



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Paulius Kripas

**ORLAIVIO PADĖTIES IR SKRYDŽIO KRYPTIES NUSTATYMO SISTEMA
(AHRS) BEI JOS TIKSLUMO VERTINIMAS**
**AHRS (ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM) AND ITS
ACCURACY ASSESSMENT**

BAIGIAMASIS MAGISTRO DARBAS

Skrydžių valdymo studijų programa, valstybinis kodas 601H41002

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Vytautas Rimša

(Vardas, pavardė)

(Data)

Paulius Kripas

**ORLAIVIO PADĖTIES IR SKRYDŽIO KRYPTIES NUSTATYMO SISTEMA
(AHRS) BEI JOS TIKSLUMO VERTINIMAS**

**AHRS (ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM) AND ITS
ACCURACY ASSESSMENT**

Baigiamasis magistro darbas

Dieninė studijų programa, valstybinis kodas 601H41002
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. Vaidotas Kondroška

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

lekt. Ramūnas Kikutis

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Technologijos mokslo sritis

Aeronautikos inžinerija studijų kryptis

Skrydžių valdymas studijų programa, valstybinis kodas 601H41002

SVfa-11 grupė

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

doc.dr. Vytautas Rimša

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2015-11-16 Nr.

Vilnius

Studentui **PAULIUI KRIPUI**

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: ORLAIVIO PADĖTIES IR SKRYDŽIO KRYPTIES NUSTATYMO
SISTEMA (AHRS) BEI JOS TIKSLUMO VERTINIMAS.

ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM (AHRS) AND ITS ACCURACY ASSESSMENT.

patvirtinta 2015 m. lapkričio 16 d. dekanų potvarkiu Nr.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016 m. gegužės 30 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Atlikti literatūros baigiamojo darbo tema apžvalgą;
2. Pagal atliktą literatūros apžvalgą pasirinkti optimalų AHRS sistemos algoritmą ir pateikti detalų aprašymą;
3. Suprojektuoti AHRS sistemą panaudojant MEMS jutiklius;
4. Įvertinti AHRS sistemos paklaidas matuojant orlaivio padėtį erdvėje;
5. Rezultatus pateikti grafiškai, atlikti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
lekt. Ramūnas Kikutis

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

.....
(Parašas)

dr. Vaidotas Kondroška

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....Paulius Kripas.....
(Vardas, pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Antano Gustaičio aviacijos institutas

Aviacijos technologijų katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Skrydžių valdymo studijų programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas: Orlaivio padėties ir skrydžio krypties nustatymo sistema (AHRS) bei jos tikslumo vertinimas.

Autorius: **Paulius Kripas**

Vadovas: **dr. Vaidotas Kondroška**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Šiame baigiamajame magistro darbe nagrinėjami orlaivio padėties ir skrydžio krypties nustatymo sistemos (toliau – AHRS) gauti padėties duomenys bei vertinamas šio prietaiso tikslumas. Apžvelgiami moksliniai straipsniai bei kita literatūra, susijusi su darbo tema. Gavus AHRS jutiklių duomenis, tiriamas jų tikslumas, bandoma gauti tikslesnius duomenis naudojant Kalmano filtrą bei nustatomi gautųjų pirminių bei filtruotų padėties duomenų skirtumai. Analizuojami grafikai, vaizduojantys AHRS teikiamus skrydžio krypties, polinkio ir posvyrio duomenis. Nustatomas sistemos tikslumas bei Kalmano filtro įtaka jam. Pateikiamos išvados.

Darbą sudaro 6 dalys:

1 dalis: Įvadas.

2 dalis: Literatūros apžvalga.

3 dalis: Teorinė dalis.

4 dalis: Praktinė dalis.

5 dalis: Išvados.

6 dalis: Priedai.

Darbo apimtis – 57 p. teksto be priedų, 39 pav., 21 lent., 28 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Kalmano filtras, skrydžio kryptis, polinkis, posvyris, standartinė paklaida, tikslumas.

Vilnius Gediminas Technicl University
Antanas Gustaitis‘ Aviation Institute
Department of Aviation technologies

ISBN ISSN
Copy no.
Date-.....-.....

Air Traffic Control study programme Master Graduation Thesis

Title: AHRS System And Its Accuracy Assessment

Author: **Paulius Kripas**

Academic supervisor: **Dr. Vaidotas Kondroška**

Language

☒

Lithuanian

☐

Foreign

Annotation

In this thesis the data of position given by the Attitude and Heading Refference System (AHRS) is analyzed and the accuracy of it is assessed. Literature regarding this topic is reviewed. The initial data received from the sensors is analysed, afterwards it is filtered with Kalman filter and the effects of it on the accuracy of the data is assesed. Schemes are used to depict the data containing information about heading, pitch and roll received from the AHRS and afterwards analyzed and compared to the filtered data. Conclusions about this system and its accuracy are made.

The work consists of 6 parts:

Part 1: Introduction.

Part 2: The analysis of literature.

Part 3: The theoretical part.

Part 4: The practical part.

Part 5: Conclusions.

Part 6: Appendixes.

Work volume – 57 pages of text without appendixes, 39 illustrations, 21 tables.

Key words: Kalman filter, heading, pitch, roll, standard error, accuracy

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius Kripas, 20113219

Antano Gustaičio aviacijos institutas

Skrydžių valdymo studijų programa, SVfa-11

**BAIGIAMOJO DARBO
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2016 m gegužės 10 d.

(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Orlaivio padėties ir skrydžio krypties nustatymo sistema (AHRS) bei jos tikslumo vertinimas.“, patvirtintas 2015 m. lapkričio 16 d. dekanų potvarkiu Nr. 201ai, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkas ir specialistas: Lekt. Ramūnas Kikutis.

Mano darbo vadovas dr. Vaidotas Kondroška.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

(Parašas)

Paulius Kripas
(Vardas ir pavardė)

Turinys

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS.....	10
LITERATŪROS ANALIZĖ	11
1.2. Literatūros analizės išvados.....	15
2. TEORINĖ DALIS	16
2.1. Naudota įranga	16
2.2. AHRS – Arduino jungimas.	18
2.3. Arduino kodas	19
3. PRAKTINĖ DALIS.....	21
3.1. Pirminių skrydžio krypties duomenų analizė	21
3.2. Pirminių posvyrio duomenų analizė:.....	25
3.3. Polinkio duomenų analizė:	29
3.4. Filtruotų skrydžio krypties duomenų analizė	33
3.5. Filtruotų posvyrio duomenų analizė:.....	37
3.6. Filtruotų polinkio duomenų analizė:	41
3.7. Pirminių ir išfiltruotų duomenų lyginimas	45
3.8. Pirminių ir išfiltruotų duomenų lyginimo apžvalga	54
IŠVADOS	55
LITERATŪROS ŠALTINIAI:	56
PRIEDAI.....	58

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

- AHRS – orlaivio padėties ir skrydžio krypties nustatymo sistema (angl. *Attitude and heading reference system*)
- DSP – skaitmeninis signalo procesorius (angl. *digital signal processor*)
- EKF – išplėstinis Kalmano filtras (angl. *Extended Kalman filter*)
- GND – žemėminimas (angl. *Ground*)
- GPS – globalinė padėties nustatymo sistema (angl. *Global positioning system*)
- I²C – Inter-integruotoji jungtis (angl. *Inter-integrated circuit*)
- IMU – inercinis matavimo prietaisas (angl. *inertial measurement unit*)
- MAV – mikro orlaiviai (angl. *Micro-Air Vehicles*)
- MEMS – mikro-elektromechaninė sistema (angl. *Micro-electromechanical system*)
- MSE – vidutinė kvadratinė paklaida (angl. *Mean square error*)
- PWM – Pulsuojančio pločio moduliacija (angl. *Pulse Width Modulation*)
- RBFFNN – radialo pagrindo funkcinis nervinis tinklas (angl. *Radial basis function neural network*)
- SCL – serijinė laikrodžio linij (angl. *Serial clock line*)
- SDA – serijinė duomenų linija (angl. *Serial data line*)
- SRAM – statinė atsitiktinės prieigos atmintis (angl. *Static random access memory*)
- UAV – bepiločiai orlaiviai (angl. *Unmanned Air Vehicles*)
- UKF – „Unscented“ Kalmano filtras (angl. *Unscented Kalman filter*)

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. AHRS schema	11
2 pav. Bendras AHRS gamintojų kaupiamasis pelnas (per gamintoją)	12
3 pav. Kalmano filtrų (EKF ir UKF) vidutinės kvadratinės nelineinio judėjimo paklaidos	15
4 pav. Darbe naudota AHRS mikroschema GY-85	16
5 pav. AHRS GY-85 schema	16
6 pav. Arduino UNO mikroprocesorių plokštė	17
7 pav.: Arduino jungimas su AHRS sistema	18
8 pav. Realus AHRS GY-85 jungimas	18
9 pav. Realus Arduino UNO jungimas	18
10 pav. Arduino kodo fragmentas	19
11 Pav. Arduino serijinio ekrano duomenų fragmentas	19
12 pav. Serial Oscilloscope duomenų fragmento pavyzdys	20
13 pav. Skrydžio krypties deviacija esant stacionarioje 1 padėtyje	21
14 pav. Skrydžio krypties deviacija esant stacionarioje 2 padėtyje	22
15 pav. Skrydžio krypties deviacija esant stacionarioje 3 padėtyje	23
16 pav. Posvyrio deviacija stacionarioje 1 padėtyje	25
17 pav. Posvyrio deviacija stacionarioje 2 padėtyje	26
18 pav. Posvyrio deviacija stacionarioje 3 padėtyje	27
19 pav. Polinkio deviacija stacionarioje 1 padėtyje	29
20 pav. Polinkio deviacija stacionarioje 2 padėtyje	30
21 pav. Polinkio deviacija stacionarioje 3 padėtyje	31
22 pav. Filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 1 padėtyje	33
23 pav. Filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 2 padėtyje	34
24 pav. Filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 3 padėtyje	35
25 pav. Filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 1 padėtyje	37
26 pav. Filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 2 padėtyje	38
27 pav. Filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 3 padėtyje	39
28 pav. Filtruota polinkio deviacija stacionarioje 1 padėtyje	41
29 pav. Filtruota polinkio deviacija stacionarioje 2 padėtyje	42
30 pav. Filtruota polinkio deviacija stacionarioje 3 padėtyje	43
31 pav. Pirminė ir filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 1 padėtyje	45
32 pav. Pirminė ir filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 2 padėtyje	46
33 pav. Pirminė ir filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 3 padėtyje	47
34 pav. Pirminė ir filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 1 padėtyje	48

35 pav. Pirminė ir filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 2 padėtyje	49
36 pav. Pirminė ir filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 3 padėtyje	50
37 pav. Pirminė ir filtruota polinkio deviacija stacionarioje 1 padėtyje	51
38 pav. Pirminė ir filtruota polinkio deviacija stacionarioje 2 padėtyje	52
39 pav. Pirminė ir filtruota polinkio deviacija stacionarioje 3 padėtyje	53

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Vidutinės EKF ir EKF su RBFNN filtruotų duomenų paklaidos	14
2 lentelė. Mikroprocesorių plokštės Arduino UNO specifikacijos	17
3 lentelė. AHRS-Arduino jungimas	18
4 lentelė. Pirminių skrydžio krypties duomenų rodikliai	24
5 lentelė. Pirminių posvyrio duomenų rodikliai	28
6 lentelė. Pirminių polinkio duomenų rodikliai	32
7 lentelė. Filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai	36
8 lentelė. Filtruotų posvyrio duomenų rodikliai	40
9 lentelė. Filtruotų polinkio duomenų rodikliai	44
10 lentelė. Pirminių ir filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai 1 padėtyje	45
11 lentelė. Pirminių ir filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai 2 padėtyje	46
12 lentelė. Pirminių ir filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai 3 padėtyje	47
13 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 1 padėtyje	48
14 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 2 padėtyje	49
15 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 3 padėtyje	50
16 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 1 padėtyje	51
17 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 2 padėtyje	52
18 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 3 padėtyje	53
19 lentelė. Filtruotų ir pirminių skrydžio krypties standartinių paklaidų santykiai procentais	54
20 lentelė. Filtruotų ir pirminių posvyrio standartinių paklaidų santykiai procentais	54
21 lentelė. Filtruotų ir pirminių polinkio standartinių paklaidų santykiai procentais.	54

IVADAS

Temos aktualumas:

Aviacija – tai viena iš svarbiausių, moderniausių ir labiausiai didėjančių susisiekimo bei technologinių rinkų. Šioje sferoje yra didelis bei vis augantis inovacijų bei naujų technologijų poreikis, siekiant sumažinti skrydžių bei pačių orlaivių gamybos kaštus, tikslinti navigacijos bei kitų orlaivio prietaisų tikslumą ir taip užtikrinti kiek įmanoma didesnę saugą. Vienas iš būdų, kaip sumažinti kaštus – tai naujų, pigesnių bei efektyvesnių sistemų diegimas orlaivyje. AHRS – viena iš naujovių, kurios ilgainiui gali padėti pasiekti šiuos tikslus.

Pagrindinė problema:

Aviacijoje naudojami brangūs bei technologiškai pasenę prietaisai, tačiau naujos jų alternatyvos dar nėra deramai ištirtos bei nėra įsitikinta jų tikslumu.

Hipotezė:

Pigiausias bei tiksliausias būdas nustatyti orlaivio padėtį yra naudojant AHRS sistemą.

Darbo tikslas:

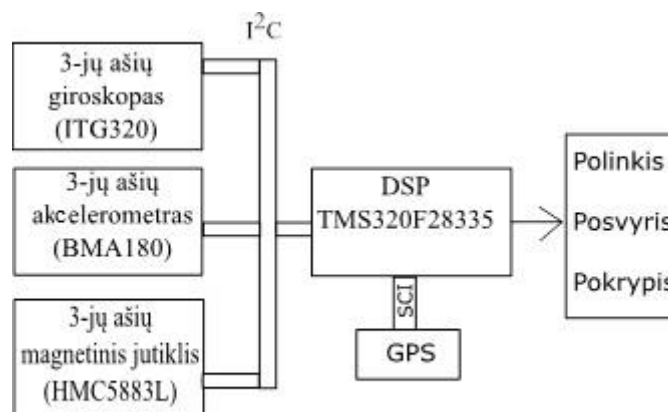
Ištirti AHRS sistemą, apskaičiuoti bei įvertinti jos tikslumą naudojantis MATLAB programa; nustatyti, ar ši sistema atitinka aviacijos srityje keliamus patikimumo reikalavimus bei palyginti gautus rezultatus su kitų šiai funkcijai atlikti skirtų prietaisų tikslumo parametrais.

LITERATŪROS ANALIZĖ

Literatūros sąrašė pateikiami 27 šaltiniai, siejami su šiuo darbu. Didžioji dalis apie AHRS sistemą randamų literatūros šaltinių yra moksliniai straipsniai arba jos veikimo instrukcijos. Nors šie straipsniai surinkti iš daugybės įvairių valstybių, tokių kaip Kinija, Indija, JAV, Meksika ir kitų, 25 iš jų yra anglų kalba, likę 2 – lietuvių. Teorinėje dalyje aptarsime, kur gali būti panaudota AHRS sistema, kokie iš šios sistemos gautų duomenų filtravimo būdai geriausiai padėtų panaikinti paklaidas bei kokie prietaisai gali pagerinti AHRS sistemos veikimą.

AHRS sistemos

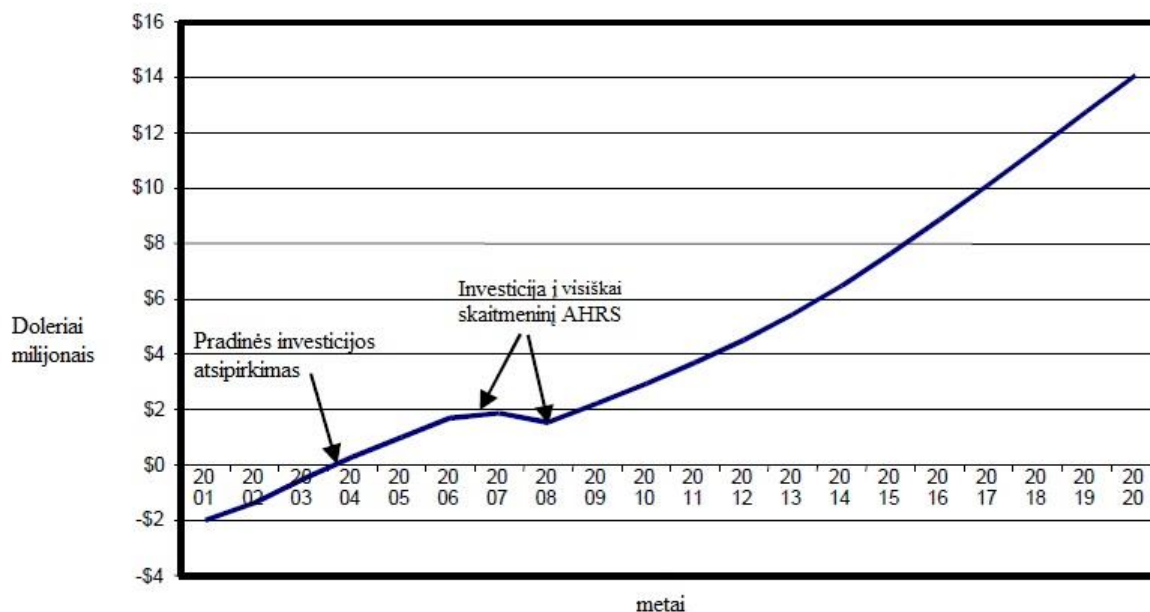
AHRS sistema – tai mikro-elektromechaninė sistema (toliau – MEMS), skirta nustatyti objekto padėtį x, y ir z ašių atžvilgiu bei to objekto judėjimo kryptį. Hanlin Sheng ir Tianhong Zhang straipsnyje (2015) yra pateikta tokia AHRS sistemos schema (1 pav.):



1 pav. AHRS schema

1 paveikslėlyje nurodyta, kad AHRS sistema susideda iš 3 ašių giroskopų, 3 ašių akcelerometrų bei trijų ašių magnetinio jutiklio. Visi šie informacijos jutikliai yra sujungti su DSP, kuris lygiagrečiai jutiklių duomenims gali gauti ir duomenis, tačiau standartiniame AHRS šios funkcijos gali ir nebūti. DSP apdorojus ir išfiltravus visą gautą informaciją galima gauti tris rodiklius: polinkį (angl. *pitch*), posvirį (angl. *roll*) bei pokrypį (angl. *yaw*).

