7 pav. Media Tek modulio blokinė schema [24]

Ardupilot įterptinė sistema naudojama duomenų nuskaitymui iš Media Tek GPS modulio ir perdavimui į informacijos apdorojimo įrenginį, naudojant RS232 protokolą.

Atliekant bandymą, stebimas matomų palydovų išsidėstymas danguje, vietos koordinatės ir vietos nustatymo tikslumas horizontalioje ir vertikalioje plokštumose. Surinktų duomenų apdorojimui naudojami Garmin GPS experts ir Matlab programų paketai.

Imtuvai įrengiami po orlaivio galiniu stiklu, taip, kad būtų kaip įmanoma sumažinta GPS signalo užstojo galimybė (6.8 pav.). Kadangi imtuvai įrengti nedideliame plote galima teigti, kad abu imtuvai priima signalus iš tų pačių palydovų ir yra veikiami tų pačių paklaidų šaltinių.



6.8 pav. Cessna 172 SP

6.3.2. GPS ir EGNOS duomenų rinkimas

Bandymas atliekamas analogiškai aptartam 6.3.1 skyriuje. Vienintelis skirtumas tas, kad GPS imtuvuose aktyvuojama EGNOS diferencinių duomenų priėmimo funkcija.

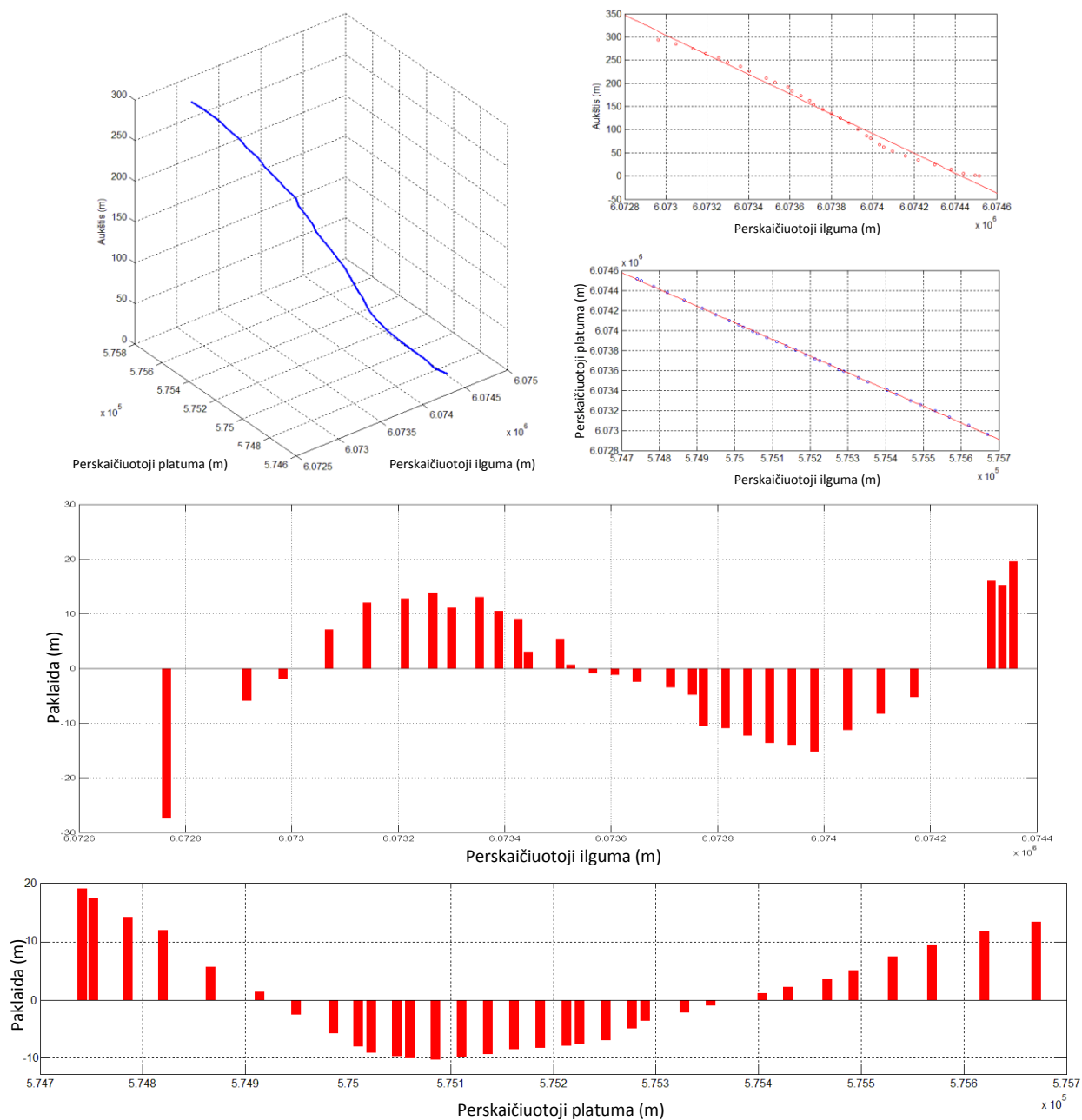
6.4. Bandymo duomenų apdorojimas

Bandymo rezultatų apdorojimui, kaip jau minėta 6.3.1 skyriuje, naudojami Garmin GPS experts ir Matlab programų paketai. Visi matavimai atlikti WGS-84 koordinačių sistemoje, dėl skaičiavimų supaprastinimo duomenys perskaičiuoti į LKS-94 metrinę koordinačių sistemą. Kadangi tūptinė yra laikoma tiese tarp dviejų taškų (5.1 pav.), todėl suformuotų tūpimo ir kilimo trajektorijų paklaidų įvertinimui pasirenkamas tiesinis regresijos modelis, paklaidų koeficientai įvertinami mažiausių kvadratų metodu [30]. Bandymo rezultatai pateikiami grafiškai (suformuota skrydžio trajektorija 3D grafike, skrydžio trajektorija vertikalioje ir horizontalioje plokštumose, bei horizontalios ir vertikalios nuokrypos nuo idealios trajektorijos) . Kiekvieno bandymo rezultatai įvertinami atskirai horizontalioje ir vertikalioje plokštumoje apskaičiuojant vidutinę kvadratinę paklaidą (standartinį nuokrypį nuo idealios tūptinės). Įvertinus kiekvieno bandymo rezultatus apskaičiuojamas vidutinis kvadratinis įvertis nuo idealios tūpimo ir kilimo trajektorijos.

6.5. GPS bandymo rezultatai

Bandymas buvo atliekamas 2013-05-17 (EGNOS signalų nepavyko užfiksuoti, todėl buvo naudojami tik GPS signalai), kaip jau minėta ankstesniame skyriuje bandymo metu buvo atlikti 8 bandymai skirtingomis oro sąlygomis, kiekvienu atveju formuojant tūptinę bei orlaivio kilimą. Matuojamos GPS paklaidos. Šiame skyriuje pateikiama tik 4 bandymų rezultatai, likę bandymų rezultatai pateikti 1 priede.

Pirmojo bandymo metu (imituojant tūptinę, imtuvas Garmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: dangus giedras, drėgnis 81 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.9 pav..



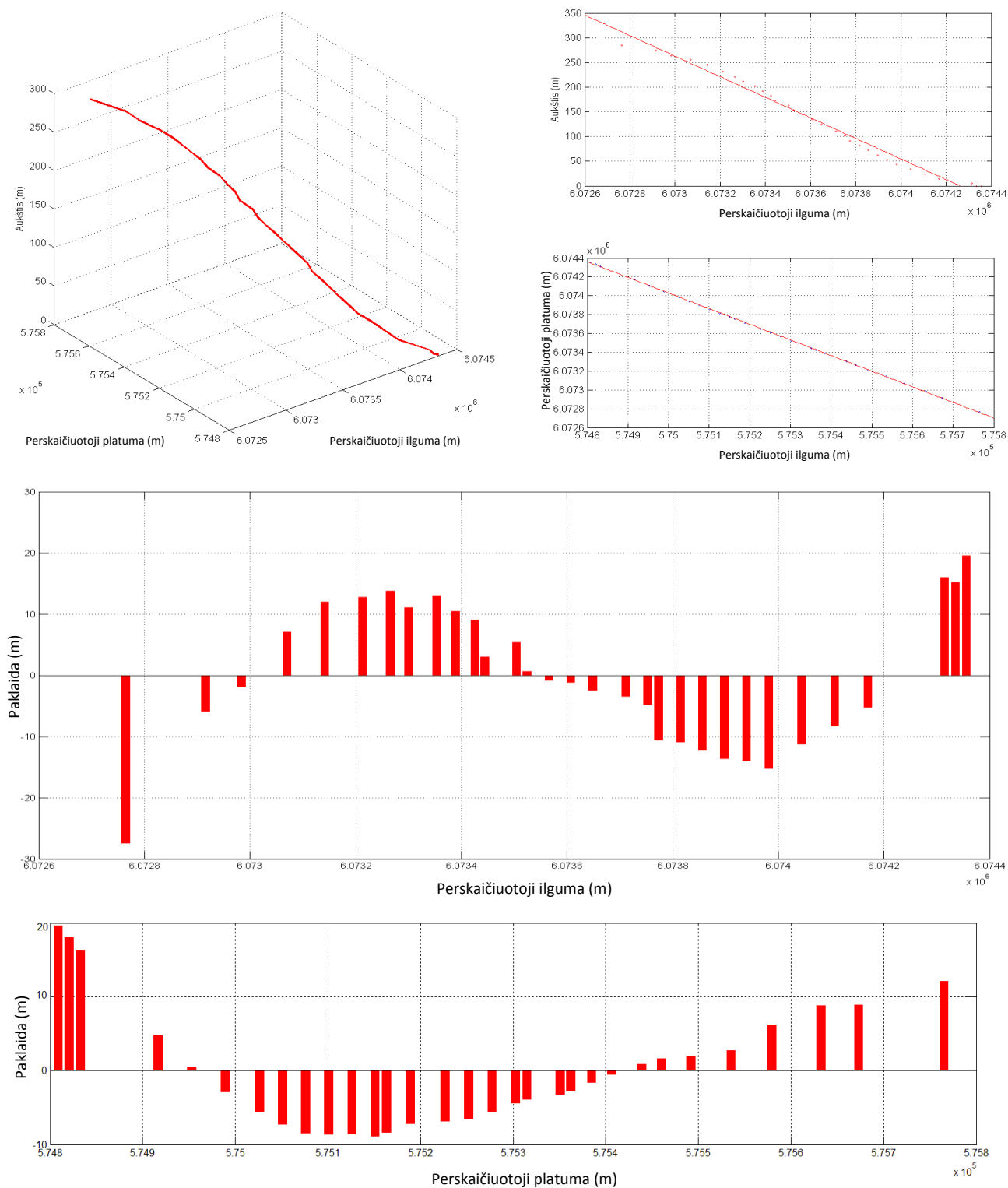
6.9 pav. Pirmojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 11,5 \text{ m}$; $\partial_h = 8,8 \text{ m}$

Apskaičiuota vidutinė kvadratinė paklaida vertikalioje (∂_v) ir horizontalioje (∂_h) plokštumose pagal formulę:

$$\partial_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^i (\Delta x)^2} \quad (6.1)$$

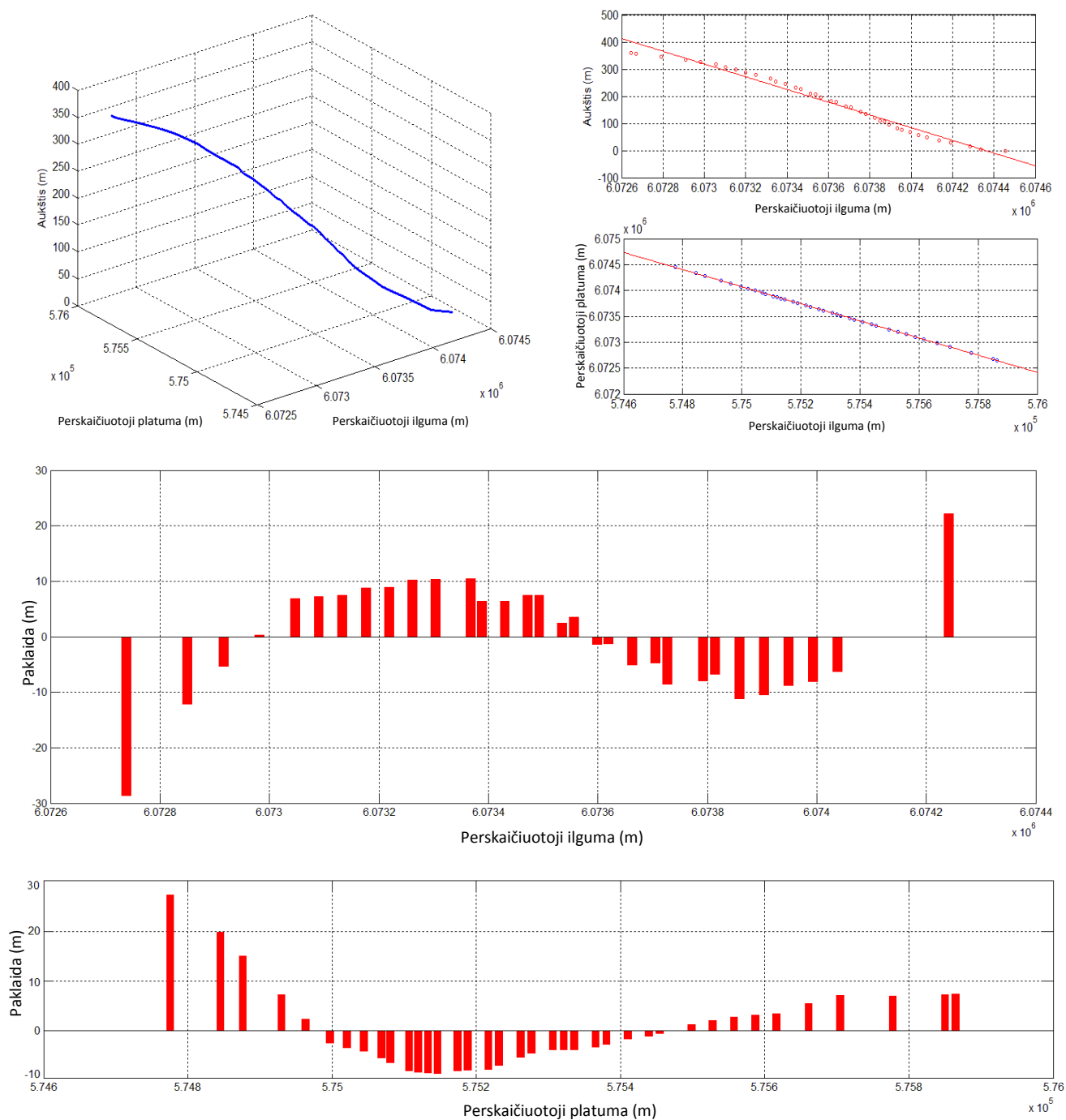
kur: n - matavimų skaičius, Δx - paklaidos dydis.

