



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Darius Leckas

**ELEKTROMECHANINIŲ JUTIKLIŲ TAIKymo NAVIGACIJAI
PATALPŲ VIDUJE TYRIMAS**
RESEARCH OF MEMS APPLICATION FOR INDOOR NAVIGATION

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003
Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

—

(parašas)

prof. habil. dr. R. Martavičius

2014 m. _____ mėn.

__ d.

Darius Leckas

**ELEKTROMECHANINIŲ JUTIKLIŲ TAIKymo
NAVIGACIJAI PATALPŲ VIDUJE TYRIMAS**

**RESEARCH OF MEMS APPLICATION FOR
INDOOR NAVIGATION**

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Vadovas dr. V. Zlosnikas

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Lietuvių k. konsultantė lekt. dr. Vaida Buivydienė

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos
universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas
Pavadinimas **Elektro mechaninių jutiklių taikymo navigacijai patalpų viduje tyrimas**
Autorius **Darius Leckas**
Vadovas **dr. Valerijus Zlosnikas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Pastarųjų metų technologinė puslaidininkinių trimačių mikro struktūrų gamybos procese pažanga leidžia sukurti vis tikslesnius ir patikimesnius tokio tipo elektromechaninius jutiklius. Gerėjanti tokio tipo jutiklių kokybė atveria naujas jų panaudojimo galimybes. Viena jų – vidaus navigacinė sistema. Tokio tipo sistema reikalauja tikslių pagreičio, kampinio greičio ir kitokio tipo duomenų judėjimo trajektorijai nustatyti. Šiame darbe yra apžvelgtos pagrindinės problemos su kuriomis susiduriama kuriant inercines vidaus navigacines sistemas. Apžvelgti, patikrinti ir pasiūlyti alternatyvūs šių problemų sprendimo metodai. Mechaninių jutiklių taikymo navigacijai patalpų viduje tyrimas. Magistro baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos magistro laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. 2014 m.

Prasminiai žodžiai: INS, vidaus navigacija, inercinė navigacinė sistema

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electronic Systems

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

Master Degree Studies **Electronics Engineering** study programme Master Graduation Thesis
Title **Research of MEMS Application for Indoor Navigation**
Author **Darius Leckas**
Academic supervisor **Dr Valerijus Zlosnikas**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

Recent technological improvements in micromachining process allows to produce smaller, cheaper and more accurate MEMS sensors. Better accuracy/size ratio increases MEMS sensors application field. One of most precise sensors looking for field is MEMS based indoor navigation system, which requires precise accelerometer/gyros, to ensure error free estimated position. Current gyros and accelerometers are much less precise than standard laser based gyros and bulk accelerometers. This work describes the main problems of using MEMS for inertial navigation and possible solutions, to minimize estimated position error. Research of MEMS application for indoor navigation. Master thesis for electronics engineer master degree. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius 2014 m.

Keywords: IMU, INS, MEMS, indoor navigation, inertial navigation,

TURINYS

Žymenys ir santrumpos	8
Ivadas	9
Darbo aktualumas ir tikslas	9
Darbo uždaviniai	9
Darbo naujumas ir praktinė nauda.....	11
2. Vidaus pozicionavimo sistemų ir analogiškų tyrimų apžvalga	12
2.1. Neineracinės vidaus navigacinės sistemos.....	12
2.1.1. Analogiškos neineracinės navigacinės sistemos.....	12
2.1.2. Neinercinių navigacinių sistemų palyginimas	14
2.2. Inercinės navigacinės sistemos.....	14
2.2.1. Stabilios platformos INS.....	15
2.2.2. Tiesiogiai sujungtos platformos INS	16
2.2.3. INS naudojami puslaidininkinius jutiklius.....	17
2.2.4. „NavShoe“ technologija	18
2.2.5. „U-blox 3D ADR“ vidaus navigacinė sistema transporto priemonėms.....	18
2.2.6. INS naudojami kelių vaizdo kamerų vaizdų apdorojimą.....	19
Skyriaus išvados	19
3. Vidaus pozicionavimo sistemos, naudojančios elektromechaninius jutiklius, analizė	21
3.1. Žemės traukos kompensacija.....	21
3.2. Puslaidininkinių akselerometrų signalų paklaidos	23
3.2.1. Nuolatinė dedamoji	23
3.2.2. Šiluminis triukšmas signaluose.....	24
3.2.3. Nuolatinės dedamosios svyravimai.....	25
Pagreičio paklaidų suvestinė ir aptarimas	25
Skyriaus išvados	25
4. Elektro-mechaninių jutiklių ir jų duomenų apdorojimo metodų tyrimas	26
4.1. Lygiagretus jutiklių jungimas signalų kokybei pagerinti	26
4.2. Žemų dažnių filtras akselerometrų signalų triukšmui sumažinti.....	31
4.3. Kalmano Filtras triukšmui sumažinti	32
4.4. Giroskopų signalų tyrimas ir apdorojimas	35
4.5. Magnetinio lauko jutiklių signalų tyrimas ir apdorojimas	36
4.6. Barometrų signalų tyrimas ir apdorojimas	38
4.6.1. Žemės traukos kompensacija naudojant ADF	39
4.6.2. Žemės traukos kompensacija naudojant giroskopus.....	40
4.6.3. Žemės traukos kompensacija naudojant orientacijos filtrą.....	41
4.7. Vidaus navigacinės sistemos jutiklių sintezė	42
Skyriaus išvados	43
5. Jutiklių signalų apdorojimo metodų įtakos vidaus navigacijos tikslumui palyginimas	44
5.1. Žemų dažnių filtro įtaka navigacijos tikslumui	44

5.1.1. Žemų dažnių filtro įtaka filtruoti nejudančio akselerometro signalams	44
5.1.2. Žemų dažnių filtro įtaka judančio akselerometro signalams	45
5.2. Kalmano filtro, naudojamo akselerometro duomenims filtruoti, įtaka navigacijos tikslumui	47
5.2.1. Kalmano filtras nejudančio akselerometro duomenims filtruoti	48
5.2.2. Kalmano filtras judančio akselerometro duomenims filtruoti	49
5.3. Orientacijos filtro, naudojamo gravitacijai kompensuoti, tyrimas.....	50
5.3.1. Navigacinės sistemos tikslumas nekintat padėčiai ir orientacijai.....	50
5.3.2. Navigacinės sistemos tikslumas nekintat padėčiai, bet kintant orientacijai	52
5.3.3. Navigacinės sistemos tikslumas kintant padėčiai, bet nekintant orientacijai	53
Skyriaus išvados.....	55
6. išvados	56
Literatūra	58
PRIEDAI	61
1 priedas. Kompaktinė plokštelė	61
2 priedas. Pažyma apie dalyvavimą XVII jaunųjų mokslininkų konferencijoje.....	62

ŽYMENYS IR SANTRUMPOS

MEMS (angl. Microelectromechanical System)	mikroelektromechaninė sistema
GPS (angl. Global Positioning System)	pasaulinė navigacinė sistema
IMU (angl. Inertial Measurement Unit)	inercinio matavimo įtaisas
INS (angl. Inertial Navigation System)	inercinė navigacinė sistema
LED (angl. Light Emitting Diode)	šviesos diodas
SNR (angl. Signal to Noise Ratio)	signalų / triukšmo santykis, STS
I ² C (angl. Inter-Integrated-Circuit)	duomenų perdavimo sąsaja

ĮVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Prieš kelis dešimtmečius mechaniniai judesio jutikliai buvo makromatmenų ir buvo taikomi tik labai brangiuose specifiniuose įrenginiuose, tokiuose kaip kosminiai aparatai, laivai, lėktuvai, prabangūs automobiliai (1980 metų antroje pusėje). Pastarųjų metų technologinė integrinių mikrojutiklių gamybos proceso pažanga leido sumažinti šių jutiklių savikainą, padidinti tikslumą, patikimumą. Tai atveria naujas šių įrenginių panaudojimo galimybes, viena iš jų – mikrojutiklių pagalba veikianti vidaus navigacija [3].

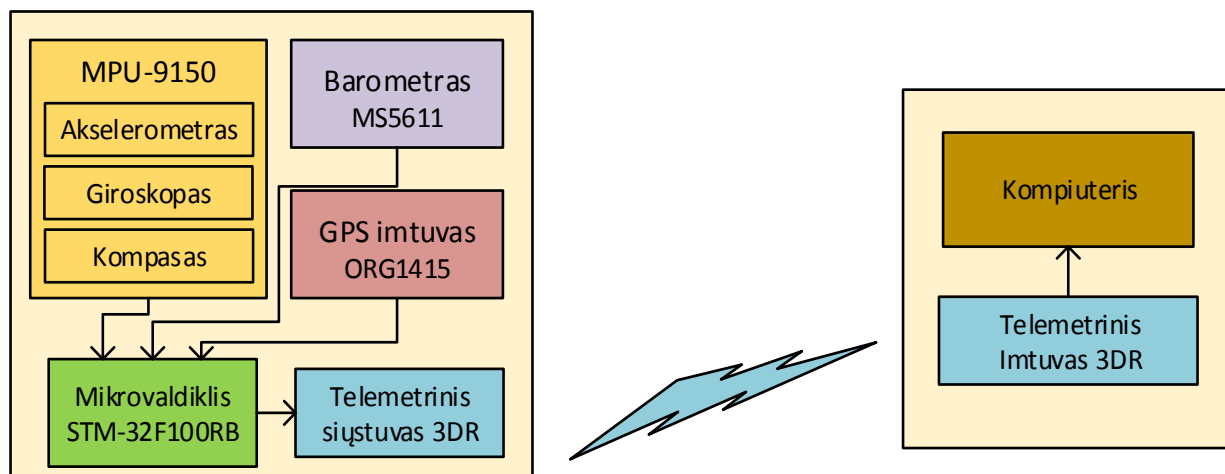
Šiame darbe bus tiriamos problemos, su kuriomis susiduriama naudojant mikrojutiklius inercinėse navigacinėse sistemose, bus pasiūlyti bei išbandyti įvairūs duomenų apdorojimo metodai šioms problemoms spręsti.

Darbo uždaviniai

- atlikti panašių sistemų apžvalgą;
- atlikti panašių INS tyrimų apžvalgą;
- sudaryti elektromechaninių jutiklių tyrimo metodiką;
- ištirti elektromechaninius jutiklius, naudojamus vidaus navigacijoje, ir jų signalų apdorojimo metodus.

Tiriamąjį darbo metu bus naudojami:

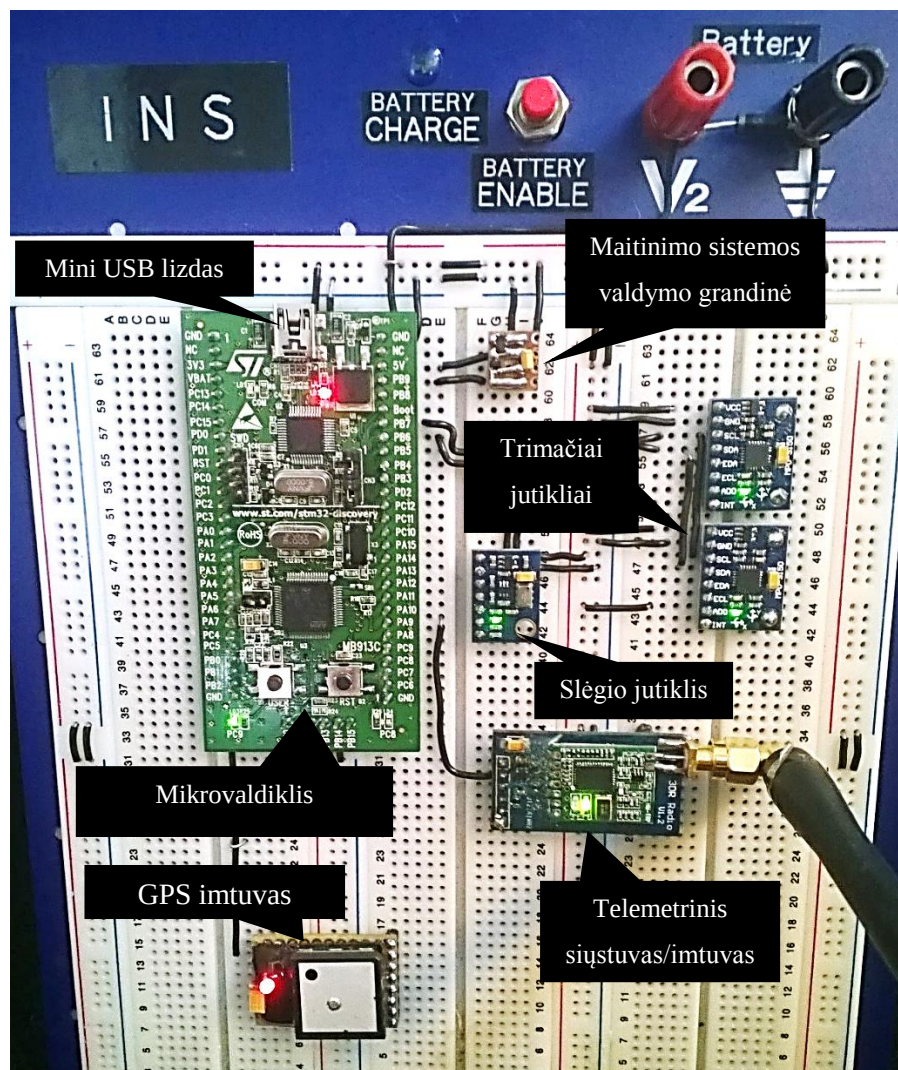
- kompleksinis jutiklis MPU – 9150, kuriame yra 3 ašių akselerometras, 3 ašių giroskopas ir 3 ašių magnetinio lauko jutiklis;
- GPS imtuvas ORG1415;
- mikrovaldiklis STM32F100RB;
- slėgio jutiklis MS5611-01ba03
- bevielis telemetrinis siųstuvas – imtuvas 3DR;
- asmeninis kompiuteris.



1.1 pav. Struktūrinė maketo schema

Struktūrinė maketo schema pavaizduota 1.1 paveiksle. 1.2 paveiksle pavaizduotas pats tyrimo maketas, sukurtas pagal 1.1 struktūrinę schemą. Pagrindinis maketo jutiklis yra MPU-9150 [18, 19, 20], tai 3 ašių pagreičio, kampinio greičio ir magnetinio lauko jutiklis, bei kiti pagalbinių jutikliai: slėgio jutiklis MS-5611 [21], bei GPS imtuvas ORG-1415 [27]. Pagerinti maketo mobilumui, makete bus įrengta galimybė maitinti maketą nuo ličio jonų baterijos. Makete taip pat bus įrengta šios baterijos krovimo galimybė nuo kompiuterio mini USB lizdo. Su 1 Ah baterija, įrenginys galės veikti iki 4 h su įjungtais visais jutikliais. Nesudėtinga lauko tranzistorių schema leis perkrauti visus jutiklius perkraunant mikrovaldiklį.

Atliekant tyrimą, pradžioje bus renkami duomenys iš jutiklių į asmeninį kompiuterį. Mikrovaldiklis STM32f100RB [22, 23, 24, 25, 26] bus naudojamas tik kaip I²C > UART duomenų keitiklis. Kompiuteryje bus renkami kiekvieno jutiklio (akselerometro, giroskopo, magnetometro, barometro imtuvo) duomenys. Vėliau duomenys bus apdorojami įvairiais filtrais. Stebimi duomenų parametrai. Atlikus statinių duomenų filtravimą kompiuteryje MS Excel terpėje, filtrai bus realizuoti mikrovaldiklyje C kalba. Galiausiai bus pateikti įvairių duomenų apdorojimo metodų palyginimas visai sistemai.



1.2 pav. Jutiklių tyrimo maketas

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Rinkoje iki šiol yra didelis navigacinių sistemų, nereikalaujančių jokios išankstinės pastato infrastruktūros, trūkumas. Tai lemia keli faktoriai: a) tokios sistemos, kuri pilnai galėtų būti apibūdinama kaip vidaus navigacinė sistema, veikianti bet kuriame pastate ir užtikrinanti reikiamą tikslumą dar nėra; b) yra daugybė panašių sistemų, tačiau reikalaujančių vienokio ar kitokio tipo vidinės pastato infrastruktūros; c) visiškai inercinės sistemos yra nepakankamo tikslumo norint užtikrinti navigaciją patalpų viduje.

Šiame darbe bus aptariami pagrindiniai sunkumai kuriant elektromechaniniais jutikliais grįsta technologija veikiančią vidaus navigaciją. Bus patikrinti metodai gerinantys judesio jutikliais pagrįstos navigacinės sistemos tikslumą.

2. VIDAUS POZICIONAVIMO SISTEMŲ IR ANALOGIŠKŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Šio skyriaus pirmoje dalyje bus aptartos analogiškos vidaus navigacinės sistemos ir jų pagrindiniai privalumai ir trūkumai. Antroje dalyje bus aptarta inercinė navigacinė sistema ir jau atlikti inercinės navigacinės sistemos tyrimai.

2.1. Neinercinės vidaus navigacinės sistemos

Neinercinė vidaus navigacinė sistema skaičiuoja objekto padėtį remdamasi faktiniais duomenimis, realiu laiku. Ji randa faktinę objekto padėtį, o ne skaičiuoja kaip judėjo objektas žinodama kur prieš tai jis buvo, kaip daroma inercinėse navigacinėse sistemose [11].

2.1.1. Analogiškos neinercinės navigacinės sistemos

- Palydoviniu ryšiu veikianti technologija

Palydoviniu ryšiu pagrįsta navigacinė sistema yra labiausiai paplitusi sistema iki šiol. Labiausia populiari JAV sukurta *Global Positioning System (GPS)*. Alternatyvios sistemos yra GLONASS, sukurta Rusijoje ir GALILEO, sukurta Europoje.

2002 m, JAV laido naudoti GPS signalus civiliniams tikslams ir GPS tapo prieinamu visur. Pradžioje GPS buvo pritaikytas automobilių navigacinėse sistemose, vėliau – nešiojamuose įrenginiuose. Šiuo metu GPS pagrindu veikiančios technologijos yra lengvai prieinamos, pigios ir patikimos. Užtikrinamas 1-100m tikslumas, priklausomai nuo priimamo signalo stiprumo ir priimamų palydovų signalų skaičiaus. Neveikia/blogai veikia nesant tiesioginio matomumo su palydovais [28].

- Garso bangomis paremta technologija

Šia technologija veikianti sistema atstumus matuoja naudodama mechanines garso bangas. Sekamas įrenginys, matuoja garso bangos sklaidimo laiką nuo specialių siųstuvų iki imtuvo, arba aido, atsispindėjusio nuo didelių objektų, tokių kaip siena, trukmę (Hazas 2006; Minami 2004). Sistema veikia tik tiesioginio matomumo zonose, reikalauja gausybės ultragarsinių siųstuvų-imtuvų išdėstytų pastatuose. Galimas labai tikslus pozicionavimas <1 cm [4].

- Naudojant bevielio internetinio tinklo signalus

Pastate išdėsčius tris ar daugiau bevielio interneto priėjimo taškus, galima įrenginyje matuoti priimamų signalų lygius. Pagal priimamų signalų lygį galima suskaičiuoti kokia yra matuojamo objekto koordinatė. Metodas puikiai tinka naudoti su bevielio ryšio priėmimo galimybę turinčiais

įrenginiais. Nebūtina prisijungti prie kiekvieno iš tinklo, užtenka matuoti signalo stiprumą. Tokiu metodu užtikrinamas 1-10 m. pozicionavimo tikslumas [29].

- Prisijungus prie "Bluetooth" arba „WI-FI" siųstuvo

Daugelis elektroninių prietaisų turi "Bluetooth" arba „WI-FI" radijo ryšio priėmimo galimybę, įskaitant kiekvieną išmanųjį telefoną. Jutikliai nešiojamuose įrenginiuose gali skaityti signalus iš specialių pastate įrengtų taškų. Įrenginys prisijungęs prie būtent to siųstuvo žino apie savo koordinatę. Kuo pastate bus išdėstyta daugiau tokių siųstuvų, tuo tikslesnis pozicionavimas pastate bus realizuotas. Tokiu metodu užtikrinamas 8-12 m. pozicionavimo tikslumas.

- Naudojant LED apšvietimą

Pastato apšvietimui naudojant LED šviestuvus, galima jais siųsti trumpus, žmogaus akiai nepastebimus šviesos impulsus, kuriuos nesunkiai detektuoja mobiliojo telefono kamera, arba kitas jautrus fotoimtuvas. Šviesos impulsuose gali būti užkoduota padėties ar kita informacija. Šis metodas užtikrina 1-8 m tikslumą, tačiau yra brangus, reikalaujantis brangių LED šviestuvų ir jų valdymo sistemų. Atsiranda interferencijos problemos su kitais šviesos šaltiniais.

- Naudojant mobiliojo ryšio bokštų siunčiamus signalus

Mobiliuoju telefonu galima matuoti mobiliojo ryšio bokštų siunčiamų signalų stiprius, taip žinant savo padėtį erdvėje. Kitu atveju, pagal tai, prie kurio iš bokštų yra prisijungęs mobilusis įrenginys, galima surasti jo padėtį erdvėje. Metodas vidaus navigacijai praktiškai nenaudojamas, nes užtikrina tik 30-200 m. tikslumą [5].

- Matuojant žemės magnetinį lauką

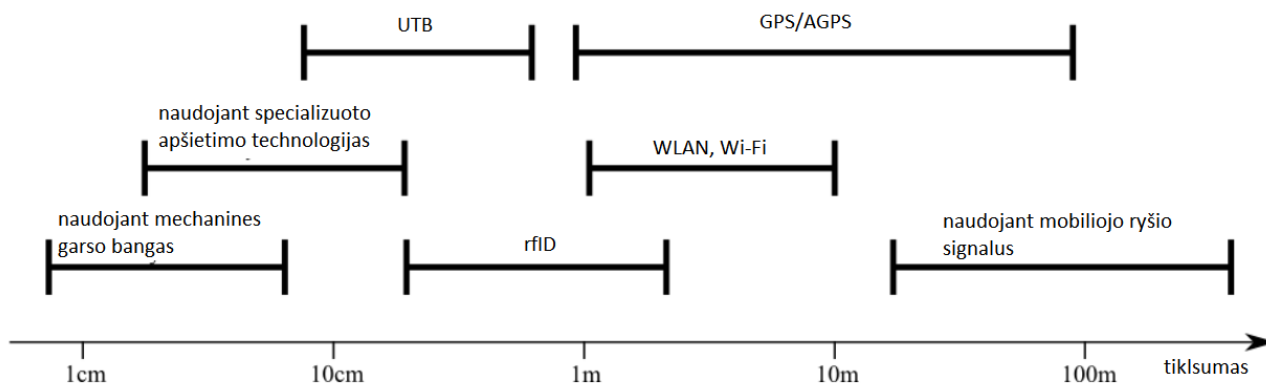
Magnetinis Žemės pietų ašigalis yra netoli geografinio šiaurės ašigalio. Žemėlapyje tai matoma tiksliai ties 74° šiaurės platumos ir 100° pietų ilgumos. Magnetinis šiaurės ašigalis yra netoli pietų ašigalio. Žemėlapyje tai matoma tiksliai ties 72° pietų platumos ir 155° šiaurės ilgumos. Jautriu erdvinio magnetinio lauko matuokliu galima matuoti žemės magnetinį lauką, ir pagal tai žinoti savo objekto orientaciją erdvėje. Be to, žemės magnetinio lauko stipris šiek tiek priklauso nuo platumos, dėl to tiksliai išmatavus jo vertę galima spręsti, kokioje platumoje yra objektas, 20-30 laipsnių tikslumu. Dėl mažo tikslumo metodas naudojamas tik kaip pagalbinis, norint pagerinti kitų metodų tikslumą. Kadangi matuokliu yra matuojamas realus fizikinis dydis – magnetinio lauko stipris, dėl to šis sekimo metodas yra gana jautrus bet kokiems šalutiniams magnetiniams laukams.