Jau kurį laiką, kalbama apie AHRS perspektyvas. Yuchnovicz D. ir Burgess M. (1999) savo tyrime įvertino AHRS sistemos kainą ir nustatė, kad ši sistema yra daug pigesnė nei tą pačią paskirtį turintys inerciniai matavimo prietaisai (angl. *Inertial Measurement Units* – toliau IMU) ir ilgalaikėje perspektyvoje gamintojams finansiškai apsimokėtų pereiti prie šios technologijos naudojimo. Jų tyrimo rezultatai pavaizduoti 2 pav.



2 pav. Bendras AHRS gamintojų kaupiamasis pelnas (per gamintoją)

2 paveiksle nurodomas AHRS sistemų gamintojų bendrojo besikaupiančio pelno prognozė. Iš joje esančių duomenų matyti, kad AHRS sistemų masinei gamybai 2001 metais būtų reikėję 2 milijonų JAV dolerių, o gamybos savikaina būtų atsipirkusi per ketverius metus. Nuo to laiko pelnas turėtų vis didėti, neskaitant šio tokio susvyravimo, įvykusio 2006–2008, investuojant į visiškai skaitmenines AHRS sistemas.

Kingston D. B. ir Beard R. W. (2004) straipsnyje nustatyta, kad AHRS sistemos turi didelį potencialą būti naudojamos bepiločiuose (angl. *Unmanned Air Vehicles*, toliau – UAV) ir mikro orlaiviuose (angl. *Micro-Air Vehicles* – toliau MAV) dėl savo itin mažų matmenų. Šios technologijos naudojimas mažuose (mikro) orlaiviuose ne tik atpigintų juos, bet ir padėtų dar sumažinti jų matmenis, kas yra itin svarbu žvalgybai skirtai technikai.

Be to, naudojant AHRS sistemas galima suteikti naujų galimybių orlaiviams. Mahmood, A. bei Kim, Y. (2015) savo straipsnyje nustatė, kad naudojantis AHRS sistema galima sinchronizuoti keletą bepiločių sraigtasparnių (angl. *quadrocopters*) ir taip priversti juos skristi formuotėje nesusiduriant. Tokia technologija gali būti puikiai panaudojama krovinių vežimo bei siuntų srityje.

Rios J. A. bei White E. (2000) darbe nustatyta, kad papildomų magnetometrų pridėjimas prie AHRS500/GPS sistemos bei papildyto filtro būsenos modelio labai pagerina prietaisų charakteristikas, kurios buvo nustatytos anksčiau naudotoje arbaletinėje (angl. *Crossbow*) GPS/DMU sistemoje.

AHRS sistemos naudojimas kitose sferose

AHRS sistemą bandyta pritaikyti ne vien aviacijoje, vienas iš įdomesnių to pavyzdžių aprašomas straipsnyje „Performance Evaluation of AHRS Kalman Filter for MojoRTK System“ – tai šios sistemos panaudojimas sujungti MEMS inerciniams duomenims su GPS duomenimis tam, kad būtų galima sugeneruoti padėties sprendimą autonominiam agrikultūriniam traktoriui.

Buvo ištirtas ir AHRS sistemos naudojimas laivo padėčiai nustatyti. Straipsnyje „A MEMS-based Adaptive AHRS for Marine Satellite Tracking Antenna“ naudojantis AHRS sistema buvo patobulinti padėties nustatymo algoritmai, pasinaudojant adaptyviu mechanizmu, kuris suderina padėties nustatymo prietaiso parametrus, remiantis numatytu laivo judėjimo dažniu.

Filtro parinkimas

Norint gauti kuo tikslesnius padėties rodmenis reikia pasirinkti ne tik tinkamą AHRS prietaisą, bet ir Kalmano filtrą (angl. Kalman filter). Kalmano filtras – tai algoritmas, skirtas panaikinti statistinį triukšmą bei sumažinti matavimų paklaidas.

Standartinis Kalmano filtro algoritmas veikia pasinaudojant kalmano filtro įtakos reikšme (svoriu) – K . Ši reikšmė gali svyruoti tarp 0 ir 1. Kuo K būna artimesnis vienetui, tuo labiau filtras pasitiki prietaiso rodmenimis, o kuo K yra artimesnis nuliui, tuo labiau filtras pasikliauna savo ankstesniais rodmenimis ir mažiau kliaujasi tuo, ką rodo prietaisas. Algoritmas susideda iš 4 pagrindinių žingsnių:

1. Apskaičiuojama kalmano filtro įtakos reikšmė K :

$$K = \frac{P(i)}{P(i) + R} \quad (1)$$

Čia: $P(i)$ – proceso paklaida i -tajame žingsnyje; R – matavimo paklaida.

2. Tikslinamas būsenos spėjimas naudojant filtro įtakos reikšmę, prietaiso rodmenis ir nepatikslintą būsenos spėjimą.

$$x_m(i) = (1 - K) \times x_n(i) + K * V(i) \quad (2)$$

Čia: x_m – patikslinta būsena. Kalmano filtro spėjimas dabartiniam žingsniui, x_n – nepatikslinta būsena. $V(i)$ – prietaiso rodmenys.

3. Dabartinio žingsnio patikslintas spėjimas naudojamas, kaip kito žingsnio nepatikslintas spėjimas.

$$x_n(i + 1) = x_m(i) \quad (3)$$

4. Tikslinama proceso paklaida pagal Kalmano filtro įtakos reikšmę.

$$P(i + 1) = (1 - K) \times P(i) \quad (4)$$

Algoritmo žingsniai būna kartojami daugybę kartų, taip iš skaičiavimų pašalinant didelę dalį statistinio triukšmo ir padidinant rodmenų tikslumą.

Išplėstasis Kalmano filtras

Išplėstojo Kalmano filtro (toliau – EKF) veikimo principas:

Vienas pagrindinių ir reikšmingiausių standartinio Kalmano filtro algoritmo reikalavimų yra tas, kad sistemos proceso ir matavimų modeliai <...> yra tiesinės lygtys. Vis dėlto realiame pasaulyje dažniausiai pasitaiko netiesiniai procesai ir netiesinės jų matavimų lygtys. Todėl šiai problemai spręsti reikalingas standartinio Kalmano filtro pritaikymas netiesinėms sistemoms. Tam tikslui buvo naudojamas išplėstasis Kalmano filtras. EKF yra paremtas netiesinio sistemos modelio ištiesinimu apie charakteringus taškus taikant Teiloro eilučių skleidimą. (Rudinskas 2011)

Šio filtro tikslumą galima padidinti naudojant papildomą funkcinę nervinę sistemą – tai aprašoma straipsnyje „Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) Aided Extended Kalman Filter for MEMS AHRS/GPS.“ Tiriamas RBFNN naudojant EKF bei AHRS ir GPS sistemas objekto ant žemės vietos nustatymui:

1 lentelė. Vidutinės EKF ir EKF su RBFNN filtruotų duomenų paklaidos

	Padėties paklaida (")			Pozicijos paklaida (m)		
	Polinkis	Posvyris	Kryptis	X- ašies	Y-ašies	Z-ašies
EKF	114,12	33,48	36,36	3,68	1,52	3,31
EKF su RBFNN	100,08	32,04	34,94	3,38	0,92	2,11
Paklaidų santykis	12,3 %	4,3 %	4,0 %	8,2 %	39,5 %	33,2 %

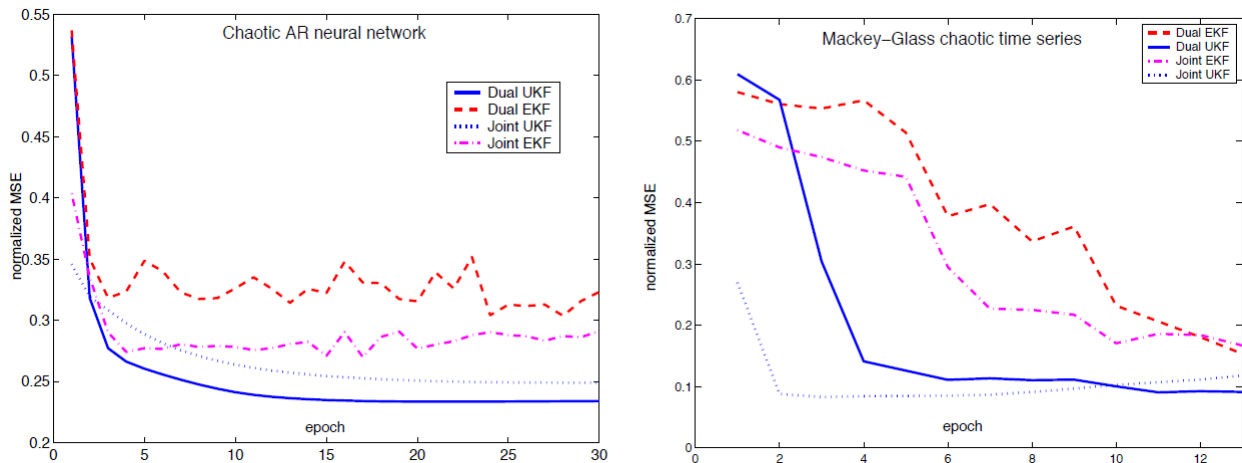
1 lentelėje matome nurodytas paklaidas, naudojant paprastą EKF statistinio triukšmo filtravimui ir EKF su RBFNN. Visais atvejais EKF su RBFNN teikia mažesnę paklaidą, nei tiesiog EKF, o didžiausias tikslumo pagerėjimas matomas Y ašies atžvilgiu – jis siekia net 39,5 %, mažiausiai, bet vis dėlto pagerėja skrydžio krypties tikslumas per 4 %.

„Unscented“ Kalmano Filtras

Rudinskas, D. disertacijoje taipogi apibūdinamas „Unscented“ Kalmano filtro (toliau – UKF) veikimo principas bei pranašumai prieš EKF:

EKF turi vieną reikšmingą trūkumą – esant stipriai netiesinei sistemai, staiga blogėja Kalmano filtro savybės. Šis EKF trūkumas buvo pašalintas pritaikius „unscented“ transformaciją (UT). UT taikoma tariant, kad lengviau aproksimuoti tikimybės pasiskirstymą nei pasirenkamą netiesinę funkciją ar jos transformaciją. Vietoj to, kad netiesinis modelis EKF atveju ištiesinamas darbo aplinkoje ir tuomet aproksimuojamas, tai UKF atveju sugeneruojamas baigtinis skaičius atrinktų taškų dar vadinamų sigma taškais. Šie sigma taškai naudojant netiesinę sistemą transformuojami į naują taškų seką. Sistemos būseną ir susijusias klaidų kovariacijų matricos yra determinuotai paremtos transformuotų sigma taškų vidurkio ir kovariacijų reikšmėmis. (Rudinskas 2011)

Straipsnyje (Wan, Merwe 2000) buvo tirta UKF ir EKF paklaidų ir statistinio triukšmo šalinimas:



3 pav. Kalmano filtrų (EKF ir UKF) vidutinės kvadratinės nelineinio judėjimo paklaidos

Schemose matome dviem skirtingais nelineiniais judėjimais judančio kūno išmatuotas vidutinės kvadratinės paklaidas (MSE) per laiko tarpą (angl. *epoch*) naudojantis UKF ir EKF. Abiem atvejais matomas akivaizdus UKF filtro pranašumas prieš EKF – didžiausias paklaidų santykis EKF/UKF gali būti net 6. Nors praėjus ilgesniam laiko tarpui EKF tikslumas pagerėja, tačiau ir vėliau neprilygsta daug greičiau optimalų tikslumą pasiekiančiam UKF.

1.1. Literatūros analizės išvados

- AHRS sistema yra perspektyvi, pigi bei pasižyminti itin mažais matmenimis.
- Derinant su kitais prietaisais AHRS sistemos parametrai gali būti patobulinti.
- Sistema patraukli ne vien aviacijos, bet ir kitų sričių atstovams.
- Siekiant užtikrinti prietaiso tikslumą, būtina gautus duomenis filtruoti vienu iš Kalmano filtrų.
- UKF yra tinkamesnis naudoti už EKF, jei tiriami duomenys nėra linijiniai.
- Šiame darbe nagrinėjama tema nėra deramai ištirta ir reikalauja daugiau tyrimų.

1. TEORINĖ DALIS

2.1. Naudota įranga

Įsigytas AHRS - GY-85. Ši sistema yra itin maža, jos matmenys: 2.2 cm x 1.6 cm x 0.3 cm.



4 pav. Darbe naudota AHRS mikroschema GY-85

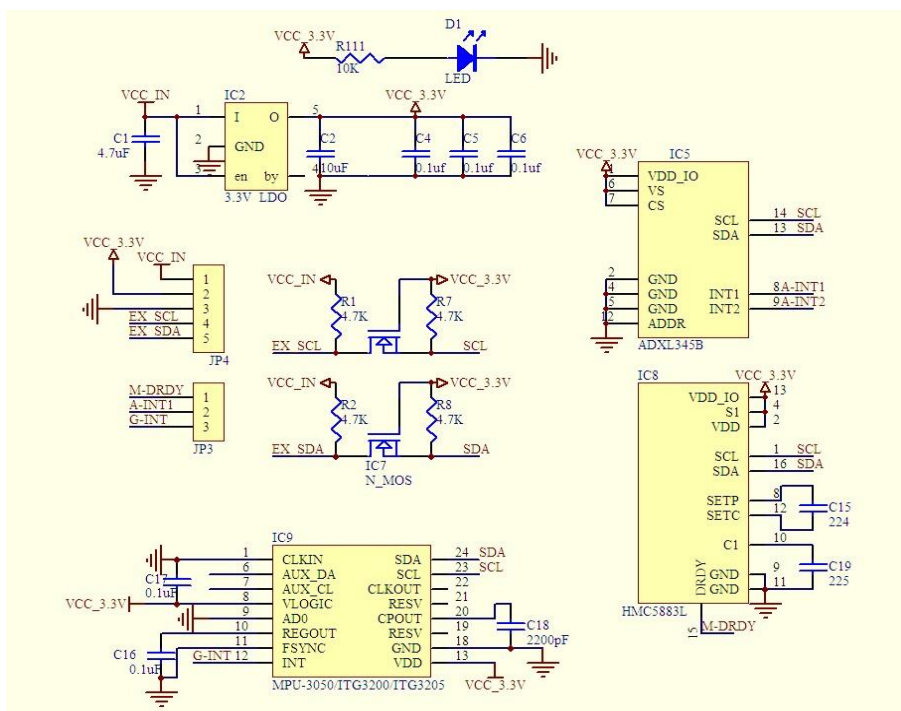
4 pav pavaizduota mikroschema susideda iš 3 pagrindinių dalių, kurios ir leidžia gauti pozicijos, t. y. skrydžio krypties, polinkio ir posvyrio duomenis:

ITG3205 – 3 ašių giroskopas.

ADXL345 – 3 ašių akcelerometras.

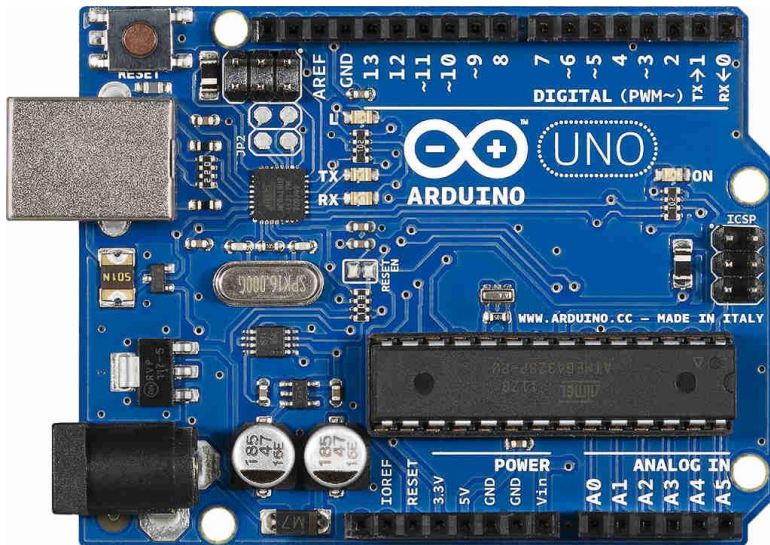
HMC5883L – 3 ašių magnetometras.

GY-85 AHRS mikroschemos veikimo schema nurodyta 5 pav.



5 pav. AHRS GY-85 schema

Norint gauti informaciją iš AHRS jutiklių, būtina sistemą sujungti su mikroprocesorių plokšte. Šiam tyrimui buvo pasirinkta Arduino mikroprocesorių plokštė – *Arduino UNO*. Ji pavaizduota 6 pav.



6 pav. *Arduino UNO* mikroprocesorių plokštė

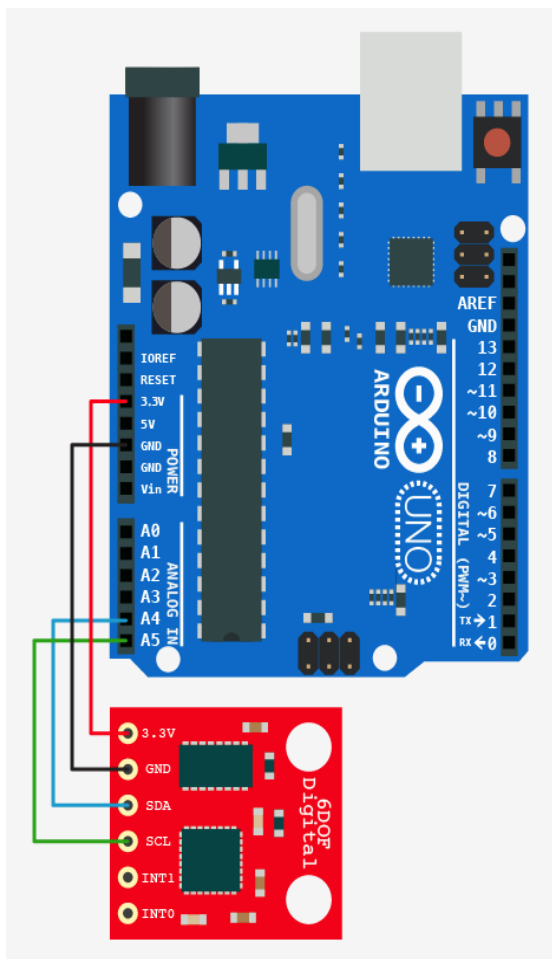
Arduino UNO plokštė puikiai tinka gauti informaciją iš įvairių daviklių, šios mikroprocesorių plokštės parametrai nurodyti 2 lentelėje.