Antrojo bandymo metu (imituojant kilimą, imtuvas Garmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: dangus giedras, drėgnis 81 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.10 pav..



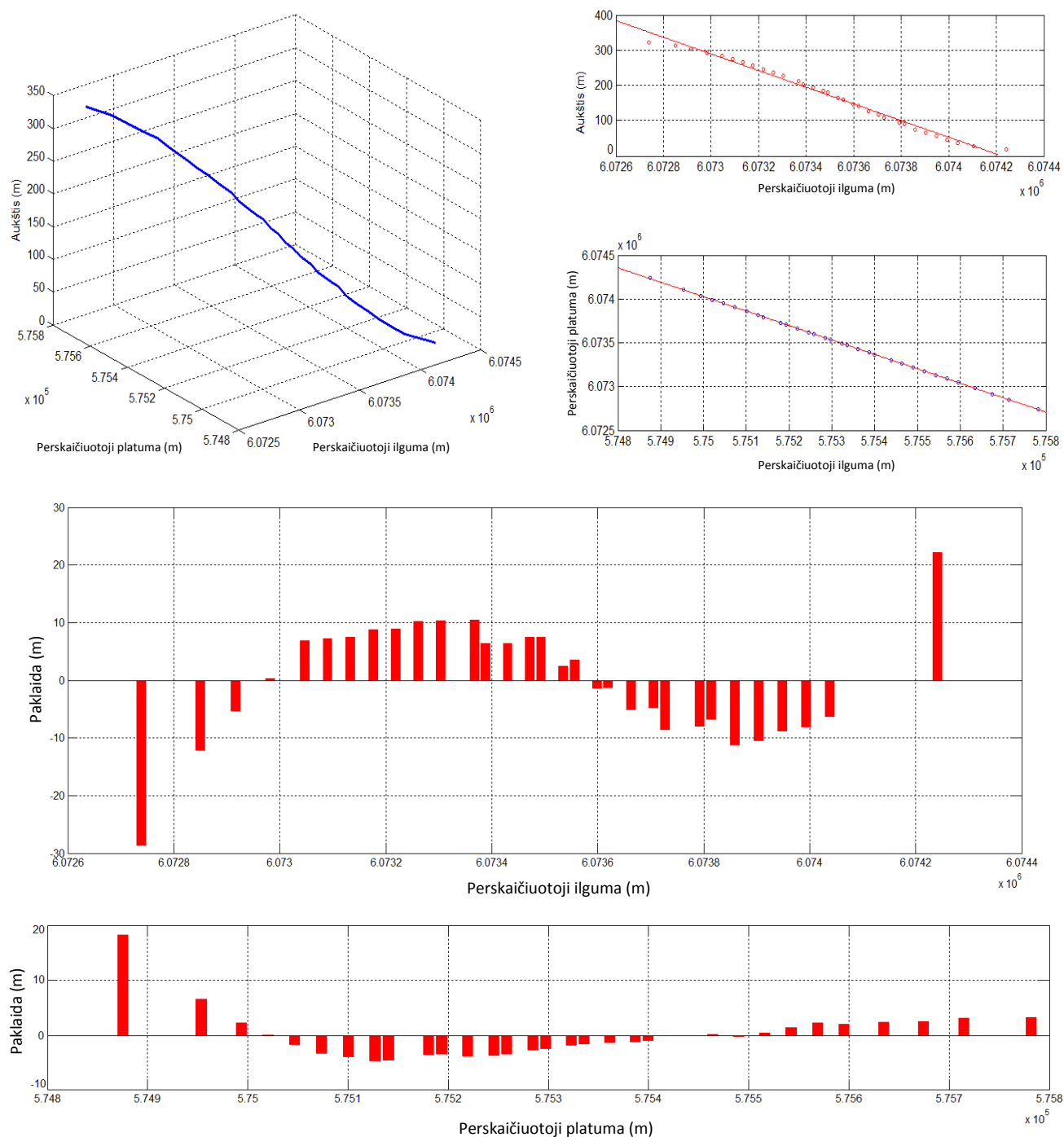
6.10 pav. Antrojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 11,8 \text{ m}$; $\partial_h = 8,7 \text{ m}$

Trečiojo bandymo metu (imituojant tūptinę, ArduPilot ir Media Tek GPS imtuvas) oro sąlygos: dangus giedras, drėgnis 81 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.11 pav..



6.11 pav. Trečiojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 10 \text{ m}$; $\partial_h = 8,6 \text{ m}$

Ketvirtojo bandymo metu (imituojant kilimą, ArduPilot ir Media Tek GPS imtuvas) oro sąlygos: dangus giedras, drėgnis 81 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.12 pav..

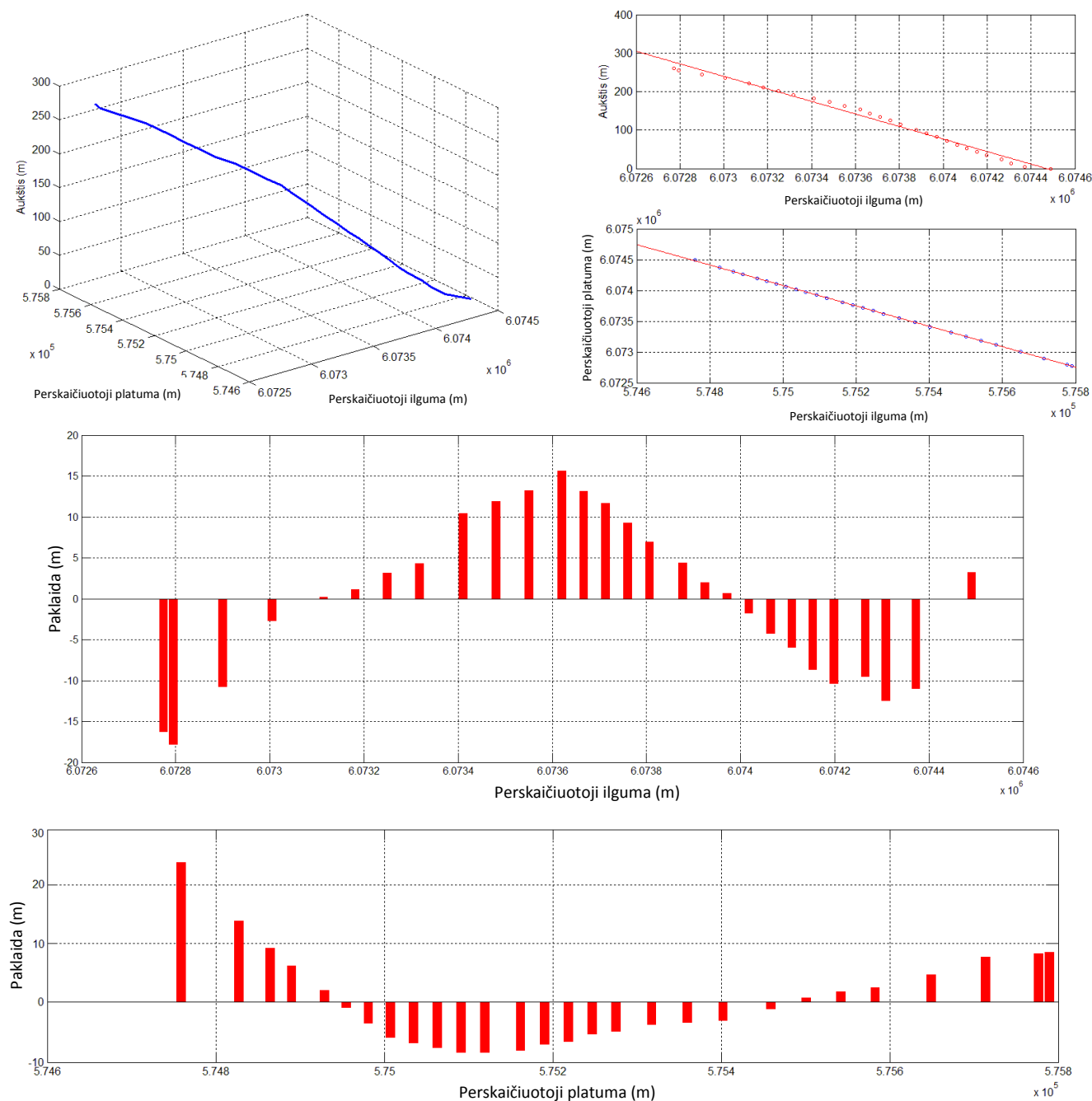


6.12 Ketvirtojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 10,26 \text{ m}$; $\partial_h = 4,8 \text{ m}$

6.6. GPS ir EGNOS bandymo rezultatai

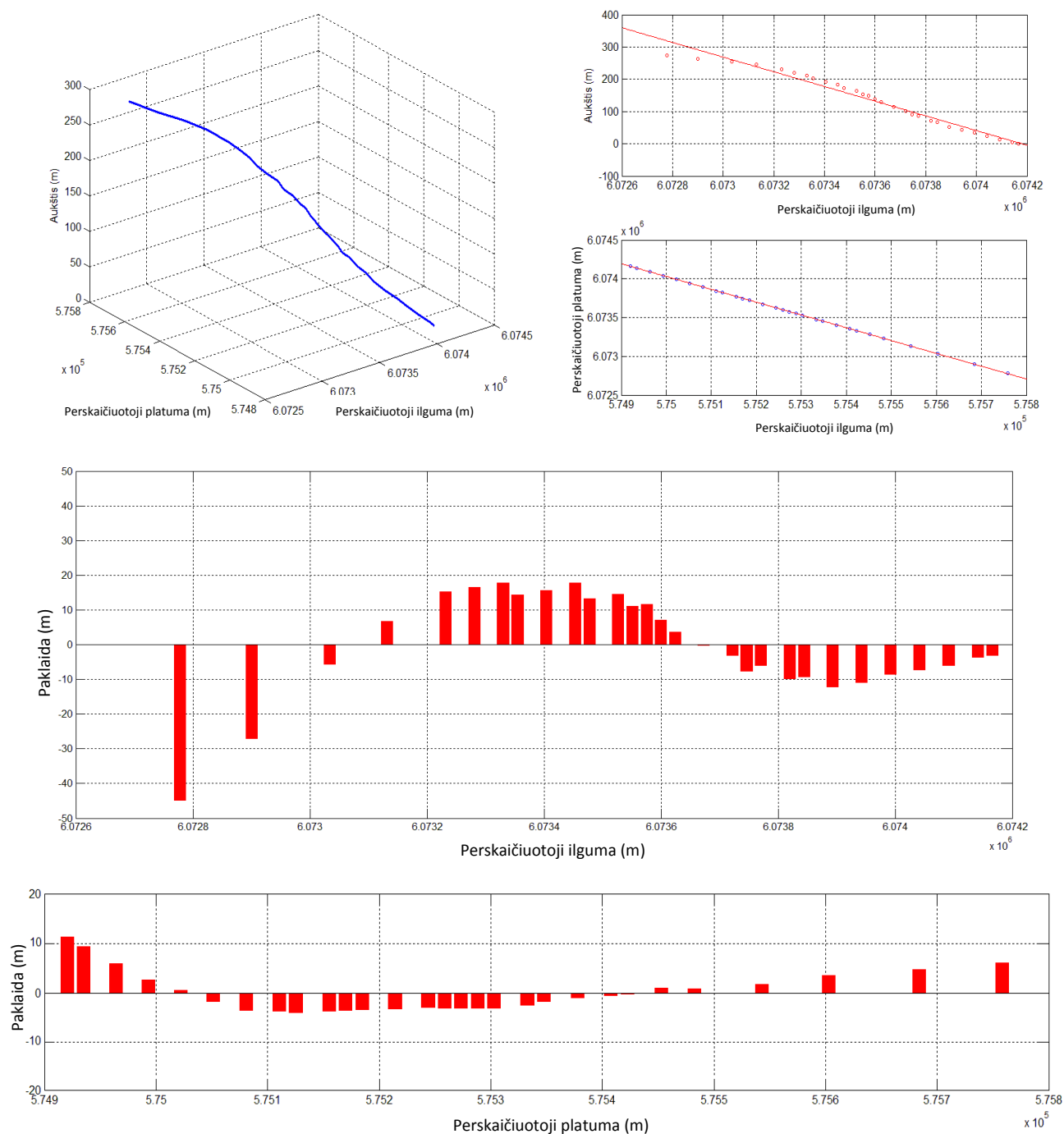
Bandymas buvo atliekamas 2013-05-18, kaip jau minėta ankstesniame skyriuje bandymo metu buvo atlikti 8 bandymai skirtingomis oro sąlygomis, kiekvienu atveju formuojant tūptinę bei orlaivio kilimą. Matuojamos GPS paklaidos naudojant diferencinių stočių EGNOS signalus. Šiame skyriuje pateikiama tik keletas bandymo rezultatų, likę bandymo rezultatai pateikti 2 priede.