- Naudojant žemos orbitos GPS

Palydovai, skrendantys žemesne orbita 600–800 km (standartiniai GPS palydovai apie 20000 km.) yra arčiau, dėl to, signalas nuo jų yra mažiau slopinamas, tinkamas panaudoti netgi vidaus navigacijai. Deja, žemesnės orbitos palydovų signalai civilinėms GPS reikmėms yra neprieinami.

2.1.2. Neinercinių navigacinių sistemų palyginimas

Visų neinercinių sistemų pagrindinė teigiama savybė lyginant su inercinėmis, jos turi nuo laiko nepriklausantį tikslumą. Trūkumas – daugumai jų reikia specialios pastato infrastruktūros, specialių papildomų įrenginių pastato viduje, kitu atveju – jų tikslumas labai mažas ir praktiškai nepanaudojamas vidaus navigacinėse sistemose. Žemiau pateiktame 2.1 paveiksle pateiktas šių sistemų tikslumo palyginimas.



2.1 pav. Vidaus pozicionavimo sistemų tikslumo palyginimas [1]

Kaip matome, geriausią tikslumą turi garso bangomis veikianti technologija ir specializuoto apšvietimo technologija, tačiau jos reikalauja labai specifinės ir brangios pastato infrastruktūros, ir turi kitų apribojimų.

2.2. Inercinės navigacinės sistemos

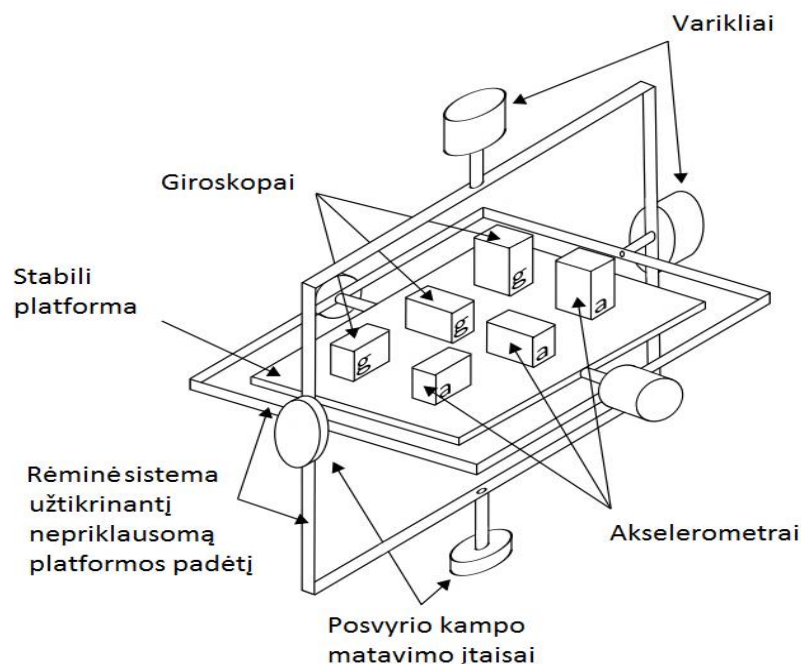
Inercinė navigacinė sistema (INS) buvo sukurta JAV, pirmoji jos versija veikė vieno giroskopo pagalba ir buvo skirta valdyti nepilotuojamos raketos trajektorijai. Antrojo Pasaulinio karo metais vokiečių inžinieriai INS papildė dar vienu girokopu, akselerometru ir mini kompiuteriu, šių jutiklių duomenims apdoroti. Ši sistema padėjo dar tiksliau kontroliuoti nepilotuojamos raketos skrydį. Pasiteisinusi sistema ėmė sparčiai plisti lėktuvų, laivų, kosminių aparatų valdymo ir navigacijos sistemose [6, 7, 8].

INS remiasi tuo, kad pradžioje yra žinoma objekto koordinatė, ir vėliau yra tik skaičiuojama kur ir kaip judėjo objektas. Pagreitį integruojant laike du kartus, gaunamas objekto padėties pokytis. Iš objekto pasisukimo galima spręsti, kuria kryptimi judėjo objektas. Metodas labai geras tuo, kad jis veikia bet kur, kosmose, žemėje, po vandeniu ar tunelyje. Kadangi šiuo metodu yra matuojami realūs fizikiniai dydžiai (pagreitis, kampinis greitis), atsiranda paklaidos, kurios dvigubo integravimo metu taip pat yra integruojamos, ir laikui bėgant paklaida didėja pagal kvadratinės

funkcijos priklausomybę. Yra keletas metodų, padedančių šią paklaidą galima sumažinti. Tai yra įvairūs filtrai bei kitų pozicionavimo metodų naudojimas [16, 17].

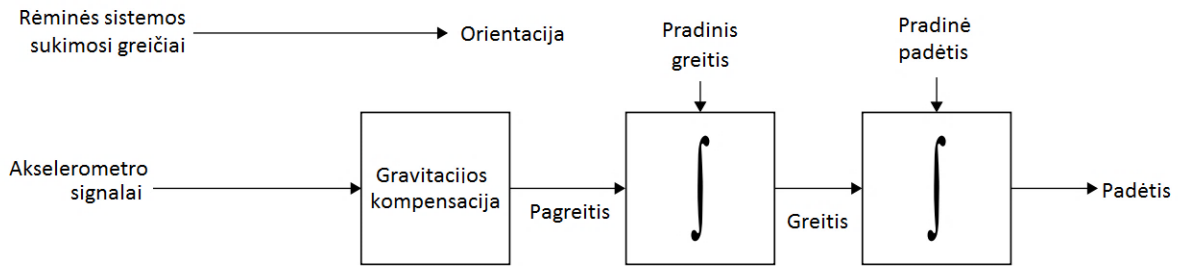
2.2.1. Stabilios platformos INS

Stabilios platformos INS yra pirmoji INS versija. Tokio tipo INS buvo naudojama pirmųjų raketų, laivų ar kosminių aparatų valdymo sistemose. Stabilios platformos INS pavaizduota 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Stabilios platformos INS [1]

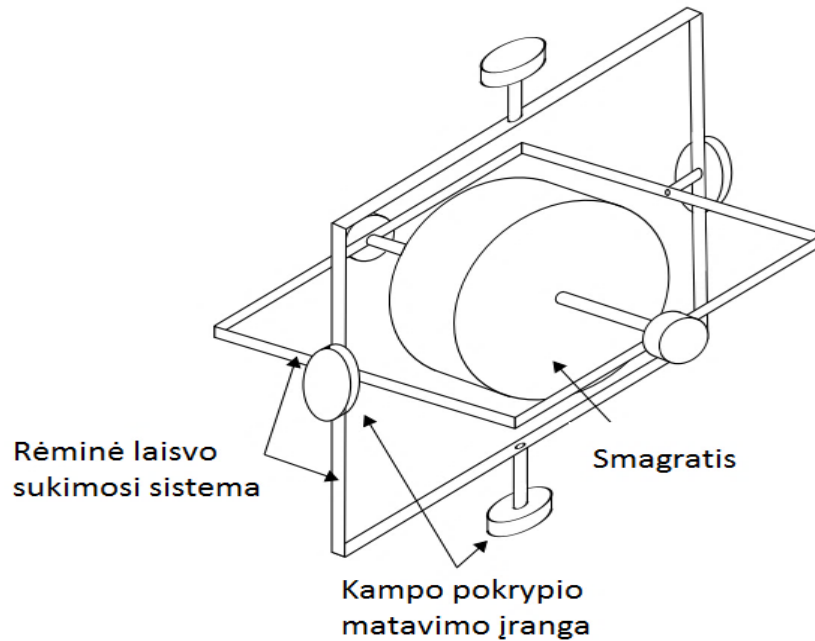
Ją sudaro stabili platforma, kuri nejuda žemės ar kitos atskaitos sistemos atžvilgiu. Suktis apie tvirtinimo taškus jai padeda trijų ašių rėminė sistema. Rėmai yra valdomi trijų variklių. Stabilioje platformoje yra akselerometrai ir giroskopai. Giroskopai matuoja rėmų sukimosi greičius ir pagal tai valdo variklius tam kad išlaikyti tą pačią stabilios platformos padėtį. Akselerometrai matuoja pagrečius kuriais yra veikiamą platformą. Kadangi platforma yra išlaikoma visada toje pačioje padėtyje, akselerometrų veikiantis nuolatinis žemės laisvojo kritimo pagreitis yra determinuotas ir gali būti lengvai kompensuotas. Tokios sistemos duomenų apdorojimo algoritmas pavaizduotas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Stabilios platformos INS duomenų apdorojimo algoritmo schema

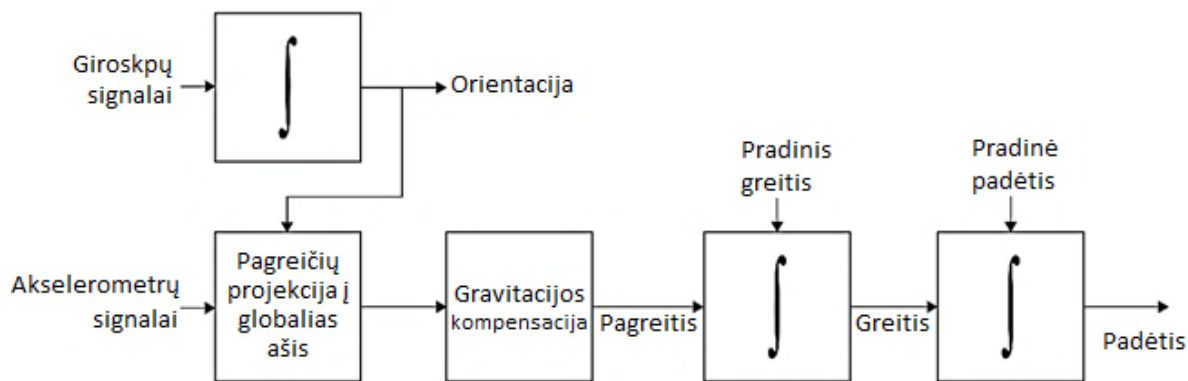
2.2.2. Tiesiogiai sujungtos platformos INS

Tokio tipo sistemą sudaro tiesiogiai prie objekto pritaisyta pagreičių matavimo įranga – akselerometrai. Šalia yra pritaisytas giroskopas. Jis gali būti įvairių rūšių. Bendra sistemos konstrukcija pavaizduota 2.4 paveiksle.



2.4 pav. INS giroskopas

Tokio tipo sistema privalo atsižvelgdama į giroskopo duomenis skaičiuoti savo orientaciją. Visas tokios sistemos duomenų apdorojimo algoritmas pavaizduotas 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Tiesioginės INS duomenų apdorojimo algoritmas

Kaip matome, nuo stabilios platformos INS skiriasi tuo, kad sistemai reikia realiu laiku skaičiuoti objekto orientaciją. Tai atlieka giroskopai, kurių signalai yra integruojami laike, ir gaunama objekto orientacija (*angl.* heading) aplinkos atžvilgiu. Gauta objekto orientacija $C(t)$ yra naudojama akselerometrų signalams $a_b(t)$ dekoduoti, gaunami globalūs pagreičiai $a_g(t)$, kurių kryptys atitinka žemės koordinatės.

$$a_g(t) = C(t)a_b(t) \quad (2.1)$$

Žinant objekto orientaciją, galima apdoroti akselerometrų duomenis, panaikinti žemės laisvojo kritimo pagreitį g_g . Integruojant pagreitį gaunamas judėjimo greitis $v_g(t)$:

$$v_g(t) = v_g(0) + \int_0^t (a_g(t) - g_g) dt \quad (2.2)$$

integruojant greitį – padėtis $s_g(t)$:

$$s_g(t) = s_g(0) + \int_0^t v_g(t) dt \quad (2.3)$$

$v_g(0)$, $s_g(0)$ ir g_g yra objekto pradinis greitis, pradinė padėtis ir žemės laisvojo kritimo pagreitis.

2.2.3. INS naudojanti puslaidininkinius jutiklius

INS naudojančios puslaidininkinius jutiklius struktūra panaši į tiesiogiai sujungtos INS. Skirtumas tas, kad pagreičio ir kampinio greičio jutikliai yra puslaidininkiniai, pagaminti litografiniu arba analogišku gamybos (*angl.* *micromachining*) procesu. Tokie jutikliai yra maži, neretai viename korpuse turintys net keletą jutiklių. Tarkime šiame darbe naudojama mikroschema „MPU-9150“, turi 3 ašių pagreičio, 3 ašių kampinio greičio ir 3 ašių magnetinio lauko jutiklius, ir visa tai vos 4x4x1 mm dydžio korpuse. Deja, bet mažesnė šių jutiklių ne tik kaina ir matmenys, bet ir tikslumas. Nors puslaidininkinių mechaninių jutiklių gamybos technologija nuolat tobulėja, atrandamos vis geresnės kokybės trimačių mikro struktūrų gamybos galimybės, puslaidininkinių

mechaninių jutiklių tikslumas dar dešimtis ir šimtus kartų atsilieka nuo tradicinių jutiklių. INS jutiklių tikslumas yra itin aktualus, jis tiesiogiai nulemia visos INS tikslumą.

2.2.4. „NavShoe“ technologija

Tai patentuota technologija, kuri veikia inercinės navigacinės ir GPS sistemų pagalba. Šios sistemos INS modulis įtaisytas žmogaus bato pade. Iš pirmo žvilgino toks sprendimas atrodo gana keistas, kadangi žmogui einant, būtent kojų bei ypač pėdų greitis nuolat smarkiai kinta, nuolat kinta ir pėdų orientacija žemės atžvilgiu, tai įneša papildomus sunkumus skaičiuojant INS sistemos orientaciją ir veikiantį pagreitį, be to, nuolat smarkiai kinta žemės gravitacijos komponentės akselerometrų ašyse. Tačiau, sistemos kūrėjai įžvelgė labai gerą tokios sistemos privalumą: einant, kuomet koja liečia žemės paviršių, jos greitis lygus nuliui. Tai reiškia, kad paklaida, kuri gaunama integruojant pagreitį du kartus yra kur kas mažesnė, ir kinta nebe pagal kvadratinės, o pagal tiesinės funkcijos priklausomybę. Po kiekvieno žingsnio, jutiklį veikiantys pagreičiai yra suintegruojami dukart, ir užfiksuojamas žingsnio dydis. Toliau paklaida nebedidėja jeigu žmogus nejuda. Be to, kadangi žmogaus kojų judesiai yra gana staigūs, jutiklius veikia gana dideli pagreičiai, lyginant su tiesiog visą kūną veikiančiu pagreičiu, taip signalas yra daug „švaresnis“, kadangi matuojamo naudingo signalo ir triukšmo santykis yra daug didesnis. Elektroninio kompasas pagalba skaičiuojama judėjimo trajektorijos orientacija žemės atžvilgiu. Tokios sistemos privalumas lyginant su paprastos INS yra tas, kad šios sistemos paklaida didėja su nueitu atstumu, bet ne laikui bėgant, t.y. jeigu žmogus stovi vietoje, ir niekur neina, sistema ir rodo kad jis nejuda, kitaip negu tradicinėje INS, kurioje apie žmogaus sustojimą turi informuoti lėtėjimo pagreitis, kurio integralas turi visiškai sutapti su greitėjimo integralu, jeigu šie dydžiai nesutampa, lieka likutinis greitis, kuris per visą žmogaus ar sekamo objekto stovėjimo laiką sumuojasi ir paklaida nuolat didėja [11].

Be to, sistema skirta veikti ne tik patalpų viduje, bet ir išorėje. Ten kartu veikia ir GPS, taigi taip galima gauti labai precizinius padėties ir bendro žmogaus kūno judėjimo matavimus su nedidejančia paklaida. Sistemos gamintojai teigia kad ji veikia be jokio pradinio kalibravimo ir leidžia realizuoti navigaciją patalpų viduje be jokios papildomos infrastruktūros.

2.2.5. „U-blox 3D ADR“ vidaus navigacinė sistema transporto priemonėms

Ši patentuota technologija skirta papildyti transporto priemonių navigacinę sistemą taip, kad ši veiktų tuneliuose, didelėse požeminėse aikštelėse, didelių pastatų apsuptyje, kur GPS signalas yra per silpnas. Ji taip pat priskiriama prie inercinių, tačiau turi savyje ir papildomų matavimo priemonių, tokių kaip ratų enkoderių signalai, greičių dėžės signalai, odometro duomenys.

Duomenų sintezei istema naudoja Kalmano filtrą. Kadangi tai inercinė navigacinė sistema, paklaida didėja nuo nuvažiuoto atstumo. Gamintojai teigia, kad po 10 minučių pasivažinėjimo požeminėje stovėjimo aikštelėje, paklaida išvažiuojant yra tik 2 metrai. Šios technologijos produktas yra mikroschema, kuri turi savyje visus INS jutiklius. Ji prijungiama prie transporto priemonės kompiuterio (CAN sąsaja), gauna duomenis iš sukimosi jutiklių ratuose, greičių dėžės (važiavimo kryptčiai nustatyti), ir siunčia padėties duomenis į transporto priemonės navigacinę sistemą [13].

2.2.6. INS naudojanti kelių vaizdo kamerų vaizdų apdorojimą

Tai yra technologija, kurią galima priskirti prie inercinių navigacinių sistemų. Ji remiasi vaizdo kamerų vaizdų apdorojimu. Dvejomis ar daugiau kamerų filmuojama aplinka. Apdorojant filmuotus vaizdus skaičiuojama kaip ir kur judėjo objektas. Kaip ir paprastų INS, taip ir šios technologijos, taikančios vaizdų apdorojimą, paklaida didėja laikui bėgant. Tokios sistemos matavimo tikslumas labai priklauso nuo filmuojamos aplinkos, nuo filmuojamų objektų. Technologija reikalauja nuolatinio aplinkos filmavimo, t.y. vaizdo kamerų neturi užstoti jokios kliūtys ar objektai. Egzistuoja šios vaizdų apdorojimo metodais grįstos sistemos ir mikro jutikliais grįstos technologijos sintezė, taip užtikrinanti dar tikslesnį vidaus pozicionavimą. Ši technologija yra taip pat perspektyvi kaip puslaidininkiniais judesio jutikliais grįsta technologija, tačiau apie ją plačiau nebus kalbėta.

Skyriaus išvados

Šiame skyriuje buvo kalbėta apie vidaus pozicionavimo sistemas, apie metodus šioms sistemoms realizuoti. Buvo aptartos dvi pagrindinės technologijos: inercinės ir neinerinės navigacinės sistemos. 2.1 lentelėje pavaizduotas visų šių sistemų palyginimas. Neinerinės navigacinės sistemos gali būti labai tikslios, tiek trumpame tiek ilgame laikotarpyje, tačiau reikalauja specialios ir neretai labai brangios pastato infrastruktūros. Tos kurios nereikalauja papildomos pastato infrastruktūros, nėra pakankamai tikslios, kad užtikrintų tinkamą navigaciją pastato viduje. Inercinės navigacinės sistemos nereikalauja jokio specialios pastato infrastruktūros, yra tikslios, tačiau tik trumpame laikotarpyje, ir laikui bėgant jų matavimo paklaida vis didėja. „NavShoe“ technologija tai pat priskiriama prie inercinių, ji veikia tik specifinėmis sąlygomis. U-blox 3D ADR technologija skirta transporto priemonėms, ji turi pagalbinių priemonių, kurios objektų sekimui patalpose yra nepritaikomos. Atsižvelgiant į tai, kad tik inercinės navigacinės sistemos nereikalauja papildomos pastato infrastruktūros, darbo metu bus tiriamos tik tokio tipo sistemos, analizuojami jų trūkumų šalinimo metodai.

2.1 lentelė. Vidaus navigacinių sistemų palyginimas

Sistemos	Tikslumas	Ar reikalinga pastato infrastruktūra
GPS	Pastato viduje neveikia	Ne
Žemos orbitos GPS	Pastato viduje veikia blogai, neprieinamas civilinėms reikmėms	Ne
INS	Geras, bet smarkiai mažėja laikui bėgant	Ne
Ant žmogaus bato tvirtinama INS	Geras, bet mažėja nuo nueito atstumo	Ne, bet veikia tik pritaisyta ant žmogaus bato
„Wi-Fi“, „Bluetooth“ signalų vidaus navigacinės sistemos	Geras, užtikrina iki 1 m tikslumą	Taip
LED apšvietimo vidaus navigacinė sistema	Labai geras, užtikrina iki 0.1 m tikslumą	Taip
Garso bangų vidaus navigacinė sistema	Puikus, užtikrina iki 0.01 m tikslumą	Taip, bei reikalauja tiesioginio matomumo iki siųstuvų/imtuvų
„U-blox 3D ADR“	Geras, bet mažėja nuo nueito atstumo	Ne, bet reikalauja mašinos odometro duomenų

3. VIDAUS POZICIONAVIMO SISTEMOS, NAUDOJANČIOS ELEKTROMECHANINIUS JUTIKLIUS, ANALIZĖ

Kuriant inercines navigacines sistemas nepriklausomai nuo to kokio tipo jutikliai naudojami, ar puslaidininkiniai ar tradiciniai, neišvengiamai susiduriama su pagrindinėmis problemomis: triukšmas jutiklių signaluose, gravitacijos kompensacijos problema, elektroninio kompasos įsisotinimas, slėgio jutiklių išduodamo signalo priklausomybė nuo temperatūros, giroskopo nuolatinės dedamosios plaukiojimas laikui bėgant. Visi šie veiksniai nulemia vis didėjančią vidaus navigacinę sistemos paklaidą laikui bėgant. Šiame skyriuje bus apžvelgtos ir ištirtos šios jutiklių problemos išsamiau.

3.1. Žemės traukos kompensacija

Vidaus navigacinė sistema remiasi objektą veikiančio pagreičio skaičiavimu. Žinant kokiu pagreičiu juda objektas, galima suskaičiuoti kokiu greičiu jis juda ir kokia yra jos koordinatė. Pagreitis gaunamas iš sistemoje įtaisytų akselerometrų. Kai objektas juda tik horizontaliai, ir nepasvyra žemės paviršiaus atžvilgiu, akselerometrai rodo teisingą - tik horizontalaus judėjimo pagreitį. Kai objektas juda ne horizontaliai, pavyzdžiui nuožulnia plokštuma, arba jeigu įtaisas prataisytas prie žmogaus, žmogus pakeičia nugaros vertikalią padėtį, akselerometruose atsiranda žemės laisvojo kritimo pagreičio dedamoji. Šiame poskyryje bus apie tai kalbėta plačiau.

Žemės trauka apibūdinama laisvojo kritimo pagreičiu. Šis pagreitis paprastuose skaičiavimuose naudojamas suapvalintas $\sim 10 \text{ m/s}^2$, paprastose fizikinėse lygtyse $\sim 9.81 \text{ m/s}^2$. Tačiau INS norint užtikrinti tinkamą gravitacijos kompensaciją reikia kuo galima tikslesnės gravitacijos reikšmės.