2 lentelė. Mikroprocesorių plokštės *Arduino UNO* specifikacijos

<i>Arduino UNO</i>	
Mikrovaldiklis:	Atmega328P
Operacinė įtampa:	5V
Įėjimo įtampa (rekomenduojama):	7–12V
Įėjimo įtampa (maksimali):	6–20V
Skaitmeninių jungčių skaičius:	14
PWM skaitmeninių jungčių skaičius:	6
Analoginių įėjimo jungčių skaičius:	6
Tiesioginė srovė vienai įėjimo išėjimo jungčiai:	20 mA
Tiesioginė srovė 3,3 V jungčiai:	50 mA
Laikrodžio greitis	16 MHz
Atmintis (angl. <i>Flash Memory</i>)	32 kB
SRAM	2 kB
Ilgis	68,6 mm
Plotis	53,4 mm
Svoris	25 g

2.2. AHRS – Arduino jungimas.

AHRS jungiamas su Arduino mikrovaldikliu naudojantis I²C jungtimi. Arduino buvo sujungtas pagal schemą 1:



3 lentelė. AHRS-Arduino jungimas

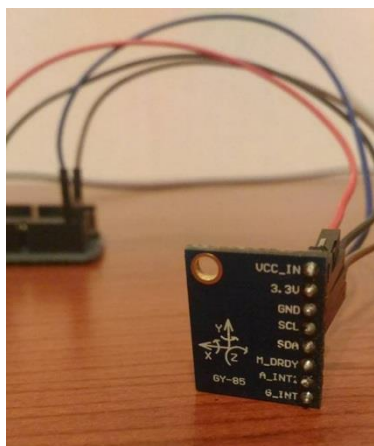
	AHRS	Arduino UNO
1	3.3V	3.3V
2	GND (įžeminimas)	GND (įžeminimas)
3	A4	SDA
4	A5	SCL

Prietaisai sujungiami taip, kaip nurodyta 3 lentelėje, kiekviena jungtis atlieka specifinę funkciją:

1. Pirmąją jungtimi paduodama elektros įtampa AHRS maitinimui.
2. GND jungtys abiejuose prietaisuose sujungiamos viena su kita, kad prietaisas būtų įžemintas ir nekiltų pavojus jam perdegti.
3. A4 jungtis yra skirta priimti informaciją iš prietaiso SDA jungties. SDA perduoda į Arduino duomenis, gaunamus iš prietaiso jutiklių.
4. A5 jungtis yra skirta priimti informaciją iš prietaiso SCL jungties. Naudojantis SCL prietaisas perduoda informaciją apie laiką.
- 5.

7 pav.: Arduino jungimas su AHRS sistema

Naudojamų AHRS ir Arduino sistemų realus jungimas nurodytas 8 ir 9 pav.



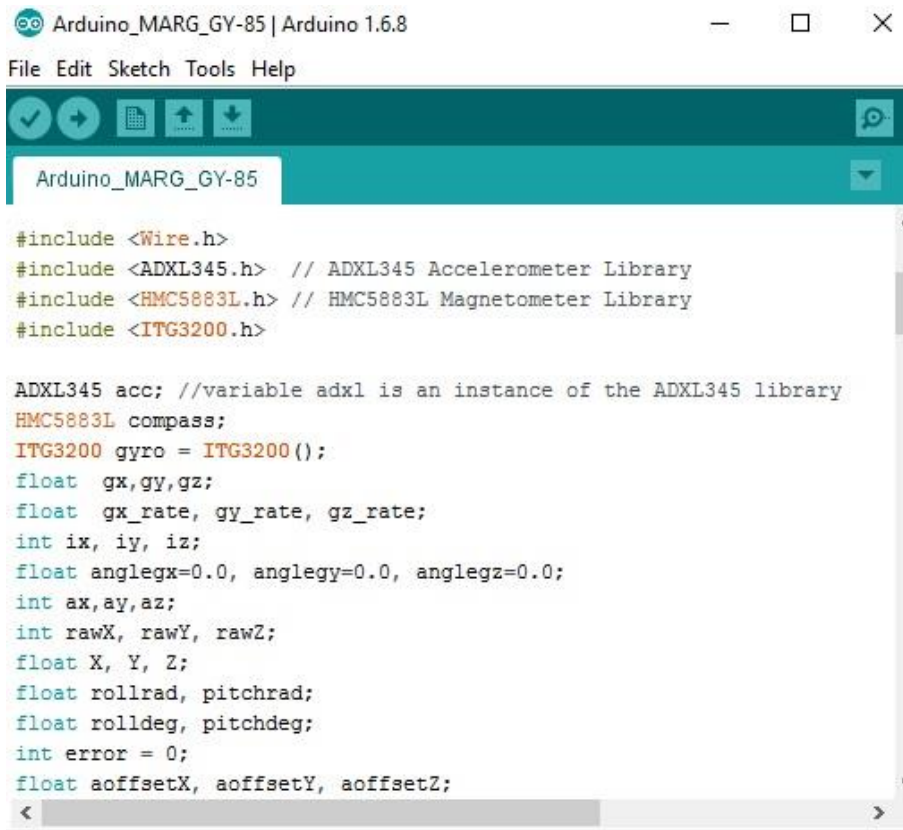
8 pav. Realus AHRS GY-85 jungimas



9 pav. Realus Arduino UNO jungimas

2.3. Arduino kodas

Naudojama atvirojo kodo, nemokama Arduino programinė įranga ARDUINO 1.6.8. Norint gauti skrydžio krypties, posvyrio ir polinkio duomenis, naudojamas C ir C+ programavimo kalbos mišiniu parašytas kodas, jo fragmentas pavaizduotas 10 pav.



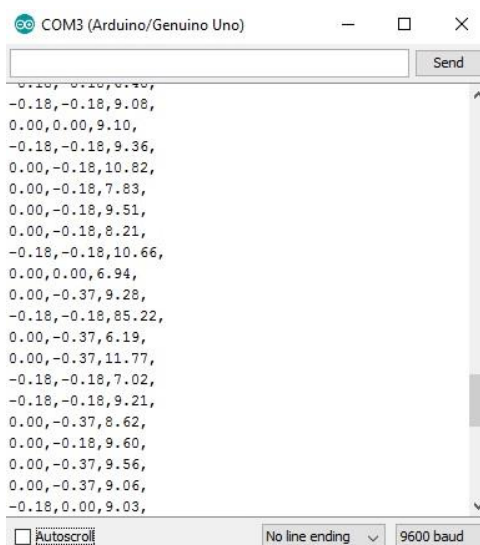
```
Arduino_MARG_GY-85 | Arduino 1.6.8
File Edit Sketch Tools Help

#include <Wire.h>
#include <ADXL345.h> // ADXL345 Accelerometer Library
#include <HMC5883L.h> // HMC5883L Magnetometer Library
#include <ITG3200.h>

ADXL345 acc; //variable adxl is an instance of the ADXL345 library
HMC5883L compass;
ITG3200 gyro = ITG3200();
float gx,gy,gz;
float gx_rate, gy_rate, gz_rate;
int ix, iy, iz;
float anglegx=0.0, anglegy=0.0, anglegz=0.0;
int ax,ay,az;
int rawX, rawY, rawZ;
float X, Y, Z;
float rollrad, pitchrad;
float rolldeg, pitchdeg;
int error = 0;
float aoffsetX, aoffsetY, aoffsetZ;
```

10 pav. Arduino kodo fragmentas

Visas Arduino kodas sukurtas koreguojant *himix.lt* pateiktą kodą. Jis yra pateiktas 1 priede. Paleidus Arduino serijinį ekraną (angl. *serial monitor*) matome gaunamas pokrypio polinkio ir skrydžio krypties reikšmes. Gaunamų duomenų pavyzdys pavaizduotas 11 pav.

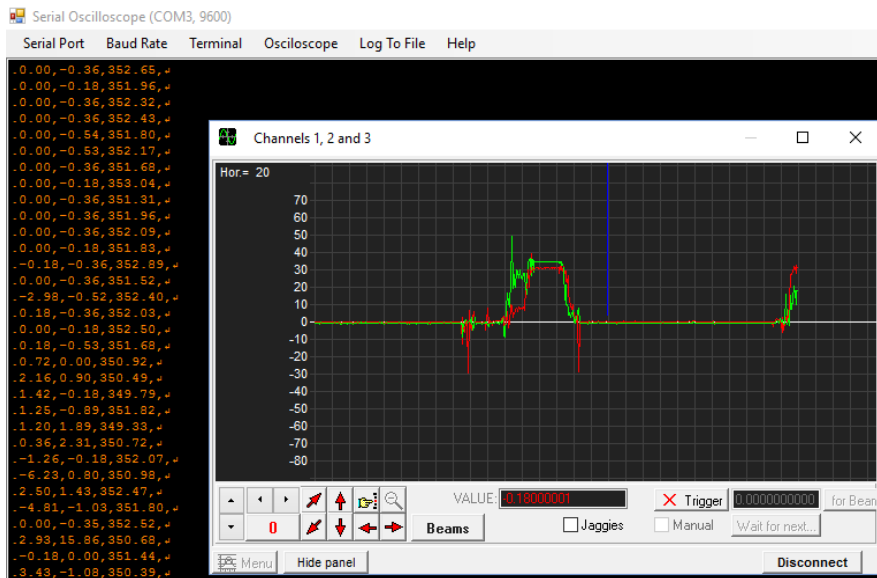


```
COM3 (Arduino/Genuino Uno)
Send

0.10,-0.10,0.10,
-0.18,-0.18,9.08,
0.00,0.00,9.10,
-0.18,-0.18,9.36,
0.00,-0.18,10.82,
0.00,-0.18,7.83,
0.00,-0.18,9.51,
0.00,-0.18,8.21,
-0.18,-0.18,10.66,
0.00,0.00,6.94,
0.00,-0.37,9.28,
-0.18,-0.18,85.22,
0.00,-0.37,6.19,
0.00,-0.37,11.77,
-0.18,-0.18,7.02,
-0.18,-0.18,9.21,
0.00,-0.37,8.62,
0.00,-0.18,9.60,
0.00,-0.37,9.56,
0.00,-0.37,9.06,
-0.18,0.00,9.03,
```

11 Pav. Arduino serijinio ekrano duomenų fragmentas

Naudodami programą *Serial Oscilloscope v1.5* (žiūrėti 12 pav.), nustatę jungtį, kuria kompiuteris sujungtas su Arduino prietaisu, šiuo atveju – COM3, bei duomenų perdavimo spartą – 9600 b/s gauname tą pačią duomenų seką, kaip ir Arduino programoje, tačiau su šia programa galima eksportuoti gaunamus duomenis į *Microsoft Excel* programą apdorojamą failą.



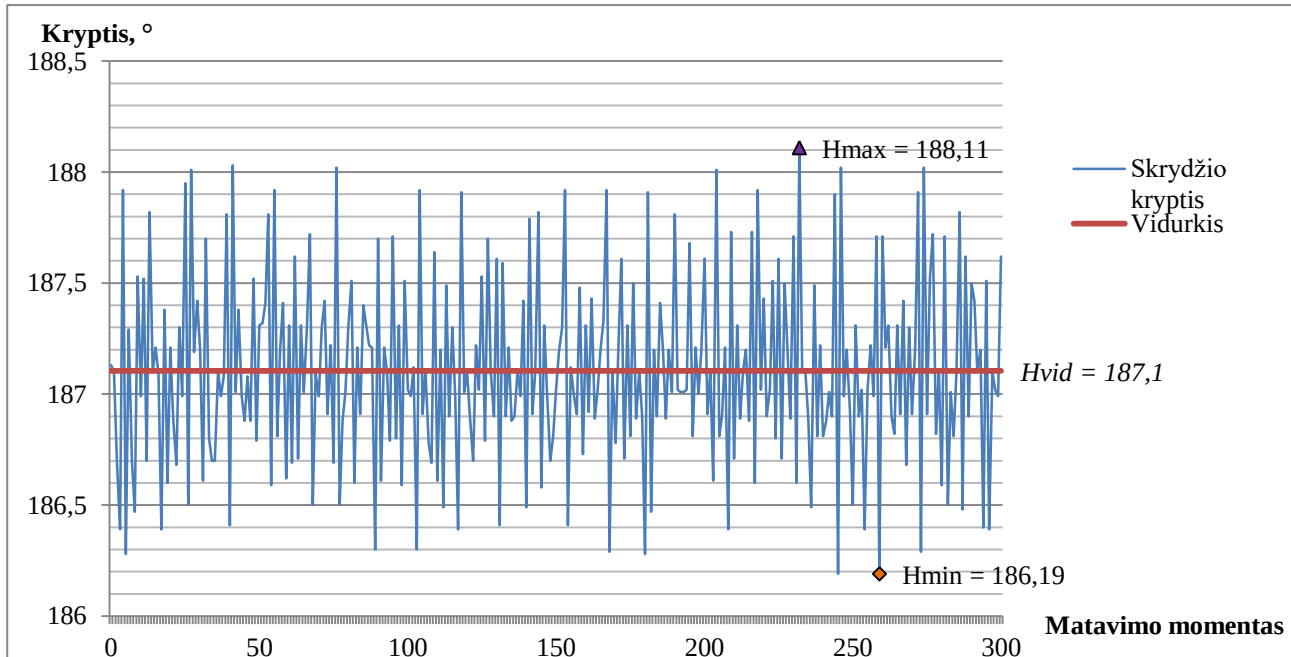
12 pav. *Serial Oscilloscope* duomenų fragmento pavyzdys

Microsoft Excel programa sukuriami grafikai, parodantys AHRS padėties rodiklių svyravimus. Gauti trijų ašių (skrydžio krypties, posvyrio ir polinkio) rodmenys – pagrindinė tiriama informacija, iš jos bandoma nustatyti prietaiso tikslumą.

3. PRAKTINĖ DALIS

3.1. Pirminių skrydžio krypties duomenų analizė

Šiame skyriuje pateiktose schemose (13, 14, 15 pav.) pavaizduoti skrydžio krypties duomenys, gauti iš AHRS, kuris buvo stacionarioje pozicijoje tam, kad rodytų vienodą padėtį vieno matavimo metu. Siekiant užtikrinti surinktų duomenų patikimumą, duomenys buvo renkami trijose skirtingose pozicijose.



13 pav. Skrydžio krypties deviacija esant stacionarioje 1 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti jutiklių teikiami nefiltruoti skrydžio krypties duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali krypties reikšmė ($H_{\max}$): $188,11^\circ$
- Minimali krypties reikšmė ($H_{\min}$): $186,19^\circ$
- Krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}): $187,1^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta H = H_{\max} - H_{\min} = 188,11 - 186,19 = 1,92^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{H_{\max}} = H_{\max} - H_{\text{vid}} = 188,11 - 187,1 = 1,01^\circ$
 - $D_{H_{\min}} = H_{\text{vid}} - H_{\min} = 187,1 - 186,19 = 0,91^\circ$

Standartinė paklaida apskaičiuojama pagal formulę

$$SE_P = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

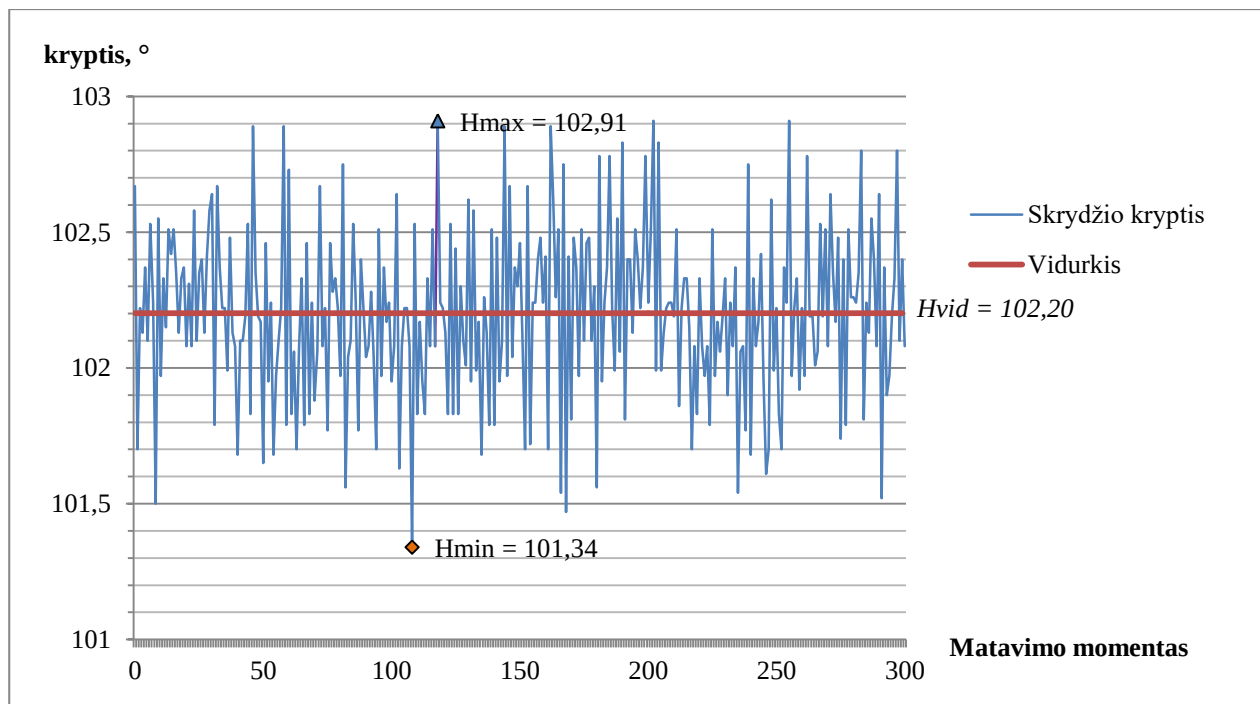
Čia: SE - standartinė paklaida; s – standartinė deviacija, n – matavimų skaičius.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_v)^2} \quad (6)$$

čia: N – matavimų skaičius; x_i – i matavime gautas rodmuo; x_v – išmatuotas vidurkis.

$$SE_H = 0,421^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti skrydžio krypties duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (žiūrėti 14 pav.)