Pirmojo bandymo metu (imituojant tūptinę, imtuvas Garmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.13 pav..



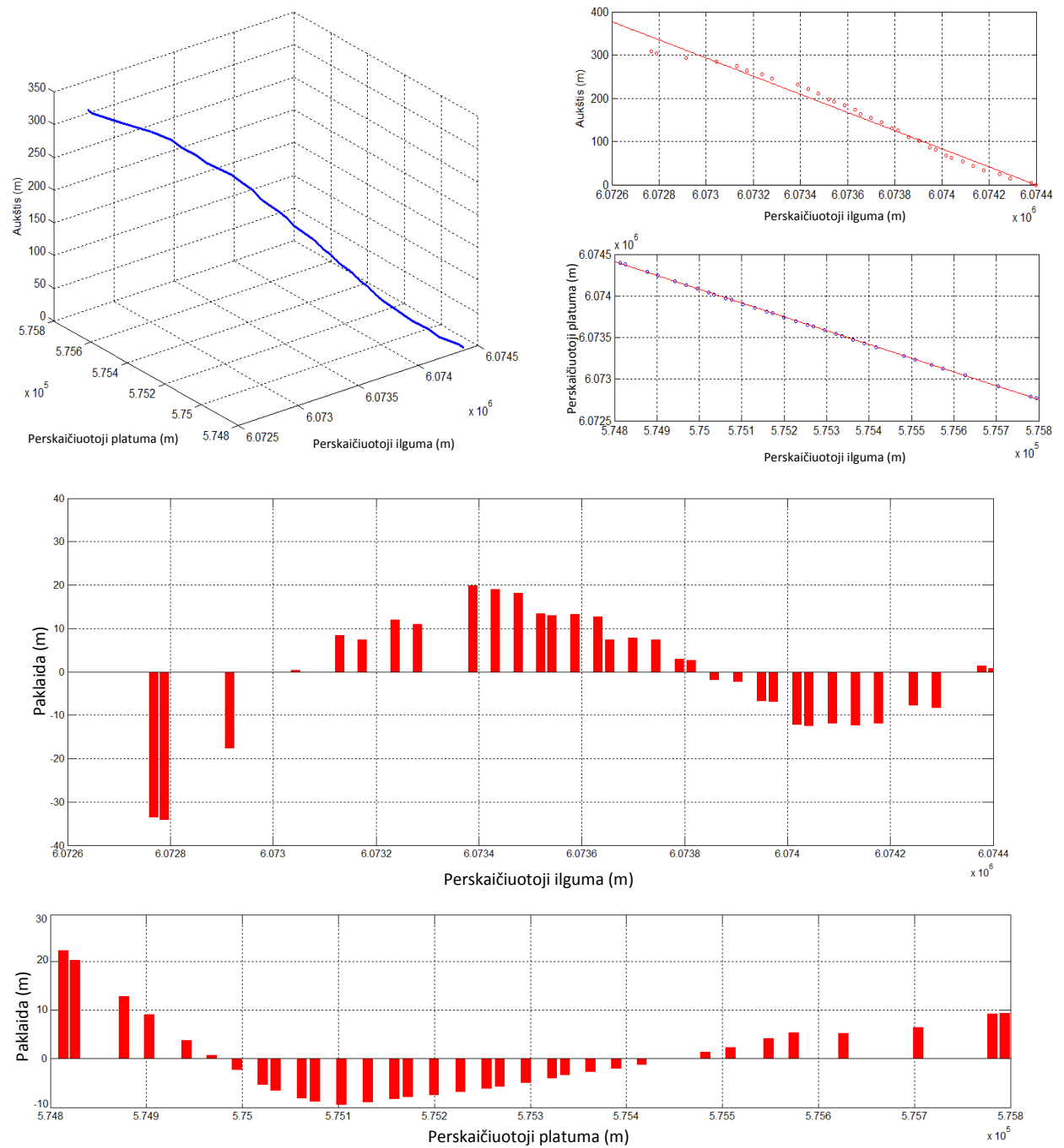
6.13 pav. Pirmojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 9,5 \text{ m}$; $\partial_h = 7,8 \text{ m}$

Antrojo bandymo metu (imituojant kilimą, imtuvas Garmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.14 pav..



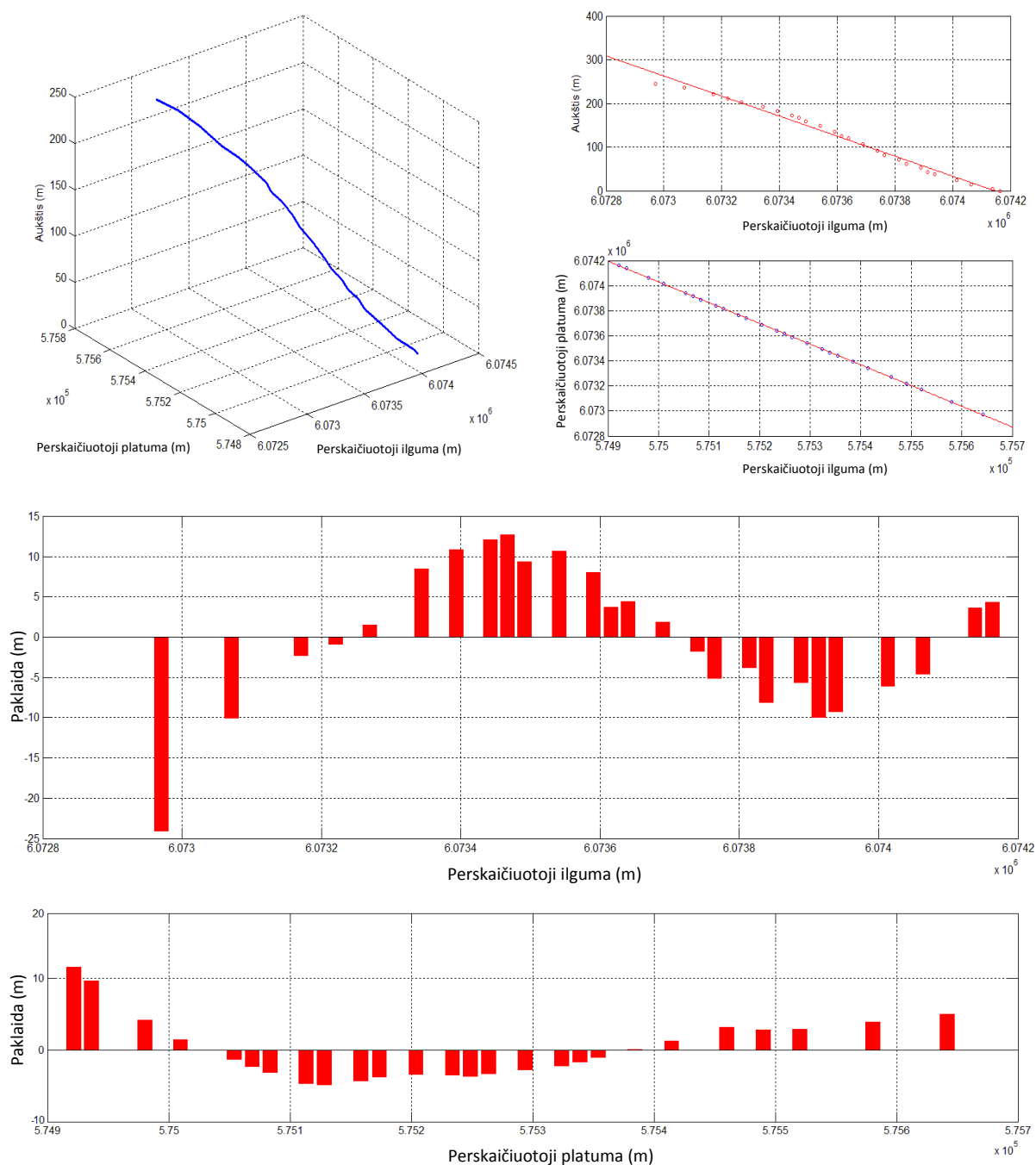
6.14 pav. Antrojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 14,5 \text{ m}$; $\partial_h = 4,2 \text{ m}$

Trečiojo bandymo metu (imituojant tūptinę, imtuvas ArduPilot ir Media Tek GPS) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.15 pav..



6.15 pav. Trečiojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 13,6 \text{ m}$; $\partial_h = 8,3 \text{ m}$

Ketvirtojo bandymo metu (imituojant kilimą, imtuvas ArduPilot ir Media Tek GPS) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.16 pav..



6.16 Ketvirtojo bandymo duomenys: $\partial_v = 8,58 \text{ m}$; $\partial_h = 8,4 \text{ m}$

6.7. Bandymų rezultatų analizė

Šiame skyriuje įvertinamos vidutinės bandymų paklaidos vertikalioje ir horizontalioje plokštumose skirtingomis oro sąlygomis naudojantis tik GPS ir GPS kartu su EGNOS (kaip minėta 6.5 poskyryje EGNOS signalų 2013-05-17 užfiksuoti nepavyko. Norint šią sistemą naudoti tiksliam artėjimui tūpti prieinamumas turi būti 100 proc. [10], todėl tolimesnė šios bandymų dalies analizė atliekama tik norint ištirti EGNOS diferencinių pataisų poveikį matavimų tikslumui), taip pat naudojamų skirtingų gamintojų imtuvų matavimų gautų paklaidų palyginimas (6.1 lentelė).

GPS bandymų vidutinis kvadratinis paklaidų, gautų skirtinguose bandymuose, įvertis:

$$\Delta \sigma = \frac{\sum \partial_i}{n} \quad (6.2)$$

kur: n-matavimų skaičius, ∂_i -paklaidos dydis.

6.1 lentelė: Bandymo rezultatų palyginimas

Paklaida	Sistema	Imtuvas	
		Garmin eTrex Venture HC	ArduPilot ir Media Tek GPS
Vidutinis kvadratinis įvertis vertikalioje plokštumoje	GPS	11,82 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis vertikalioje plokštumoje	GPS ir EGNOS	12,02 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis horizontalioje plokštumoje	GPS	8,08 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis horizontalioje plokštumoje	GPS ir EGNOS	6,69 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis vertikalioje plokštumoje (normaliomis oro sąlygomis)*	GPS	10,89 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis horizontalioje plokštumoje (normaliomis oro sąlygomis)*	GPS	7,73 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis vertikalioje plokštumoje (sudėtingomis oro sąlygomis)**	GPS	12,75 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis horizontalioje plokštumoje (sudėtingomis oro sąlygomis)**	GPS	8,43 m	
Vidutinis kvadratinis įvertis vertikalioje plokštumoje matuojant skirtingais imtuvais	GPS	12,48 m	11,17 m
Vidutinis kvadratinis įvertis horizontalioje plokštumoje matuojant skirtingais imtuvais	GPS	8,45 m	7,7 m
Vidutinis kvadratinis įvertis vertikalioje plokštumoje matuojant skirtingais imtuvais	GPS ir EGNOS	12,45 m	11,35
Vidutinis kvadratinis įvertis horizontalioje plokštumoje matuojant skirtingais imtuvais	GPS ir EGNOS	7,03 m	6,35 m

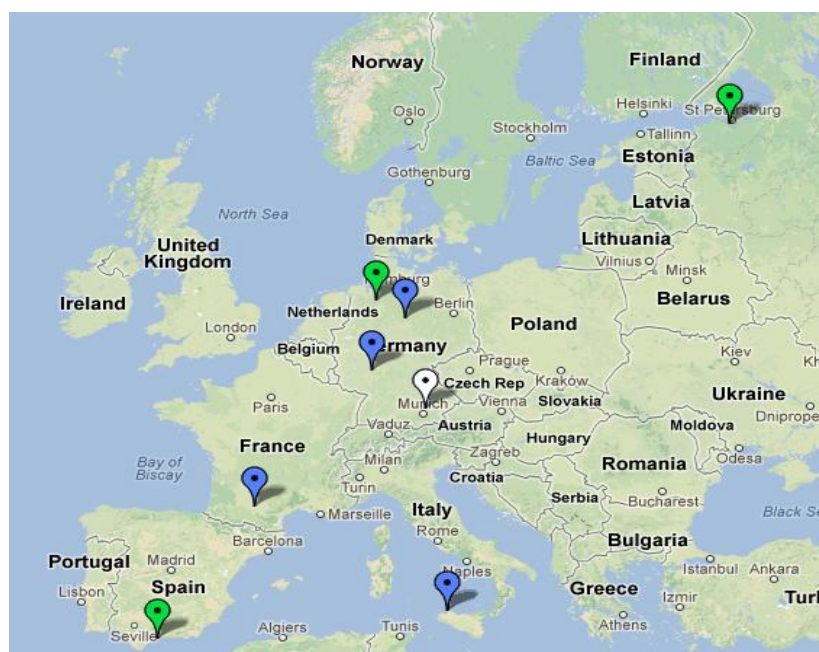
* giedras dangus, mažas debesuotumas.