Šis dydis nėra konstanta, jo kitimą įtakoja keletas veiksnių, tačiau pagrindinis ir labiausiai juntamas yra Žemės sukimtas [9]. Ties pusiauju, objektai kartu su Žemės paviršiumi lekia 1666 km/h greičiu, jie kartu juda ir įcentrinio pagreičiu, kuris sukuria išcentrinę jėgą, mažinančią žemės laisvojo kritimo pagreitį. Einant link ašigalių, linijinio greičio ir išcentrinės jėgos vertės mažėja ir ties ašigaliais išnyksta. Laisvojo kritimo pagreičio priklausomybė nuo platumos skaičiuota pagal 1 formulę (3.1) [9]:

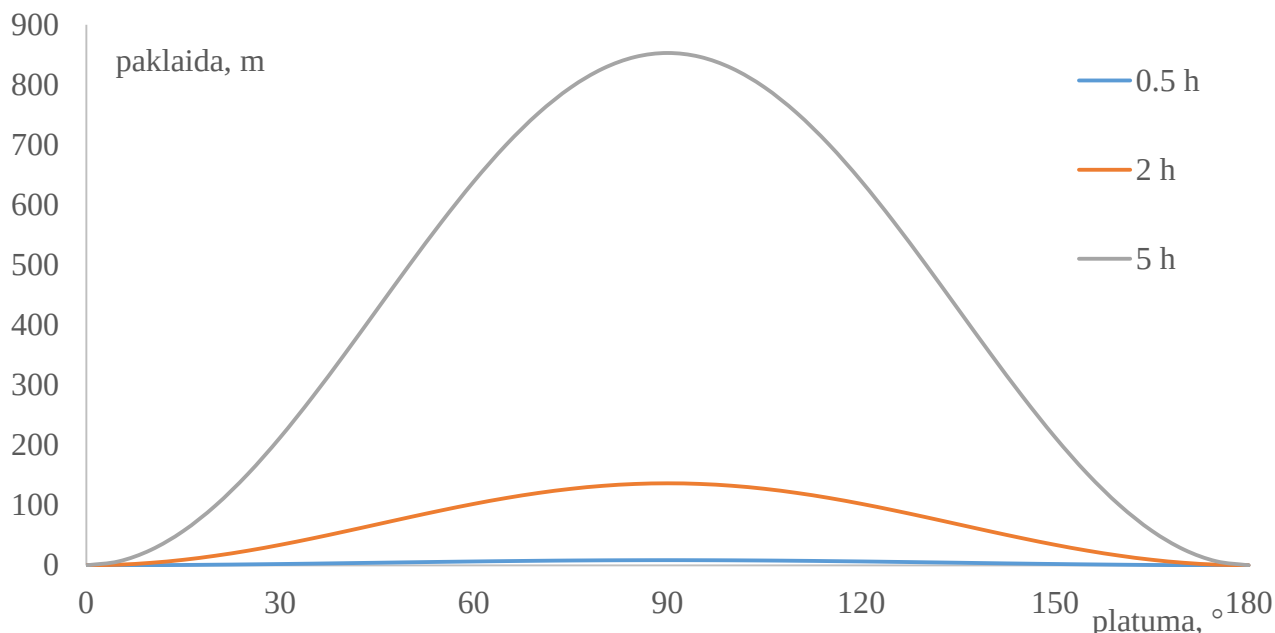
$$g_0 \approx 9.7803267714 \cdot \left(\frac{1+0.00193185138639 \cdot \sin^2 \lambda}{\sqrt{1-0.00669437999013 \cdot \sin^2 \lambda}} \right) \quad (3.1)$$

, kur g_0 yra laisvojo kritimo pagreitis (m/s^2) platumoje λ , (rad).

Nekompensuotas laisvojo kritimo pagreičio kitimas priklausomai nuo platumos sukuria INS paklaidas. Paklaidos dydžiai skaičiuoti pagal formulę:

$$\Delta s = \int_{t_1}^{t_2} \Delta a dt = \Delta a \frac{t^2}{2} \quad (3.2)$$

Paklaidų rezultatai per 0.5, 2 ir 5 valandas pavaizduoti 3.1 paveiksle.

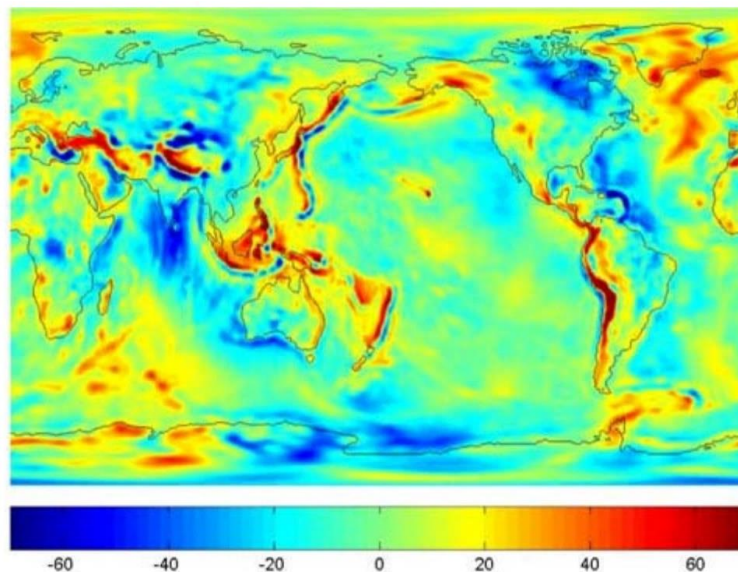


3.1 pav. INS paklaidos atsiradusios neįvertinus platumos per 0.5, 2 ir 5 valandas

Kaip matome, maksimali paklaida dėl neteisingai parinktos platumos per 0:30 h yra 8 m. per 2:00 h – 120 m, per 24:00 h – net 850 m.

Kitus gravitaciją įtakančius veiksnius galima ignoruoti:

- Vertikalus kilimas. Gravitacija sumažėja per 0.0001 m/s^2 pakilus į 1000 aukštį. Kylant dar aukščiau gravitacija mažėja lėčiau. Per 1 h toks pakilimas dėl gravitacijos pokyčio sudarytų 0.18 m paklaidą, per 5:00 h – 4.5 m. Reikia atkreipti dėmesį, kad dėl vertikalios kilimo atsiranda kitas daug reikšmingesnis pagreitis, kurį sukuria Koreolio jėga [10].
- Žemės paviršiaus netolygumas. Žemės paviršius nėra vientisas, dėl to kai kuriose vietose pasireškia žemės traukos anomalijos. Jos pavaizduotos 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Gravitacijos anomalijos, mgal ($1 \text{ mgal} = 0.00001 \text{ m/s}^2$) [9]

Dėl gravitacinių anomalijų laisvojo kritimo pagreitis kinta ribose $\pm 0.0006 \text{ m/s}^2$. INS per 1:00 h tai lemia 1 m tikslumą, per 2:00 h – 4.32 m, per 5:00 h – 27 m. Reikėtų pastebėti, kad gravitacijos anomalijos nebūtinai sutampa su žemės reljefo ypatybėmis.

3.2. Puslaidininkinių akselerometrų signalų paklaidos

3.2.1. Nuolatinė dedamoji

Nuolatinė dedamoji akselerometrų signaluose yra signalo vertė, kuomet akselerometras neveikiamas jokių pagreičių. Tai pasiekama tuomet kai jo jautrumo ašis yra statmena žemės gravitacijos vektoriui ir akselerometro neveikia jokie kiti pagreičiai. Laikui bėgant tokia paklaida INS sukuria paklaidas, kuri randama pagal formulę:

$$s(t) = e \frac{t^2}{2} \quad (3.3)$$

Formulėje $s(t)$ yra nuo laiko priklausanti padėties paklaida, e – akselerometro nuolatinė dedamoji, t – laikas. Kaip matome, bėgant laikui, paklaida gaunama dėl nuolatinės dedamosios didėja pagal kvadratinės funkcijos priklausomybę.

Šią nuolatinę dedamąją galima panaikinti, matuojant ją ilgą laiką, ir vėliau kiekvieną kartą atimti gautą paklaidos vidurkį nuo naujai išmatuotos pagreičio vertės.

3.2.2. Šiluminis triukšmas signaluose

Triukšmas – nepageidaujamas signalas, kuris neišvengiamai yra bet kokio signalo sudedamoji dalis. Ne išimtis yra akcelerometrų išduodami signalai. Jautriausia triukšmui INS sistemos dalis – akcelerometras. Jo signalai yra tiesiogiai naudojami padėties skaičiavimuose, kitų jutiklių signalams triukšmo lygis nėra toks kritinis reiškinys, nes jų signalai naudojami tik kaip tam tikrų filtrų sudedamoji dalis.

Akselerometrų signalams būdingas šiluminis (baltas) triukšmas. Tai galima spręsti iš triukšmo spektro (4.2. paveikslas). Akselerometro bendras triukšmas P_{SD} apibūdinamas formule:

$$P_{SD} = \sqrt{a_{nm}^2 + b_{ne}^2} \quad (3.4)$$

Formulėje a_{nm} yra mechaninis akcelerometro triukšmas, b_{ne} - elektrinis akcelerometro triukšmas. Mechaninis šiluminis triukšmas kinta priklausomai nuo akcelerometro judamosios masės m , pakabos tamprumo k ir slopinimo faktoriaus α . Mechaninis triukšmas gali būti mažinamas didinant mechaninės sistemos kokybę Q , bei mažinant rezonansinį dažnį f_0 , tačiau tai būdinga diskretiems akcelerometrams, o ne puslaidininkiniams, nes jų parametrų mes keisti negalime. Elektrinis šiluminis triukšmas kyla iš puslaidininkinių medžiagų netobulumo.

Šiluminis triukšmas akcelerometrų signaluose turi įtakos navigacijos tikslumui. Norint gauti šią padėties paklaidą reikia dvigubai integruoti pagreičio paklaidos vartę, kurios nuolatinė dedamoji lygi nuliui $E(N_i)=0$, o standartinė nuokrypa $Var(N_i)=\delta^2$, o N_i čia yra i -oji pagreičio matavimo vertė. Tai galima išreikšti formulėmis:

$$\int_0^t \int_0^t e(\tau) d\tau d\tau = \delta t \sum_{i=1}^n \delta t \sum_{j=1}^i N_j = \delta t^2 \sum_{i=1}^n (n - i + 1) N_i \quad (3.5)$$

Kur n tyra pagreičio verčių matavimo skaičius, o δt yra laiko trapas tarp matavimų.

Padėties paklaidą galima apibrėžti formule:

$$E \left(\int_0^t \int_0^t e(\tau) d\tau d\tau \right) = \delta t^2 \sum_{i=1}^n (n - i + 1) E(N_i) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{Var \left(\int_0^t \int_0^t e(\tau) d\tau d\tau \right)}{t^3 \cdot \sigma^2} = \delta t^4 \sum_{i=1}^n (n - i + 1)^2 Var(N_i) = \frac{\delta t^4 n(n+1)(2n+1)}{6} Var(N_i) \approx \frac{1}{3} \delta t \cdot \sigma^2 \quad (3.7)$$

Ir paklaidos dispersija:

$$\sigma_s(t) \approx \sigma \cdot t^{2/3} \cdot \sqrt{\frac{\delta t}{3}} \quad (3.8)$$

Formulės 3.6 ir 3.7 rodo, padėties paklaidos vidurkis dėl balto triukšmo lygus nuliui, tačiau dispersija didėja laikui bėgant. Tuo įsitikinsime atlikdami tyrimus su realiais akselerometro duomenimis 4 skyriuje.

3.2.3. Nuolatinės dedamosios svyravimai

Tokio tipo pagreičio paklaida atsiranda dėl įvairių priežasčių. Ji inercinėse navigacinėse sistemose sukuria tiek greičio tiek padėties paklaidas. Integruojant vieną kartą, gaunama greičio paklaida yra proporcinga $t^{3/2}$, integruojant du kartus, gaunama padėties paklaida proporcinga $t^{5/2}$.

Pagreičio paklaidų suvestinė ir aptarimas

Paklaidų akselerometro signaluose suvestinė pavaizduota 3.1 lentelėje.

Lentelė 3.1 Paklaidos akselerometro signaluose

Paklaidos tipas	Apibūdinimas	Reikšmė padėties skaičiavimuose (paklaida po dvigubo integravimo)
Nuolatinė dedamoji	Pastovi pagreičio vertė e , net kuomet akselerometras neveikiamas jokių pagrečių	Kvadratine priklausomybe auganti paklaida: $s(t) = e \frac{t^2}{2}$
Šiluminis triukšmas	Triukšmas signaluose su standartinė deviacija σ	Antros eilės atsitiktinis padėties kitimas. Apibūdinamas: $\sigma_s(t) \approx \sigma \cdot t^{2/3} \cdot \sqrt{\frac{\delta t}{3}}$
Temperatūros įtaka	Nuolatinė dedamoji kintanti nuo temperatūros	Kaip ir nuolatinė dedamoji, aprašome formule: $s(t) = e \frac{t^2}{2}$
Nuolatinės dedamosios nestabilumas	Nuolatinės dedamosios nestabilumas dėl atsitiktinumo (angl. <i>random walk</i>).	Trečios eilės atsitiktinis padėties kitimas, proporcingas $\sim t^{5/2}$
Kalibravimas	Paklaida dėl netikslaus akselerometrų sulgiavimo, netikslumo gamybos procese.	Kaip ir nuolatinė dedamoji, aprašome formule: $s(t) = e \frac{t^2}{2}$

Skyriaus išvados

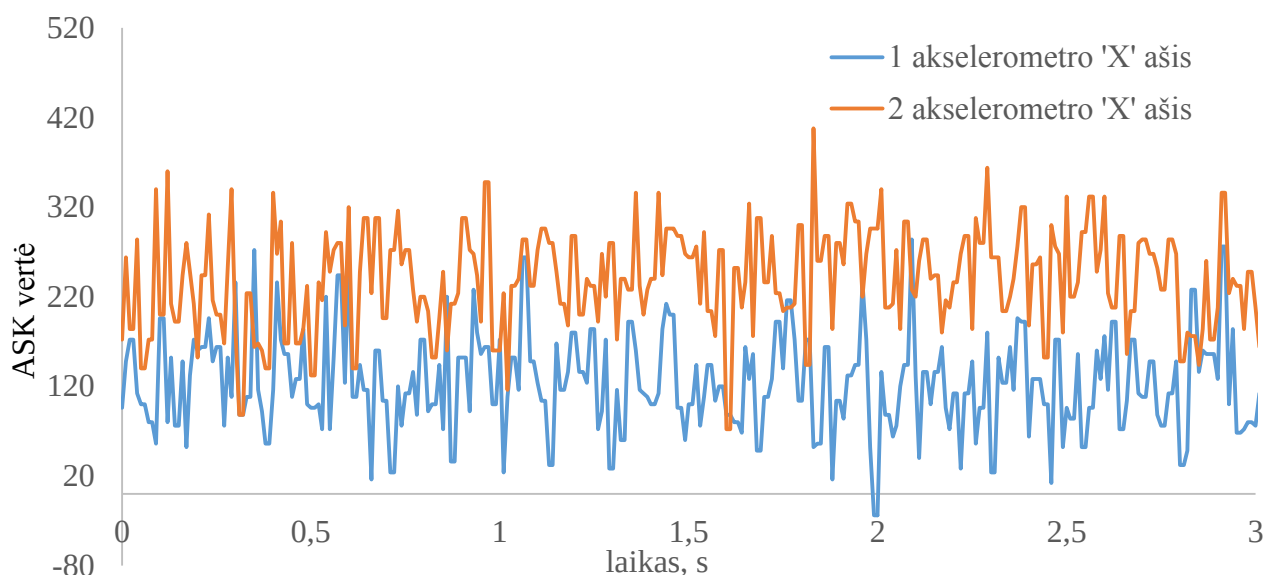
Šiame skyriuje buvo apžvelgti pagrindiniai inercinių navigacinių sistemų paklaidų šaltiniai. 3.1 lentelėje pavaizduoti

4. ELEKTRO-MECHANINIŲ JUTIKLIŲ IR JŲ DUOMENŲ APDOROJIMO METODŲ TYRIMAS

Šiame poskyryje bus aptartos puslaidininkinių akselerometrų signalų tyrimo ir apdorojimo ypatybės, su kuriomis susiduriama naudojant akselerometrus inercinėse navigacinėse sistemose.

4.1. Lygiagretus jutiklių jungimas signalų kokybei pagerinti

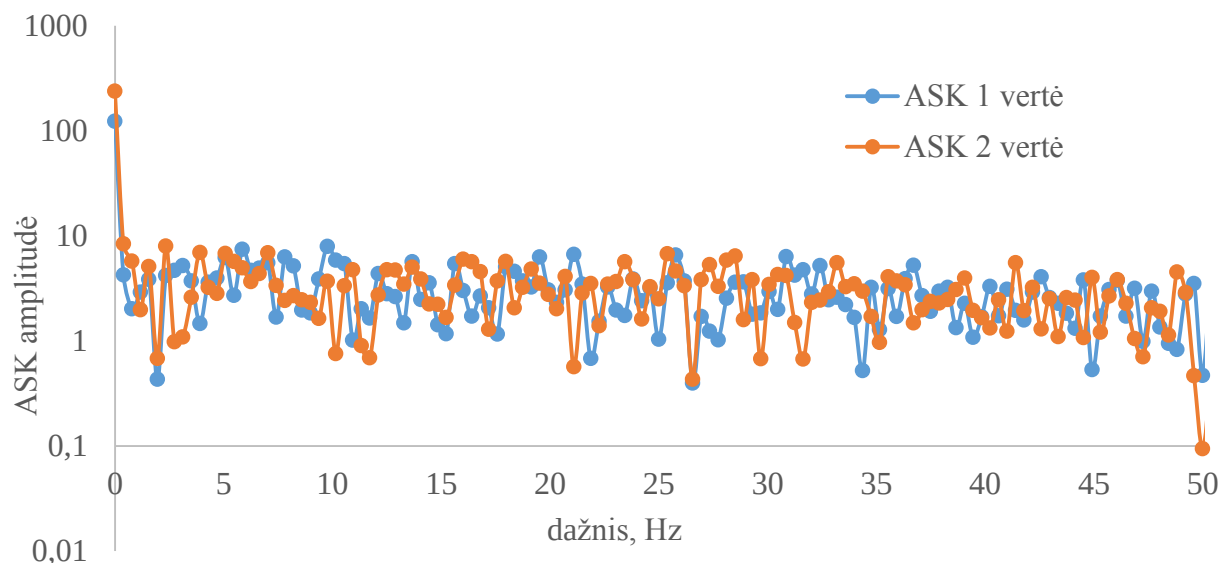
Tyrimo metu prie mikrovaldiklio buvo prijungti du jutikliai „MPU-9150“. Jie buvo prijungti prie tos pačios I²C duomenų perdavimo sąsajos. Mikrovaldiklis paeiliui užklausia apie pagreičio, kampinio greičio ir magnetinio lauko jutiklių duomenis, abudu jutikliai paeiliui atsako į užklausias. Teoriškai, abiejų jutiklių duomenys turi sutapti, jų signalus turi skirti tik nežymus kelių ms vėlinimas, kuris atsiranda dėl nevienalaikio kreipimosi į jutiklius. Tačiau realioje situacijoje, jutiklių signalai gana ženkiai skiriasi. 4.1 paveiksle pavaizduoti du tos pačios ašies akselerometrų signalai, tačiau gauti iš skirtingų jutiklių. Akselerometrai matavimo metu buvo statinėje būsenoje, juos veikė tik žemės laisvojo kritimo pagreičio projekcija. Grafike pateikti skaitmeniniai akselerometrų duomenys be jokio apdorojimo. Visa matavimo skalė yra nuo minus 32767 iki 32767 ir tai atitinka realų pagreitį nuo minus 19.6 iki 19.6 m/s²



4.1 pav. Dviejų akselerometrų “X” ašies signalai stacionarioje būsenoje

Pažiūrėjus į signalus galima pastebėti du dalykus: pirma, signalai yra tarpusavyje nekoreliuoti (nepanašūs vienas į kitą), taip yra dėl to kad signalai yra paskendę triukšme, antras – signalus skiria tam tikra nuolatinė dedamoji, taip gali atsirasti tiek dėl tam tikros nuolatinės dedamosios esančios

viename ar abiejuose signaluose, tiek dėl tiesiog nevysiška tikslaus akselerometrų gamybos ar montavimo sulygiavimo. Tokiu atveju, juos veikia skirtinga žemės laisvojo kritimo pagreičio dedamoji.



4.2 pav. Dviejų akselerometrų „x“ ašies signalų spektrai

Paveiksle 4.2 pavaizduota 1 ir 2 akselerometrų „x“ ašies signalų spektrai. Amplitudė parodyta logaritminėje skalėje, taip nuolatinė dedamoji neužgožia triukšmo. Iš triukšmo pobūdžio galima spręsti kad tai yra Gauso (baltas) triukšmas. Šiam triukšmui slopinti bus naudojami įvairūs metodai. Apie triukšmo slopinimo metodus bus kalbėta plačiau 4 skyriuje.

Turėdami du panašius signalus, galime juos įvairiai interpretuoti, tarkime, skaičiuoti jų vidurkį. Signalų interpretaciją atliksime dviem skirtingais metodais: geometriniu vidurkiu (4.1):

$$C = \sqrt{A \cdot B} \quad (4.1)$$

ir aritmetiniu vidurkiu (4.2):

$$C = \frac{A+B}{2} \quad (4.2)$$

Formulėse A ir B yra tie patys signalai gauti iš skirtingų jutiklių, C yra šių dviejų signalų sintezės rezultatas.

Interpretacijų metodų lyginimui skaičiuosime kiekvienu metodu gautos signalų sintezės triukšmo lygius. Triukšmo lygis bus apskaičiuotas formule (4.3):

$$P_K = \sqrt{\frac{D_0^2 + D_1^2 + \dots + D_{K-2}^2 + D_{K-1}^2}{K}} - \frac{D_0 + D_1 + \dots + D_{K-2} + D_{K-1}}{K} \quad (4.3)$$

Formulėje P_K yra bendras signalo triukšmo lygis, K – sėkmingai atliktų matavimų skaičius, $D_0...D_K$ yra matavimo rezultatai.

Triukšmo slopinimas L , išreikštas dB skaičiuojamas pagal formulę (4.4):

$$L = 20 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot P_K^C}{P_K^A + P_K^B} \right) \quad (4.4)$$

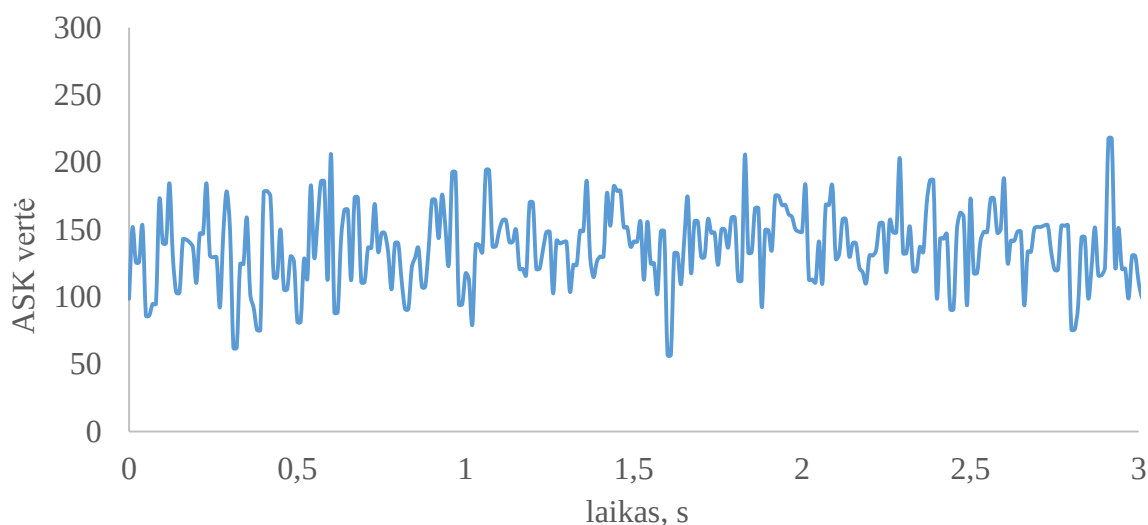
Šioje formulėje P_K^A ir P_K^B yra triukšmo lygiai gauti iš skirtingų jutiklių A ir B, P_K^C – triukšmo lygis gautas po signalų sintezės. Lentelėje žemiau pateikti signalų sintezės metodų rezultatai.