14 pav. Skrydžio krypties deviacija esant stacionarioje 2 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti jutiklių teikiami nefiltruoti skrydžio krypties duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

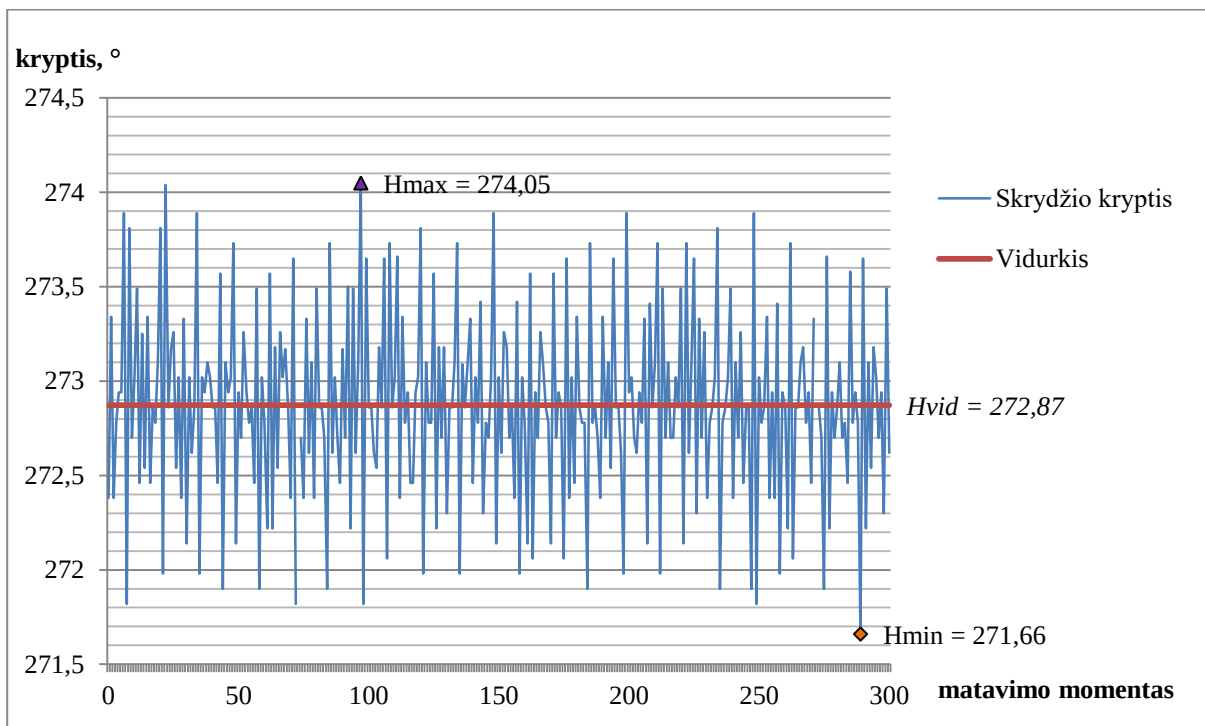
- Maksimali krypties reikšmė (H_{max}): $102,91^\circ$
- Minimali krypties reikšmė (H_{min}): $101,34^\circ$
- Krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}): $102,20^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta H = H_{max} - H_{min} = 102,91 - 101,34 = 1,57^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Hmax} = H_{max} - H_{vid} = 102,91 - 102,2 = 0,71^\circ$
 - $D_{Hmin} = H_{vid} - H_{min} = 102,2 - 101,34 = 0,86^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_H matuojama pagal 6 formulę:

$$SE_H = 0,312^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti skrydžio krypties duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (žiūrėti 15 pav.)



15 pav. Skrydžio krypties deviacija esant stacionarioje 3 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti jutiklių teikiami nefiltruoti skrydžio krypties duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali krypties reikšmė ($H_{\max}$): $274,05^\circ$
- Minimali krypties reikšmė ($H_{\min}$): $271,66^\circ$
- Krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}): $272,87^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta H = H_{\max} - H_{\min} = 274,05 - 271,66 = 2,39^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{H_{\max}} = H_{\max} - H_{\text{vid}} = 274,05 - 272,87 = 1,18^\circ$
 - $D_{H_{\min}} = H_{\text{vid}} - H_{\min} = 272,87 - 271,66 = 1,21^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_H matuojama pagal 6 formulę:

$$SE_H = 0,497^\circ$$

Pirminių skrydžio krypties duomenų tyrimo apibendrinimas

Surinkti skrydžio krypties duomenys bei apskaičiuoti aktualiausi rodikliai:

4 lentelė. Pirminių skrydžio krypties duomenų rodikliai

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	vidurkis
$\Delta H, ^\circ$	1,92	1,57	2,39	1,96
$D_{Hmax}, ^\circ$	1,01	0,71	1,18	0,967
$D_{Hmin}, ^\circ$	0,91	0,86	1,21	0,993
$SE_H, ^\circ$	0,421	0,312	0,497	0,410

Skaičiuodami maksimalių deviacijų santykį mažesnę rodmenį dalijame iš didesnio, kad žinotume, kiek procentų didesniojo skaitmens jis sudaro. Šiuo atveju D_{Hmax} yra mažesnis, tad jį dalijame iš D_{Hmin} .

$$\frac{D_{Hmax}}{D_{Hmin}} \times 100 \% = \frac{0,967}{0,993} \times 100 \% = 97,38 \%$$

Šioje lentelėje matoma, kad iš imtuvo, esančio stacionarioje padėtyje gautų skrydžio krypties rodmenų intervalas (ΔH) svyruoja nuo $1,57^\circ$ iki $2,39^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $1,96^\circ$.

Maksimali rodmenų deviacija aukščiau vidurkio (D_{Hmax}) svyruoja nuo $0,71^\circ$ iki $1,18^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,967^\circ$.

Maksimali rodmenų deviacija žemiau vidurkio (D_{Hmin}) svyruoja nuo $0,86^\circ$ iki $1,21^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,993^\circ$.

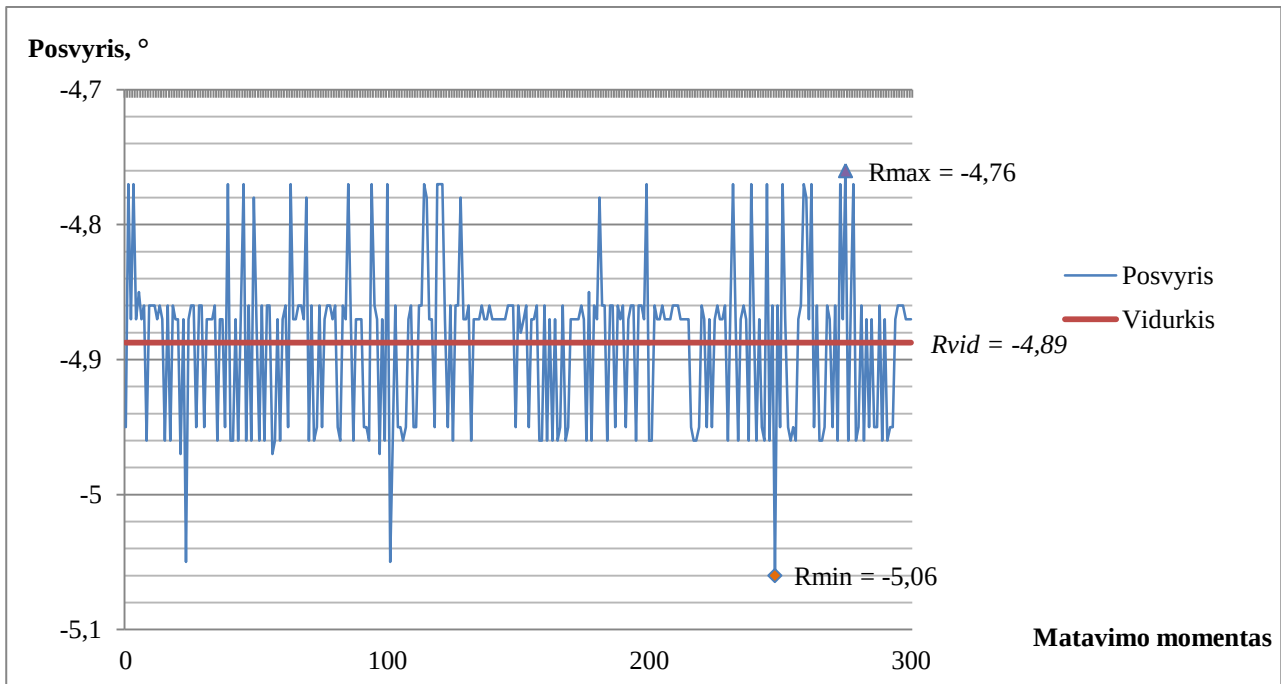
D_{Hmax} ir D_{Hmin} vidurkių santykis nustatomas

Atsižvelgiant į tai, kad tiek aukščiau, tiek žemiau vidurkio maksimalūs nuokrypių vidurkiai yra artimi vienas kitam, t. y. jų santykis, išreikštas procentais, lygus 97,38 %, galima daryti išvadą, kad skrydžio krypties deviacijos yra beveik proporcingos ir nėra matoma žymi tendencija prietaiso ekstremumams būti vienakrypčiams.

Standartinė skrydžio krypties paklaida (SE_H) svyruoja nuo $0,312^\circ$ iki $0,497^\circ$. Visose trijose matavimo padėtyse standartinė skrydžio krypties paklaida sudaro mažiau nei pusę mažiausios padalos, rodomos standartiniuose skrydžio krypties rodmenų prietaisuose, t. y. 1° . Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,41^\circ$.

3.2. Pirminių posvyrio duomenų analizė:

Šiame skyriuje pateiktose schemose (16, 17, 18 pav.) pavaizduoti posvyrio duomenys, gauti iš AHRS, kuris buvo stacionarioje pozicijoje tam, kad rodytų vienodą padėtį vieno matavimo metu. Siekiant užtikrinti surinktų duomenų patikimumą, duomenys buvo renkami trijose skirtingose pozicijose.



16 pav. Posvyrio deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti jutiklių teikiami nefiltruoti posvyrio duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

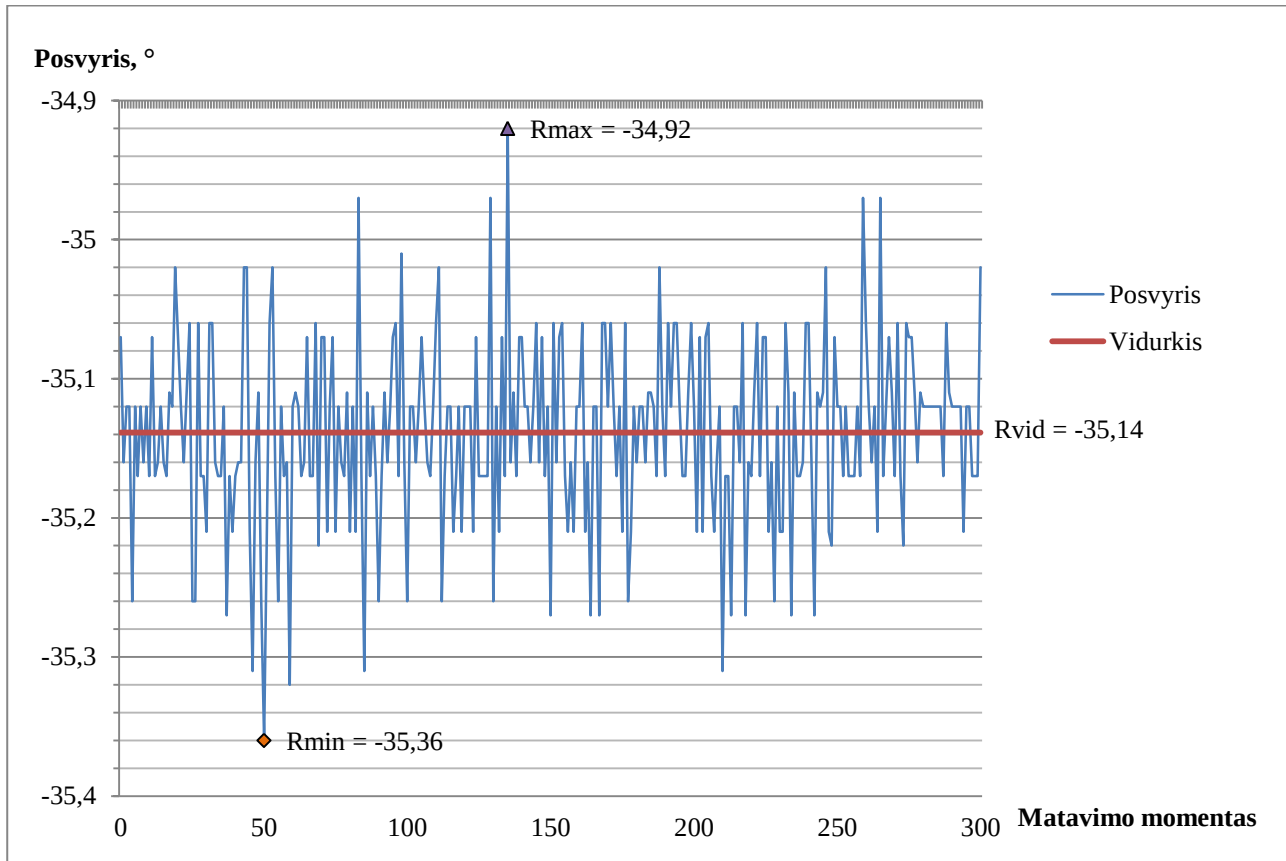
- Maksimali posvyrio reikšmė ($R_{\max}$): $-4,67^\circ$
- Minimali posvyrio reikšmė ($R_{\min}$): $-5,06^\circ$
- Posvyrio rodmenų vidurkis (R_{vid}): $-4,89^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta R = R_{\max} - R_{\min} = -4,67 - (-5,06) = 0,39^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{R_{\max}} = R_{\max} - R_{\text{vid}} = -4,67 - (-4,89) = 0,22^\circ$
 - $D_{R_{\min}} = R_{\text{vid}} - R_{\min} = -4,89 - (-5,06) = 0,17^\circ$

$$SE_R = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

čia SE - standartinė paklaida; s – standartinė deviacija, n – matavimų skaičius.

$$SE_R = 0,058^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti posvyrio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (17 pav.)



17 pav. Posvyrio deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti jutiklių teikiami nefiltruoti posvyrio duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

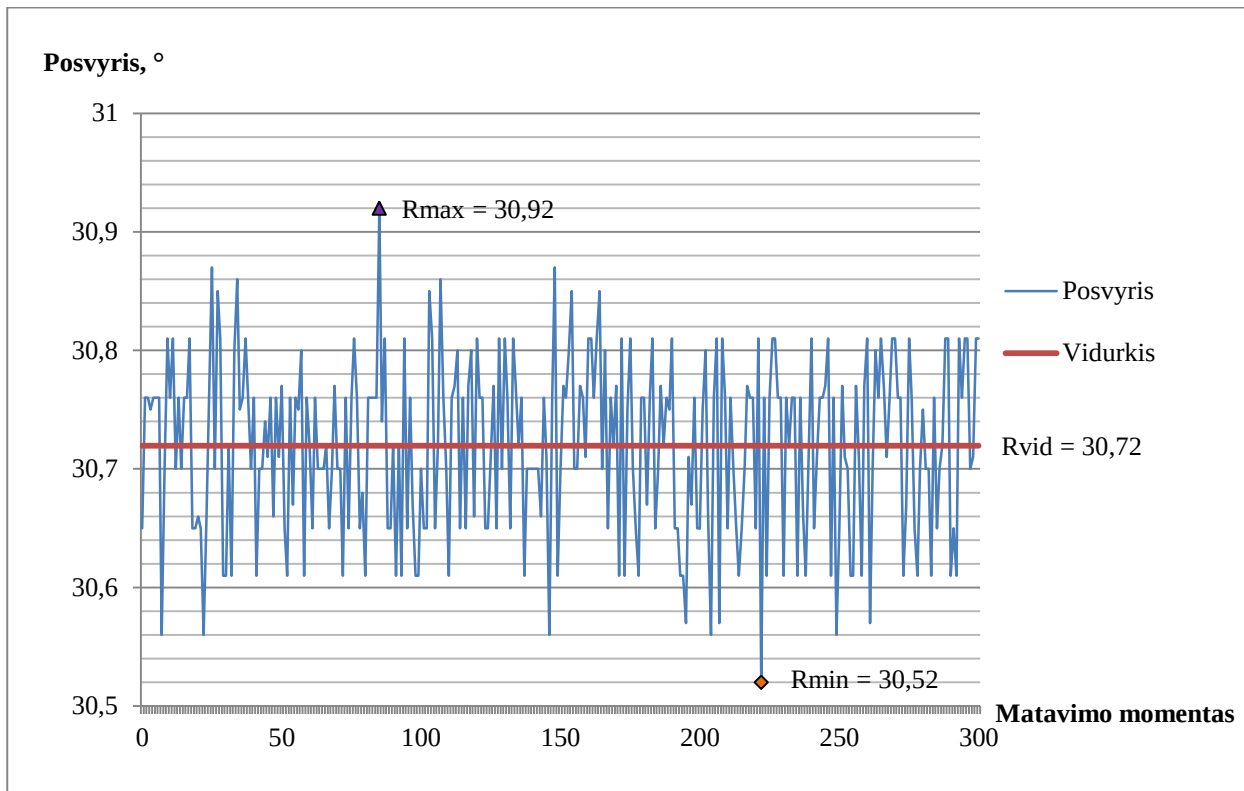
- Maksimali posvyrio reikšmė ($R_{\max}$): $-34,92^{\circ}$
- Minimali posvyrio reikšmė ($R_{\min}$): $-35,36^{\circ}$
- Posvyrio rodmenų vidurkis (R_{vid}): $-35,14^{\circ}$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta R = R_{\max} - R_{\min} = -34,92 - (-35,36) = 0,44^{\circ}$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{R_{\max}} = R_{\max} - R_{\text{vid}} = -34,92 - (-35,14) = 0,22^{\circ}$
 - $D_{R_{\min}} = R_{\text{vid}} - R_{\min} = -35,14 - (-35,36) = 0,22^{\circ}$

Standartinė paklaida:

SE_R matuojama pagal 7 formulę:

$$SE_R = 0,066^{\circ}$$

Pateikiama schema, nurodanti posvyrio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (18 pav.)