**didelis debesuotumas, lietus, griauštinis.

Iš bandymų rezultatų, pateiktų 6.1 lentelėje, galima matyti, GPS sistemos vietos nustatymo tikslumą įtakoja oro sąlygos, t.y. tikslumas mažėja ypač vertikalioje plokštumoje vidutiniškai 2 m (EGNOS vietos nustatymo tikslumas atsižvelgiant į oro sąlygas nenustatytas, kadangi susidarius sudėtingoms oro sąlygoms, signalas bandymų atlikimo rajone nebegaunamas, t.y. sistema netinkama naudojimui). Vietos tikslumas taip pat priklauso nuo naudojamo imtuvo tikslumo, šiuo atveju Garmin eTrex Venture HC tikslumas tiek horizontalioje, tiek vertikalioje plokštumoje yra vidutiniškai 1 m mažesnis nei Media Tek GPS. GPS vidutinis vietos nustatymo tikslumas šiuo atveju vertikalioje plokštumoje yra didesnis nei GPS naudojant EGNOS diferencines pataisas, tačiau horizontalioje plokštumoje GPS vidutinis tikslumas mažesnis 1,39 m. Diferencinių signalų naudojimas padidina GPS sistemos tikslumą horizontalioje plokštumoje, tačiau šiuo atveju diferencinis signalas nėra užtikrinamas 100 proc., kadangi nėra įrengta vietinė diferencinė stotis (GBAS).

6.7.1. GBAS taikymo galimybės

Kaip jau minėta 6.3 skyriuje Lietuvoje neįrengta GBAS sistema, ir nebuvo galimybės turėti imtuvą, galintį priimti GBAS diferencines pataisas, todėl realus šios sistemos bandymas negali būti atliktas. Dėl šios priežasties, norint išsamiau išnagrinėti GBAS sistemos panaudojimo galimybes, pasinaudojau kitose Europos šalyse esančių oro uostų, kuriuose veikia sertifikuotos palydovinės radijonavigacijos antžeminės patikslinimosistemos (6.17 pav.), atliktų šių sistemų bandymų duomenimis.

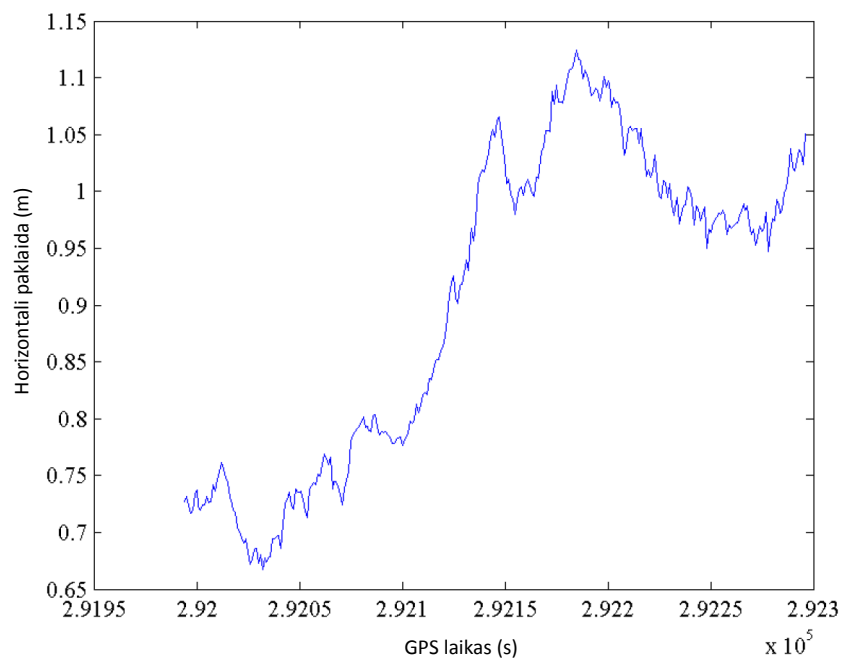


6.17 pav. GBAS stotys Europoje [27]

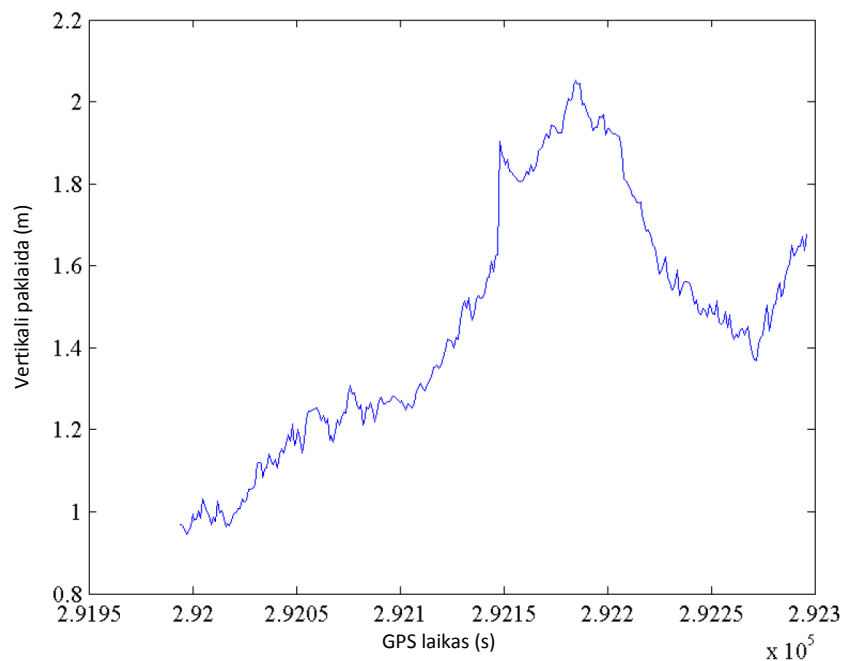
Europoje įrengtos 7 GBAS sistemos, 4 iš jų Vokietijoje: Braunšveige, Brėmene, Frankfurtas.M. ir Miunchene; Prancūzijoje: Tulūzoje; Ispanijoje: Malagoje; Italijoje: Palerme.

Šiam tyrimui pasirenkami du oro uostai aprūpinti sertifikuota GBAS įranga, kuriuose buvo atlikta daugiausia tyrimų (Braunšveigo (6.18 ir 6.18 pav.) ir Tulūzos (6.2 lentelė). Braunšveigo oro uoste įrengta NPPF Spectr LCC_A-2000, Tulūzos oro uoste Thales ATM AS615 GBAS sistemos

Braunšveige atliktų tyrimų rezultatai[28]:



6.18 Paklaida horizontalioje plokštumoje



6.19 Paklaida vertikalioje plokštumoje

Tulūzoje atliktų tyrimų rezultatai:

6.2 lentelė. Tulūzos GBAS bandymo rezultatai [29]

Parametrai		GBAS
Tikslumas	Horizontali plokštuma	1,06 m
	Vertikali plokštuma	1,86 m
Integralumas	Horizontali plokštumas	4,43 m
	Vertikali plokštuma	7,18 m
Prieinamumas	Netiksliam artėjimui	100 %
	CAT-1	
Patikimumas	Netiksliam artėjimui	1
	CAT-1	

6.7.2. GBAS bandymų rezultatų, gautų kituose pasaulio oro uostuose, palyginimas su Vilniaus oro uoste atliktais GPS bandymais

Šiam sistemų palyginimui (6.3 lentelė) pasinaudojau 6.7.1 skyriuje pateiktais Braunšveigo ir Tulūzos oro uostų GBAS sistemų tyrimo duomenimis.

6.3 lentelė. Sistemų parametų palyginimas

Parametrai		Braunšveigo	Tulūzos	VNO	
		GBAS		GPS	GPS+EGNOS
Tikslumas	Horizontali plokštuma	1,13 m	1,06 m	8,08 m	6,69 m
	Vertikali plokštuma	2,1 m	1,86 m	11,82 m	12,02 m
Integralumas	Horizontali plokštumas	4,61 m	4,43 m	-	-
	Vertikali plokštuma	7,19 m	7,18 m	-	-
Prieinamumas	Netiksliam artėjimui	100 %	100 %	-	-
	CAT-1				
Patikimumas	Netiksliam artėjimui	1	1	-	-
	CAT-1				

6.4 lentelė CAT I-III tūpimo pagal prietaisus kategorijos reikalavimai [10]

Kategorija	Paklaida vertikalioje plokštumoje	Paklaida horizontalioje plokštumoje
CAT-I	4,4 m	$\pm 10,5$ m
CAT-II	1,7 m	$\pm 7,5$ m
CAT-III	0,6 m	± 3 m

Iš pateiktų bandymų rezultatų matyti, kad viena GPS sistema netenkina 6.4 lentelėje pateiktų reikalavimų tūpimo pagal prietaisus sistemoms, tačiau įrengus oro uoste palydovinės radijo navigacijos antžeminę patikslinimo sistemą (GBAS), sistemos tikslumas, remiantis 6.3 lentelėje pateiktais duomenimis, atitinka I kategoriją.

7. REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

1. Šiame darbe išnagrinėta palydovinės radijo navigacijos antžeminė patikslinimo sistema, naudojama tiksliajam tūpimui pagal prietaisus GBAS, jos panaudojimo galimybės didžiuosiuose Lietuvos oro uostuose infrastruktūros, ekonominiu ir tikslumo požiūriais.

2. Siekiant maksimaliai išnaudoti Lietuvos oro uostų galimybes ir sumažinti oro eismo paslaugų teikimo kainą, bei padidinti skrydžių saugumą, tikslinga Lietuvos didžiuosiuose oro uostuose įrengti palydovinės radijo navigacijos antžemines patikslinimo sistemas GBAS.

3. Tyrimai atlikti naudojant GPS imtuvus Vilniaus tarptautiniame oro uoste, parodė, kad GPS tikslumas nėra pakankamas pagal tikslojo tūpimo pagal prietaisus kategorijų reikalavimus.

4. Vidutiniai kvadratiniai įverčiai GPS matavimams gavosi: vertikalioje plokštumoje 11,82 m, horizontalioje plokštumoje 8,08 m. Tuo tarpu jei būtų buvus galimybė panaudoti GBAS sistemą ir jos borto įrangą, šie įverčiai, kaip rodo tyrimai kituose oro uostuose: vertikalioje plokštumoje 2,1 m, horizontalioje plokštumoje 1,13 m.

5. Įvertinus surinktus duomenis kituose pasaulio oro uostuose, GBAS sistemos įdiegimas Lietuvos oro uostuose užtikrintų artėjimo tūpti galimybę pagal I ir II tūpimo pagal prietaisus kategorijų reikalavimus.

6. Šia sistema galėtų naudotis ne tik orlaiviai, bet ir kiti vartotojai, turintys imtuvus, galinčius priimti šios sistemos siunčiamas pataisas ir esantys šios sistemos veikimo zonoje.

Šio baigiamojo darbo tyrimų pagrindu buvo perskaitytas pranešimas 16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2013 m. teminėje konferencijoje „Aviacijos technologijos“ ir konferencijos darbų leidiniui buvo pristatytas straipsnis „GBAS sistemos taikymo Lietuvos Aviacijoje galimybių tyrimas“.