Lentelė 4.1 Signalų sintezės metodų palyginimas

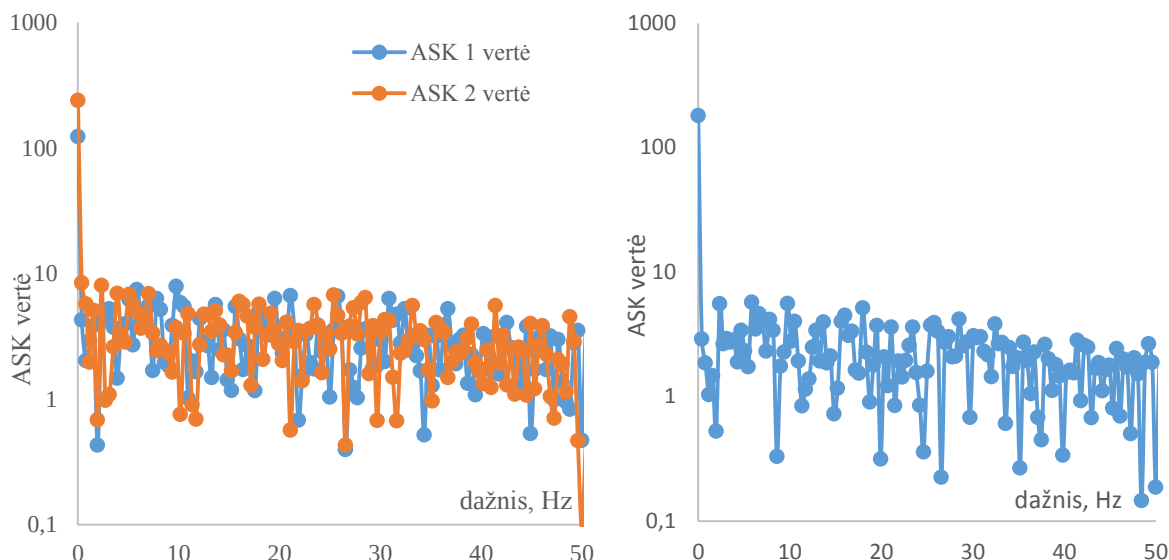
	Triukšmo lygis P_K	STS (<i>angl.</i> SNR), dB	Triukšmo slopinimas, dB
Signalas A	10.6	75.82	-
Signalas B	7.35	79	-
$C = \sqrt{A \cdot B}$	6.02	80,74	3.47
$C = \frac{A + B}{2}$	4.56	83,15	5.87

Kaip matome, aritmetinio vidurkio panašių signalų sintezės metodas duoda geriausią rezultatą. Slopiną triukšmą daugiau negu dvigubai. Kiti metodai pasirodė ne tokie efektyvūs, nors ir reikalauja mažiau resursų.

Paveiksluose 4.3 pavaizduotas tos pačios ašies dviejų skirtingų akselerometrų signalų aritmetinis vidurkis, bei šio signalo spektras 4.4 paveiksle.



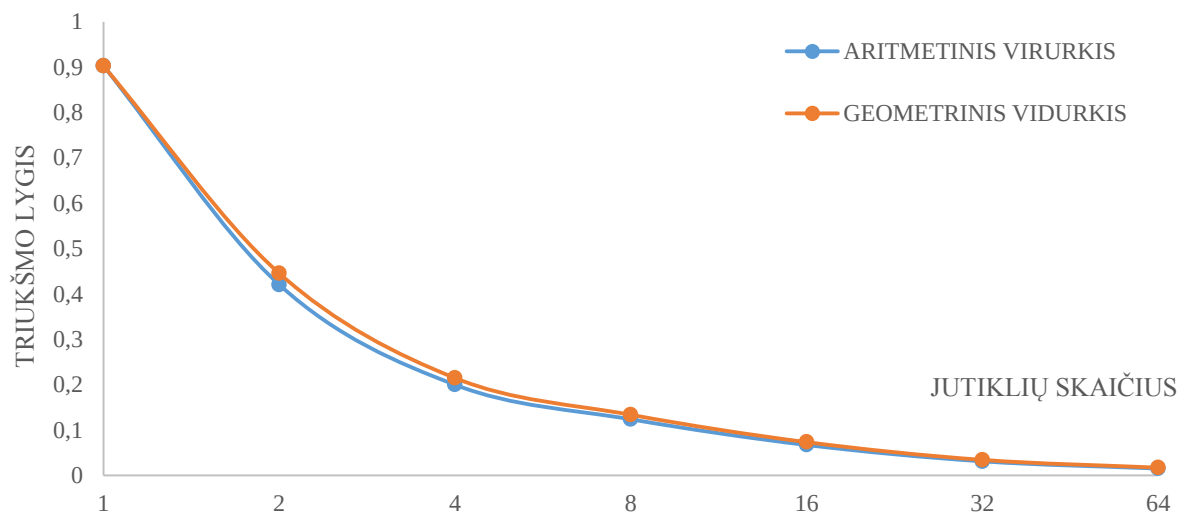
4.3 pav. Akselerometrų signal aritmetinis vidurkis



4.4 pav. A ir B akselerometrų signalų spektras kairėje, ir šių signalų aritmetinio vidurkio spektras dešinėje

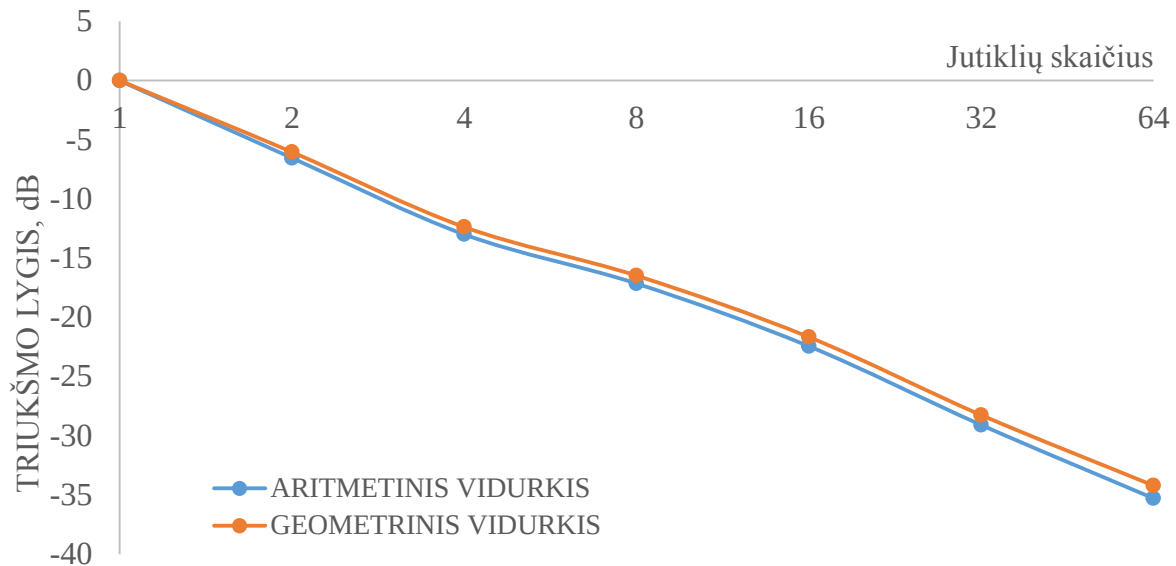
N jutiklių jungimas triukšmui mažinti. Jeigu jungiant jutiklius lygiagrečiai pagerėja matuojamo signalo kokybė, galbūt verta naudoti dar daugiau jutiklių ir taip dar labiau sumažinti triukšmo lygį signaluose? Šio tyrimo metu signalai buvo paimti ne iš realių akselerometrų, o susintezuoti dirbtinai, MS Excel terpėje.

Tyrimo rezultatai parodomi 4.5 ir 4.6 paveiksluose.



4.5 pav. Triukšmo lygis jungiant jutiklius lygiagrečiai

4.6 paveiksle pavaizduotas triukšmo lygio kitimas signaluose, jungiant signalus lygiagrečiai ir skaičiuojant jų aritmetinius ir geometrinius vidurkius.



4.6 pav. Triukšmo lygis jungiant jutiklius lygiagrečiai išreikštas dB

4.6 paveiksle pavaizduotas triukšmo slopinimas signaluose, jungiant signalus lygiagrečiai ir skaičiuojant jų aritmetinius ir geometrinius vidurkius.

Iš 4.5 ir 4.6 paveikslų matome, kad jungiant jutiklius lygiagrečiai garėja matuojamo signalo kokybė, mažėja triukšmo lygis signaluose. Padidinant jutiklių skaičių dvigubai, triukšmo lygis sumažėja irgi dvigubai, arba apytiksliai (-6 dB). Jungiant 64 jutiklius, triukšmo lygis ir sumažėja apie 64 kartus (apie -35 dB). Iš minėtų grafikų dar galime pamatyti, kad skaičiuojant aritmetinį vidurkį, triukšmo lygis gaunamas šiek tiek mažesnis nei skaičiuojant geometrinį vidurkį. Be to, geometrinio vidurkio skaičiavimas reikalauja daug daugiau procesoriaus resursų (reikia traukti N-ojo laipsnio šaknį).

Jungiant jutiklius lygiagrečiai susiduriama su kitomis problemomis. Daug jutiklių plokštėje užima daug vietos, be to jiems sujungti reikia papildomos aparatinės įrangos, kadangi standartiniai „MPU-9150“ jutikliai turi tik 2 galimus I2C sąsajos adresus. Be to, kiekviena jutiklio užklausa trunka iki kelių ms, taigi, jeigu vienu ciklu bandytume pateikti užklausą 64-iems jutikliams, tai truktų mažiausiai 120 ms, ir tai apribotų matavimo dažnį iki 7 Hz. Čia buvo kalbėta tik apie akselerometrus ir giroskopus. Magnetinio lauko jutikliai turi dar didesnę vėlinimą, jų atsakas į užklausą trunka apie 10 ms, slėgio jutiklių iki 100 ms, dėl to užklausus vienu ciklu 64 magnetinio lauko jutiklius, matavimo dažnis būtų mažesnis nei 2 Hz, 64 slėgio jutiklių – 6,4 s, 0,15 Hz. Jeigu naudojami analoginiai jutikliai, jų analoginių signalų pajungimui prie mikrovaldiklio reikia labai daug vietos plokštėje, tad geriausia tokiu atveju juos išdėstyti atskiroje plokštėje. Galimas ir toks scenarijus: lygiagrečiai jungti analoginius signalus, o tik po to juos siųsti į mikrovaldiklio ASK nuskaitymui. Tarkime, jeigu naudojame 16 akselerometrų, po 4 jų signalai yra jungiami

lygiagrečiai, bendram signalui yra naudojamas ŽDF, o vėliau šie 4 filtruoti signalai yra jungiami prie 4 ASK įėjimų mikrovaldiklyje. Mikrovaldiklyje jie gali būti interpretuojami individualiai. Taip išlaikomas geras signalo/triukšmo santykis ir neužimama daug ASK įėjimų ir vietos plokštėje.

4.2. Žemų dažnių filtras akcelerometrų signalų triukšmui sumažinti

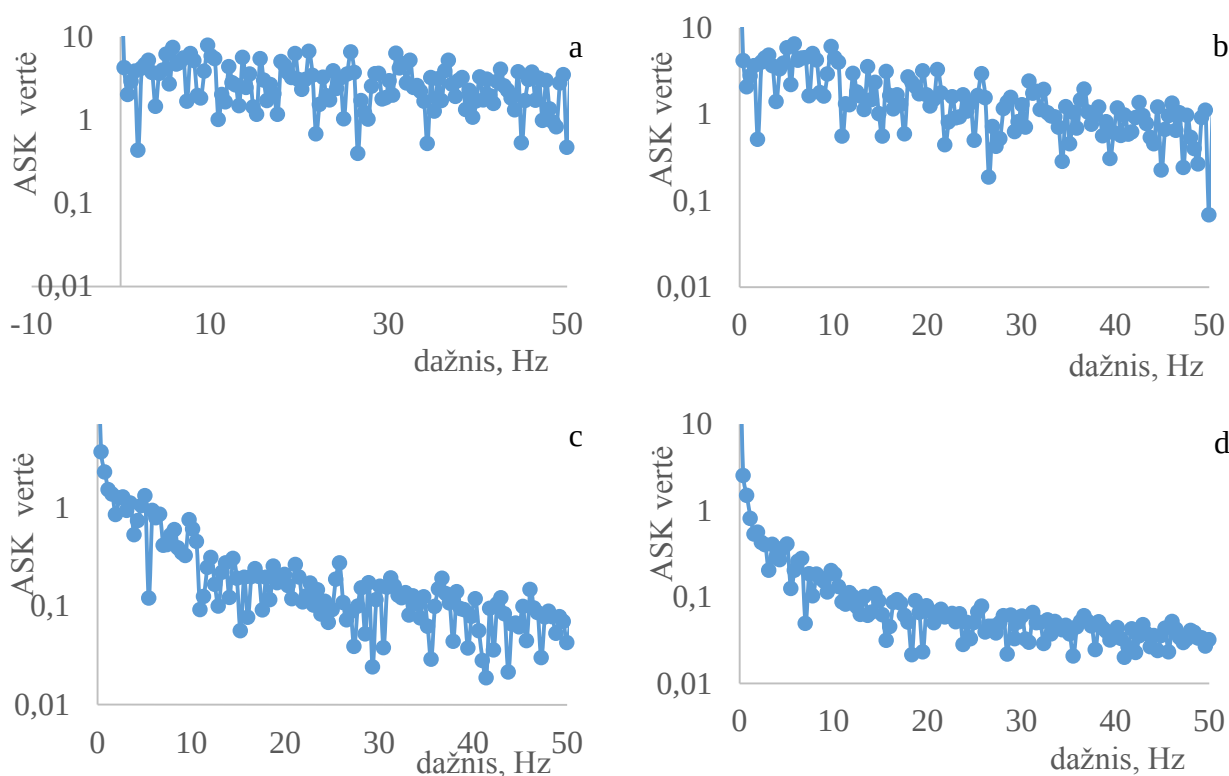
Akcelerometrų signalams filtruoti buvo bandoma panaudoti paprastą žemų dažnių filtrą. Buvo bandytos dvi jo realizacijos. Slenkančio lango ir paprastas ŽDF.

Slenkančio lango ŽDF realizuotas formule:

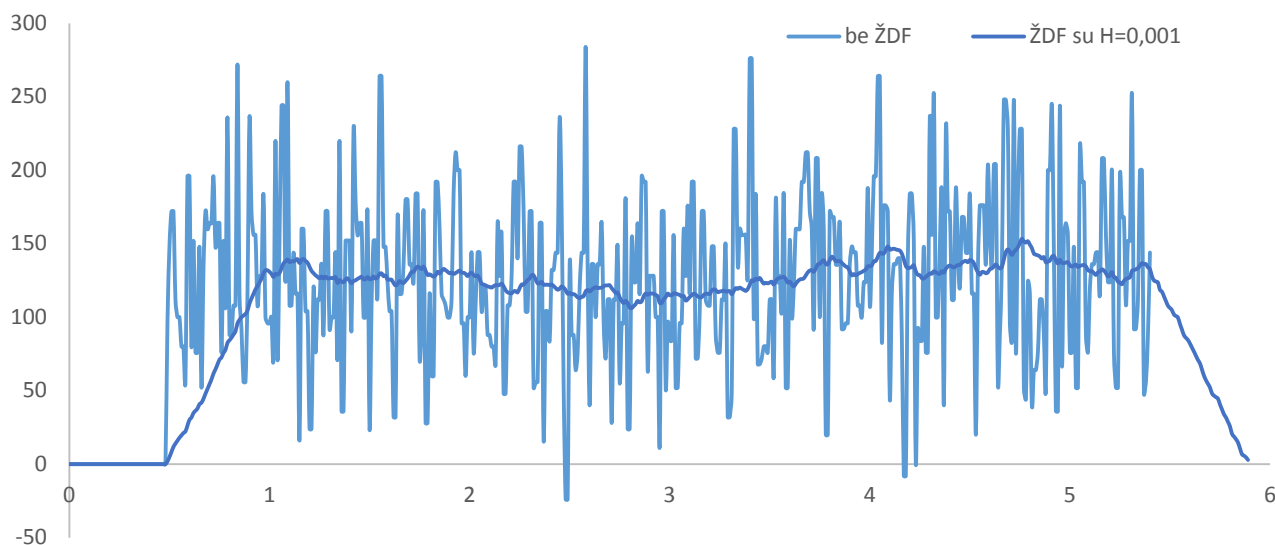
$$C_K = \frac{1}{2 \cdot K + 1} \sum_{j=-K}^K (x_{i+j}), \quad i=K, K+1, \dots, N-K \quad (4.6)$$

Paprastas ŽDF realizuotas formule:

$$C_K = H \cdot x_0 + (1 - H) \cdot C_{K-1} \quad (4.7)$$



4.7 pav. Paprasto ŽDF įtaka triukšmo spektrui kai H lygus a) 1 (be ŽDF); b) 0,5; c) 0,05; d) 0,001



4.8 pav. ŽDF įtaka akcelerometro triukšmui

4.3. Kalmano Filtras triukšmui sumažinti

Šaltojo karo metais, po sėkmingo SSRS dirbtinio žemės palydovo paleidimo į kosmoso erdvę, JAV nusprendė neatsilikti, ir 1960 m. buvo pradėta ruošti kelionei į mėnulį. Erdvėlaiviui *Appolo* reikėjo nepriekaištingos ir tikslios navigacinės sistemos. Mokslininkas [Rudolf \(Rudy\) E. Kálmán](#), sukūrė Kalmano filtrą, kuris turėjo padidinti kosminio erdvėlaivio *Appolo* navigacinės sistemos tikslumą, kuri turėjo padėti susiorientuoti kosmonautui Neilui Armstrongui viso skrydžio metu nuo žemės iki mėnulio ir atgal [2, 3].

Kalmano filtras dar kitaip vadinamas LQE (Linear Quadratic Estimation), jis skirtas sumažinti Gauso triukšmo lygį signale. Pagrindinis Kalmano filtro privalumas – jis yra labai našus, t.y. jis labai nereiklus skaičiavimo resursams, jam realizuoti užtenka labai paprastų loginių skaičiavimo įtaisų.

Paprastai tariant, Kalmano filtras – netiesinis filtras, kurio filtravimo savybės kinta laikui bėgant, priklausomai nuo signalo.

Kalmano filtras buvo kuriamas kosminio aparato navigacinės sistemos tikslumui padidinti. Į Kalmano filtrą ateidavo du pagrindiniai duomenys: tai signalai iš valdymo įrenginių, ir signalai iš inercinės navigacinės sistemos (buvo ir daugiau matavimo įrenginių, paprastumo dėlei jų neminėsimė). Valdymo įrenginiai tai galėjo būti duomenys iš greitėjimo/lėtėjimo valdymo įrenginių (paprastai tariant akceleracijos/stabdžių pedalo padėties duomenys), vairo mechanizmo valdymo padėties duomenys ir pan. Turint omenyje laivo masę, inercijos momentą ir pan. buvo galima nuspėti, kaip laivas reaguos į šiuos valdymo signalus. Iš inercinės navigacinės sistemos būdavo gaunami duomenys apie laivo orientacijos ir pagreičio kitimą. Tai buvo būsenos matavimo

duomenys. Kalmano filtro esmė ir pats didžiausias privalumas – jis geba pats nuspręsti, kada pasitikėti apskaičiuotais duomenimis pagal valdymo signalus, o kada pasitikėti būsenos matavimo rezultatais, arba naudoti šių duomenų sintezę, įvertinus kiekvieno iš šių dydžių dispersiją.

Sistemos būsenos nuspėjimą, remiantis sistemos valdymo duomenimis galima parašyti formule:

$$x_t = F_t \cdot x_{t-1} + B_t \cdot u_t + w_t, \quad (4.8)$$

x_t - numatoma, nustatyta esamos sistemos būsenos vertė (gali būti skaičius, vektorius ar matrica); x_{t-1} – praėita nustatyta sistemos būsena buvusių laiko momentu $t-1$; F_t - sistemos būsenos kitimas (skaičius, vektorius ar matrica) laiko momentu $t-1$; B_t - sistemos reakcijos matricą į valdymo vektorių (ar matricą) u_t , kurioje mūsų pavyzdyje gali būti susijusi su objekto inercija, u_t - kaip jau minėjome gali būti paprastai kalbant stabdymo/greitėjimo įrenginių padėtis, vairo mechanizmo pasukimo duomenys. w_t - sistemos triukšmas.

Sekančia lygtimi aprašysime jutiklių matavimus:

$$z = H_t \cdot x_t + v_t, \quad (4.9)$$

z_t - iš jutiklių išeinančių duomenų matrica; H_t - transformacijos matrica, kuri naudojama sistemos būsenai perkoduoti į matavimo rezultatų matricą; tai gali būti paprasčiausia skaičių matrica, kuri pavyzdžiui akselerometrų duomenis pakeičia iš minus $2^{16} \dots 2^{16}$ į minus $19.2 \frac{m}{s^2} \dots 19.2 \frac{m}{s^2}$; v_t - matavimo triukšmas.

Kalmano filtras susideda iš dviejų žingsnių: nuspėjimo ir matavimo reikšmės atnaujinimo. Sekančios reikšmės nuspėjimui naudojama formulė:

$$P_{t|t-1} = F_t \cdot P_{t-1|t-1} \cdot F_t^T + Q_t, \quad (4.10)$$

kur Q_t yra triukšmo matrica. $P_{t|t-1}$ – nuspėjamo dydžio dispersija, F_t Pagal tai, kokia dispersija gaunama atlikus matavimo, Kalmano filtras parenka, ar labiau verta pasitikėti išmatuota verte, ar apskaičiuotąja.

Reikšmės atnaujinimas:

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t(z_t - H_t \cdot \hat{x}_{t|t-1}) \quad (4.11)$$

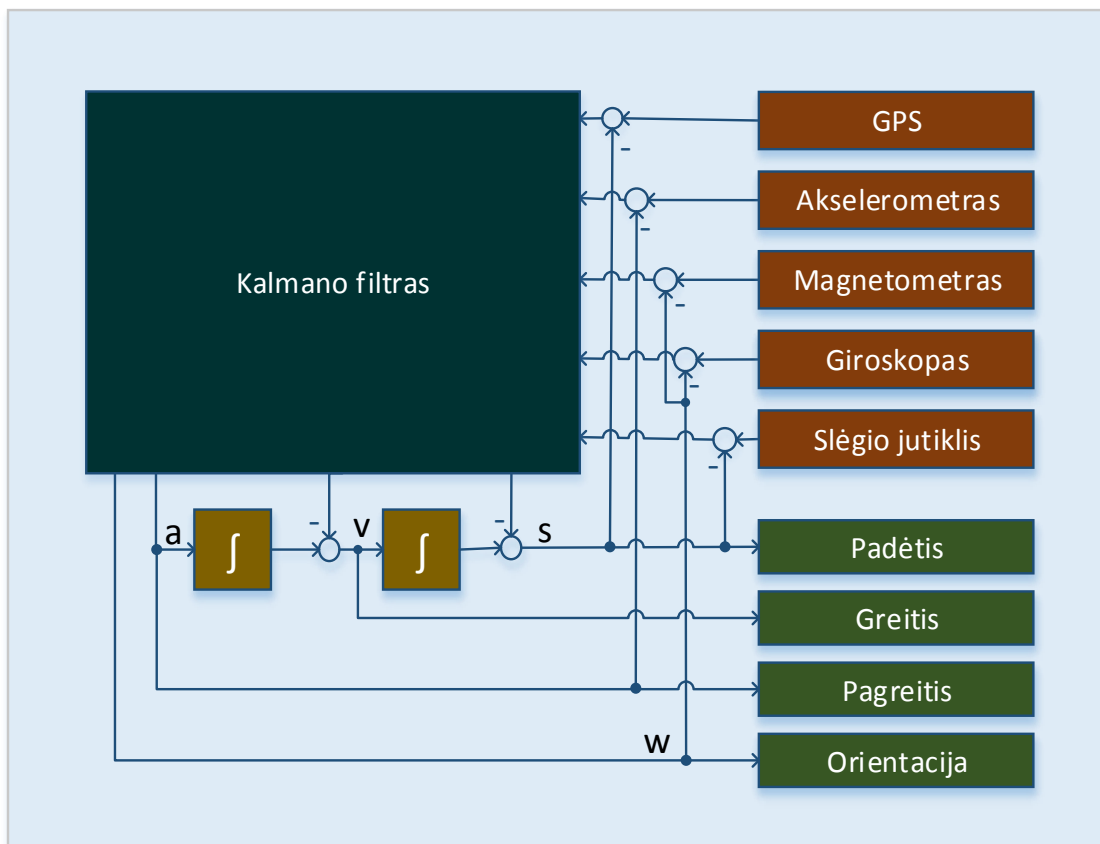
Dispersijos atnaujinimas:

$$P_{t|t} = P_{t|t-1} - K_t \cdot H_t \cdot P_{t|t-1}. \quad (4.12)$$

Kaip jau buvo minėta, Kalmano filtras tobulai tinka naudoti tuomet, kuomet turime vieną sistemos valdymo dydį, kitą – sistemos valdymo rezultato dydį, taip ir buvo sumanyta kuriant Kalmano filtrą.