18 pav. Posvyrio deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti jutiklių teikiami nefiltruoti posvyrio duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali posvyrio reikšmė ($R_{\max}$): $30,92^\circ$
- Minimali posvyrio reikšmė ($R_{\min}$): $30,52^\circ$
- Posvyrio rodmenų vidurkis (R_{vid}): $30,72^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta R = R_{\max} - R_{\min} = 30,92 - 30,52 = 0,40^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{R_{\max}} = R_{\max} - R_{\text{vid}} = 30,92 - 30,72 = 0,20^\circ$
 - $D_{R_{\min}} = R_{\text{vid}} - R_{\min} = 30,72 - 30,52 = 0,20^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_R matuojama pagal 7 formulę:

$$SE_R = 0,073^\circ$$

Pirminių posvyrio duomenų tyrimo apibendrinimas

Surinkti posvyrio duomenys bei apskaičiuoti aktualiausi rodikliai:

5 lentelė. Pirminių posvyrio duomenų rodikliai

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	vidurkis
ΔR	0,39	0,44	0,40	0,41
D_{Rmax}	0,22	0,22	0,20	0,213
D_{Rmin}	0,17	0,22	0,20	0,197
SE_R	0,058	0,066	0,073	0,066

Skaičiuodami maksimalių deviacijų santykį mažesnę rodmenį dalijame iš didesnio, kad žinotume, kiek procentų didesniojo skaitmens jis sudaro. Šiuo atveju D_{Rmin} yra mažesnis, tad jį dalijame iš D_{Rmax} .

$$\frac{D_{Rmin}}{D_{Rmax}} \times 100 \% = \frac{0,197}{0,213} \times 100 \% = 92,49 \%$$

Šioje lentelėje matoma, kad iš imtuvo, esančio stacionarioje padėtyje gautų posvyrio rodmenų intervalas (ΔR) svyruoja nuo 0,39° iki 0,44°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,41°.

Maksimali rodmenų deviacija aukščiau vidurkio (D_{Rmax}) svyruoja nuo 0,20° iki 0,22°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,213°.

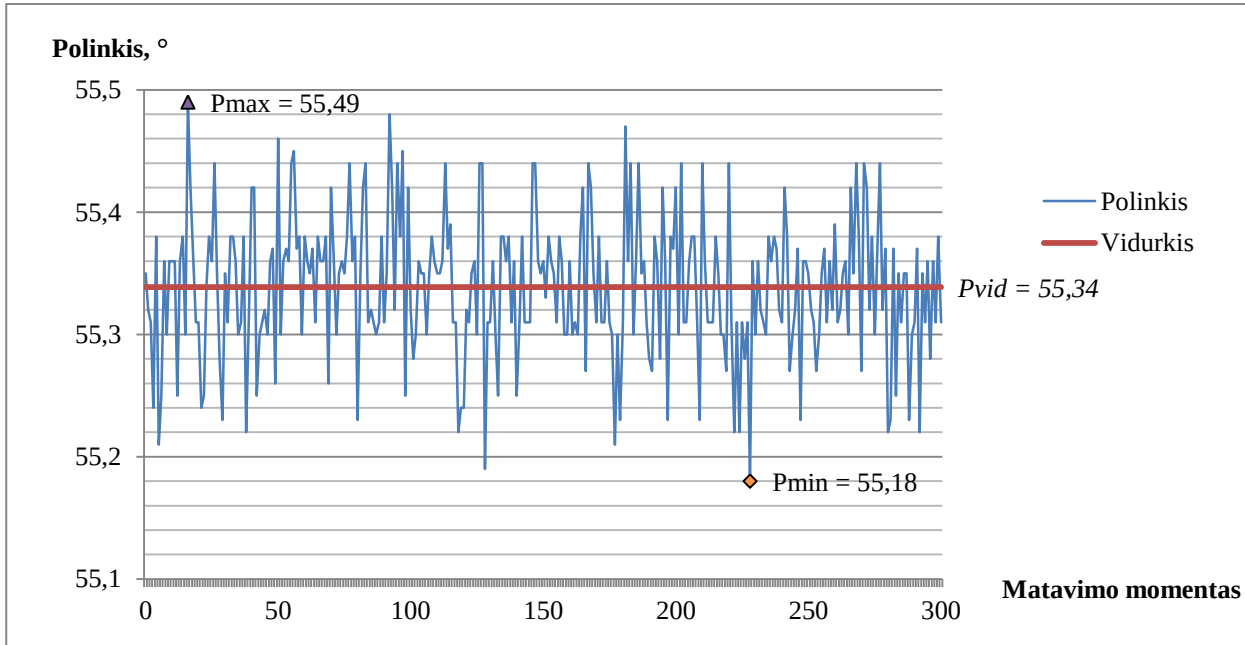
Maksimali rodmenų deviacija žemiau vidurkio (D_{Rmin}) svyruoja nuo 0,17° iki 0,22°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,197°.

Atsižvelgiant į tai, kad tiek aukščiau, tiek žemiau vidurkio maksimalūs nuokrypių vidurkiai yra artimi vienas kitam, t. y. jų santykis, išreikštas procentais, lygus 92,49 %, o dvejuose iš trijų bandymų D_{Rmax} lygus D_{Rmin} , galima daryti išvadą, kad skrydžio krypties deviacijos yra beveik proporcingos ir nėra matoma žymi tendencija prietaiso ekstremumams būti vienakrypčiams.

Standartinė pokrypio paklaida (SE_R) svyruoja nuo 0,058° iki 0,073°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,066°.

3.3. Polinkio duomenų analizė:

Šiame skyriuje atvaizduotos schemose (19, 20, 21 pav.) pavaizduoti polinkio duomenys, gauti iš AHRS, kuris buvo stacionarioje pozicijoje tam, kad rodytų vienodą padėtį vieno matavimo metu. Siekiant užtikrinti surinktų duomenų patikimumą, duomenys buvo renkami trijose skirtingose pozicijose.



19 pav. Polinkio deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti imtuvo teikiami nefiltruoti polinkio duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

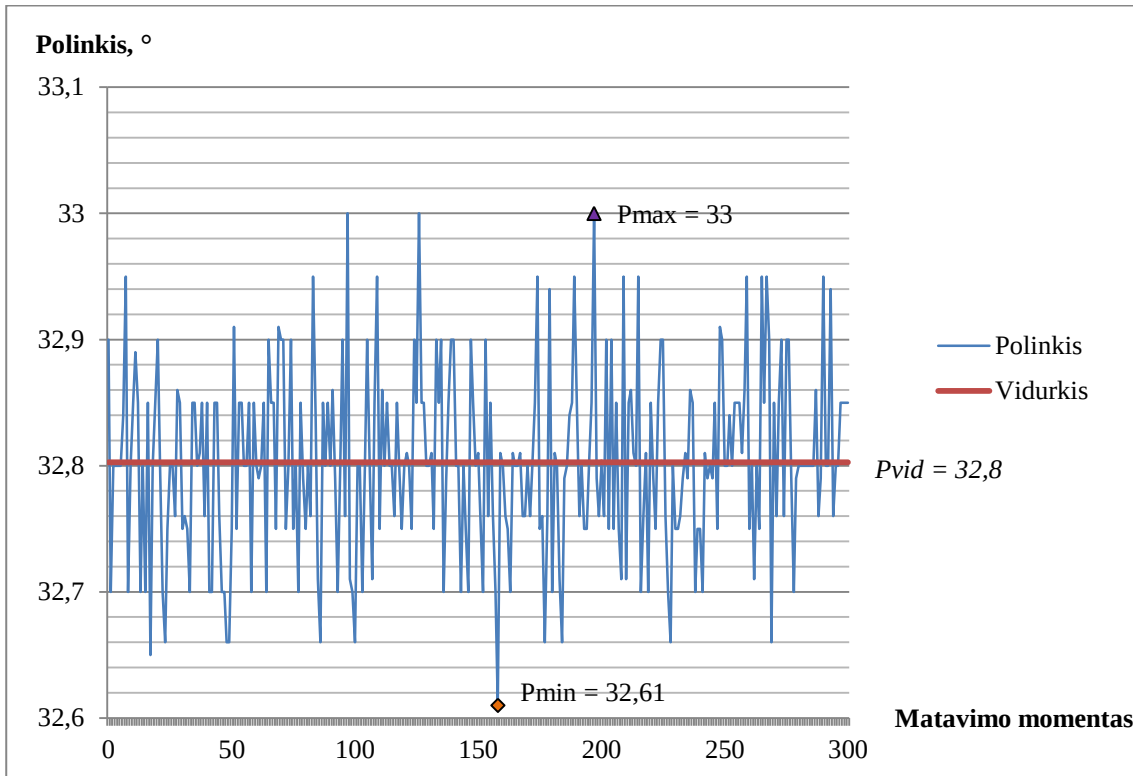
- Maksimali polinkio reikšmė ($P_{\max}$): $55,49^\circ$
- Minimali polinkio reikšmė ($P_{\min}$): $55,18^\circ$
- Polinkio rodmenų vidurkis (P_{vid}): $55,34^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta P = P_{\max} - P_{\min} = 55,49 - 55,18 = 0,31^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{P_{\max}} = P_{\max} - P_{\text{vid}} = 55,49 - 55,34 = 0,15^\circ$
 - $D_{P_{\min}} = P_{\text{vid}} - P_{\min} = 55,34 - 55,18 = 0,16^\circ$

Standartinė paklaida:

$$SE_P = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$SE_P = 0,057^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti polinkio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (20 pav.)



20 pav. Polinkio deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti imtuvo teikiami nefiltruoti polinkio duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

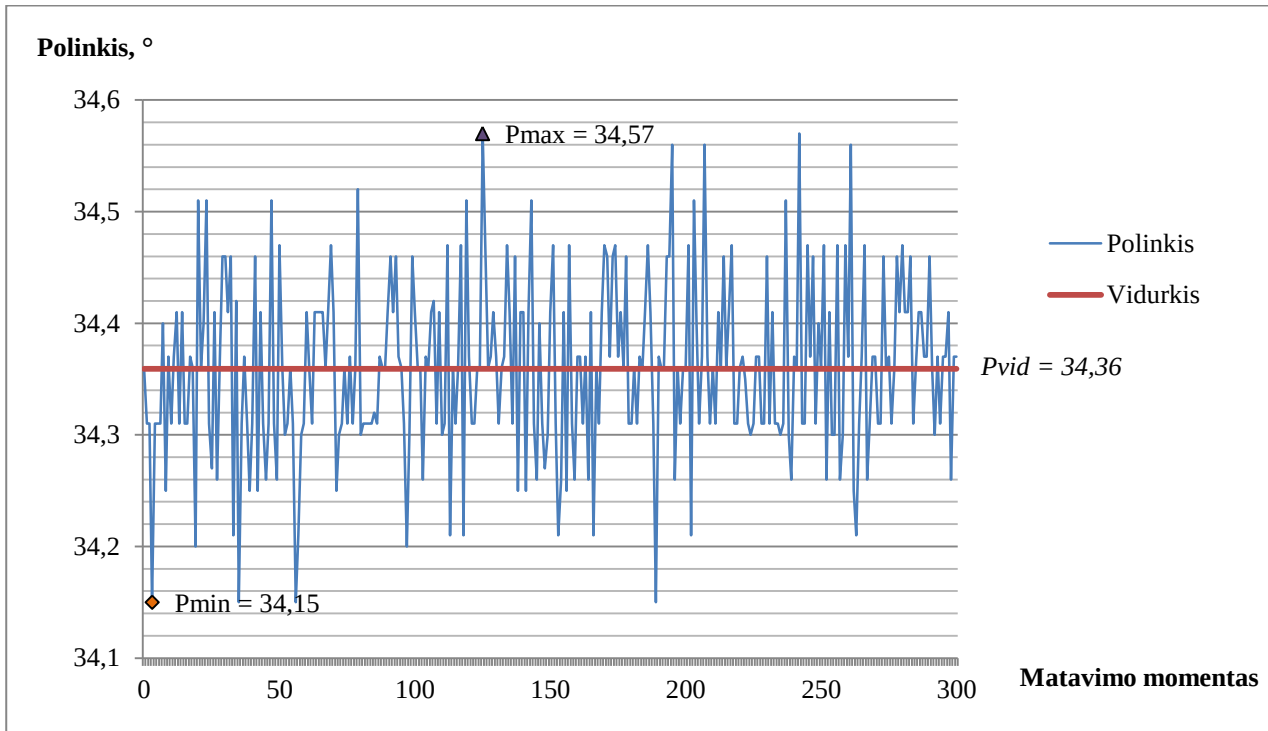
- Maksimali polinkio reikšmė ($P_{\max}$): 33°
- Minimali polinkio reikšmė ($P_{\min}$): $32,61^\circ$
- Polinkio rodmenų vidurkis (P_{vid}): $32,8^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta P = P_{\max} - P_{\min} = 33 - 32,61 = 0,39^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{P_{\max}} = P_{\max} - P_{\text{vid}} = 33 - 32,8 = 0,20^\circ$
 - $D_{P_{\min}} = P_{\text{vid}} - P_{\min} = 32,8 - 32,61 = 0,19^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_P matuojama pagal 8 formulę:

$$SE_P = 0,072^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti polinkio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje.



21 pav. Polinkio deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti imtuvo teikiami nefiltruoti polinkio duomenys. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali polinkio reikšmė ($P_{\max}$): 34.57°
- Minimali polinkio reikšmė ($P_{\min}$): 34.15°
- Polinkio rodmenų vidurkis (P_{vid}): 34.36°
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta P = P_{\max} - P_{\min} = 34.57 - 34.15 = 0.42^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{P_{\max}} = P_{\max} - P_{\text{vid}} = 34.57 - 34.36 = 0,21^\circ$
 - $D_{P_{\min}} = P_{\text{vid}} - P_{\min} = 34.36 - 34.15 = 0,21^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_p matuojama pagal 8 formulę:

$$SE_p = 0,078^\circ$$

Pirminių polinkio duomenų tyrimo apibendrinimas

Surinkti polinkio duomenys bei apskaičiuoti aktualiausi rodikliai:

6 lentelė. Pirminių polinkio duomenų rodikliai

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	vidurkis
ΔP	0,31	0,39	0,42	0,373
D_{Pmax}	0,15	0,20	0,21	0,187
D_{Pmin}	0,16	0,19	0,21	0,187
SE_p	0,057	0,072	0,078	0,069

Skaičiuodami maksimalių deviacijų santykį mažesnę rodmenį dalijame iš didesnio, kad žinotume, kiek procentų didesniojo skaitmens jis sudaro. Šiuo atveju abu vidurkiai yra lygūs, todėl nesvarbu, kurį pasirinkime.

$$\frac{D_{Pmin}}{D_{Pmax}} \times 100 \% = \frac{0,187}{0,187} \times 100 \% = 100 \%$$

Šioje lentelėje matoma, kad iš imtuvo, esančio stacionarioje padėtyje gautų polinkio rodmenų intervalas (ΔP) svyruoja nuo $0,31^\circ$ iki $0,42^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,41^\circ$.

Maksimali rodmenų deviacija aukščiau vidurkio (D_{Pmax}) svyruoja nuo $0,15^\circ$ iki $0,21^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,187^\circ$.

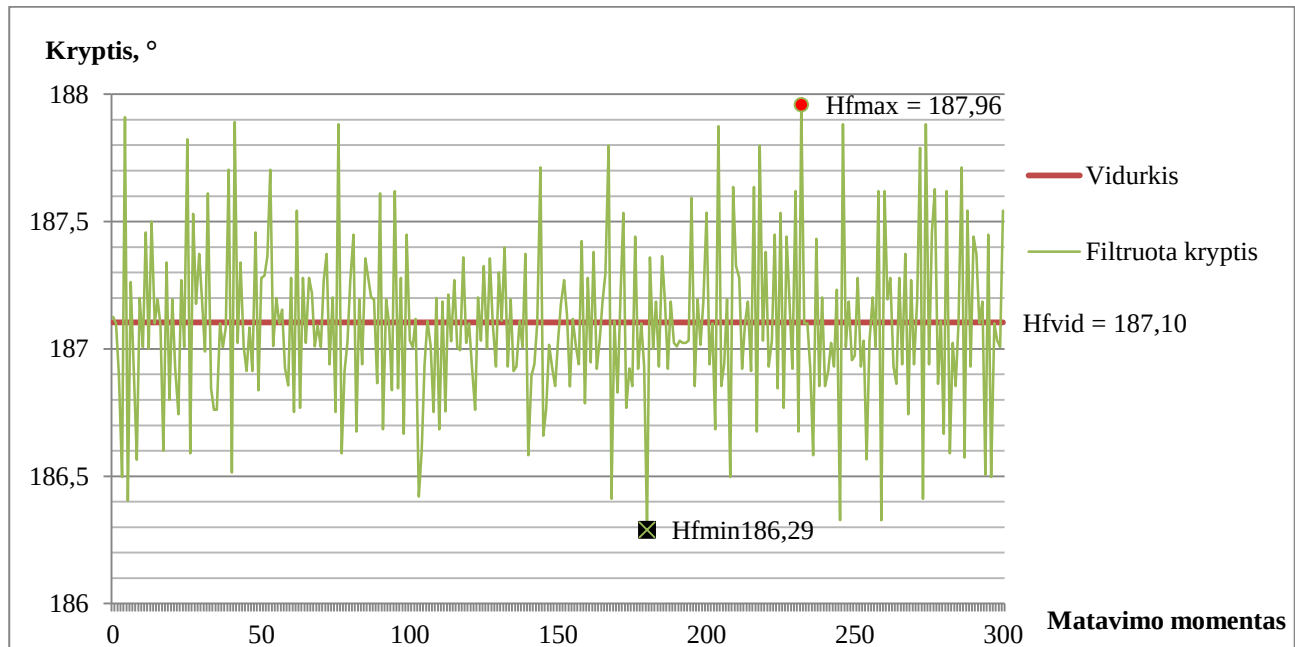
Maksimali rodmenų deviacija žemiau vidurkio (D_{Pmin}) svyruoja nuo $0,16^\circ$ iki $0,21^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,187^\circ$.

Atsižvelgiant į tai, kad tiek aukščiau, tiek žemiau vidurkio maksimalūs nuokrypių vidurkiai yra vienodi, o viename iš trijų bandymų D_{Pmax} lygus D_{Pmin} , galima daryti išvadą, kad skrydžio krypties deviacijos yra beveik proporcingos ir nėra matoma žymi tendencija prietaiso ekstremumams būti vienakrypčiams.