LITERATŪROS IR INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Savickas A. 2009. Orlaivių valdymas ir navigacija. Vilnius: Technika. 615 p.
2. Blewitt G. 1997. Basics of the GPS Technique. 46 p.
3. El-Rabbany A. 2002. Introduction to GPS: the Global Positioning system. Boston: Artech house. 176 p.
4. GNSS Manual. ICAO, Version 1.0, 2005.
5. Murphy, T. 2008. Implementation and Operational Use of Ground-Based Augmentation Systems (GBASs)—A Component of the Future Air Traffic Management System [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc12/jproc-TMurphy2006101/article.html.
6. Mobinder S., Lawrence R. 2007. Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. New Jersey: Wiley. 550 p.
7. European Organization for Civil Aviation Equipment. 2006. Minimum Operational Performance Standards for GNSS GBAS Ground Equipment to support CAT-I Operations. EUROCAE ED-114. 199 p.
8. Radio Technical Commission for Aeronautics. 2001. Minimum Operational Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA DO-253A. 349 p.
9. Review of tropospheric, ionospheric and multipath data and models for Global Navigation Satellite System [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. sausio 2 d.]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5068392&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5068392.
10. Aeronautical telecommunication. ICAO, Annex 10, 2006.
11. GBAS NSE model for CATII/III autoland simulations) [interaktyvus] [žiūrėta 2012 m. birželio 1d.]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5507222&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5507222.
12. Radio Technical Commission for Aeronautics. 2004. Minimum Aviation System Performance Standards for Local Area Augmentation System (LAAS). RTCA DO-245A. 300 p.
13. Behrend, F. 2011. CAT II / OTS CAT II operations using existing CAT I Ground Based Augmentation System [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą:

- http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6096071&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6096071.
14. NON-Gaussian Error Modeling for GBAS 1 Integrity Assessment [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. sausio 8 d.]. Prieiga per internetą:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6129664&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6129664.
15. GBAS NSE Model for CAT II/III Autoland Simulations [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. vasario 5 d.]. Prieiga per internetą:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5507222&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5507222.
16. Flight Testing and Data Evaluation of Ground –Based Augmentation Systems [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. vasario 5 d.]. Prieiga per internetą:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4106292&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4106292.
17. Murphy T., Harris M. 2012. Fault Modeling for GBAS Airworthiness Assessment [interaktyvus] [žiūrėta 2013 m. rugsėjo 11 d.]. Prieiga per internetą:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/navi.v59.2/issuetoc>.
18. Dorries R., Fricke M. 2002. Development of Approach Procedure Design Criteria for Systems Based on Global Navigation Satellite System (GNSS) with Ground Based Augmentation System (GBAS) Assessment [interaktyvus] [žiūrėta 2013 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą:
<http://www.icas-proceedings.net/ICAS2002/PAPERS/7101.PDF>.
19. Report on the EUROCONTROL XLS Business Case Studies. EUROCONTROL, 2005
20. Belabbas, B. 2010. GBAS Based Autoland System: A Bottom Up Approach for GAST-D Requirements [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. vasario 16 d.]. Prieiga per internetą:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5507312&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5507312.
21. Karinių orlaivių artėjimo tūpti pagal prietaisus procedūros, naudojimo minimumai šiaulių aerodrome bei karinio aerodromo detalus aprašymas [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. balandžio 2 d.]. Prieiga per internetą: www.ans.lt/static/aviation_data/sup/ey_sup_2012_003_en.pdf.
22. EYPA radijo navigacija ir radijo navigacijos įrenginiai [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. balandžio 2 d.]. http://www.ans.lt/static/aviation_data/aip/maps/ey_ad_2_eypa_lt.pdf.

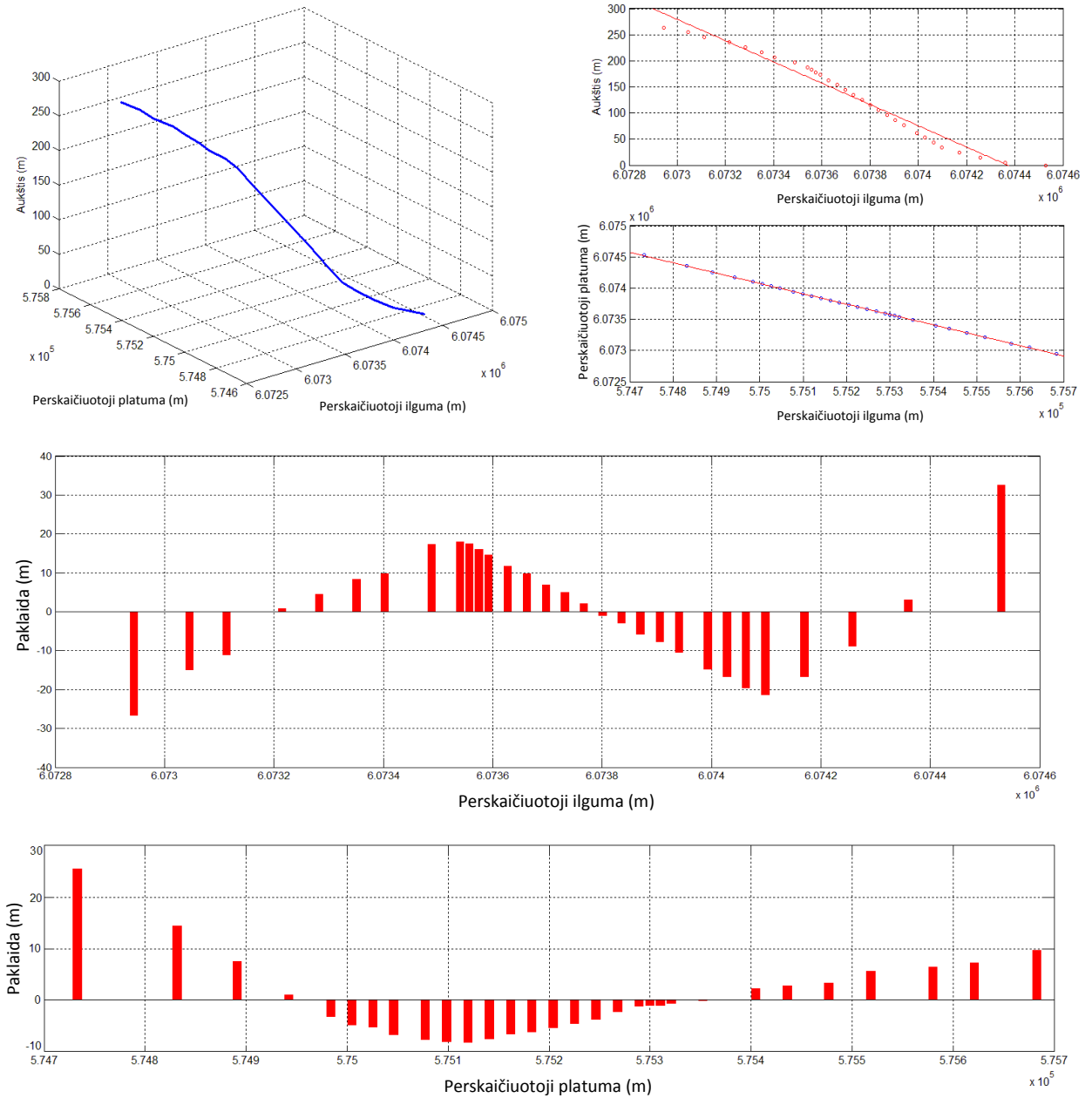
23. ETrex HC series owner's manual) [ineteraktyvus] [žiūrėta 2013 m. gegužės 11d.]. Prieiga per internetą: http://www8.garmin.com/manuals/eTrexLegendHCx_OwnersManual.pdf.
24. Media Tek GPS MT3326 datasheet [ineteraktyvus] [žiūrėta 2013 m. gegužės 11d.]. Prieiga per internetą: http://eugene.mir74.su/pdf/Ciphone_A3/MT3326_GPS.pdf.
25. ArduPilot[ineteraktyvus] [žiūrėta 2013 m. gegužės 11d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ardupilot.co.uk/>.
26. Orų prognozė [ineteraktyvus] [žiūrėta 2013 m. gegužės 17d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gismeteo.lt/>.
27. GBAS sites. [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. gegužės 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://flygls.net/articles/1/welcome-to-your-site>
28. P. Hecker, P. Schachtebeck. 2006. GBAS Flight Testing and Performance Assessment [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. gegužės 2 d.]. Prieiga per internetą: www.tu-braunschweig.de/.../cergal-2006-gbas-abstract-final.pdf.
29. Heinke T., Feuerle T. 2008. Flight Inspecting Ground Based Augmentation System (GBAS)[interaktyvus] [žiūrėta 2013m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.icasco.org/sites/faa/uploads/documents/resources/15th_int_flight_inspection_symposium/gbas.pdf.
30. Least squares [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.mathworks.com/moler/least_squares.pdf.
31. Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS) [ineteraktyvus] [žiūrėta 2012 m. birželio 11d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4745647&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F5%2F4745645%2F04745647.pdf%3Farnumber%3D4745647.pdf>.
32. Stevens B. and Lewis F. *Aircraft Control and Simulation*. 2nd Edition, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J, USA, 2003.
33. Ackland J., Imrich T., Murphy T. 2003. Global navigation system, landing system. 11 p.
34. Pullen S., Walter T., Enge P. 2011. SBAS and GBAS Integrity for Non-Aviation Users: Moving Away from „Specific Risk“ [ineteraktyvus] [žiūrėta 2013 m. gegužės 19 d.]. Prieiga per internetą: <http://waas.stanford.edu/~www/papers/gps/PDF/Integrity%2520for%2520Non-Aviation%2520Users%2520-%2520ITM%25202011.pdf>.

PRIEDAI

1. Priedas

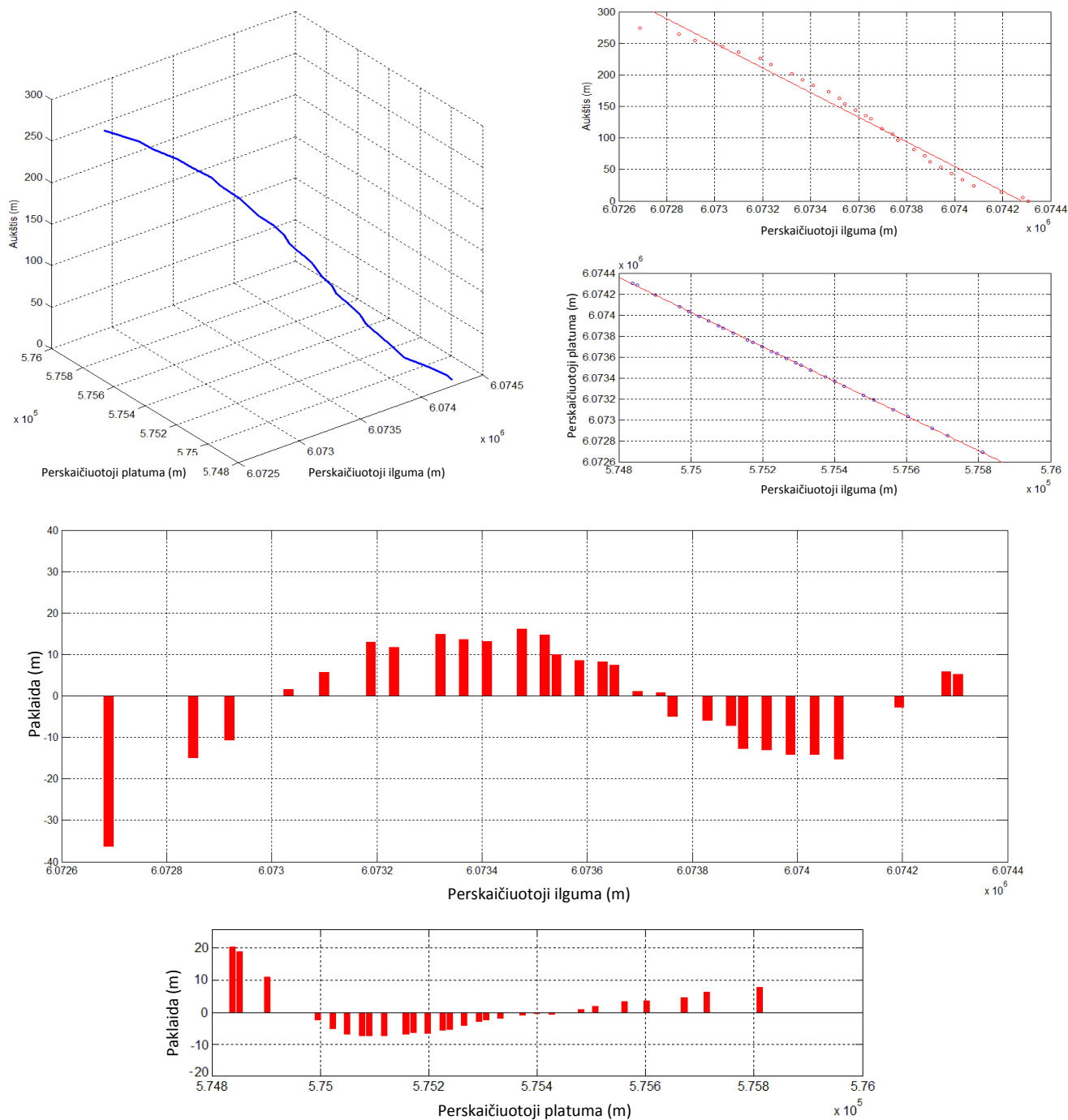
GPS bandymo rezultatai

Penktojo bandymo metu (imituojant tūptinę, imtuvas Garmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: didelis debesuotumas, lietus, drėgnis 91 % [26], griaustinis . Bandymo rezultatai pateikiami 6.18 pav..