Mūsų atveju, kuomet mes neturime sistemos valdymo dydžio, o turime tik vieną - sistemos kitimo dydį, Kalmano filtras nebetenka prasmės.

Idealiu atveju, Kalmano filtras galėtų būti panaudojamas visų jutiklių sintezei, kaip pavaizduota 4.9 paveiksle žemiau.



4.9 pav. Idealizuota visų jutiklių sintezė naudojant Kalmano filtrą

Modelyje matome kad visi jutikliai būtų naudojami padėties skaičiavime. Deja, ši realizacija pagal anksčiau minėtą pavyzdį yra nerealizuojama, kadangi nėra valdymo signalų, o tik sistemos būsenos matavimo rezultatai. Kitose sistemose, tarkime *u-blox* [9], valdymo signalai yra enkoderių signalai, įtaisyti kiekviename rate, bei vairo padėties signalai, kai tuo tarpu būsenos matavimo duomenys yra didelio tikslumo akselerometrų ir giroskopų duomenys.

Kalmano filtrą vidaus navigacinėse sistemose galima panaudoti kitais būdais: naudojant orientacijos skaičiavimuose, kuomet giroskopų duomenys yra interpretuojami kaip valdymo signalai, o gravitacijos ir magnetinio lauko jutiklių duomenys kaip sistemos būsenos. Kalmano filtras gali būti naudojamas be valdymo, kuomet matuojama tik sistemos būsena, ir jis naudojamas tik duomenų filtravimui, arba naudojant jį INS ir GPS signalų sintezei, tačiau vidaus navigacinėse sistemose GPS signalas nebeturi prasmės.

4.4. Giroskopų signalų tyrimas ir apdorojimas

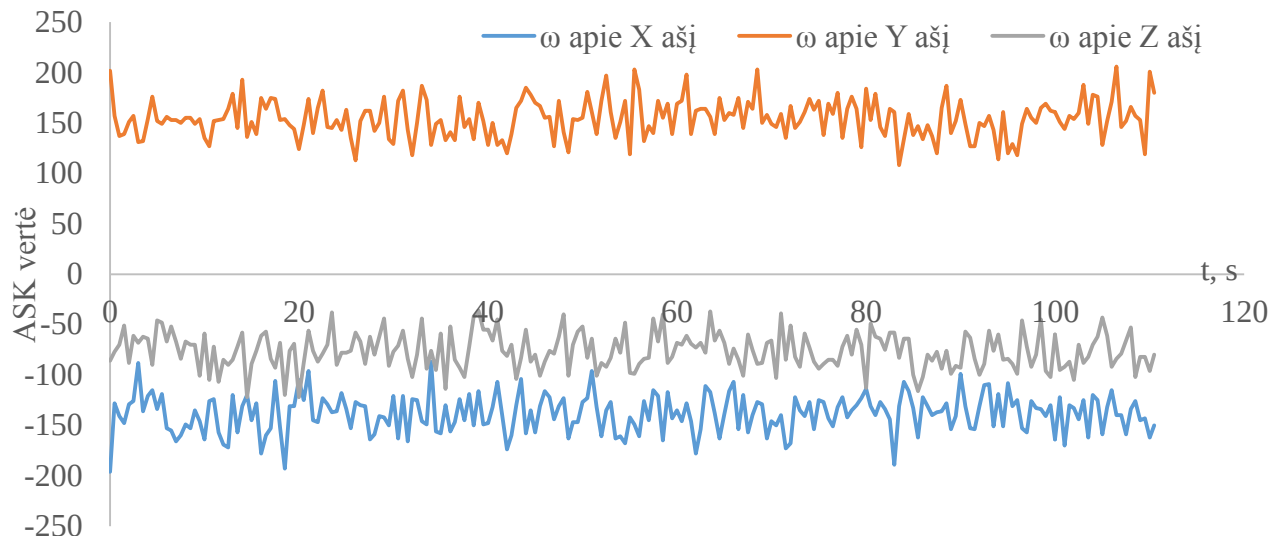
Šiame poskyryje bus aptartos puslaidininkinių giroskopų signalų tyrimo ir apdorojimo ypatybės, su kuriomis susiduriama naudojant giroskopus inercinėse navigacinėse sistemose.

Giroskopai tiesiogiai INS nėra naudojami, jie naudojami tik kaip pagalbiniai įrenginiai INS orientacijai nustatyti, tačiau tai nereiškia kad šiems signalams yra taikomi mažesni reikalavimai, anaiptol. Giroskopų signalai yra pagrindinė priemonė padedanti nustatyti greitą objekto orientacijos kitimą erdvėje, o tai yra labai svarbu kompensuojant akselerometrų signalų gravitacijos dedamąją. Tarkime, sistemai pasvirus žemės atžvilgiu nuo 0 iki 0,5 laipsnio, akselerometru būtų matomas $0,00872 \text{ m/s}^2$ pagreitis, nors objektas niekur nejuda, o tik pasvyra. Toks pokytis jau po 1h sudarytų 56 km paklaidą (4.13)!

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \Delta a t dt = (a_0 - a_1) \int_0^{3600} t dt = \left(0 - \frac{9.8 \text{ m}}{s^2} \cdot \sin(0,5^\circ)\right) \int_0^{3600} t dt =$$

$$= \frac{0,00872 \cdot 3600^2}{2} = 56 \text{ km} \quad (4.13)$$

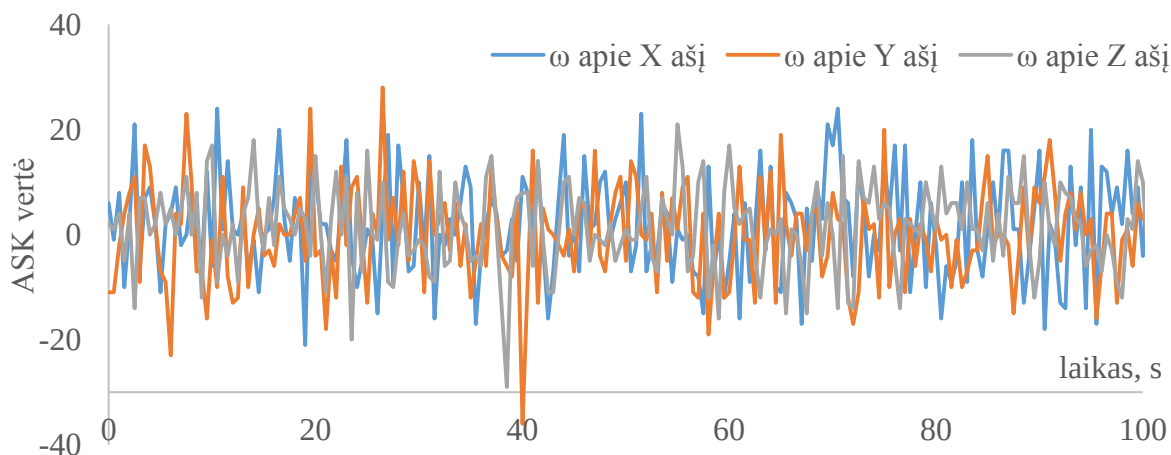
Giroskopai pasižymi dideliu tikslumu trumpu laikotarpiu, tačiau turi nuolatinės dedamosios ir jos kitimo problemą, tai matoma 4.10 paveiksle.



4.10 pav. Nekalibruotų giroskopų signalai

Giroskopų signalų nuolatinė dedamoji gali būti nesunkiai pašalinama naudojant pradinį prietaiso kalibravimą. Jis gali būti atliekamas kiekvieną kartą prieš naudojant INS. Tam tereikia padėti INS maketą nejudamai, ir matuoti giroskopų signalus. Išmatavus tarkime 10, 100 ar 1000 reikšmių suskaičiuoti jų vidurkį. Gauta reikšmė yra tos ašies nuolatinė dedamoji. Naudojant INS,

po kiekvieno kampinio greičio matavimo reikia iš jo atimti gautą nuolatinę dedamąją, ir gausime realų objekto sukimosi greitį.



4.11 pav. Kalibruotų giroskopų signalai

4.11 paveiksle pavaizduoti giroskopų kampinio greičio duomenys po pradinio kalibravimo. Giroskopai turi dar vieną neigiamą savybę – nuolatinės dedamosios kitimą bėgant laikui ir kampiniam greičiui. Tai reiškia, kad po tam tikro laiko arba po tam tikro INS veikiamo kampinio greičio, nuolatinė dedamoji pakinta, ir norint negauti paklaidų reikia ją vėl kompensuoti. Kad tai atlikti, reikia tam tikram laikui vėl padėti maketą nejudamai, skaičiuoti vidutinę signalų reikšmę ir vėl nuolat atimti iš matuojamų signalų naują suskaičiuotą dedamąją. Tai yra gana nepatogu, ir INS po pradinio kalibravimo po prietaiso įjungimo prietaisas daugiau nėra kalibruojamas. Laikui bėgant nuolatinė dedamoji yra kompensuojama orientacijos filtro pagalba, kuris aprašytas 4 skyriuje.

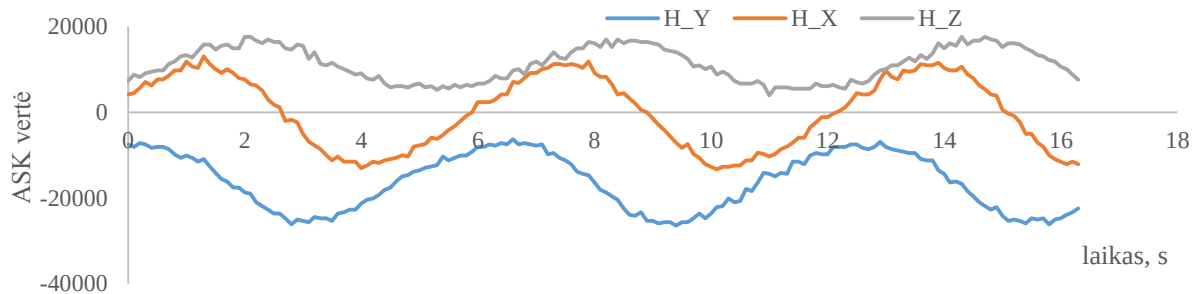
4.5. Magnetinio lauko jutiklių signalų tyrimas ir apdorojimas

Šiame poskyryje bus aptartos puslaidininkinių magnetometrų – elektroninio kompasų signalų tyrimo ir apdorojimo ypatybės, su kuriomis susiduriama naudojant magnetometrus inercinėse navigacinėse sistemose.

Magnetinio lauko jutiklių signalai kaip ir giroskopų nėra naudojami INS tiesiogiai. Jie naudojami tik kaip pagalbinė priemonė nustatyti objekto orientaciją, o tiksliau tik nurodo kurioje pusėje yra magnetinė žemės šiaurė. Kompasų signalai turi mažai įtakos gravitacijos projekcijos kitimui. Šiam uždaviniui užtenka akselerometrų ir giroskopų. Kompasas užtikrins stabilumą aplink horizontalią ašį. To reikia dekoduojant kuria kryptimi judėjo maketas.

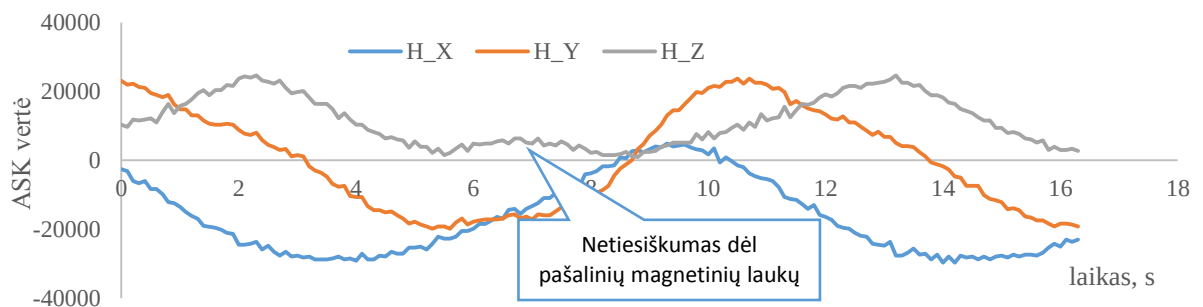
Pagrindinės elektroninių kompasų problemos: įsisotinimas ir jautrumas kitiems magnetiniams objektams.

Paveiksle 4.12 pavaizduotas normalus neįsisotinuso trijų ašių magnetinio lauko jutiklio duomenys, kuomet jutiklis sukamas ant horizontalios platformos apie . Kaip matome, „X“ ir „Y“ ašių jutiklių duomenys yra panašūs, tik skiriasi 90° faze. Kadangi žemės magnetinio lauko vektorius turi ne tik horizontalias dedamąsias, bet ir vertikalią, kadangi jis yra nukreiptas ir gilyn į žemės vidurį, matomas magnetinio lauko kitimas ir „Z“ ašyje.



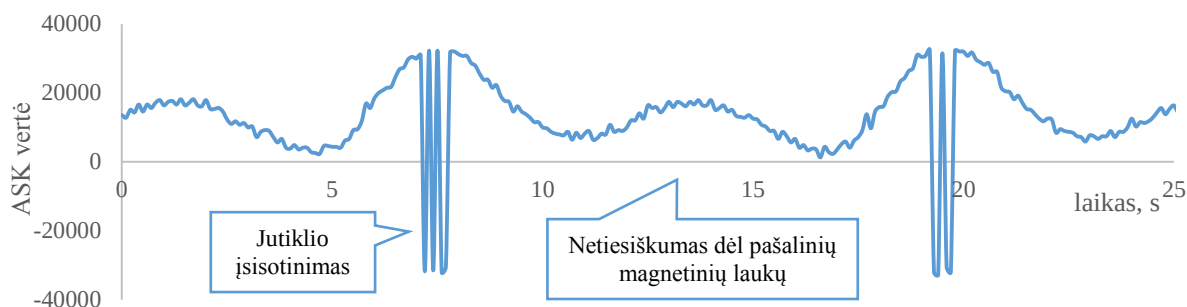
4.12 pav. Magnetinio lauko jutiklių duomenys be iškarpymų

4.13 paveiksle pavaizduotas tas pats magnetinio lauko kitimas trijų ašių elektroninio kompas jutiklių išėjimuose, kuomet jutiklis sukamas apie „Z“ ašį, tik šalia maketo 20-30 cm atstumu buvo padėti įmagnetinti metaliniai objektai. Kaip matome, tai atsispindi matuojamame magnetiniame lauke. Krenta į akis du dalykai: kai kuriose jutiklio ašyse matomas netiesiškumas neigiamoje periodo dalyje, ir kitas - visa magnetinio lauko kitimo dėsnio forma nebepanaši į sinusinio virpesio. Tokius duomenis naudojant ieškant magnetinės žemės šiaurės, bus neišvengta paklaidų.



4.13 pav. Magnetinio lauko jutiklių duomenys, kuomet jutiklis veikiamas pašalinių magnetinių laukų

4.14 paveiksle pavaizduotas „X“ ašies magnetinio lauko jutiklio signalas, kuomet jutiklis sukamas apie „Z“ ašį ir yra veikiamas stipraus išorinio magnetinio lauko. Pašalinis magnetinio lauko šaltinis buvo stiprus neodimio magnetas, padėtas 35 cm atstumu nuo besisukančio jutiklio. Kaip matome, be tradicinio harmoninio iškraipymo atsiranda stiprus iškraipymas atsirandantis dėl jutiklio įsisotinimo.



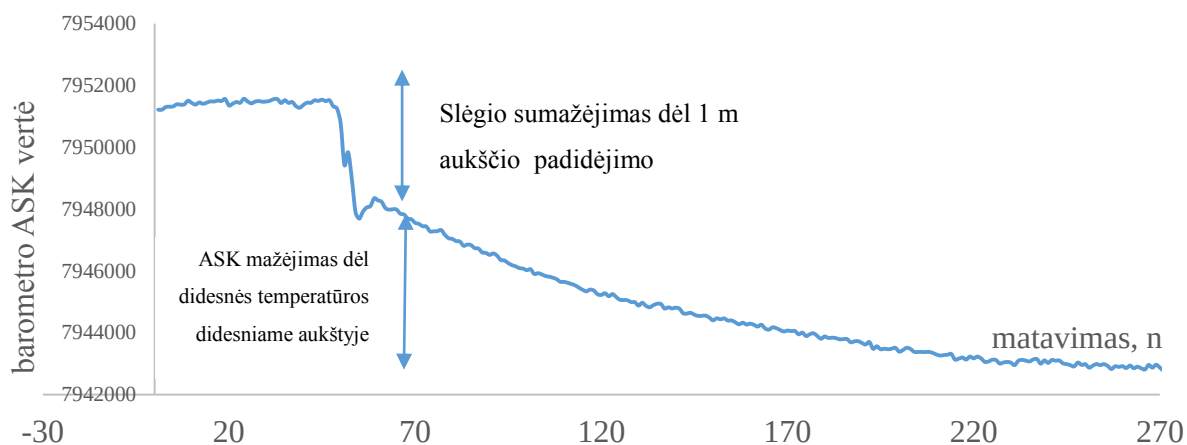
4.14 pav. Magnetinio lauko jutiklio įsisotinimas dėl stiprių pašalinių magnetinių laukų

4.6. Barometrų signalų tyrimas ir apdorojimas

Šiame poskyryje bus aptartos puslaidininkinių barometrų signalų tyrimo ir apdorojimo ypatybės, su kuriomis susiduriama naudojant barometrus inercinėse navigacinėse sistemose.

Puslaidininkinis barometras, arba kitaip slėgio jutiklis inercinėje navigacinėje sistemoje atlieka aukščio matavimo funkciją. Jis nustato vertikalų matuojamo objekto vietos kitimą.

Tyrimo metu buvo naudojamas aukščio jutiklis MS5611. Jis yra tikslus, jo aukščio raiška yra 0,1m. 4.15 paveiksle pavaizduotas šio jutiklio išėjimo signalas, kuomet jutiklis pakeliamas į 1 m aukštį.

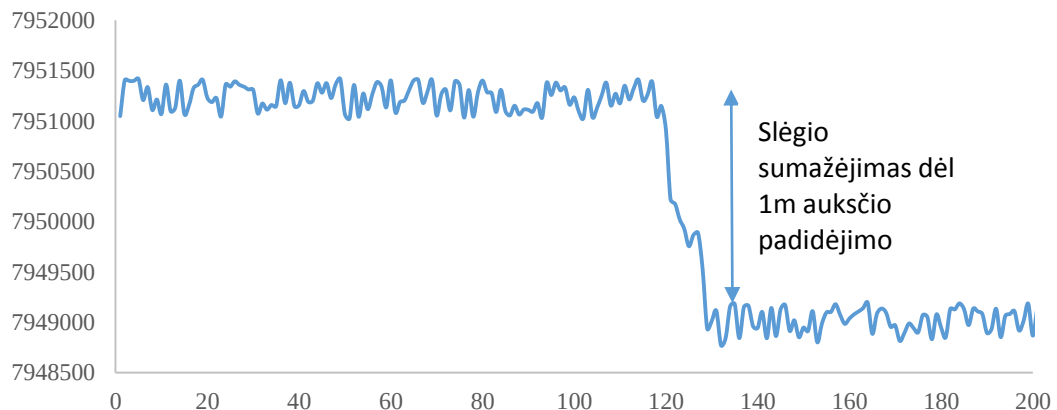


4.15 pav. Slėgio jutiklio duomenys be temperatūrinio kompensavimo

Paveiksle pavaizduota barometro ASK parodymai be jokio duomenų apdorojimo. Kaip matome, jutiklį pakėlus į 1 m aukštį, jutiklis reaguoja į slėgio pokytį, ir tai matoma jo išėjime, ASK vertė sumažėja nuo 7951500 iki 7948000. Tačiau, kadangi matavimai buvo atlikti kambario viduje, ir 1 m aukštyje temperatūra yra apie 2 laipsniais didesnė, po kurio laiko slėgio jutiklio ASK vertė ima dar labiau mažėti iki 7943000.

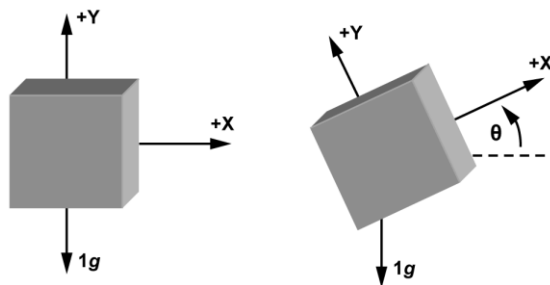
MS5611 jutiklis gaminamas kartu su integruotu tikslu temperatūros matavimo jutikliu. Tai leidžia atlikti temperatūros kompensavimą, ir sumažinti minėtą slėgio matuojamų duomenų priklausomybę nuo temperatūros.

Kompensavimo algoritmas buvo naudojamas toks kaip nurodė jutiklio gamintojas. Slėgio duomenys po kompensavimo pavaizduoti 4.16 paveiksle.



4.16 pav. Slėgio jutiklio duomenys po temperatūrinio kompensavimo

Žemės laisvojo kritimo pagreičio kompensacijos algoritmas Žemės laisvojo kritimo pagreitis vienaip ar kitaip neišvengiamai veikia akselerometrus, nekompensuota jo dedamoji sudaro labai dideles paklaidas. Problema pavaizduota 4.17 paveiksle, kuriame matome, kad dviejų ašių akselerometras pasviręs kampu į horizontą turi dvi gravitacijos dedamąsias į abi ašis. Šiame skyrelyje bus apžvelgti šio pagreičio kompensavimo algoritmai.



4.17 pav. Gravitacijos dedamosios kitimas akselerometrų ašyse

4.6.1. Žemės traukos kompensacija naudojant ADF

Žemės laisvojo kritimo pagrečius galima kompensuoti labai lengvai, tačiau šis metodas tinka tik momentiniam pagreičiui nustatyti, kur nei judėjimo, nei akselerometro kryptis nesikeičia. Toks metodas aprašomas formule:

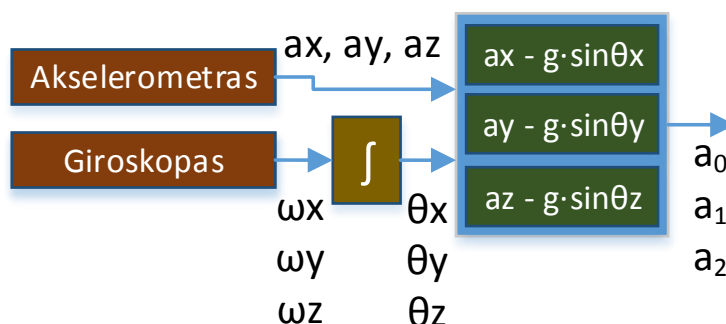
$$a_n = a_{aks} - a_0 \quad (4.14)$$

Realus objektą veikiantis pagreitis laiko momentu n lygus pagreičio kuomet objektas nebuvo pradėjęs judėti a_0 ir dabartinio pagreičio a_{aks} skirtumui. Metodas atrodo geras tuo, kad nereikia tiksliai žinoti koks yra žemės laisvojo kritimo pagreitis, tačiau netinkamas INS kadangi, jeigu

akselerometro orientacija padėtyje bent kiek nukrypsta, pasikeičia gravitacijos projekcija į akselerometro jautrumo ašį ir akselerometras ima rodyti ne realų judėjimo pagreitį, o pagreitį kartu su visu ar dalimi žemės laisvojo kritimo pagreičiu. Turint omenyje kokie pagreičiai veikia objektus judant INS (iki 1 m/s^2) ir koks yra žemės laisvojo kritimo pagreitis ($\sim 9,8 \text{ m/s}^2$), galima numatyti kokios didelės paklaidos gaunamos.