Standartinė pokrypio paklaida (SE_p) svyruoja nuo $0,057^\circ$ iki $0,078^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,069^\circ$.

3.4. Filtruotų skrydžio krypties duomenų analizė

Toliau pateiktose schemose pavaizduoti skrydžio krypties duomenys, gauti pirminius skrydžio krypties duomenis apdorojus EKF, naudojantis programa *Matlab*.¹



22 pav. Filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti išfiltruoti skrydžio krypties duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali filtruotos krypties reikšmė (H_{fmax}): $187,96^\circ$
- Minimali krypties reikšmė (H_{fmin}): $186,29^\circ$
- Krypties rodmenų vidurkis (H_{fvid}): $187,10^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta H_f = H_{max} - H_{min} = 187,96 - 186,29 = 1,67^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Hfmax} = H_{max} - H_{vid} = 187,96 - 187,1 = 0,86^\circ$
 - $D_{Hfmin} = H_{vid} - H_{min} = 187,1 - 186,29 = 0,81^\circ$

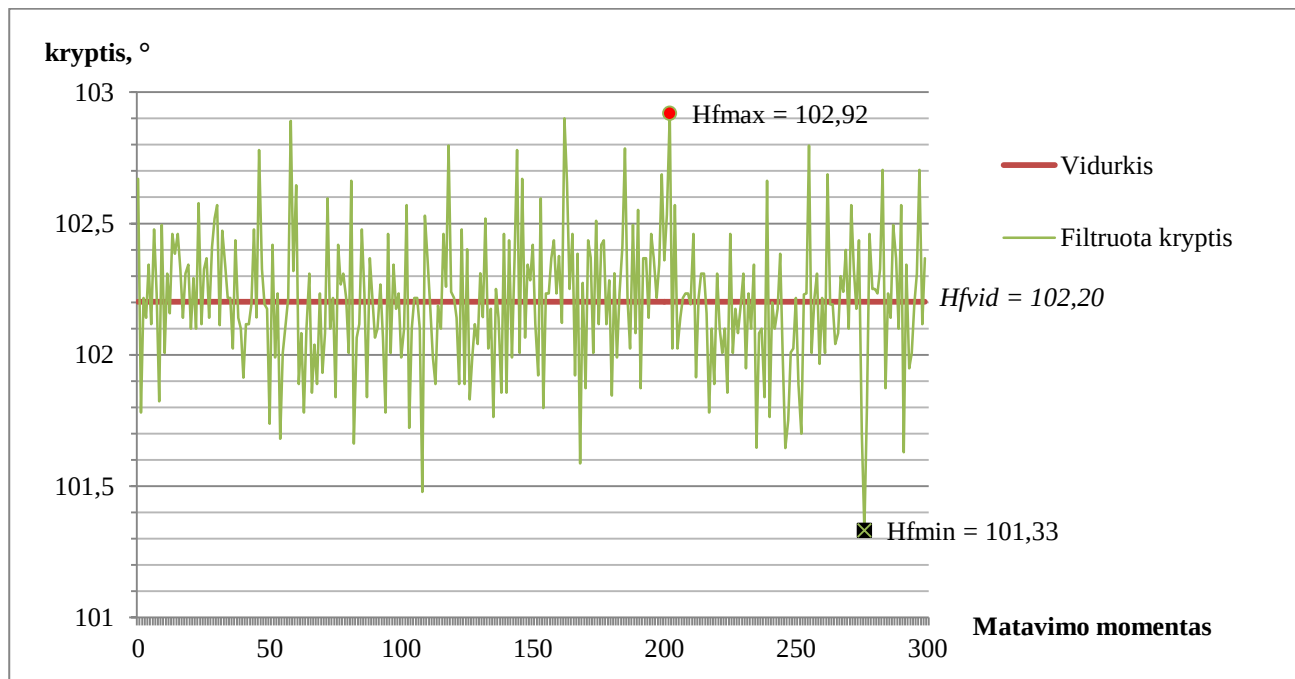
Standartinė paklaida:

SE_H matuojama pagal 6 formulę:

$$SE_{Hf} = 0,317$$

¹ Kalmano filtro kodas pateiktas 2 priede

Pateikiama schema, nurodanti filtruotus skrydžio krypties duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (23 pav.)



23 pav. Filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti išfiltruoti skrydžio krypties duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

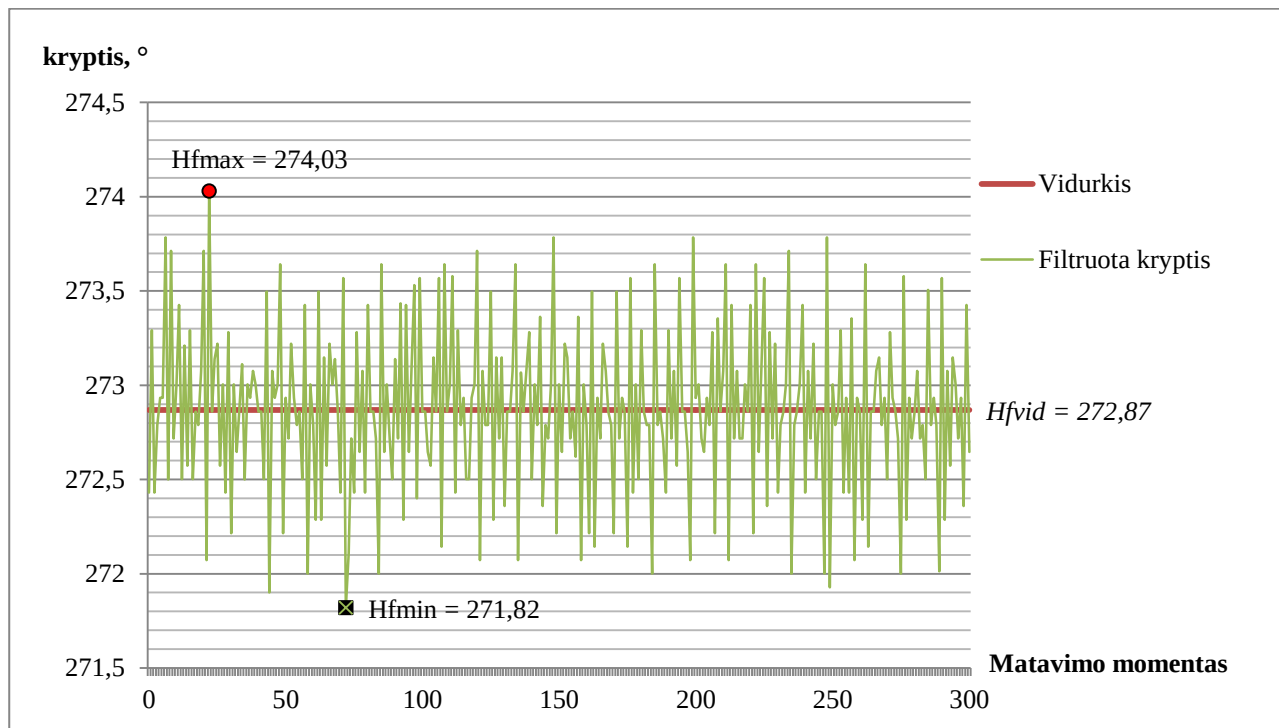
- Maksimali krypties reikšmė ($H_{\max}$): $102,92^\circ$
- Minimali krypties reikšmė ($H_{\min}$): $101,33^\circ$
- Krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}): $102,20^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta H_f = H_{\max} - H_{\min} = 102,92 - 101,33 = 1,59^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{H_{\max}} = H_{\max} - H_{\text{vid}} = 102,92 - 102,2 = 0,72^\circ$
 - $D_{H_{\min}} = H_{\text{vid}} - H_{\min} = 102,2 - 101,33 = 0,87^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_H matuojama pagal 6 formulę:

$$SE_{H_f} = 0,260^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti filtruotus skrydžio krypties duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (24 pav)



24 pav. Filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti išfiltruoti skrydžio krypties duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali krypties reikšmė ($H_{\max}$): $274,03^\circ$
- Minimali krypties reikšmė ($H_{\min}$): $271,82^\circ$
- Krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}): $272,87^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta H = H_{\max} - H_{\min} = 274,03 - 271,82 = 2,21^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio ($D_{\max}$; $D_{\min}$):
 - $D_{H_{\max}} = H_{\max} - H_{\text{vid}} = 274,03 - 272,87 = 1,16^\circ$
 - $D_{H_{\min}} = H_{\text{vid}} - H_{\min} = 272,87 - 271,82 = 1,05^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_H matuojama pagal 6 formulę:

$$SE_{H_f} = 0,434^\circ$$

Filtruotų skrydžio krypties duomenų tyrimo apibendrinimas

Surinkti filtruoti skrydžio krypties duomenys bei apskaičiuoti aktualiausi rodikliai:

7 lentelė. Filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	vidurkis
ΔH_f	1,67	1,59	2,21	1,823
D_{Hfmax}	0,86	0,72	1,16	0,913
D_{Hfmin}	0,81	0,87	1,05	0,91
SE_{Hf}	0,317	0,260	0,434	0,337

Skaiciuodami maksimalių deviacijų santykį, mažesnę rodmenį dalijame iš didesnio, kad žinotume, kiek procentų didesniojo skaitmens jis sudaro. Šiuo atveju D_{Hfmin} yra mažesnis, tad jį dalijame iš D_{Hfmax} .

$$\frac{D_{Hfmin}}{D_{Hfmax}} \times 100 \% = \frac{0,910}{0,913} \times 100 \% = 99,67 \%$$

Šioje lentelėje matoma, kad iš imtuvo, esančio stacionarioje padėtyje gautų skrydžio krypties rodmenų intervalas (ΔH_f) svyruoja nuo 1,59° iki 2,21°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 1,823°.

Maksimali rodmenų deviacija aukščiau vidurkio (D_{Hmax}) svyruoja nuo 0,72° iki 1,16°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,913°.

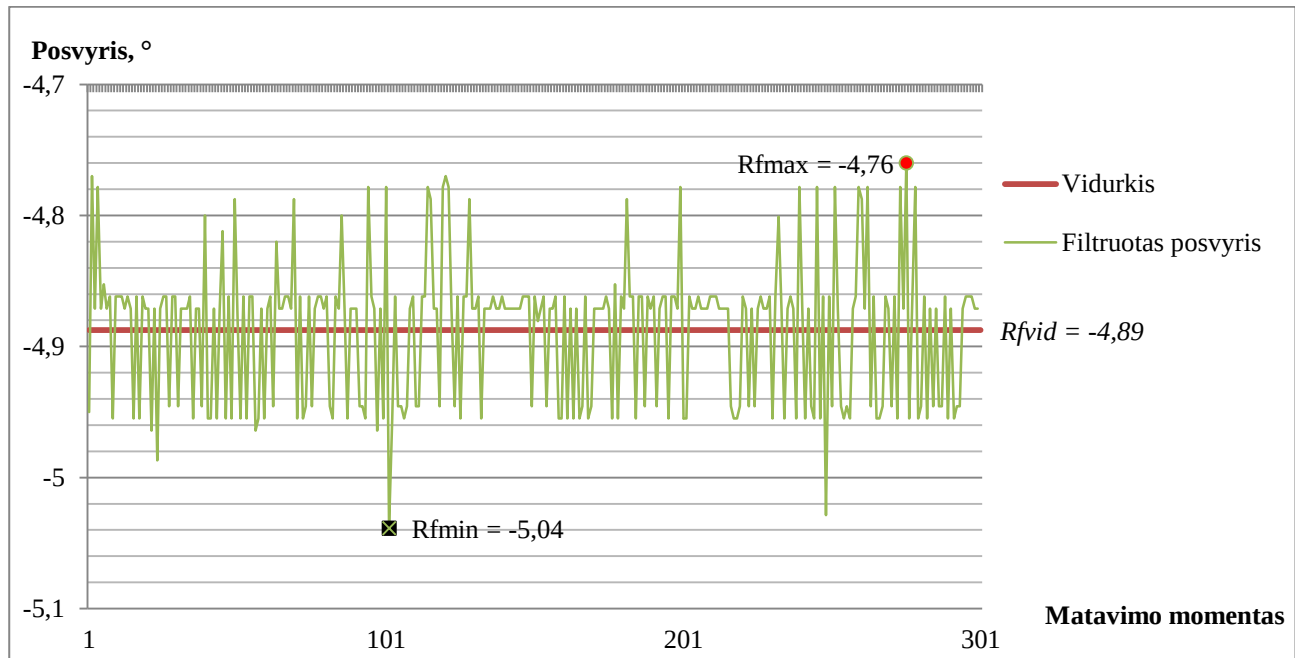
Maksimali rodmenų deviacija žemiau vidurkio (D_{Hmin}) svyruoja nuo 0,81° iki 1,05°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,91°.

Atsižvelgiant į tai, kad tiek aukščiau, tiek žemiau vidurkio maksimalūs nuokrypių vidurkliai yra artimi vienas kitam, t. y. jų santykis, išreikštas procentais, lygus 99,67 %, galima daryti išvadą, kad skrydžio krypties deviacijos yra beveik proporcingos ir nėra matoma žymi tendencija prietaiso ekstremumams būti vienakrypčiams.

Standartinė skrydžio krypties paklaida (SE_H) svyruoja nuo 0,260° iki 0,434°. Visose trijose matavimo padėtyse standartinė skrydžio krypties paklaida sudaro mažiau nei pusę mažiausios padalos, rodomos standartiniuose skrydžio krypties rodmenų prietaisuose, t. y. 1°. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro 0,337°.

3.5. Filtruotų posvyrio duomenų analizė:

Šiame skyriuje pateiktose schemose (25, 26, 27 pav.) pavaizduoti posvyrio duomenys, gauti pirminius skrydžio krypties duomenis apdorojus kalmano filtru.



25 pav. Filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti išfiltruoti posvyrio duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

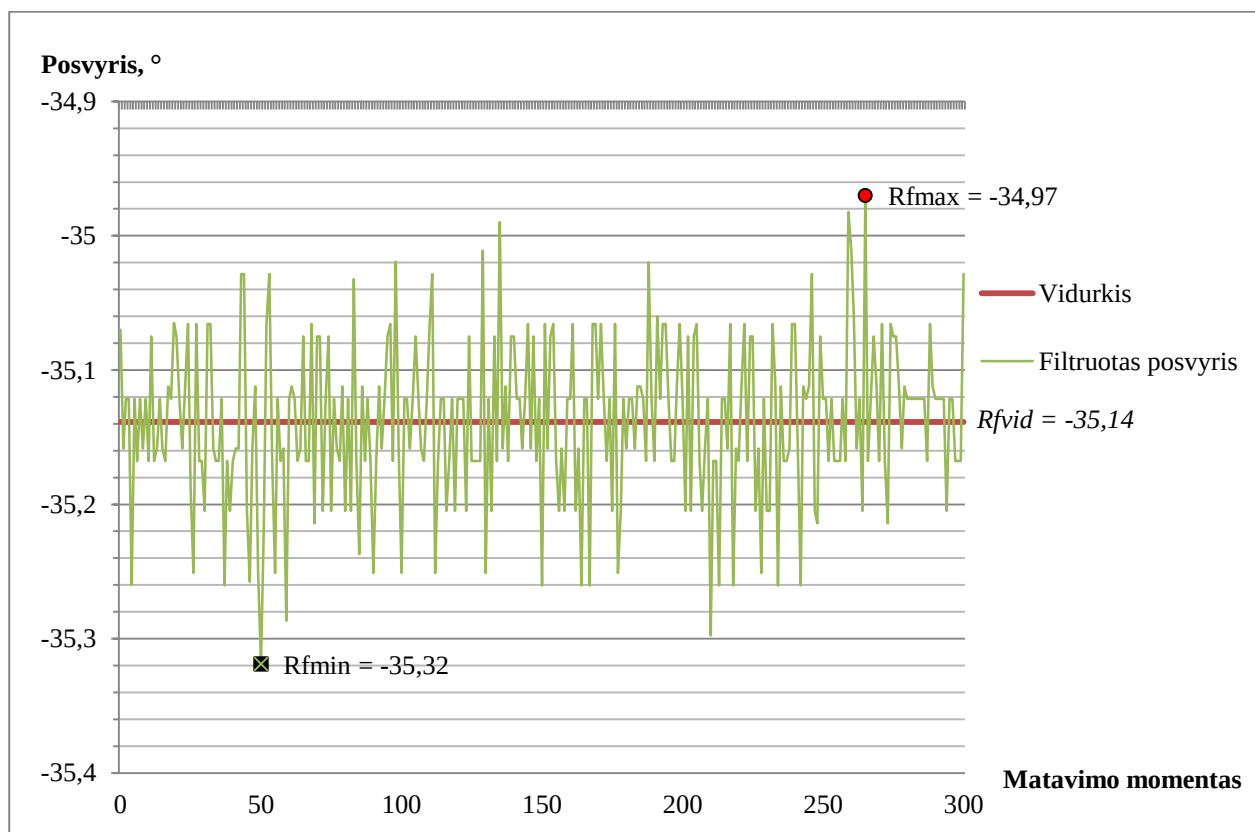
- Maksimali posvyrio reikšmė (R_{max}): $-4,67^\circ$
- Minimali posvyrio reikšmė (R_{min}): $-5,04^\circ$
- Posvyrio rodmenų vidurkis (R_{vid}): $-4,89^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta R_f = R_{max} - R_{min} = -4,67 - (-5,04) = 0,37^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Rfmax} = R_{max} - R_{vid} = -4,67 - (-4,89) = 0,22^\circ$
 - $D_{Rfmin} = R_{vid} - R_{min} = -4,89 - (-5,04) = 0,15^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_R matuojama pagal 7 formulę:

$$SE_{Rf} = 0,053^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti filtruotus posvyrio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (žiūrėti 26 pav.)