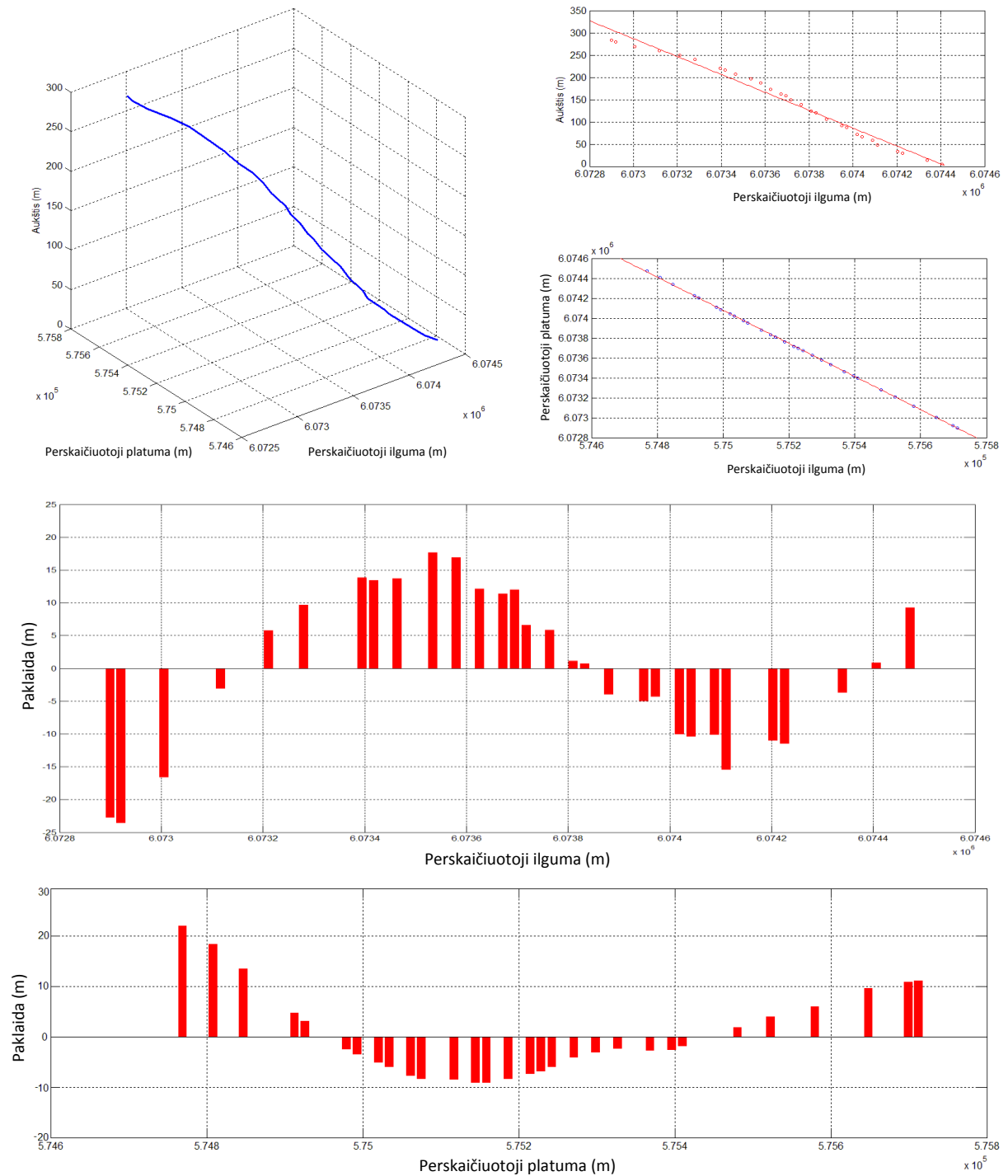
6.18 pav. Penktojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 14,1 \text{ m}$; $\partial_h = 8,7 \text{ m}$

Šeštojo bandymo metu (imituojant kilimą, imtuvas Garmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: didelis debesuotumas, lietus, drėgnis 91 % [26], griaustinis. Bandymo rezultatai pateikiami 6.19 pav..



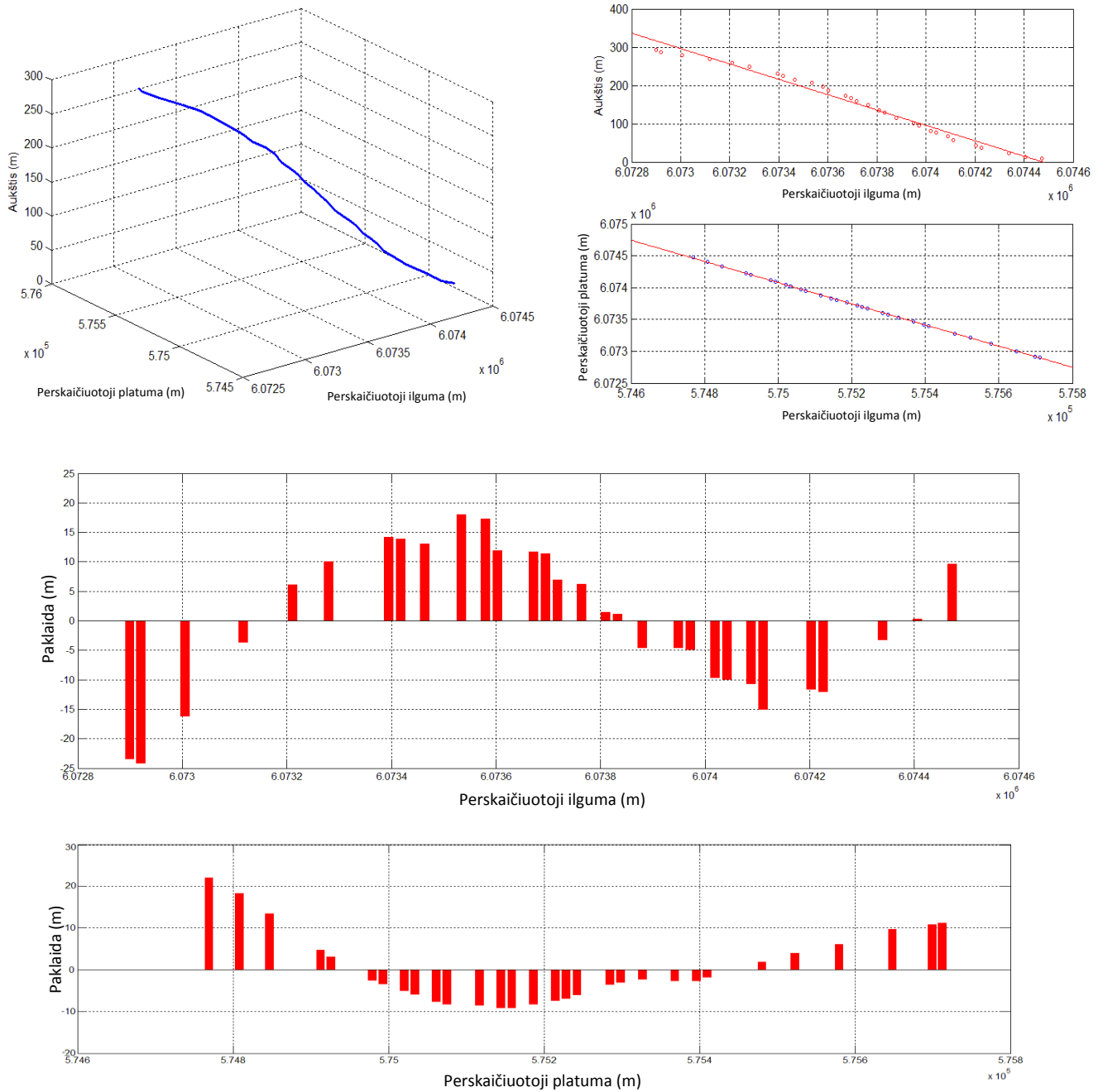
6.19 pav. Šeštojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 12,5 \text{ m}$; $\partial_h = 7,6 \text{ m}$

Septintojo bandymo metu (imituojant tūptinę, ArduPilot ir Media Tek GPS imtuvas) oro sąlygos: didelis debesuotumas, lietus, drėgnis 91 % [26], griaustinis. Bandymo rezultatai pateikiami 6.20 pav..



6.20 pav. Septintojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 12,2 \text{ m}$; $\partial_h = 8,6 \text{ m}$

Septintojo bandymo metu (imituojant kilimą, ArduPilot ir Media Tek GPS imtuvas) oro sąlygos: didelis debesuotumas, lietus, drėgnis 91 % [26], griaustinis. Bandymo rezultatai pateikiami 6.21 pav..

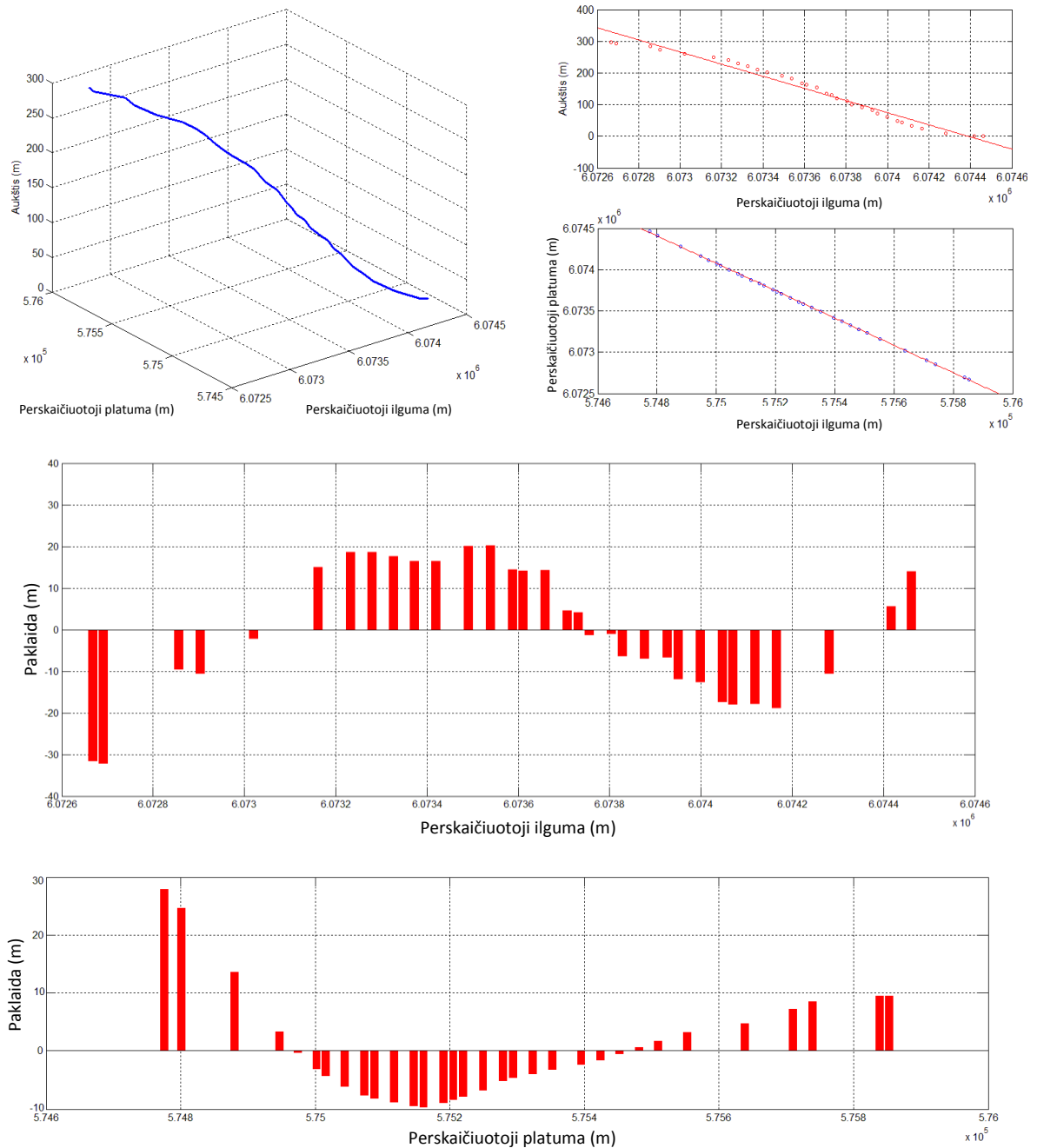


6.21 pav. Aštuntojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 12,2 \text{ m}$; $\partial_h = 8,8 \text{ m}$