4.6.2. Žemės traukos kompensacija naudojant giroskopus

Kitas metodas yra sudėtingesnis, reikalaujantis papildomo įrenginio, giroskopo. Giroskopu matuojamas objekto orientacijos kitimas. Turint objekto orientaciją, apskaičiuojama kurioje kryptyje yra žemės laisvojo kritimo pagreičio vektorius, ir pagal tai iš akselerometro duomenų atimamas 9.8 m/s^2 pagreitis. 4.18 pav.



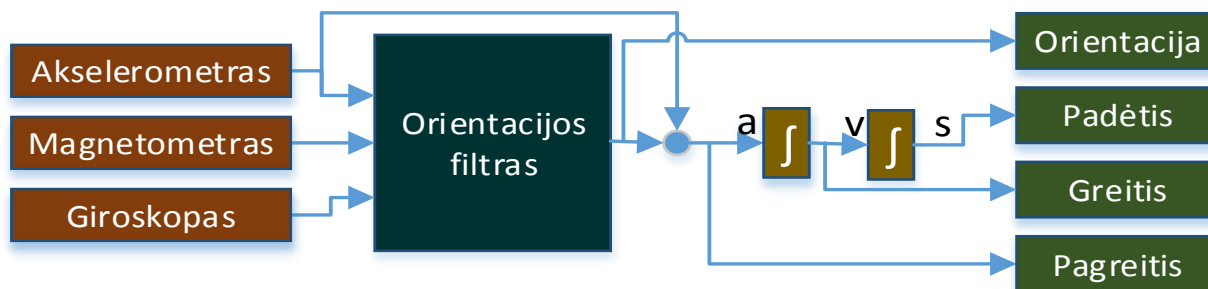
4.18 pav. Gravitacijos kompensavimas naudojant giroskopą

Pvz. Žinoma, kad pradžioje objektas buvo orientuotas taip, kad Žemės laisvojo kritimo pagreičio dedamoji veikė tik „Z“ ašį. O pats įrenginys buvo nukreiptas magnetinės šiaurės kryptimi. Laikui bėgant, objektas palinko $+10^\circ$ apie „Y“ ašį, tai reiškia kad pasikeitė ir gravitacijos projekcija į „Z“ ir „X“ ašis. Pagal tai kiek pasisuko įrenginys paskaičiuojama kiek pakito gravitacijos dedamoji į akselerometro ašis. Kuomet objektas juda, akselerometrų veikiantys pagreičiai yra matuojami ir registruojami. Skaičiuojamas objekto greitis ir padėtis. Jei objektas vėl pasisuka, giroskopai fiksuoja posūkį ir vėl atitinkamai įvertina gravitacijos dedamųjų komponentų pasiskirstymą akselerometrų ašyse. Viskas atrodytų neblogai, tačiau tiek giroskopai, tiek akselerometrai nėra idealūs, ką jau kalbėti apie puslaidininkinius. Puslaidininkiniai giroskopai per 1h nukrypsta iki 60° (pagaminti prieš 5 m nukrypdamo iki $100^\circ/\text{h}$), tai reiškia kad visa INS sistema, būdama vienoje vietoje (nejudėdama), gali manyti kad juda $1..10 \text{ m/s}^2$ pagreičiu. Vien per 1 h tai galėtų sudaryti 32400 km paklaidą!

$$S = \int_{t_1}^{t_2} a t dt = 5 \int_0^{3600} t dt = \frac{5 \cdot 3600^2}{2} = 32400 \text{ km} \quad (4.15)$$

4.6.3. Žemės traukos kompensacija naudojant orientacijos filtrą

Giroskopų paklaidos minimizavimo sprendimas – orientacijos filtras, kuris remiasi ne tik giroskopų duomenimis, bet ir akselerometrų bei magnetometrų. Sistemos, naudojantčios orientacijos filtrą realizacija pavaizduota 4.19 paveiksle.



4.19 pav. INS naudojami orientacijos filtrą gravitacijos dedamosioms akselerometruose panaikinti

Orientacijos filtro tikslas – teisingai, greitai ir sunaudojant kuo mažiau procesoriaus resursų suskaičiuoti objekto orientaciją erdvėje. Orientacijos filtras naudoja magnetinio lauko jutiklius ir akselerometrų nustatyti gravitacijos gradiento ir žemės magnetinio lauko kryptį. Giroskopai naudojami nustatyti objekto kampinį greitį.

Vyrauja keli šio filtro realizavimo metodai: Kalmano filtru ir parasto komplementaraus filtru grįstos technologijos.

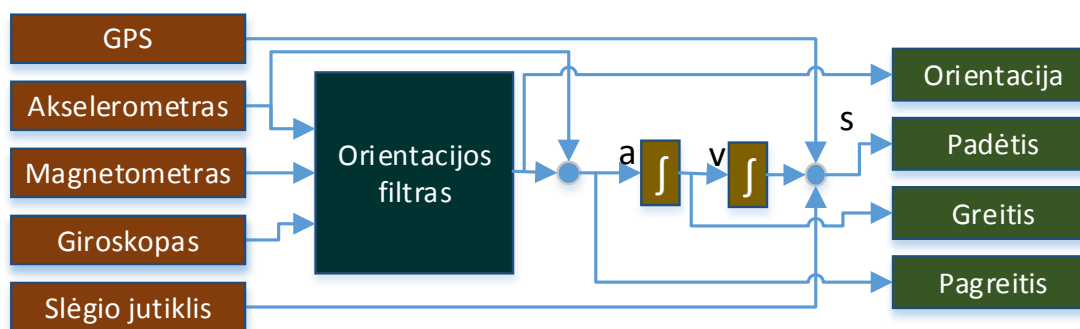
Labiausiai paplitusi ne Kalmano, o komplementaraus orientacijos filtro versija yra Sebastian O.H. Madgwick [12] parašytas filtras C kalba. Jame realizuota ir giroskopų plaukiojimo, ir magnetometrų įsisotinimo problema. Anot filtro autorius, jo sukurtas filtras reikalauja mažiau loginių operacijų apdorojant duomenis, o orientacijos tikslumo rezultatas yra panašus kaip ir Kalmano filtru grįstas orientacijos skaičiavimas. Šio filtro veikimas tyrimo metu buvo išbandytas ir rezultatai pristatyti 5 skyriuje.

Kalmano filtru grįsto orientacijos filtro veikimo principas yra kiek kitoks negu pats Kalmano filtras buvo sukurtas. Jame, vietoje valdymo duomenų yra naudojami giroskopų jutiklių duomenys, vietoje sistemos būsenos duomenų-akselerometrų ir magnetometrų duomenys. Iš esmės, Kalmano filtras buvo sukurtas veikti kiek kitomis aplinkybėmis, ir nors naudojant jį orientacijos skaičiavimui jis ir atlieka savo darbą, tačiau yra neišnaudojamos visos jo galimybės. Be to, pilno Kalmano filtro realizacija mikrovaldiklyje yra labai komplikauta, ir pateiktuose pavyzdžiuose yra tik dalinai išspręsta giroskopų nuolatinės dedamosios „plaukiojimo“ ir magnetinio lauko jutiklių įsisotinimo problemos [14].

4.7. Vidaus navigacinės sistemos jutiklių sintezė

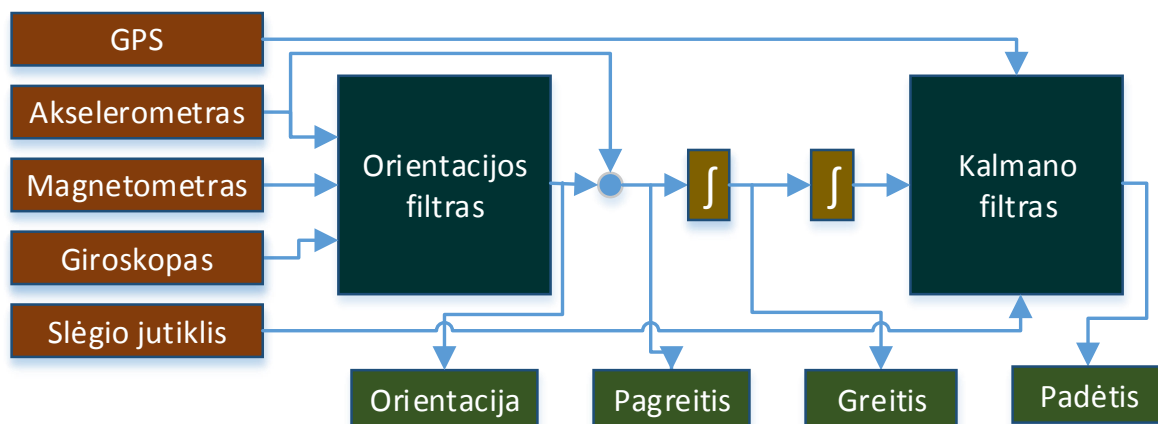
Žinant sistemos orientaciją erdvėje, ir ją veikiančius pagreičius, tokią sistemą galima laikyti navigacine. Tik nuo duomenų, ir duomenų apdorojimo metodų tikslumo priklauso navigacinės sistemos tikslumas. Teoriškai, turint kuo daugiau įvairių aplinkos jutiklių, tiek mechaninių, tiek slėgio ar kitų, tuo tiksliau turėtų veikti visa sistema. Tačiau kuo daugiau jutiklių naudojame, tuo didesnių sunkumų kyla apdorojant šiuos duomenis. Reikia imtis sudėtingų duomenų sintezės algoritmų, norint išnaudoti visų jutiklių galimybes.

4.20 paveiksle pavaizduota patobulinta vidaus navigacinės sistemos realizacija. Kaip matome, sistema papildyta GPS imtuvu ir slėgio jutikliu. GPS imtuvas suteiktų sistemai stabilumo ir tikslumo, kuomet GPS signalas yra prieinamas. Slėgio jutiklis suteiktų sistemai tikslumo vertikalios ašies atžvilgiu.



4.20 pav. Vidaus navigacinės sistemos struktūrinė schema

Šioje sistemoje yra probleminė vieta. Tai GPS, slėgio, ir padėties gautos iš inercinės navigacinės sistemos sintezė. Slėgio ir GPS signalai yra patikimi ilgu laikotarpiu, kai tuo tarpu INS yra patikima trumpu laikotarpiu. Signalus galima apjungti komplementariu filtru. T.y. GPS ir slėgio jutiklius apdoroti žemo dažnio filtru, o INS - aukšto dažnio filtru. Tačiau, geresnius rezultatus galima pasiekti sintezei naudojant Kalmano filtrą, kaip pavaizduota 4.21 paveiksle. Jo INS sistemos duomenis naudojant kaip matuojamus dydžius, o slėgio ir GPS kaip signalus, pagal kurios Kalmano filtras nuspręs ar pasitikėti INS duomenimis ar ne.



4.21 pav. Vidaus navigacinė sistema, duomenų sintezei naudojanti Kalmano filtrą

Kalmano filtru grįstos navigacinės sistemos būsenos matavimo duomenys galėtų būti GPS ir slėgio jutiklių duomenys, valdymo signalai galėtų būti duomenys iš INS. Tai reiškia, kad naudodama INS ji apskaičiuotų savo padėtį erdvėje, o remdamasi GPS ir slėgio jutikliu ją išmatuotų. Blogai tai, kad viduje GPS signalu pasikliauti negalima, tad padėties matavimui liktų tik slėgio jutiklis, kuris užtikrina tik vertikalios pozicijos matavimo tikslumą. Beliau tik INS apskaičiuota pozicija, kuri įgauna labai dideles paklaidas laikui bėgant.

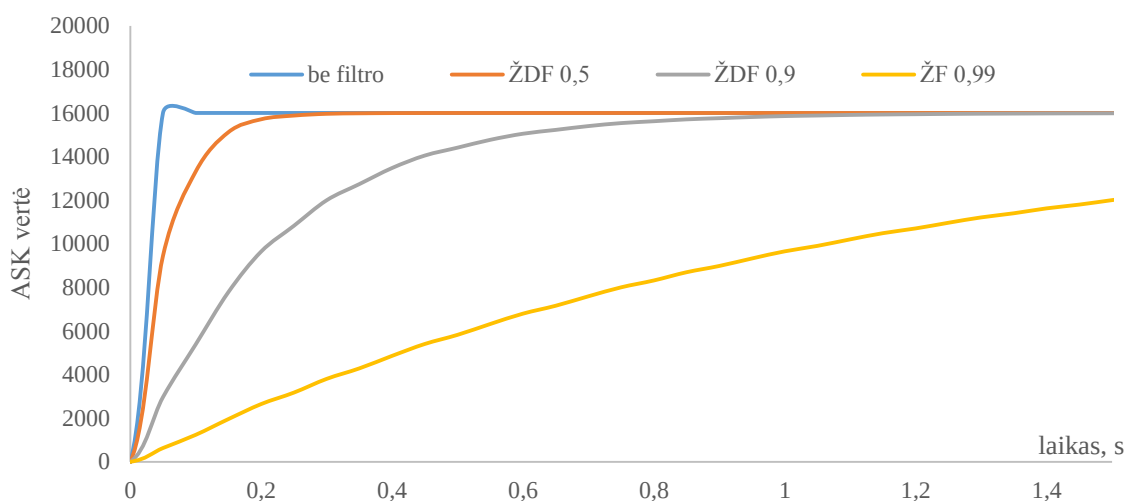
Skyles išvados

Šiame skyriuje buvo aptartos ir patikrintos vidaus navigacinėse sistemose naudojamų jutiklių problemos. Kiekvienas sistemoje naudojamas jutiklis turi savo trūkumų: akselerometrai turi gravitacijos kompensavimo ir triukšmo problemą, giroskopai – nuolatinės dedamosios kitimo, slėgio jutikliai – temperatūros priklausomybės, elektroniniai kompasai – įsisotinimo ir jautrumo pašaliniam magnetiniam laukams problemas. Šias problemas daugiau ar mažiau galima kompensuoti, sumažinti. Naudojant jutiklius kartu, galima vieno jutiklio trūkumus pakeisti kitų jutiklių privalumais, taip gerinant visos sistemos darbą, tačiau tai įneša papildomų užduočių: reikia atlikti skirtingų jutiklių signalų sintezę, įvertinant kiekvieno jutiklio privalumus bei trūkumus. Sekančiame skyriuje bus

5. JUTIKLIŲ SIGNALŲ APDOROJIMO METODŲ ĮTAKOS VIDAUS NAVIGACIJOS TIKSLUMUI PALYGINIMAS

5.1. Žemų dažnių filtro įtaka navigacijos tikslumui

Šio tyrimo metu bus tiriama, kaip kinta padėties paklaida akselerometrų signalus apdorojant ŽDF, ir vėliau apdorotus signalus naudojant padėties skaičiavimuose. Šie filtrai apskaičiuojami pagal formulę 4.7. Tyrimo metu bus naudojami filtrai: $K=0$ (be ŽDF), $K=0.5$, $K=0.9$ ir $K=0.99$. Šių filtrų vienetinio šuolio reakcijos pavaizduotos 5.1 paveiksle.

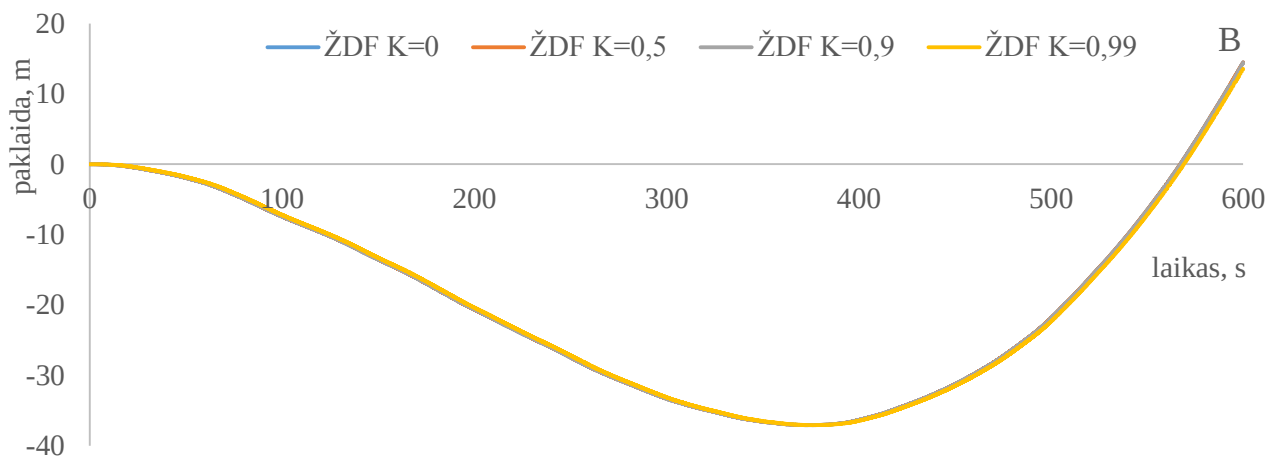


5.1 pav. Naudojamų ŽDF filtrų reakcijos į slenksčio funkciją

5.1.1. Žemų dažnių filtro įtaka filtruoti nejudančio akselerometro signalams

Šio tyrimo metu buvo išsiaiškinta, kaip padėties paklaida priklauso nuo triukšmo nejudančio akselerometro signaluose, ir kaip padėties paklaida kinta mažinant akselerometrų triukšmą paprastu ŽDF.

Tyrimo metu maketas buvo padėtas nejudamai, ir matuojami vienos ašies akselerometrų signalai. Matavimo trukmė – 10 minučių, per kurias buvo surinkta 1200000 akselerometro verčių (4 vertės, matavimo dažnis $f=50$ Hz). Duomenyse buvo panaikinta nuolatinė dedamoji (iš kiekvienos vertės atimtas imties vidurkis), ir duomenys buvo apdoroti keliais žemo dažnio filtrais. Vėliau, naudojant apdorotus duomenis buvo skaičiuojama objekto padėtis. Patogesniai duomenų apdorojimui ir tyrimui, padėties skaičiavimas buvo vykdomas kompiuteryje, MS Excel aplinkoje. 5.2 paveiksle pavaizduota padėties paklaida, atsirandanti dėl balto triukšmo signaluose per 600 s (10 min), kuomet akselerometrų duomenys apdorojami įvairiais filtrais.



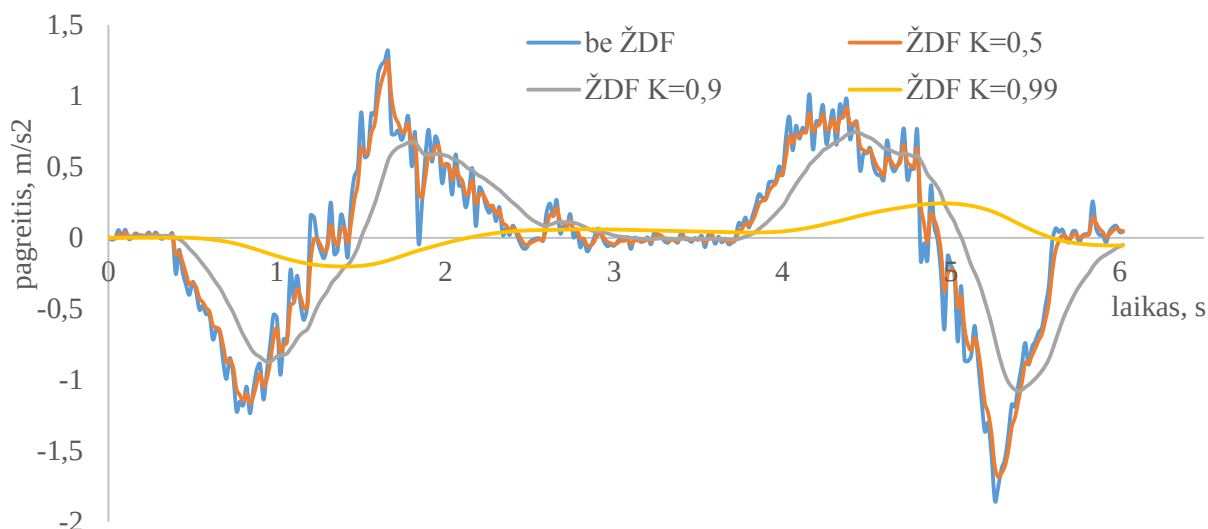
5.2 pav. Padėties paklaida dėl akselerometro triukšmų per a) 10, b) 600 s

Paveiksluose matome, kad padėties paklaida per 10 minučių jau 35 m. Paklaidos šaltinis - triukšmas signale, kuris pagal formulę sukuria padėties paklaidą kurios nuolatinė dedamoji lygi nuliui, ir dispersija apibūdinama pagal formulę 3.8. Formulėje σ yra pagreičio dispersija, δt - diskretizavimo periodas, kuris mūsų atveju lygus 0.02 s, t – laikas.

Iš paveikslo taip pat matome, kad filtrai praktiškai neturi įtakos padėties paklaidai, net naudojant labai didelio slopinimo ŽDF, ilgame laikotarpyje signalo paklaida tokia patik kaip ir nenaudojant jokių ŽDF. Didelio

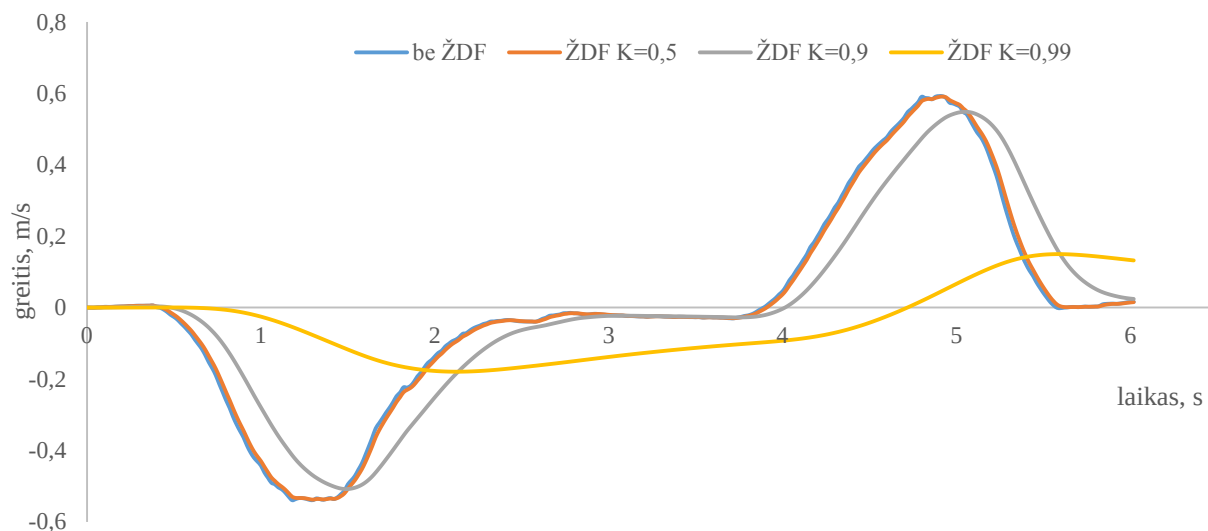
5.1.2. Žemų dažnių filtro įtaka judančio akselerometro signalams

Šio tyrimo metu visas maketas nekeičiant judėjimo trajektorijas bus pastumtas atstumu $D=0.5$ m į šalį, ir po kiek laiko grąžintas vėl atgal į tą pačią vietą. Tyrimo metu iš pagreičio duomenų bus nustatyta koku atstumu buvo pastumtas maketas. Vėliau pagreičio duomenys bus apdoroti keliais ŽDF, tokiais kurie buvo naudoti 5.1.1. skyriuje.