26 pav. Filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti išfiltruoti posvyrio duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

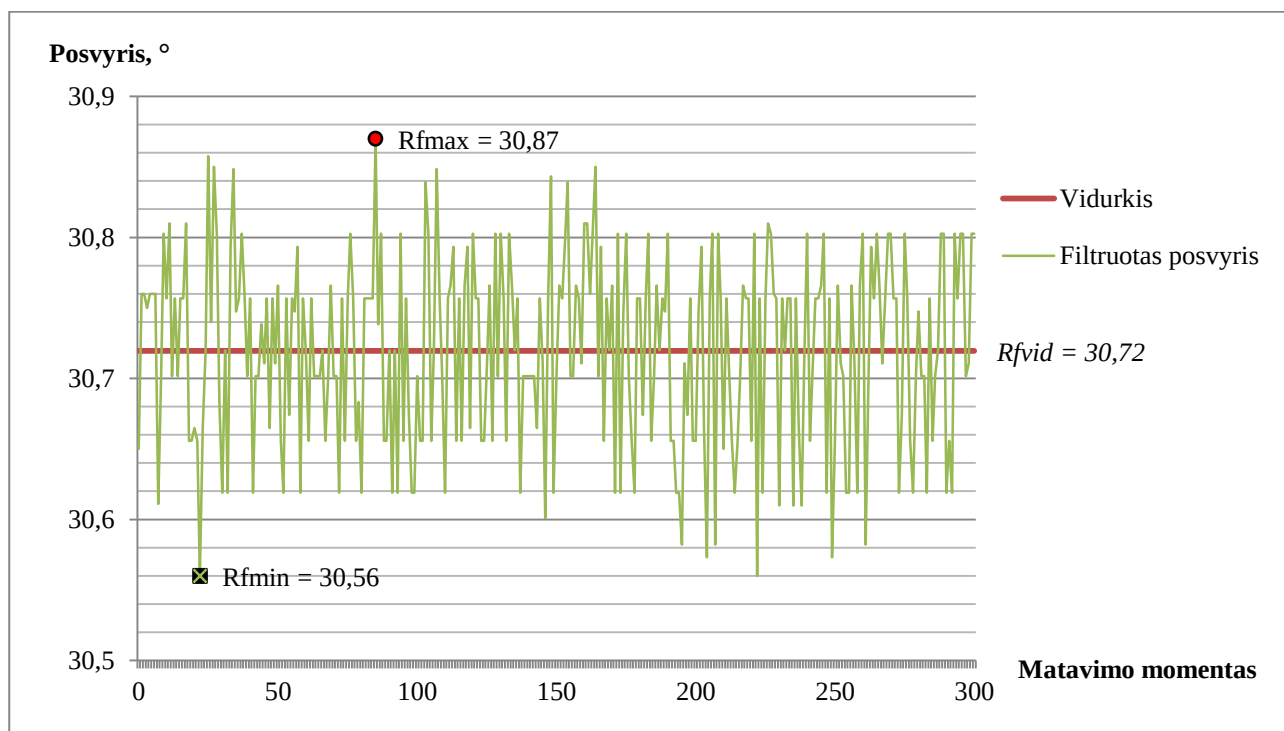
- Maksimali posvyrio reikšmė (R_{fmax}): $-34,97^\circ$
- Minimali posvyrio reikšmė (R_{fmin}): $-35,32^\circ$
- Posvyrio rodmenų vidurkis (R_{fvid}): $-35,14^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta R = R_{fmax} - R_{fmin} = -34,97 - (-35,32) = 0,35^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Rfmax} = R_{fmax} - R_{fvid} = -34,97 - (-35,14) = 0,17^\circ$
 - $D_{Rfmin} = R_{fvid} - R_{fmin} = -35,14 - (-35,32) = 0,18^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_R matuojama pagal 7 formulę:

$$SE_{Rf} = 0,060^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti filtruotus posvyrio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (žiūrėti 27 pav.)



27 pav. Filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti išfiltruoti posvyrio duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali posvyrio reikšmė (R_{fmax}): $30,87^\circ$
- Minimali posvyrio reikšmė (R_{fmin}): $30,56^\circ$
- Posvyrio rodmenų vidurkis (R_{fvid}): $30,72^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $\Delta R = R_{fmax} - R_{fmin} = 30,87 - 30,56 = 0,31^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Rfmax} = R_{fmax} - R_{fvid} = 30,87 - 30,72 = 0,15^\circ$
 - $D_{Rfmin} = R_{fvid} - R_{fmin} = 30,72 - 30,56 = 0,16^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_R matuojama pagal 7 formulę:

$$SE_{Rf} = 0,066^\circ$$

Filtruotų posvyrio duomenų tyrimo apibendrinimas

Surinkti posvyrio duomenys bei apskaičiuoti aktualiausi rodikliai:

8 lentelė. Filtruotų posvyrio duomenų rodikliai

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	vidurkis
$\Delta R_f, ^\circ$	0,37	0,35	0,31	0,343
$D_{Rfmax}, ^\circ$	0,22	0,17	0,15	0,18
$D_{Rfmin}, ^\circ$	0,15	0,18	0,16	0,163
$SE_{Rf}, ^\circ$	0,053	0,060	0,066	0,060

Skaiciuodami maksimalių deviacijų santykį mažesnę rodmenį dalijame iš didesnio, kad žinotume, kiek procentų didesniojo skaitmens jis sudaro. Šiuo atveju D_{Rmin} yra mažesnis, tad jį dalijame iš D_{Rmax} .

$$\frac{D_{Rmin}}{D_{Rmax}} \times 100 \% = \frac{0,163}{0,180} \times 100 \% = 90,56 \%$$

Šioje lentelėje matoma, kad iš imtuvo, esančio stacionarioje padėtyje gautų posvyrio rodmenų intervalas (ΔR_f) svyruoja nuo $0,31^\circ$ iki $0,37^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,343^\circ$.

Maksimali rodmenų deviacija aukščiau vidurkio (D_{Rfmax}) svyruoja nuo $0,15^\circ$ iki $0,22^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,18^\circ$.

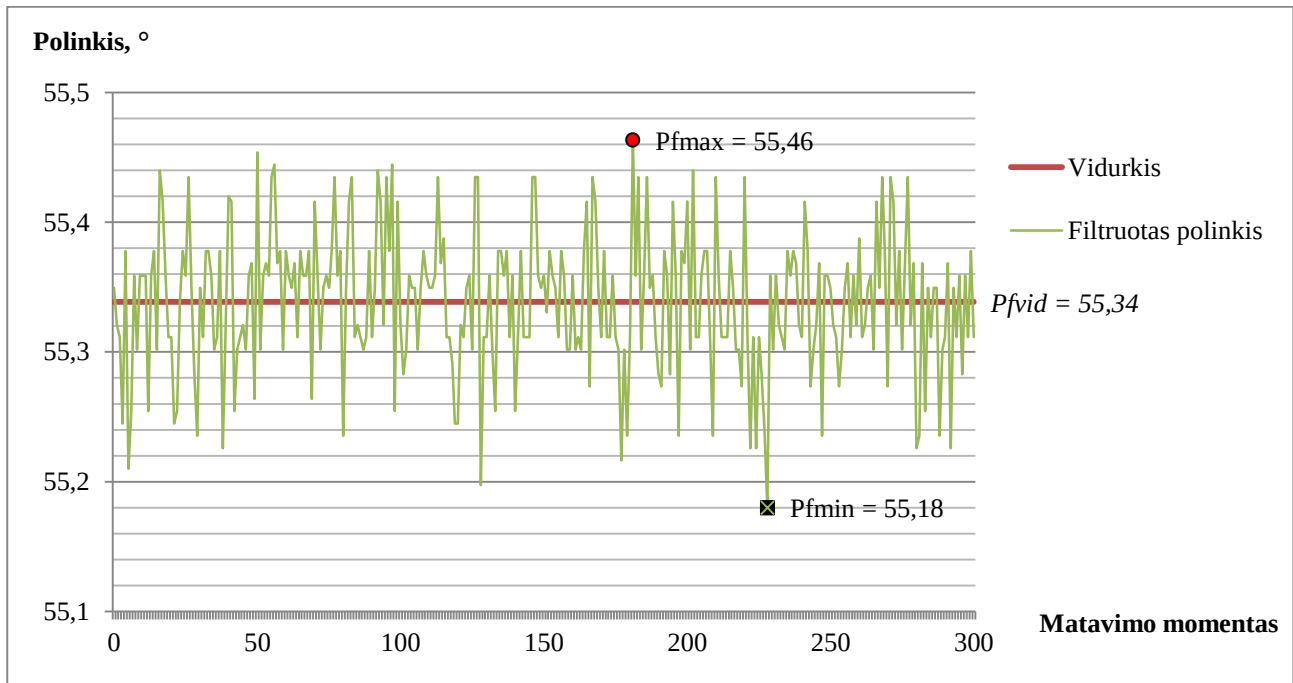
Maksimali rodmenų deviacija žemiau vidurkio (D_{Rfmin}) svyruoja nuo $0,15^\circ$ iki $0,18^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,163^\circ$.

Atsižvelgiant į tai, kad tiek aukščiau, tiek žemiau vidurkio maksimalūs nuokrypių vidurkiai yra artimi vienas kitam, t. y. jų santykis, išreikštas procentais, lygus 90,56 %, galima daryti išvadą, kad skrydžio krypties deviacijos yra beveik proporcingos ir nėra matoma žymi tendencija prietaiso ekstremumams būti vienakrypčiams.

Standartinė pokrypio paklaida (SE_R) svyruoja nuo $0,053^\circ$ iki $0,066^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,060^\circ$.

3.6. Filtruotų polinkio duomenų analizė:

Šiame skyriuje pateiktose schemose (28, 29, 30 pav.) pavaizduoti polinkio duomenys, gauti pirminius skrydžio krypties duomenis apdorojus kalmano filtru.



28 pav. Filtruota polinkio deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti imtuvo teikiami filtruoti polinkio duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

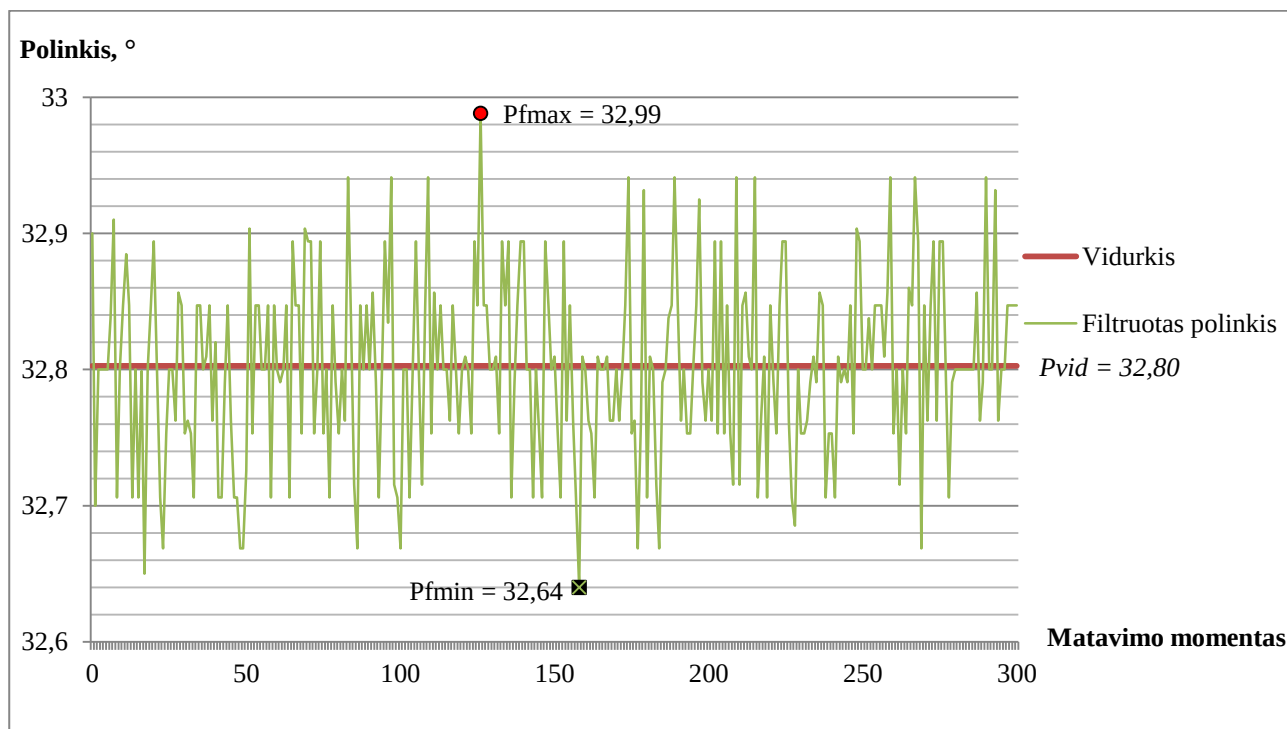
- Maksimali polinkio reikšmė (P_{fmax}): $55,46^\circ$
- Minimali polinkio reikšmė (P_{fmin}): $55,18^\circ$
- Polinkio rodmenų vidurkis (P_{fvid}): $55,34^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $P_{fmax} - P_{fmin} = 55,46 - 55,18 = 0,28^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Pfmax} = P_{fmax} - P_{fvid} = 55,46 - 55,34 = 0,12^\circ$
 - $D_{Pfmin} = P_{fvid} - P_{fmin} = 55,34 - 55,18 = 0,16^\circ$

Standartinė paklaida:

SE_p matuojama pagal 8 formulę:

$$SE_{pf} = 0.054^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti filtruotus polinkio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (žiūrėti 29 pav.)



29 pav. Filtruota polinkio deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti imtuvo teikiami filtruoti polinkio duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

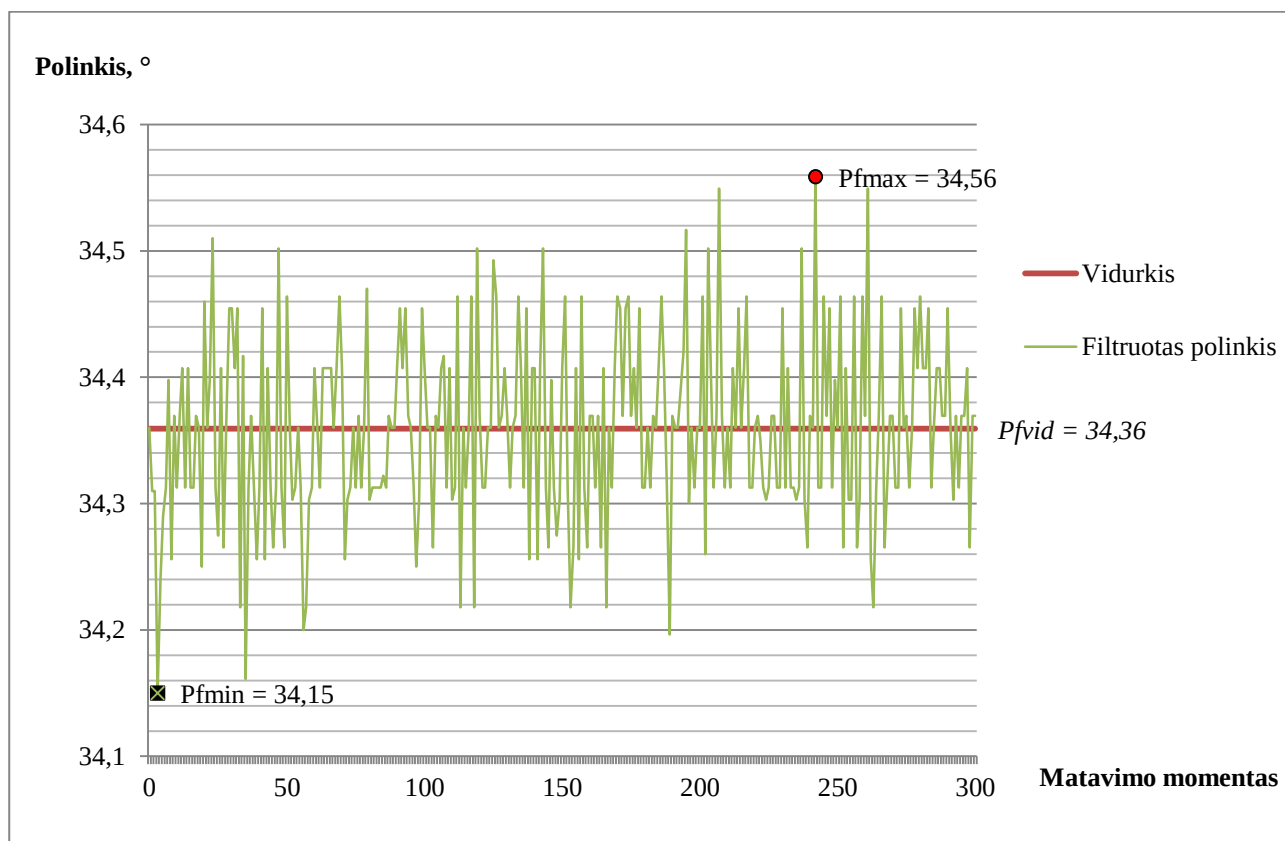
- Maksimali filtruoto polinkio reikšmė (P_{fmax}): $32,99^\circ$
- Minimali filtruoto polinkio reikšmė (P_{fmin}): $32,64^\circ$
- Filtruotų polinkio rodmenų vidurkis (P_{fvid}): $32,80^\circ$
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $P_{fmax} - P_{fmin} = 32,99 - 32,64 = 0,35^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{P_{fmax}} = P_{fmax} - P_{fvid} = 32,99 - 32,8 = 0,19^\circ$
 - $D_{P_{min}} = P_{fvid} - P_{fmin} = 32,80 - 32,64 = 0,16^\circ$

Statistinė paklaida:

SE_P matuojama pagal 8 formulę, 27 psl:

$$SE_{Pf} = 0,066^\circ$$

Pateikiama schema, nurodanti filtruotus polinkio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (žiūrėti 30 pav.)