2. Priedas

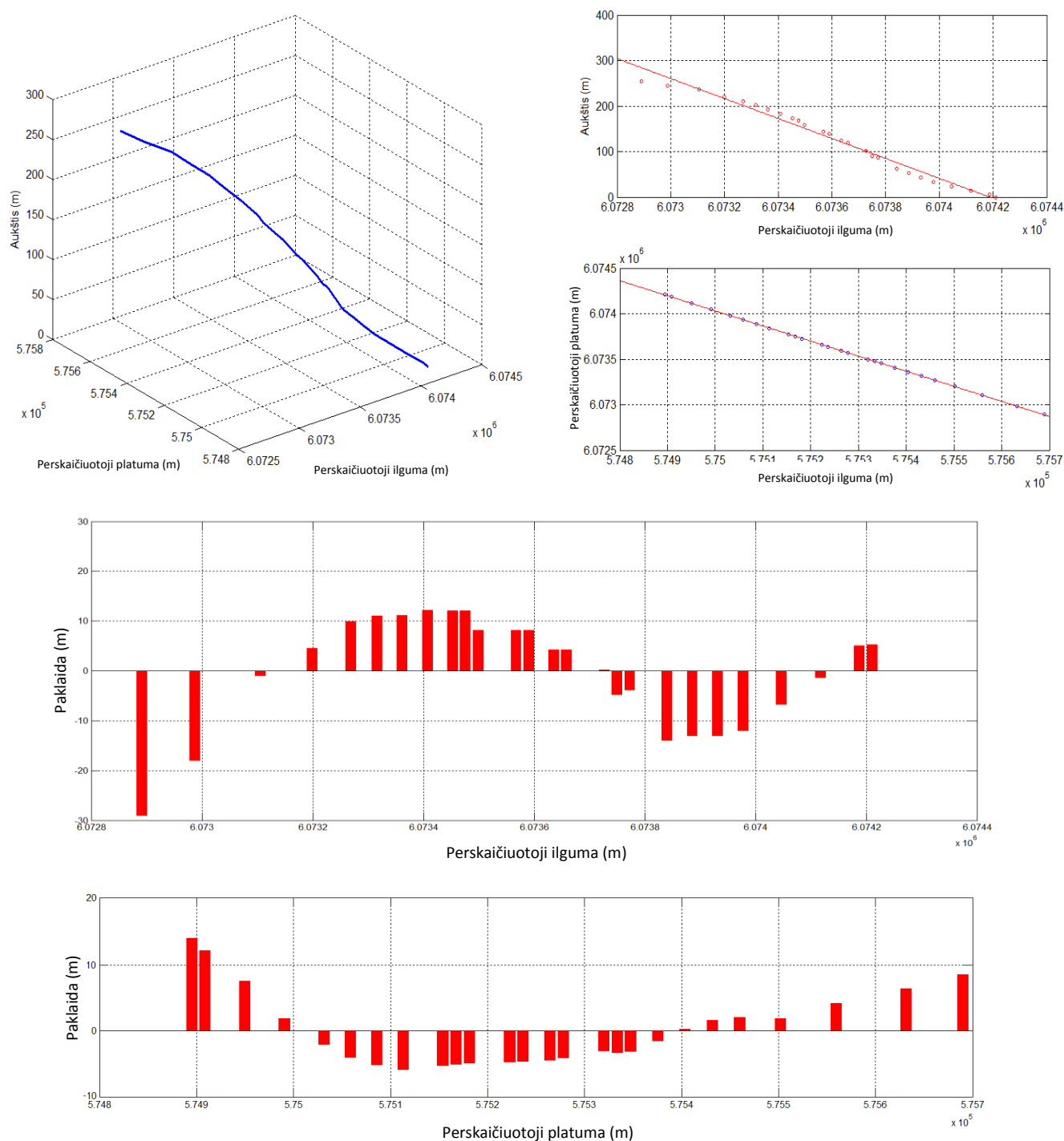
GPS ir EGNOS bandymo rezultatai

Penktojo bandymo metu (imituojant tūptinę, imtuvasGarmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.22 pav..



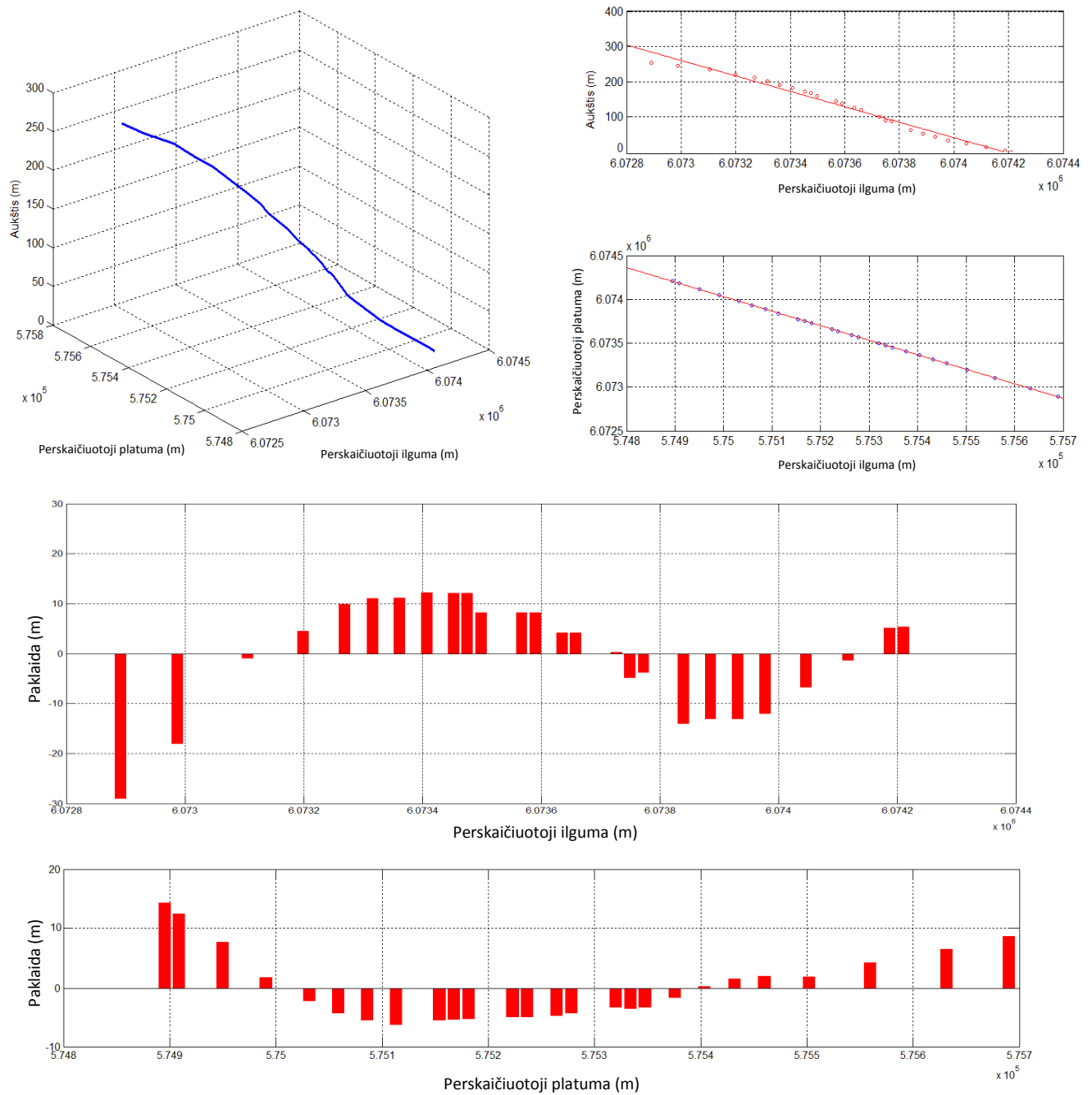
6.22 Penktojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 15,8 \text{ m}$; $\partial_h = 9,6 \text{ m}$

Šeštojo bandymo metu (imituojant kilimą, imtuvasGarmin eTrex Venture HC) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.23 pav..



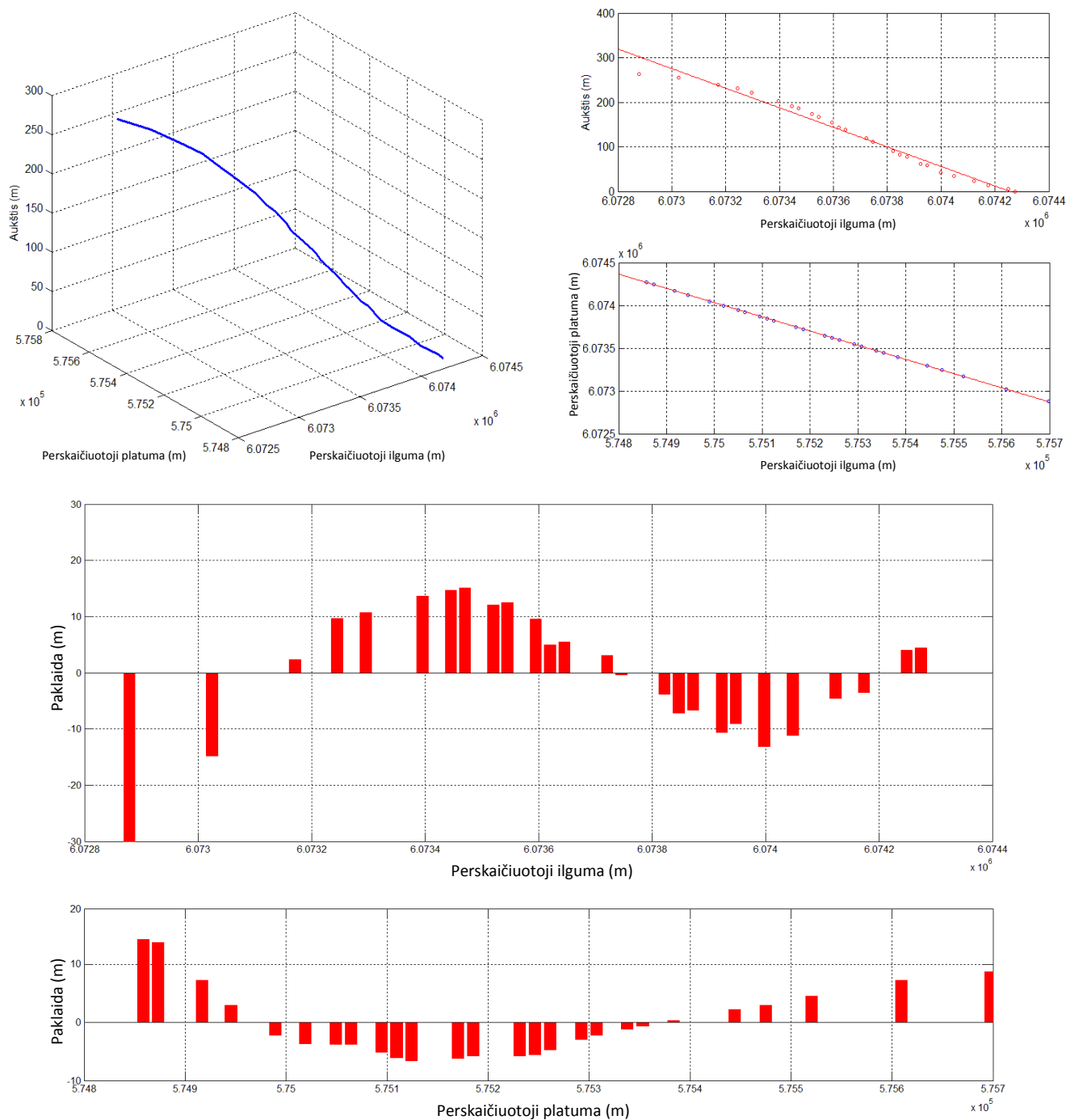
6.23 Penktojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 11 \text{ m}$; $\partial_h = 6,5 \text{ m}$

Septintojo bandymo metu (imituojant tūptinę, imtuvas ArduPilot ir Media Tek GPS) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.24 pav..



6.24 Septintojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 11,9 \text{ m}$; $\partial_h = 6,2 \text{ m}$

Aštuntojo bandymo metu (imituojant kilimą, imtuvas ArduPilot ir Media Tek GPS) oro sąlygos: mažas debesuotumas, drėgnis 84 % [26]. Bandymo rezultatai pateikiami 6.25 pav..



6.25 Aštuntojo bandymo rezultatai: $\partial_v = 11,3 \text{ m}$; $\partial_h = 6,5 \text{ m}$

GBAS SISTEMOS TAIKYMO LIETUVOS AVIACIJOJE GALIMYBIŲ TYRIMAS

Rimas Ambrakaitis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: rimas.ambrakaitis@stud.vgtu.lt;

Anotacija. Straipsnyje aptariama bazinę GPS sistemą papildanti antžeminė sistema GBAS (angl. „Ground Based Augmentation System“). Ši naujos kartos tūpimo pagal prietaisus sistema lyginama su metrinių bangų tūpimo pagal prietaisus sistema (ILS). Parodyta, kad GBAS darbo zona yra didesnė, užtikrinamas didesnis tikslumas. Orlaivis, naudojantis ILS sistema, gali artėti tūpti tik tiesia trajektorija, o naudojantis GBAS gali artėti tūpti bet kokia trajektorija. Be to, ši sistema yra santykinai nebrangi, kompaktiška, savarankiška, gali būti įrengta bet kur pasaulyje, kur tik yra techninės galimybės. GBAS pasižymi ekonomišku, teikia labai tikslią navigacinę informaciją visų oro uosto kilimo ir tūpimo takų atžvilgiu, taip pat oro uosto artėjimo tūpti zonoje. Mažesnės yra ir diegimo, techninės priežiūros bei eksploatacijos išlaidos. Šie teiginiai yra pagrindžiami autoriaus surinktais palyginamaisiais su ILS duomenimis. Darytina išvada, kad GBAS sistemas artimiausiais metais būtų tikslinga įdiegti tarptautiniuose Vilniaus, Kauno, Šiaulių oro uostuose, viena sistema užtikrinant orlaivių ne tik abiem tūpimo kryptimis, bet ir tikslų artėjimą tūpti ir aplinkiniuose mažesniuose oro uostuose, neturinčiuose tūpimo pagal prietaisus sistemų.

Reikšminiai žodžiai: diferencinės stotys, GBAS, GPS, ILS, navigacinės sistemos, paklaidos, palydovas, tūptinė.