5.3 pav. Judančio akselerometro duomenys prieš ir po apdorojimo ŽDF

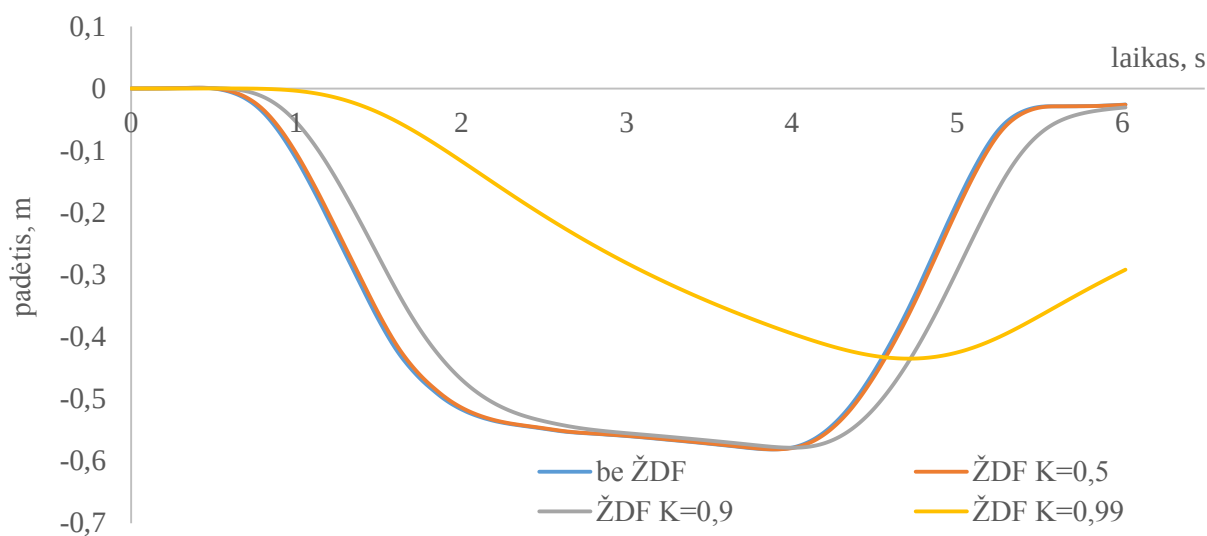
5.3 paveiksle pavaizduoti judančio akselerometro duomenys. Akselerometras buvo pastumtas atstumu $D=0,5$ m išilgai akselerometro, ir vėliau grąžintas atgal į tą pačią vietą. Pagreičio oscilogramoje matome, kad pradžioje maketą veikė neigiamas greitėjimo pagreitis (0,5 - 1,5 s), vėliau teigiamas (1,5 - 2,5 s). Maketą traukiant atgal pagreičių kryptys yra atvirkščios (4-6s). Žvelgiant į ŽDF įtaką signalams, matome, kad be ŽDF pagreičio signalas atrodo labai triukšmingas. Didinant filtro K , atsiranda signalo vėlinimas, silpnėja jo amplitudė, ir kuomet $K=99$, signalas atrodo lygus, tačiau jo fazė ir amplitudė labai skiriasi nuo nefiltruoto signalo.



5.4 pav. Maketo greičio kitimas, apskaičiuotas naudojant ŽDF apdorotus akselerometrų duomenis

5.4 paveiksle pavaizduota maketo judėjimo greičio oscilograma, kuri buvo gauta naudojant filtruotus akselerometro duomenis. Lyginat su pagreičio oscilograma, krenta į akis vienas dalykas – sumažėjo triukšmo lygis signale, ir net sunku pasakyti, kurie pagreičio duomenys buvo apdoroti

ŽDF, kurie – ne. Sekančiame 5.5 paveiksle pavaizduota apskaičiuota padėtis, naudojant apdorotus pagreičio duomenis.

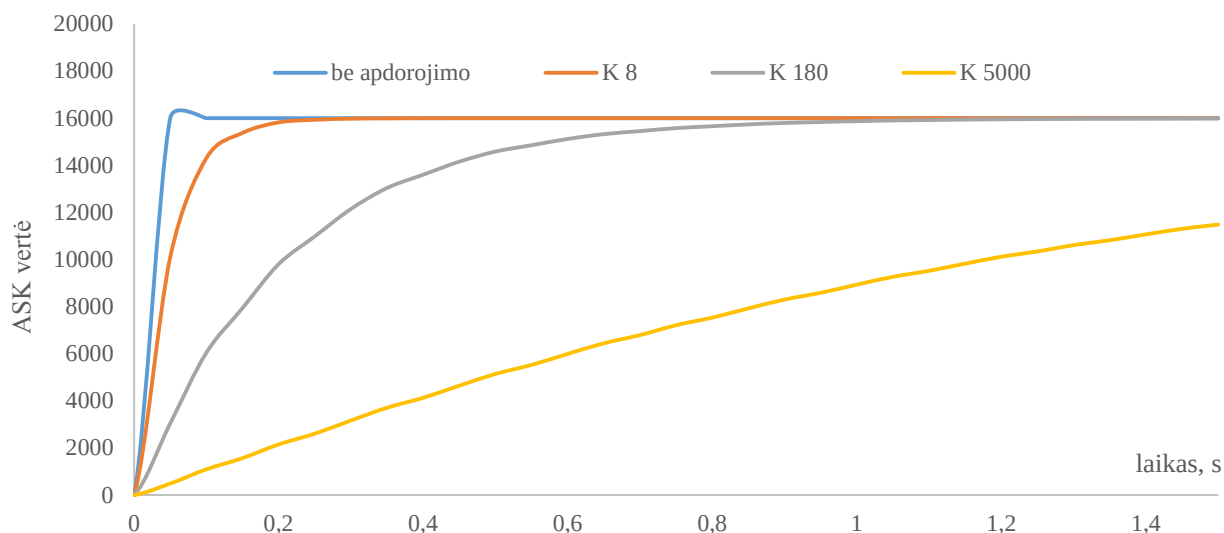


5.5 pav. Padėties kitimas, apskaičiuotas naudojant ŽDF apdorotus akselerometrų duomenis

Signale visiškai išnyko triukšmas signaluose, ir be legendos paveiksle sunku atskirti kurie pagreičio duomenys, filtruoti ar ne buvo naudoti padėties skaičiavime. Taip yra dėl natūralaus ŽDF ir padėties skaičiavimo esminio panašumo. Abiem atvejais atliekamas integravimas, kuris veikia kaip ŽDF. Galime daryti išvadą, kad padėties skaičiavimui visiškai nereikia neduoti ŽDF, nes signalas bus filtruojamas savaime skaičiuojant padėtį. ŽDF įneša tik papildomą vėlinimą ir signalo slopinimą.

5.2. Kalmano filtro, naudojamo akselerometro duomenims filtruoti, įtaka navigacijos tikslumui

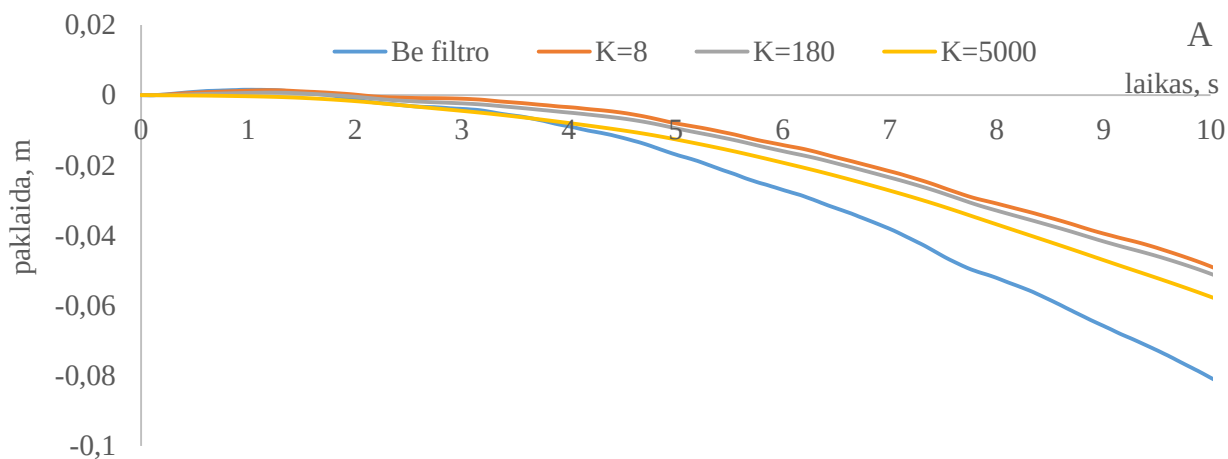
Kalmano filtras bus naudojamas neišnaudojant visų jo galimybių, kadangi jis bus naudojamas be sistemos valdymo signalų. Tai sumažins jo filtravimo savybes. Kalmano filtras buvo aprašytas 4 skyriuje, čia bus pateikti jo tyrimo rezultatai. Norint vėliau lengviau palyginti Kalmano ir ŽDF įtaką sistemos taiklumui, Kalmano filtro filtravimo koeficientai K parinkti taip, kad filtruotų signalų reakcija į vienetinio šolio virpesį būtų panaši kaip ir ŽDF naudoto 5.1 poskyryje.

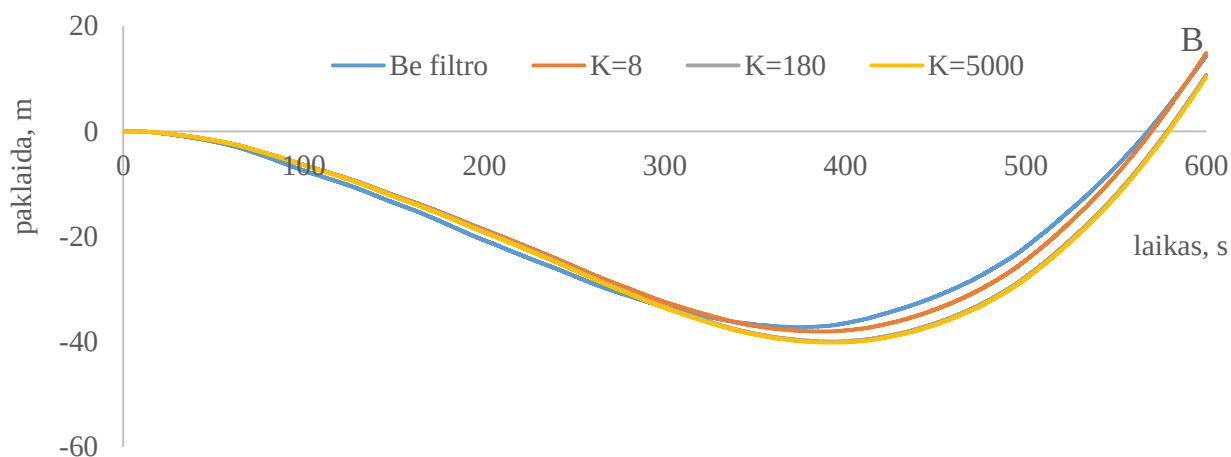


5.6 pav. Kalmano filtro reakcija į vienetinio šuolio signalą esant įvairiems filtravimo koeficientams K

5.2.1. Kalmano filtras nejudančio akselerometro duomenims filtruoti

Šio tyrimo metu bus išsiaiškinta, kaip paprastas Kalmano filtras padeda sumažinti padėties paklaidą, naudojant jį akselerometro duomenims filtruoti. Tyrimo metodika tokia pati kaip ir 5.1.1 skyrelyje, tačiau duomenų apdorojimui naudojami ne ŽDF, o Kalmano filtrai. Tyrimo rezultatai pavaizduoti 5.7 paveiksle. Čia pateikti padėties skaičiavimo rezultatai, kuomet skaičiavimui buvo naudojami Kalmano filtru apdoroti akselerometro duomenys. Kaip matome, paprastas Kalmano filtras taip pat nepadidina navigacinės sistemos atsparumo triukšmams, ir atvirkščiai, filtras tik, įneša nereikalingą signalų vėlinimą. Per 10 minučių paklaida pakyla iki 30 m.

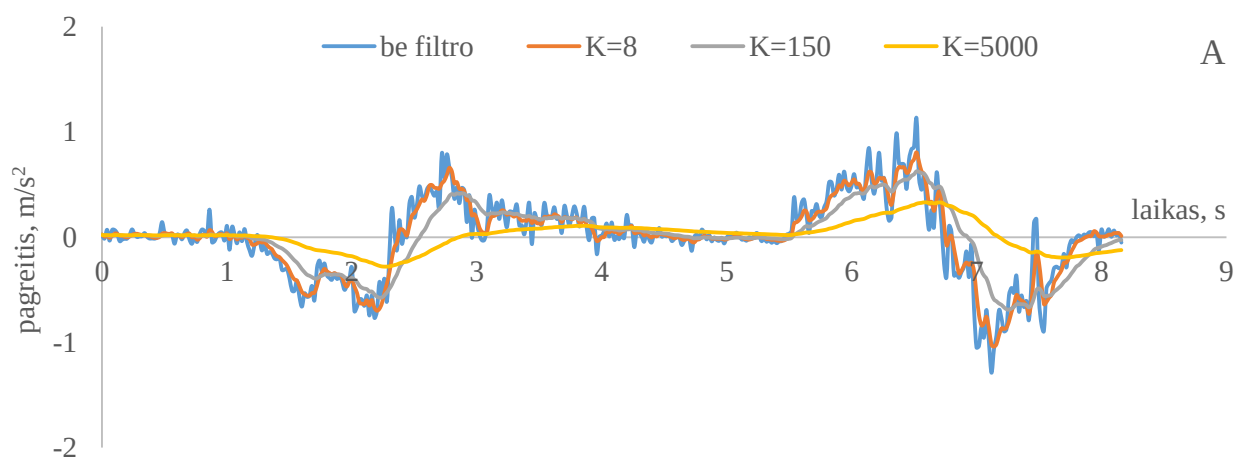




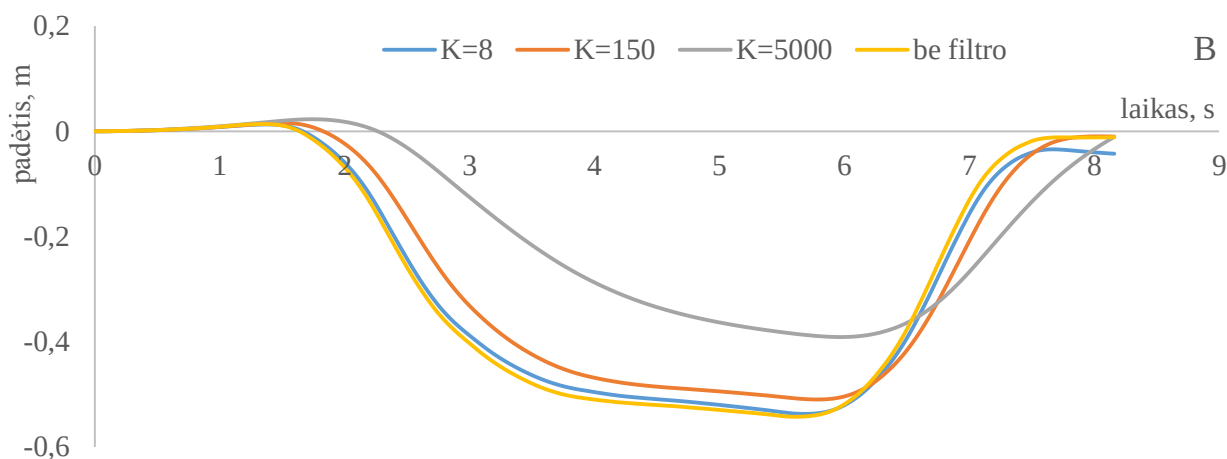
5.7 pav. Padėties paklaida per A – 10 s ir B - 10 min, skaičiavimui naudojant Kalmano filtru apdorotus akselerometro duomenis

5.2.2. Kalmano filtras judančio akselerometro duomenims filtruoti

5.8 paveiksle A pavaizduoti Kalmano filtru apdoroti judančio akselerometro duomenys. Tyrimo metodika ir rezultatai panašūs kaip ir 5.1.2. skyrelyje, kuomet duomenų apdorojimui buvo naudojamas ŽDF. Iš paveikslo matome, kad paprastas Kalmano filtras sumažina triukšmo lygį akselerometro signaluose. 5.8 paveiksle B pavaizduotas maketo padėties kitimas, skaičiavimui naudojant Kalmano filtru apdorotus akselerometro duomenis. Matome, kad Kalmano filtras realios naudos neduoda, ir atvirkščiai, naudojant labai didelio slopinimo Kalmano filtrą, padėtis apskaičiuojama klaidingai ($K=5000$).



5.8 pav. Kalmano filtras judančio akselerometro duomenims filtruoti



5.9. pav. Kalmano filtras judančio akselerometro duomenims filtruoti A ir padėtis apskaičiuota naudojant šiuos duomenis B

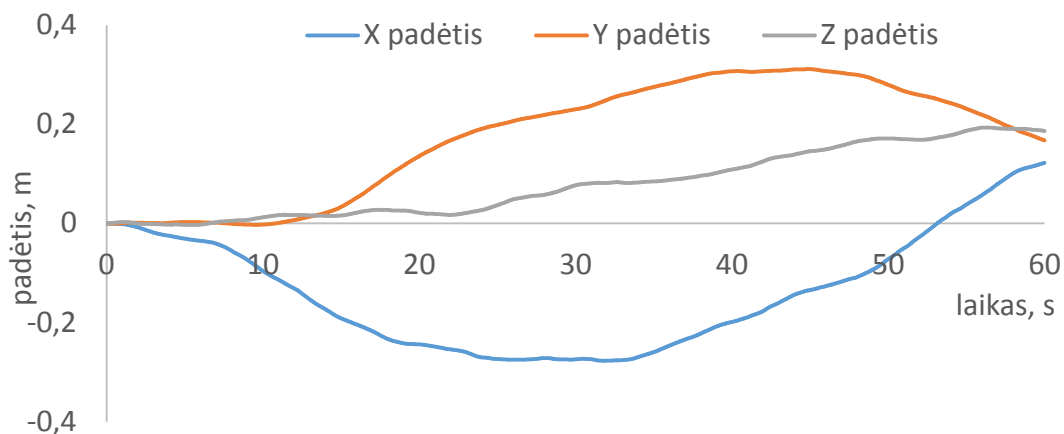
Kalmano filtras akselerometrų duomenims filtruoti pasirodė neefektyvus, kadangi veikdamas be valdymo signalų jis veikia tik iš dalies. Filtras visuomet paskaičiuoja pagreičio vertę remdamasis buvusiu apskaičiuota ir šiuo metu atliktu matavimu. Reikia nepamiršti, kad šio tyrimo metu, prieš naudojant akselerometro duomenis padėties skaičiavimui, duomenyse buvo panaikinta nuolatinė dedamoji, dėl to rezultatai yra idealizuoti.

5.3. Orientacijos filtro, naudojamo gravitacijai kompensuoti, tyrimas

Svarbiausias inercinės navigacinės sistemos dalis – orientacijos filtras. Šiame poskyryje bus patektas vidaus navigacijoje pritaikyto Sebastian O.H. Madgwick, [6] orientacijos filtro tyrimas. Tyrimo metu buvo aiškinamasi kaip kinta padėties paklaida, kuomet sistema veikia keturiuose režimuose: a) nekinta nei objekto padėtis nei orientacija; b) kinta orientacija, bet nekinta padėtis; c) kinta padėtis, bet nekinta orientacija. Reikia turėti omenyje, kad skaičiuojant objekto orientaciją, mikrovaldikliui tenka nemenka užduotis, reikia atlikinėti aritmetines operacijas su daugybe duomenų, dalis duomenų yra slankaus kablelio, dėl to rezultato atnaujinimo dažnis nuo 50 Hz sumažintas iki 20 Hz.

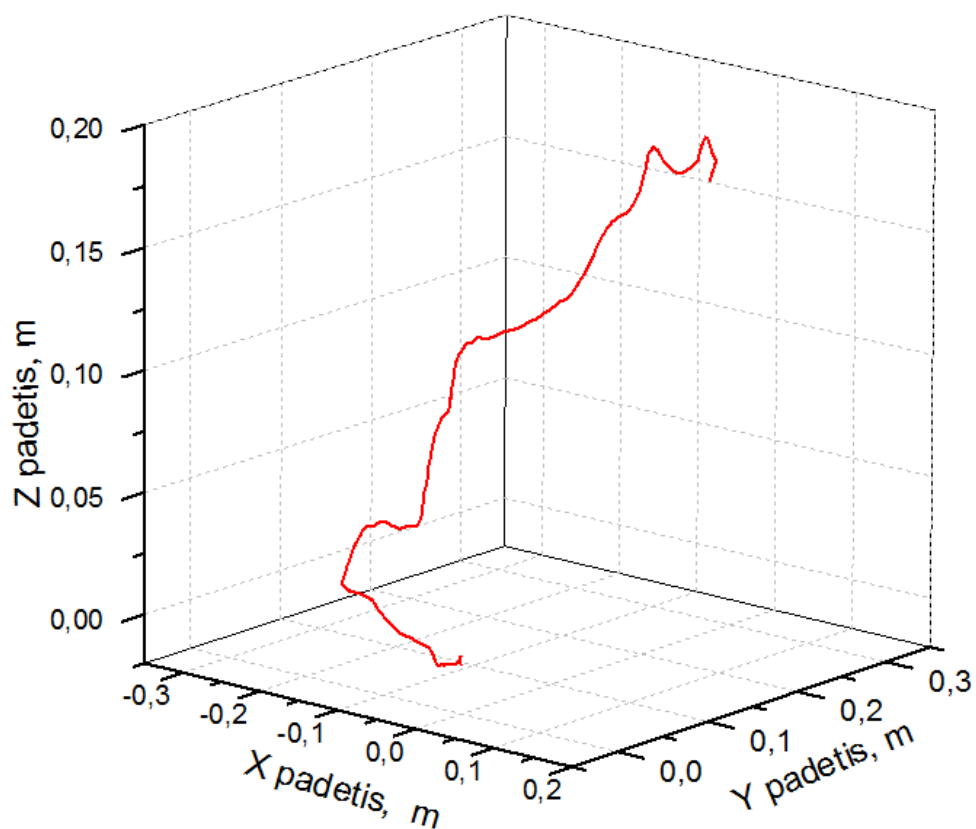
5.3.1. Navigacinės sistemos tikslumas nekintat padėčiai ir orientacijai

Šio tyrimo metu maketas bus padėtas nejudamai, bus registruojami maketo akselerometrų jutiklių duomenys. Vėliau iš jų bus skaičiuojama maketo padėtis. Kadangi yra žinoma, kad maketas nejudą, apskaičiuotas padėties kitimas bus lygus navigacinės sistemos paklaidai.



5.10 pav. Nejudančios INS paklaida

5.10 paveiksle pavaizduota padėties paklaida, padėties skaičiavimui naudojant šio tyrimo metu gautus akselerometro duomenis. 5.11 paveiksle ši paklaida pavaizduota trimatėje erdvėje.

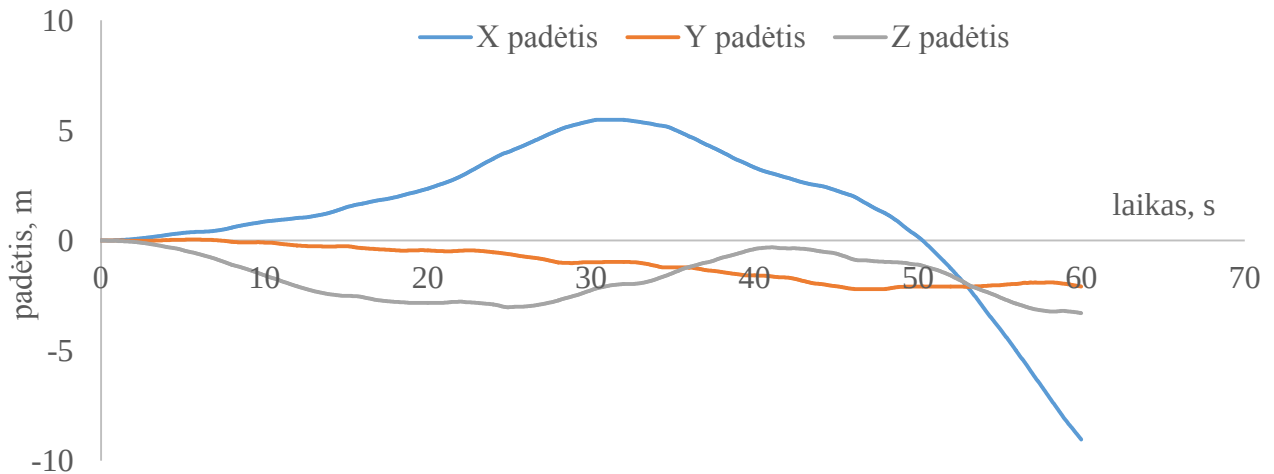


5.11 pav. Nejudančios INS paklaida erdvėje

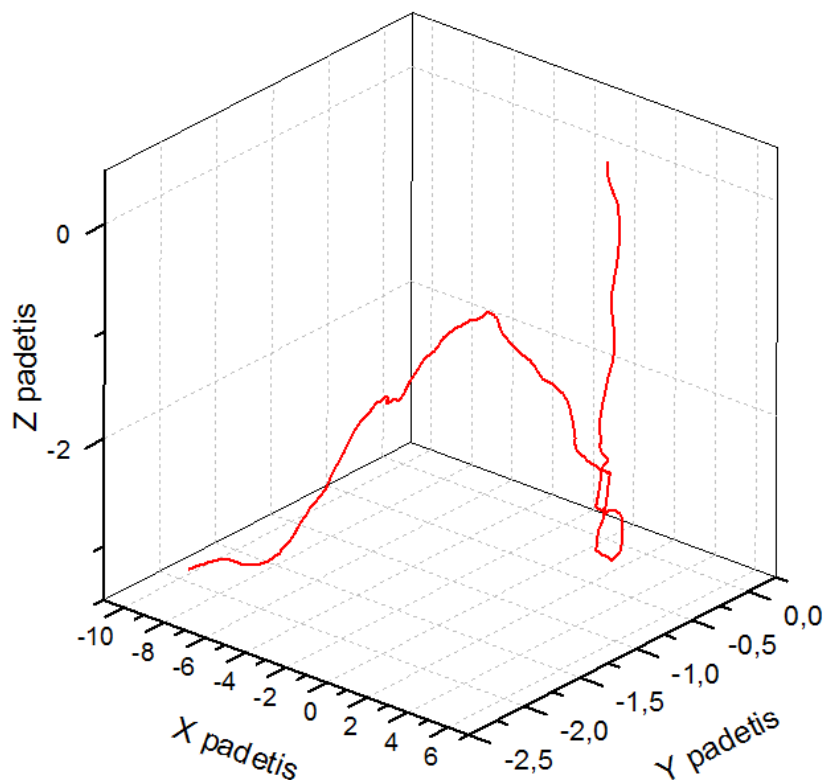
Matome, kad paklaidai būdingas tas pats paklaidos pobūdis kaip ir gautas ankstesnių tyrimų metu. Nulinė nuolatinė dedamoji ir didėjanti dispersija laikui bėgant. Padėties paklaida per 1 minutę pasiekia 0,3 m.

5.3.2. Navigacinės sistemos tikslumas nekintat padėčiai, bet kintant orientacijai

Šio tyrimo metu, maketas išlaikomas daugmaž toje pačioje padėtyje, tačiau keičiama jo orientacija. Kitaip tariant, maketas vartomas įvairioms kryptimis vietoje. Šio proceso metu, akcelerometrus veiks vis kintantis gravitacijos pagreitis, ir orientacijos filtro pagalba bus bandoma jį kompensuoti. Iš gautų duomenų apskaičiuota maketo padėtis pavaizduota 5.12 ir 5.13 paveiksluose. Kaip matome, per 1 minutę padėties paklaida išaugo iki 8 m.



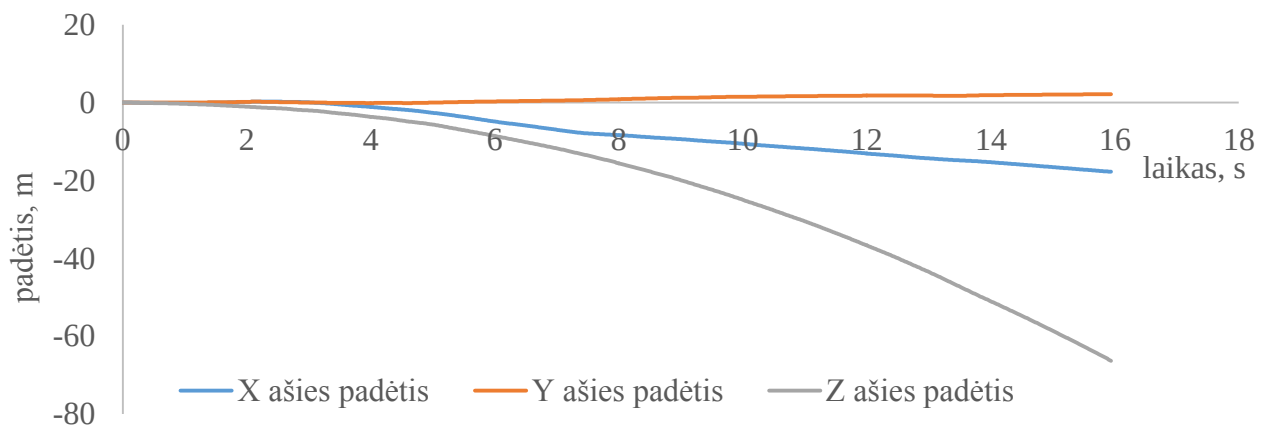
5.12 pav. Nejudančios INS paklaida, kuomet kinta jos orientacija



5.13 pav. Nejudančios INS paklaida erdvėje, kuomet kinta jos orientacija

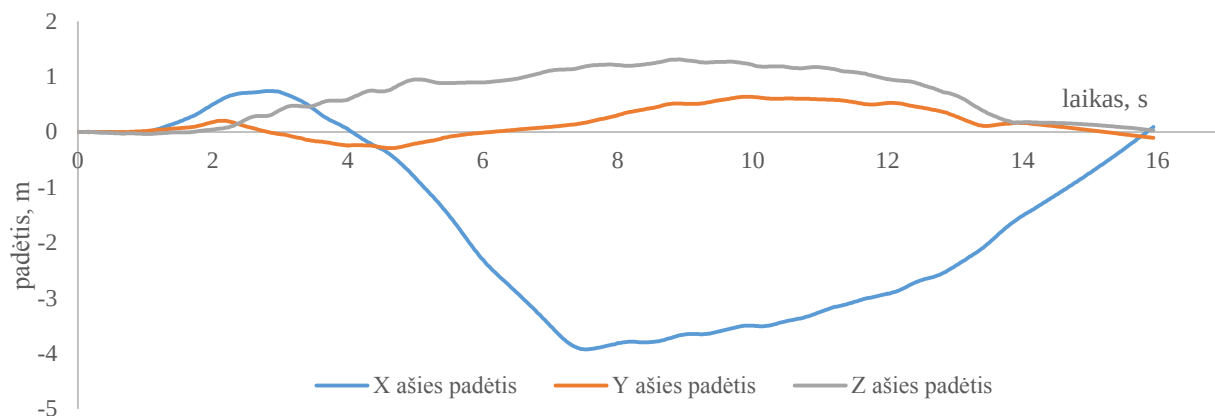
5.3.3. Navigacinės sistemos tikslumas kintant padėčiai, bet nekintant orientacijai

Šio tyrimo metu maketas buvo laikomas rankose, ir perneštas $D=4$ m tiesia linija, vėliau, nekeičiant jo orientacijos grąžintas atgal į tą pačią vietą. Maketo perkėlimo metu, kito ir jo aukštis, ir horizontali padėtis, tačiau buvo stengiamasi nesukti jo. 5.14 paveiksle pavaizduota apskaičiuota padėtis šio tyrimo metu. Kaip matome, padėties kitimo dėl didelės paklaidos įžvelgti praktiškai neįmanoma. Yra matomas funkcijos iškilimas „X“ ašyje ties 4 - 6 sekunde, tačiau bendra paklaida po šio tyrimo yra apie 30 m „X“ ašies kryptimi ir per 60 m „Z“ ašies kryptimi. Akivaizdu, kad tokie duomenys navigacijoje nėra priimtini net krašutiniais atvejais.



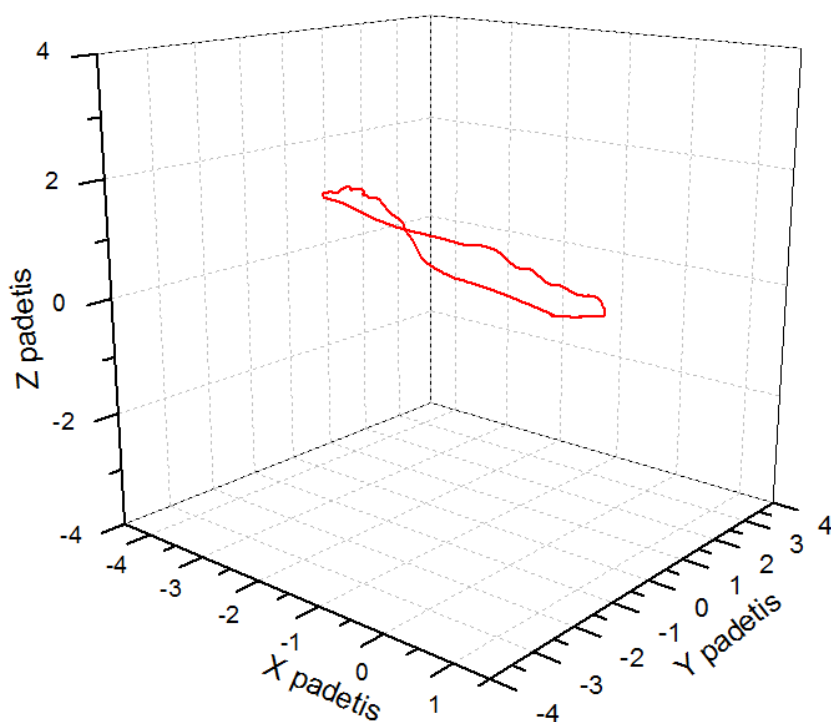
5.14 pav. Apskaičiuota INS padėtis be pagreičio nuolatinės dedamosios kompensacijos

Turėdami akselerometrų duomenis ir žinodami tyrimo eigą, galime daryti tam tikras prielaidas, kaip kad tarkime mums yra žinoma, kad po tyrimo objektas grįžo į savo pradinę vietą. Žinodami tai, galime keisti nuolatinės dedamosios vertes akselerometrų signaluose taip, kad pradinė ir galutinė padėtys sutaptų. Tokiu principu apdorotais duomenimis buvo pasinaudota skaičiuojant padėtį, kuri pavaizduota 5.15 paveiksle. Kaip matome, dabar iš šių duomenų galime nesunkiai įžvelgti, jog buvo judėta apie 4 m „X“ ašies kryptimi, ir vėliau grįžta atgal. 5.16 paveiksle pavaizduota tie patys rezultatai trimatėje erdvėje.



5.15 pav. Apskaičiuota INS padėtis po pagreičio nuolatinės dedamosios kompensavimo

Trimatėje erdvėje pavaizduotas padėties kitimas leidžia lengviau pamatyti judėjimo trajektoriją. Taip pat, turėdami pastato vidaus planą, galime daryti kitokio tipo prielaidas. Tarkime jeigu judama siauru koridoriumi, kuris turi tam tikrą skaičių durų kairėje ir dešinėje pusėse, priskirdami judėjimo trajektorijai galimus kelius, galime dar tiksliau nustatyti judėjimo trajektoriją ilgesniame laikotarpyje [30].



5.16 pav. Apskaičiuota INS padėtis po pagreičio nuolatinės dedamosios kompensavimo trimatėje erdvėje

Skyriaus išvados

Šiame skyriuje buvo aptarti navigacinės sistemos tyrimo rezultatai. Buvo patikrinti du akselerometrų duomenų apdorojimo filtrai: žemų dažnių ir Kalmano filtras. Abu metodai pasirodė esantys efektyvūs apdorojant akselerometrų duomenis. Jie abu sumažina triukšmo lygį akselerometrų signaluose. Tačiau, naudojant akselerometrų duomenis padėties skaičiavimuose, tiek Kalmano filtras, tiek žemų dažnių filtrai neturi jokio teigiamo poveikio padėties rezultatams, netgi atvirkščiai, naudojant mažo kirtimo dažnio filtrus, jie tik įneša papildomą vėlinimą padėties signaluose. Tyrimo metu paaiškėjo, kad daug didesnę reikšmę padėties skaičiavimo rezultatams turi nuolatinės dedamosios kompensavimas akselerometrų skaičiavimuose. Net nedidelė pagreičio nuolatinė dedamoji sudaro reikšmingas paklaidas laikui bėgant. Darant tam tikras prielaidas, šią paklaidą duomenų apdorojimo metu galima pašalinti, o naudojant slėgio jutiklį – pilnai pašalinti „Z“ ašies padėties paklaidą.

6. IŠVADOS

Baigiamajame darbe buvo atlikti elektromechaninių jutiklių, jų signalų ir signalų apdorojimo metodų tyrimai. Tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti, kaip tokio tipo jutikliai tinka naudoti inercinėse navigacinėse sistemose, skirtose sekti objektų judėjimą patalpose, kur GPS signalas yra nepasiekiamas, nes atlikus analogiškų sistemų ir tyrimų apžvalgą paaiškėjo, kad tik inercinė navigacinė sistema gali užtikrinti objektų padėties sekimą patalpų viduje, nereikalaudama papildomos pastato infrastruktūros.

Tyrimui atlikti buvo naudojami kompleksiniai jutikliai „MPU-9150“. Tai erdviniai pagreičio, kampinio greičio ir magnetinio lauko jutikliai. Jutiklių duomenims priimti ir dalinai apdoroti naudojamas ARM šeimos mikrovaldiklis „STM32F100RB“, duomenims perduoti į asmeninį kompiuterį – telemetrinis siųstuvas-imtuvas „3DR“. Duomenims apdoroti kompiuteryje – „MS Excel“ programa.

Tiriant jutiklių signalus paaiškėjo, kad jutikliai gerai atlieka tam skirtą darbą, jų triukšmo ir paklaidos charakteristikos artimos nurodytoms specifikacijose, tačiau, naudojant tokio tipo jutiklius vidaus navigacinėse sistemose, jų triukšmo ir paklaidos charakteristikos smarkiai mažina visos inercinės navigacinės sistemos tikslumą. Tikslumui pagerinti galimi įvairūs sprendimai. Efektyviausias – jutiklių skaičiaus didinimas. Padidinus jutiklių skaičių dvigubai, dvigubai sumažėja ir signalo triukšmas. Žemų dažnio filtras ir paprastas Kalmano filtras akselerometrų duomenims filtruoti pasirodė visiškai neveiksnūs, kadangi šie filtrai remiasi signalo integravimu, o skaičiuojant padėtį iš momentinio pagreičio jau ir taip integruojamos pagreičio vertės, dėl to papildomas signalo integravimas filtruojant neatneša naudos, o tik vėlina pagreičio ir padėties signalą. Paaiškėjo, kad naudojant pagreičio vertes padėčiai nustatyti, daug svarbiau yra ne triukšmo lygis signale, o nuolatinė dedamoji. Būtent jos kompensavimas lemia didžiausią padėties paklaidos mažėjimą. Nuolatinė dedamoji akselerometrų signaluose atsiranda dėl gravitacijos įtakos, netikslaus jutiklių sulitavimo ar pačių jutiklių gamybos proceso netobulumo. Nuolatinę dedamąją galima kompensuoti, kalibruojant jutiklius, tačiau nuolatinė dedamoji kinta tiek nuo laiko, tiek nuo temperatūros, tad tai įneša papildomų problemų kompensuojant dedamąją. Inercinėse navigacinėse sistemose didžiausia problema – gravitacijos kompensavimas. Taip yra dėl to, kad laisvojo kritimo pagreitis yra šimtus ir tūkstančius kartų didesnis, negu realūs pagreičiai, kuriais juda objektai kuriems vidaus navigacija galėtų būti skirta, ir kuriuos būtent ir reikia matuoti akselerometrais. Tai reiškia, kad labai svarbu ypač tiksliai pašalinti gravitacijos dedamąsias akselerometrų signaluose, nes priešingu atveju net menka gravitacijos dedamoji sukuria dideles (šimtai metrų per keliasdešimt sekundžių) objekto padėties paklaidas.

Realizuojant INS, pasitvirtino spėjimai, kad sistemos paklaida didėja laikui bėgant. Dar blogiau, paklaida didėja net tuomet kai objektas nejuda. Ši problema yra dalinai išspręsta, prie žmogaus kojos pritaisomose navigacinėse sistemose ar sistemose skirtose automobilių vidaus navigacijai, kuomet gaunami automobilio odometro duomenys. Padėties paklaidas galima sumažinti, jeigu žinomas patalpos išplanavimas, ir duomenų analizės metu darant tam tikras prielaidas. Be to, vertikalią padėties paklaidą „Z“ ašies kryptimi galima sumažinti naudojant slėgio jutiklius.

Baigiant galima pridurti, kad vidaus navigacija, kuri remiasi vien judesio jutikliais visada bus ribojama didėjančios paklaidos laikui bėgant. Visi tolimesni tokio tipo navigacijos tobulinimo tyrimai bus orientuoti tik į tokio tipo navigacijos paklaidos mažinimą.

Darbas buvo pristatytas XVII-ojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas-Lietuvos ateitis“ [2 priedas].

LITERATŪRA

Knyga

1. JUŠKA A., GEDMINIENĖ G. 2008. Studijų rašto darbai: mokomoji knyga, Vilnius: Technika. 46 p.

Straipsniai žurnaluose (periodiniuose leidiniuose)

2. MOHINDER S. GREWAL, ANGUS P. ANDREWS. 2010. Applications of Kalman Filtering in Aerospace 1960 to the Present, IEEE control systems magazine. 7.
3. R. FARAGHER, rugsėjis 2012, Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation, IEEE signal processing magazine [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cl.cam.ac.uk/~rmf25/papers/Understanding%20the%20Basis%20of%20the%20Kalman%20Filter.pdf>
4. M. MCCARTHY, P. DUFF, H. L. MULLER, C. RANDELL. 2006 m. Accessible Ultrasonic Positioning. IEEE Pervasive Comput. 5(4): 86–93.
5. A. VARSHAVSKY, E. DE LARA, J. HIGHTOWER, A. LAMARCA, V. OTSASON. 2007 m. GSM indoor localization, Pervasive Mob. Comput., 3: 698–720.
6. SUNG KYUNG HONG. 2003. Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (uav). Sensors and Actuators A: Physical, 107(2):109 – 118.

Nuorodos į interneto šaltinius

7. New Indoor Navigation Technologies Work Where GPS Can't, [Interaktyvus]. 2013 lapkritis. DAVID SCHNEIDER, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/new-indoor-navigation-technologies-work-where-gps-cant>
8. An introduction to inertial navigation, [Interaktyvus]. rugpjūtis 2007. OLIVER J. WOODMAN, Cambridge CB3 0FD. United Kingdom, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
9. How precise is Earth's gravity? [Interaktyvus]. Glen Thorncroft, ME Department, Cal Poly, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.calpoly.edu/~gthorncr/ME236/documents/AccuracyofGravity.pdf>
10. The Coriolis Effect, [Interaktyvus]. 1996, Dave Van Domelen, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://stratus.ssec.wisc.edu/courses/gg101/coriolis/coriolis.html>
11. NavShoe™ Pedestrian Inertial navigation Technology brief [Interaktyvus]. 2006 rugpjūtis, Eric Foxlin, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.wpi.edu/Images/CMS/PPL/InterSense.pdf>
12. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, [Interaktyvus]. Balandžio 30, 2010, Sebastian O.H. Madgwick, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf

13. U-blox 3D Dead Reckoning for Vehicle Applications - An advanced solution for modern urban navigation and positioning Uffe Pless [Interaktyvus]. Sausis 2014. Dr. Alexander Somieski, Michael Ammann ir Carl Fenger. [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.u-blox.com/en/adr.html>
14. Position Estimation Approach by Complementary Filter-aided IMU for Indoor Environment [Interaktyvus]. Šveicarija 2013, H. Fourati ir N. Manamanni, Zurich. [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/79/70/42/PDF/FM_ECC_2013.pdf
15. An Indoor Navigation System For Smartphones [Interaktyvus]. 2013 m. Abhijit Chandgadkar, Imperial College London. [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.doc.ic.ac.uk/teaching/distinguished-projects/2013/a.chandgadkar.pdf>
16. Indoor Navigation System for Handheld Devices, [Interaktyvus]. 2009 m. Manh Hung V. Le, Dimitris Saragas, Nathan Webb ir Worcester, Massachusetts, JAV. [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-102209-164024/unrestricted/Indoor_Navigation_System_for_Handheld_Devices.pdf
17. Centimeter-Accuracy Indoor Navigation, [Interaktyvus]. 2001, Changdon Kee et al., GPS World, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/asignaturas/17223/Centimeter_Accuracy_Indoor.pdf
18. MPU-9150 Product Specification, [Interaktyvus]. 2013, InvenSense Inc, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-9150A-00v4_3.pdf
19. MPU-9150 Register Map and Descriptions, [Interaktyvus]. 2013, InvenSense Inc, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/RM-MPU-9150A-00v4_2.pdf
20. MPU-9150 9-Axis Evaluation Board User Guide, [Interaktyvus]. 2013, InvenSense Inc, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/AN-MPU-9150EVB-00.pdf>
21. MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor, [Interaktyvus]. 2013, Measurement Specialties, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.meas-spec.com/downloads/MS5611-01BA03.pdf>
22. STM32F0DISCOVERY peripheral firmware examples, [Interaktyvus]. 2013, STMicroelectronics, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/DM00049931.pdf
23. Migration and compatibility guidelines for STM32 microcontroller applications, [Interaktyvus]. 2013, STMicroelectronics, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/DM00024853.pdf
24. Getting started with software and firmware environments for the STM32F0DISCOVERY kit, [Interaktyvus]. 2013, STMicroelectronics, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą:

http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00049929.pdf

25. STM32F0DISCOVERY User manual, [Interaktyvus]. 2013, STMicroelectronics, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00050135.pdf
26. Programming manual, [Interaktyvus]. 2013, STMicroelectronics, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/programming_manual/DM00051352.pdf
27. ORG1415-R01-AB1 Customer Data Sheet, [Interaktyvus]. 2010, www.origingps.com, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.origingps.com/wp-content/uploads/2014/02/Hornet_AB1-ORG1415_R01_AB1.pdf
28. Global positioning system standard positioning service signal specification, [Interaktyvus]. 1995, [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>
29. WiFi Localization and Navigation for Autonomous Indoor Mobile Robots, [Interaktyvus]. Joydeep Biswas, The Robotics Institute, Manuela Veloso Computer Science Department. [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cs.cmu.edu/~mmv/papers/10icra-joydeep.pdf>
30. FootPath: Accurate Map-based Indoor Navigation Using Smartphones, [Interaktyvus]. 2011, international conference on indoor positioning and indoor navigation Germany [žiūrėta 2013 m. gegužės m. 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.comsys.rwth-aachen.de/fileadmin/papers/2011/2011-IPIN-bitsch-footpath.pdf>

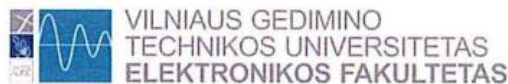
PRIEDAI

1 priedas. Kompaktinė plokštelė

Kompaktinės plokštelės turinys:

1. Magistro baigiamasis darbas: Mikrojutiklių panaudojimo vidaus navigacinėse sistemose tyrimas.
Darius Leckas.pdf
2. Tyrimams naudoto mikrovaldiklio STM32F100RB programos išvesties kodas: INS.rar
3. Pristatymo XVII-ojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas-Lietuvos ateitis“ skaidrių medžiaga: Elektromechaninių jutiklių panaudojimas vidaus navigacinėje sistemoje.
Darius.Leckas.ppt

2 priedas. Pažyma apie dalyvavimą XVII jaunųjų mokslininkų konferencijoje



XVII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA
Darius Leckas

*Sistemų inžinerijos ir kompiuterių technologijų (T120),
Signalų technologijų (T121), Aukštų dažnių technologijų
(T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

***ELEKTRO-MECHANINIŲ JUTIKLIŲ TAIKymo
NAVIGACIJAI PATALPŲ VIDUJE TYRIMAS***

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

dr. Raimondas Pomarnacki

2014 m. kovo 21 d.
Vilnius