Įvadas

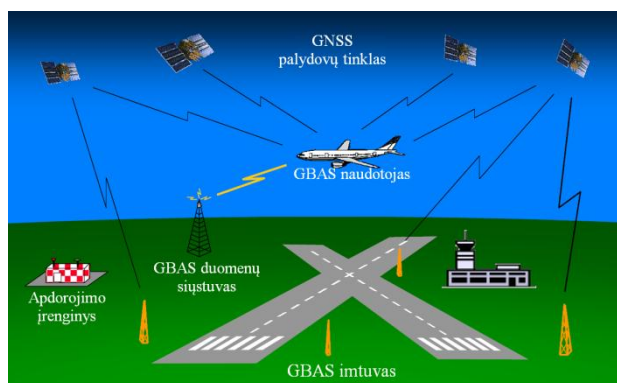
Pastaruoju metu sparčiai augant oro eismo srautams Lietuvos teritorijoje, bei didėjant ne tik pagrindinių, bet ir mažųjų oro uostų apkrovimui vis didesnę svarbą įgauna palydovinės tūpimo pagal prietaisus sistemos. Augantys oro eismo srautai ir didėjančios išlaidos reikalauja vis geresnės oro eismo valdymo sistemos, t.y., sistemos valdančios orlaivio trajektoriją 4 dimensijose (horizontalioje, vertikalioje, išilginėje plokštumose ir laike). GBAS sistema oro transporto naudotojams yra svarbi dėl keleto priežasčių. Tai yra šiuo metu vienintelė patikslinimo sistema galinti patenkinti aviacijos veiklos poreikius pačiuose sudėtingiausiuose skrydžio etapuose (kilimo ir artėjimo tūpti prasto matomumo sąlygomis) [5]. Taip pat ši sistema yra santykinai nebrangi, kompaktiška, gali būti įrengta bet kuriame oro uoste, kur tik yra techninės galimybės. GBAS susideda tik iš vienos pagrindinės sistemos, jai nereikalinga jokia kita didelė, brangi infrastruktūra. Svarbiausia GBAS teikia ekonomišką, labai tikslią navigacijos informaciją visų oro uosto kilimo-tūpimo tako atžvilgiu. Mažesnės įrengimo, aptarnavimo ir eksploataavimo išlaidos. Dėl šių priežasčių ši sistema turėtų tapti nepakeičiama priemone artėti ir tūpti pagal prietaisus Lietuvos oro uostuose.

GBAS tūpimo pagal prietaisus sistema

GBAS sistema teikia vietos globalios palydovinės sistemos (GNSS) patikslinamuosius duomenis. Sistema sukurta aptarnauti visų kategorijų (nuo CAT-I (sertifikuota) iki CAT III) [6] tūpimo pagal prietaisus sistemas.

Tipinė GBAS sistema susideda iš (1 pav.): antžeminės įrangos, palydovų ir borto įrangos.

Antžeminę įrangą – pagrindinę GBAS dalis, kurią sudaro 3 arba 4 GBAS sistemos imtuvai [6] išdėstyti oro uosto teritorijoje arba arti jo, apdorojimo įrenginys ir siųstuvas.



1 pav. Antžeminė GPS patikslinimo sistema [5]

GBAS, iš esmės, yra vietinė diferencinė palydovinė sistema [6]. Šios sistemos veikimo principo esmė: tiksliai žinomame GBAS imtuvo įrengimo taške, kurio koordina-

tės nustatytos dideliu geodezinio tikslumu, apskaičiuojamos paklaidos įtakojančios pseudo atstumo matavimą, palyginant tikrąjį atstumą su išmatuotuoju pseudo atstumu, kiekvieno matomo palydovo atskirai. Darant prielaidą, kad toje pačioje zonoje visus vartotojus veikia tokie patys paklaidų šaltiniai ir persiunčiant šias pataisas vartotojams padidinamas vietos nustatymo tikslumas, lyginant su GNSS vietos nustatymo tikslumu.

Tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemų palyginimas

Lyginant didžiausiuose Lietuvos oro uostuose naudojamą ILS tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemas su naujos kartos palydovine tūpimo pagal prietaisus sistema GBAS, pastaroji turi keletą svarbių pranašumų. Vienas svarbiausių tas, kad priešingai nei ILS, kuri turi būti įrengta kiekvieno tūpimo-kilimo tako (KTT) gale, viena GBAS sistema gali teikti navigaciją tiksliam tūpimui pagal prietaisus ne tik visuose oro uosto KTT, kuriame įrengta, bet ir tikslųjį artėjimą tūpti aplinkiniuose mažesniuose oro uostuose, kurie nutolę ne toliau kaip 40 km.[6].

Didžiausiame Lietuvoje Vilniaus tarptautiniame oro uoste pagrindiniame KTT (2 pav.) naudojamos dvi ILS tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemos I ir II kategorijos. I kategorijos sistema įrengta 20 KTT, dėl žemės paviršiaus nelygumų, kurie sukelia atspindžius nuo žemės paviršiaus 02 kryptimi ir iškraipo ILS signalus. II kategorijos ILS sistema realizuota 02 KTT, kadangi žemės paviršius yra šiek tiek lygesnis. Atsarginiame KTT tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistema neįrengta.



2 pav. Vilniaus oro uosto ILS ir GBAS sistemų galimas panaudojimas

Realizavus palydovinę tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemą viena GBAS sistema aptarnautų visą oro uostą (2 pav.), t.y. nebereikėtų dviejų ILS sistemų pagrindiniame KTT take, taip pat būtų tikslaus artėjimo galimybė atsarginiame KTT, kuriame šiuo metu neįrengta jokia tūpimo pagal prietaisus sistema. Šiuo metu pagal ICAO reikalavimus [1] GBAS sertifikuota tik I kategorijos tūpimui pagal prietaisus, tačiau artimiausiu metu ketinama šią sistemą sertifikuoti II ir III kategorijų tūpimui pagal prietaisus[5], todėl 02 KTT tūpimo pagal prietaisus kate-

gorija sumažėtų tik laikinai. Tačiau atsirastų vienas didžiausių sistemos pranašumų, tikslaus tūpimo pagal prietaisus paslaugomis galėtų naudotis aplinkiniai mažesni oro uostai (pvz. Kyviškių oro uostas esantis GBAS sistemos veikimo zonoje t.y. iki 40 km atstumu). Taip pat 20 KTT, kuriame šiuo metu veikia I kategorijos tūpimo pagal prietaisus sistema dėl anksčiau minėtų priežasčių, sertifikavus GBAS II arba III kategorijos tūpimui pagal prietaisus šio KTT kategorija galėtų padidėti net iki III, kadangi ši sistema nėra jautri apie KTT esančio žemės paviršiaus nelygumams, bei į jos veikimo zoną pakliūnantiems objektams [4].

Šiuo metu naudojant ILS sistemą susiduriama ir su kitomis problemomis, kurių būtų išvengtas įrengus GBAS. Kiekvienam KTT kuriame įrengta ILS reikalinga kiekvienai ILS priskirti atskirą dažnį, kas oro uostuose sukelia problemų, kadangi galimų dažnių skaičius yra ribotas [4]. Veikimo sutrikimai atsiranda perjungiant ILS aptarnauti kitą KTT kryptį ir taip pakeičiant veikimo dažnį. Šios problemos išvengia GBAS, kadangi ši sistema visus KTT aptarnauja vienu VHF dažniu, todėl ribotas dažnių spektras išnaudojamas daug efektyviau[4].

Saugumo požiūriu GBAS yra saugesnė nei ILS, kadangi GBAS antenos įrengiamos ne prie pat KTT. Nebelieka krypties radijo vedlio antenų KTT galuose, iškilusių ganėtinai aukštai virš KTT lygio, kurias orlaiviams būtina perskristi ir dėl šios priežasties tūpimo taškas pasislenka toliau nuo KTT slenksčio. Taip pat nėra šalia KTT nuolydžio vedlio antenos.

Kituose didžiuosiuose Lietuvos oro uostuose situacija yra analogiška aptartai anksčiau, todėl išsamiau neap-
tartinėjama.

Kauno oro uoste įrengtos dvi II kategorijos ILS sistemos (3 pav.).



3 pav. Kauno oro uosto ILS ir GBAS sistemų panaudojimas

Šiaulių oro uoste pagrindiniame KTT įrengtos dvi I kategorijos ILS tūpimo pagal prietaisus sistemos (4 pav.)

[7]. Atsarginiame KTT neįrengta tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistema.



4 pav. Šiaulių oro uosto ILS ir GBAS sistemų panaudojimas

GBAS sistema ekonominiu požiūriu

Oro eismo paslaugų teikėjui GBAS sistemos įgyvendinimo išlaidas sudaro: įrangos pirkimas, įrengimas ir jų eksploatacija. Pagal šaltinyje [2] pateiktus išlaidų pavyzdžius GBAS ir ILS įrangos atitinkančios CAT-1 kategorijos įrengimui ir aptarnavimui sudaryta 1 lentelė.

1 lentelė. GBAS ir ILS antžeminių sistemų įrengimo kainos.

Elementas	GBAS Kaina (€)	ILS Kaina (€)	Pastaba
Įranga	500 000	336 000	Antžeminės stoties, siųstuvo, imtuvo.
Statybos darbai	44 000	195 000	Platformų, įvairių stočių ir antenų įrengimas.
Instaliavimas ir patikra	120 000	176 000	Parengiamieji darbai, tinklo sujungimas, įrengimas naujos įrangos ir patikrinimas.
Skrydžių bandymai	30 000	30 000	Sistemos sertifikavimas
Eksploatavimo išlaidos (per metus)	43 000	79 000	Atsarginės dalys, įrangos aptarnavimas, personalo paruošimas, ir apskraidomoji kontrolė kartą per metus.

Įrangos kaina lyginat CAT-II, CAT-III sistemos įrengimui yra didesnė nei GBAS CAT-I (apie 1000 000 € [2]). Palyginus pirmos kategorijos GBAS sistemos su pirmos kategorijos ILS pirmų metų įrengimo ir eksploataavimo išlaidas pastarosios sistemos išlaidos didesnės 79 000

€. Didėjant sistemos sudėtingumui, kaip ILS CAT-III, didėja ir eksploataavimo kaina apie 105 000 € per metus, tačiau GBAS eksploataavimo kaina išlieka ta pati.

Išvados

1. Šiame darbe išnagrinėta tikslaus tūpimo pagal prietaisus palydovinė sistema GBAS, jos panaudojimo galimybės didžiuosiuose Lietuvos oro uostuose infrastruktūros ir ekonominiu požiūriu.

2. Siekiant maksimaliai išnaudoti Lietuvos oro uostų galimybes, bei sumažinti oro eismo paslaugų teikimo kainą, bei padidinti skrydžių saugumą, tikslinga Lietuvos didžiuosiuose oro uostuose įrengti palydovines tikslaus tūpimo pagal prietaisus sistemas GBAS.

Padėkos

Dėkoju doc. dr. Algimantui Jakučioniui už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

1. Minimum Operational Performance Standards for GNSS GBAS Ground Equipment to support CAT-I Operations. EUROCAE ED-114, European Organization for Civil Aviation Equipment, September 2006.
2. Report on the EUROCONTROL XLS Business Case Studies. EUROCONTROL, 2005
3. Ackland J., Imrich T., Murphy T. 2003. Global navigation system, landing system. 11 p.
4. Belabbas, B. 2010. GBAS Based Autoland System: A Bottom Up Approach for GAST-D Requirements [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. vasario 16 d.]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5507312&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5507312.
5. Behrend, F. 2011. CAT II / OTS CAT II operations using existing CAT I Ground Based Augmentation System [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6096071&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6096071.
6. Murphy, T. 2008. Implementation and Operational Use of Ground-Based Augmentation Systems (GBASs)—A Component of the Future Air Traffic Management System [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc12/jproc-TMURPHY-2006101/article.html.
7. Karinių orlaivių artėjimo tūpti pagal prietaisus procedūros, naudojimo minimumai šiaulių aerodrome bei karinio aerodromo detalus aprašymas [interaktyvus] [žiūrėta 2013m. balandžio 2 d.]. Prieiga per internetą: www.ans.lt/static/aviation_data/sup/ey_sup_2012_003_en.pdf.

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF GBAS SYSTEM APPLICATION FOR LITHUANIAN AVIATION

Rimas Ambrakaitis

Summary

This article discusses the basic GPS system complement ground system GBAS (Ground based augmentation system). This next generation instrument landing systems is compared with the metric wave instrument landing system (ILS). It is shown that GBAS work area is larger, ensuring greater accuracy. The aircraft which use ILS can approach through only linear landing trajectory, but aircraft which use GBAS can approach through any landing trajectory. In addition, this system is relatively inexpensive, compact, stand-alone, can be installed anywhere in the world, wherever there are technical possibilities. GBAS is characterized by economy and provide highly accurate navigation information for all airport runways respect, as well as the airport approach zone. Lower are the installation, maintenance and operating costs. These claims are justified by the author collected data compared to an ILS. It follows that the GBAS system in the coming years would be appropriate to install in Vilnius, Kaunas, Šiauliai international airports, one system ensures not only the landing of aircraft in both directions, but exact approach and the surrounding smaller airports, that do not have instrument landing system.

Keywords: differential station, GBAS, GPS, ILS, navigation systems, error, satellite, glide path.