30 pav. Filtruota polinkio deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Šiame grafike pavaizduoti imtuvo teikiami filtruoti polinkio duomenys, AHRS sistemai esant stacionarioje padėtyje. Buvo atlikta 300 matavimų jutikliui esant toje pačioje padėtyje. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta:

- Maksimali filtruoto polinkio reikšmė (P_{fmax}): 34.56°
- Minimali filtruoto polinkio reikšmė (P_{fmin}): 34.15°
- Filtruotų polinkio rodmenų vidurkis (P_{fvid}): 34.36°
- Rodmenų tikslumo intervalas:
 - $P_{fmax} - P_{fmin} = 34.56 - 34.15 = 0.41^\circ$
- Maksimalios deviacijos nuo vidurkio (D_{max} ; D_{min}):
 - $D_{Pfmax} = P_{fmax} - P_{fvid} = 34.56 - 34.36 = 0.20^\circ$
 - $D_{Pmin} = P_{fvid} - P_{fmin} = 34.36 - 34.15 = 0.21^\circ$

Statistinė paklaida:

SE_p matuojama pagal 8 formulę:

$$SE_{Pf} = 0.071^\circ$$

Filtruotų polinkio duomenų tyrimo apibendrinimas

Surinkti polinkio duomenys bei apskaičiuoti aktualiausi rodikliai:

9 lentelė. Filtruotų polinkio duomenų rodikliai

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	vidurkis
ΔP_f	0,28	0,35	0,41	0,347
D_{Pfmax}	0,12	0,19	0,20	0,17
D_{Pfmin}	0,16	0,16	0,21	0,177
SE_{Pf}	0,054	0,066	0,071	0,064

Skaičiuodami maksimalių deviacijų santykį mažesnę rodmenį dalijame iš didesnio, kad žinotume, kiek procentų didesniojo skaitmens jis sudaro. Šiuo atveju D_{Pfmax} yra mažesnis nei D_{Pfmin} .

$$\frac{D_{Pfmax}}{D_{Pfmin}} \times 100 \% = \frac{0,17}{0,177} \times 100 \% = 96,05 \%$$

Lentelėje matoma, kad iš imtuvo, esančio stacionarioje padėtyje gautų polinkio rodmenų intervalas (ΔP) svyruoja nuo $0,28^\circ$ iki $0,41^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,347^\circ$.

Maksimali rodmenų deviacija aukščiau vidurkio (D_{Pmax}) svyruoja nuo $0,12^\circ$ iki $0,20^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,17^\circ$.

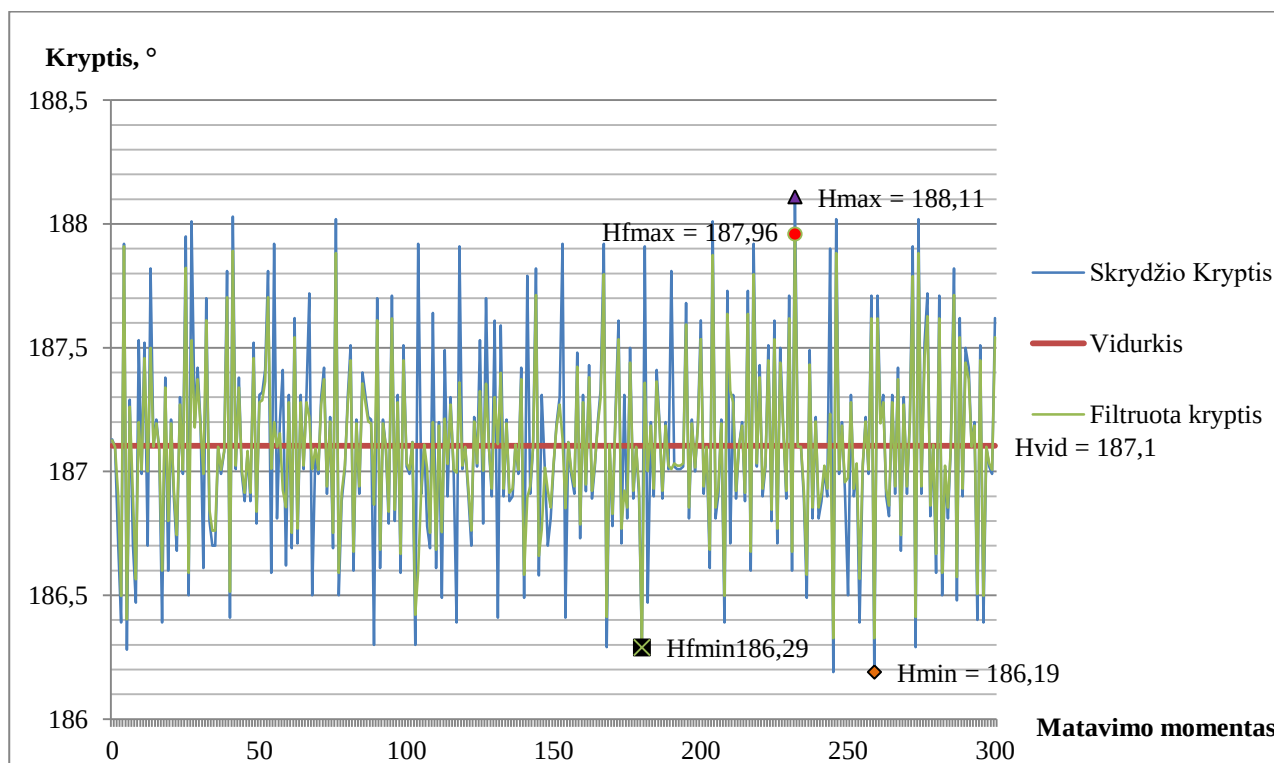
Maksimali rodmenų deviacija žemiau vidurkio (D_{Rmin}) svyruoja nuo $0,16^\circ$ iki $0,21^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,177^\circ$.

Atsižvelgiant į tai, kad tiek aukščiau, tiek žemiau vidurkio maksimalūs nuokrypių vidurkiai yra artimi vienas kitam, , t. y. jų santykis, išreikštas procentais, lygus 96,05 %, galima daryti išvadą, kad skrydžio krypties deviacijos yra beveik proporcingos ir nėra matoma žymi tendencija prietaiso ekstremumams būti vienakrypčiams.

Standartinė pokrypio paklaida (SE_P) svyruoja nuo $0,054^\circ$ iki $0,071^\circ$. Iš trijų atliktų bandymų paimtas vidurkis sudaro $0,064^\circ$.

3.7. Pirminių ir išfiltruotų duomenų lyginimas

Šioje darbo dalyje lyginame pirminius iš jutiklių gautus duomenis apie objekto poziciją ir Kalmano filtru apdorotus duomenis.



31 pav. Pirminė ir filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Iš schemos (31 pav.) nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai skrydžio krypties duomenys.

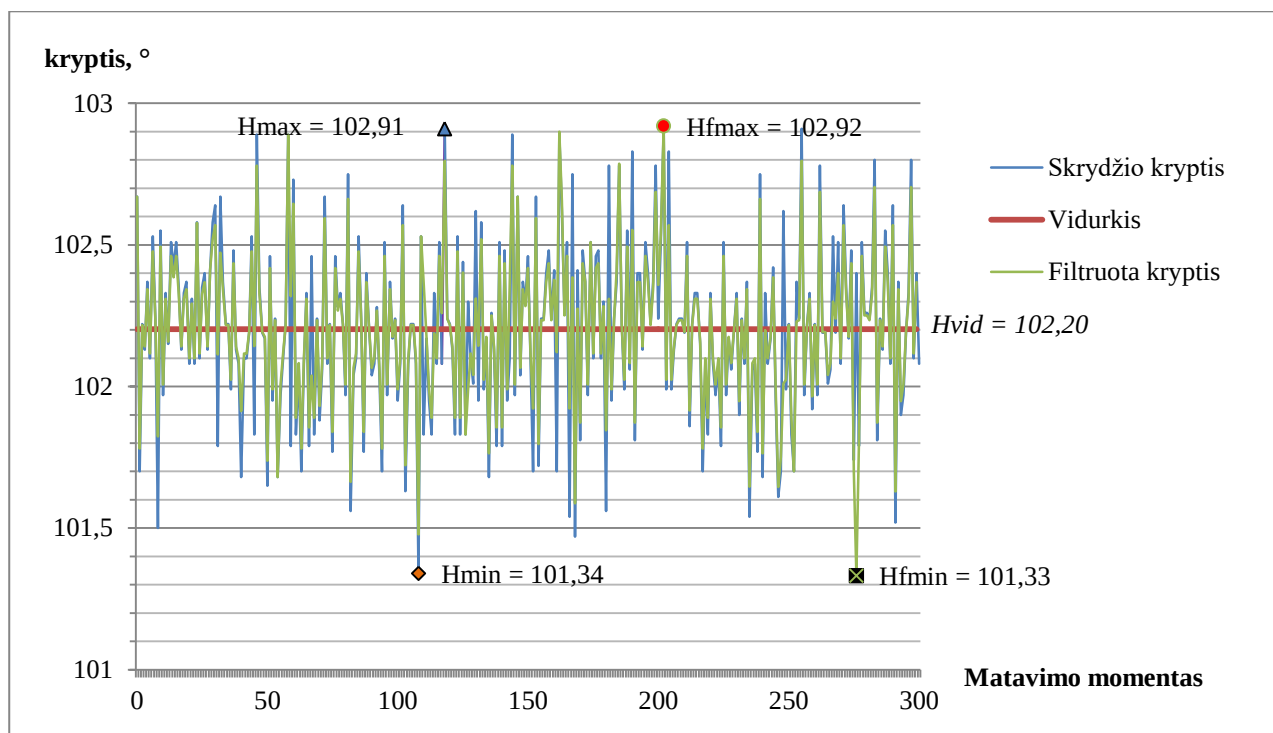
10 lentelė. Pirminių ir filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai 1 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$H_{\max}, ^\circ$	188,11	187,96
$H_{\min}, ^\circ$	186,19	186,29
$H_{\text{vid}}, ^\circ$	187,10	187,10
$\Delta H, ^\circ$	1,92	1,67
$D_{H_{\max}}, ^\circ$	1,01	0,86
$D_{H_{\min}}, ^\circ$	0,91	0,81
$SE_H, ^\circ$	0,421	0,317

$$\frac{SE_{HF}}{SE_H} \times 100 \% = \frac{0,317}{0,421} \times 100 \% = 75,3 \%$$

Lentelėje matoma, kad skrydžio krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}) išliko apytiksliai toks pats, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_H) sumažėjo iki 75,3 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus skrydžio krypties duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (32 pav.)



32 pav. Pirminė ir filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai skrydžio krypties duomenys.

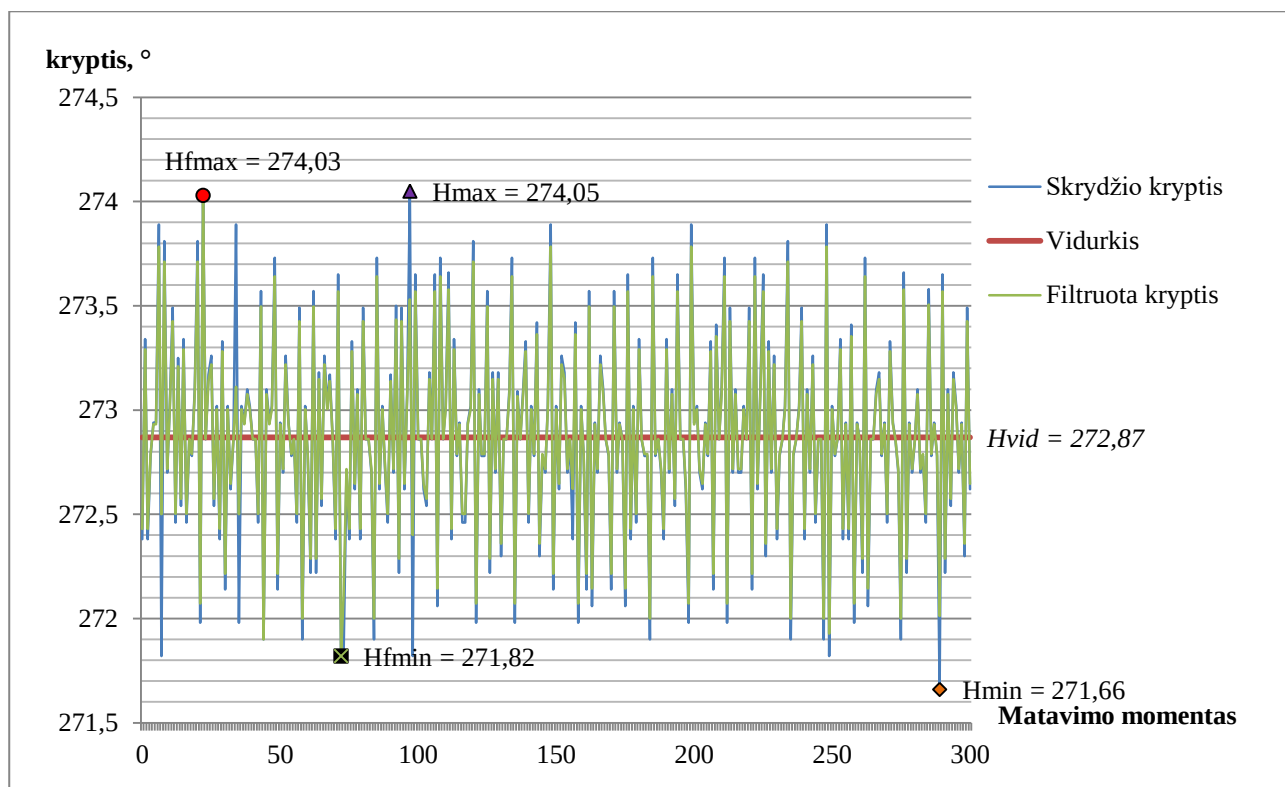
11 lentelė. Pirminių ir filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai 2 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$H_{\max}, ^\circ$	102,91	102,92
$H_{\min}, ^\circ$	101,34	101,33
$H_{\text{vid}}, ^\circ$	102,20	102,20
$\Delta H, ^\circ$	1,57	1,59
$D_{H_{\max}}, ^\circ$	0,71	0,72
$D_{H_{\min}}, ^\circ$	0,86	0,87
$SE_H, ^\circ$	0,312	0,260

$$\frac{SE_{HF}}{SE_H} \times 100 \% = \frac{0,260}{0,312} \times 100 \% = 83,3 \%$$

Lentelėje matoma, kad skrydžio krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}) išliko apytiksliai toks pats, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. Nepaisant to, kad filtruotų duomenų maksimalios deviacijos $D_{H_{\max}}$ ir $D_{H_{\min}}$ padidėjo per $0,01^\circ$, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_H) sumažėjo iki 83,3 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus skrydžio krypties duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (33 pav.)



33 pav. Pirminė ir filtruota skrydžio krypties deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai skrydžio krypties duomenys.

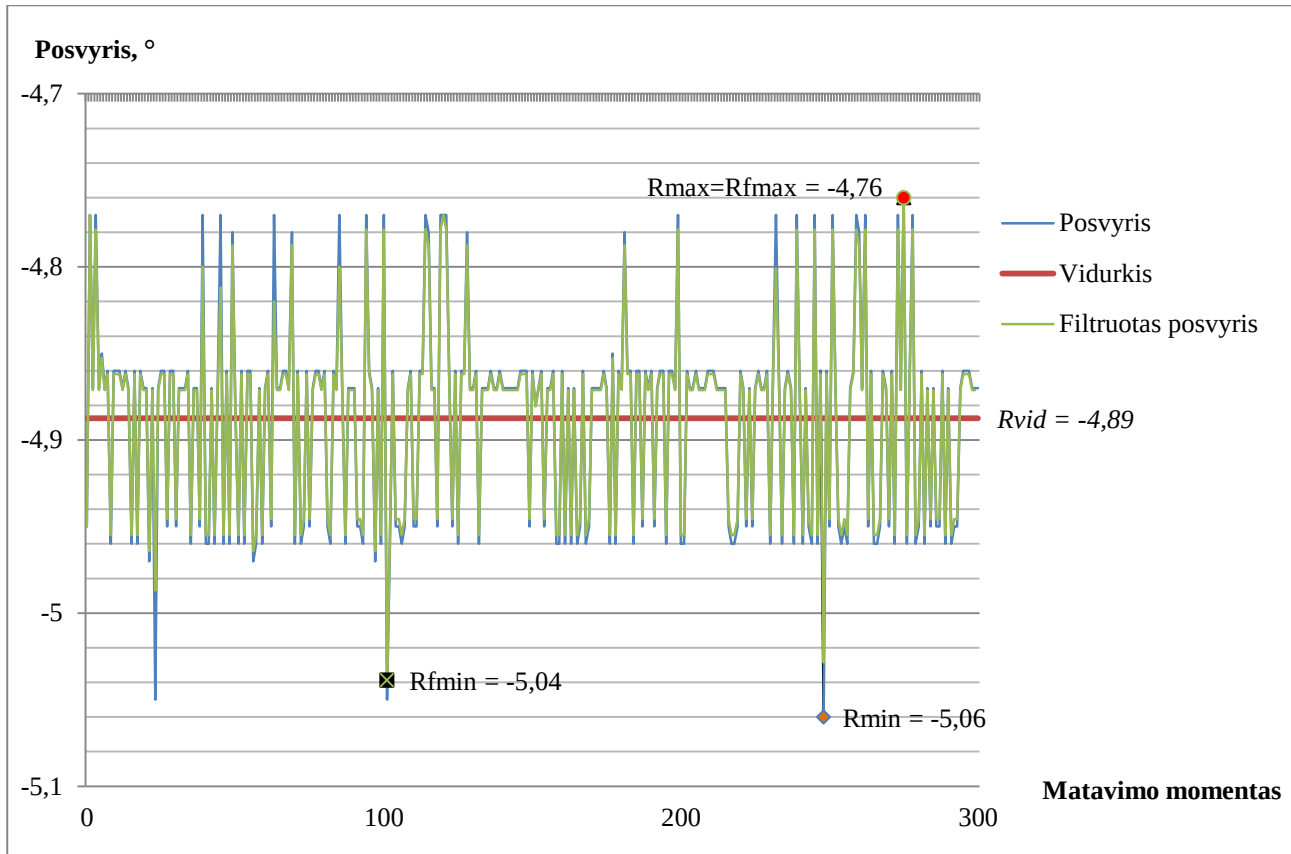
12 lentelė. Pirminių ir filtruotų skrydžio krypties duomenų rodikliai 3 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$H_{\max}, ^\circ$	274,05	274,03
$H_{\min}, ^\circ$	271,66	271,82
$H_{\text{vid}}, ^\circ$	272,87	272,87
$\Delta H, ^\circ$	2,39	2,21
$D_{H\max}, ^\circ$	1,18	1,16
$D_{H\min}, ^\circ$	1,21	1,05
$SE_H, ^\circ$	0,497	0,434

$$\frac{SE_{HF}}{SE_H} \times 100 \% = \frac{0,434}{0,497} \times 100 \% = 87,3 \%$$

Lentelėje matoma, kad skrydžio krypties rodmenų vidurkis (H_{vid}) išliko apytiksliai toks pats, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_H) sumažėjo iki 87,3 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus posvyrio duomenis. (34 pav.)



34 pav. Pirminė ir filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai posvyrio duomenys.

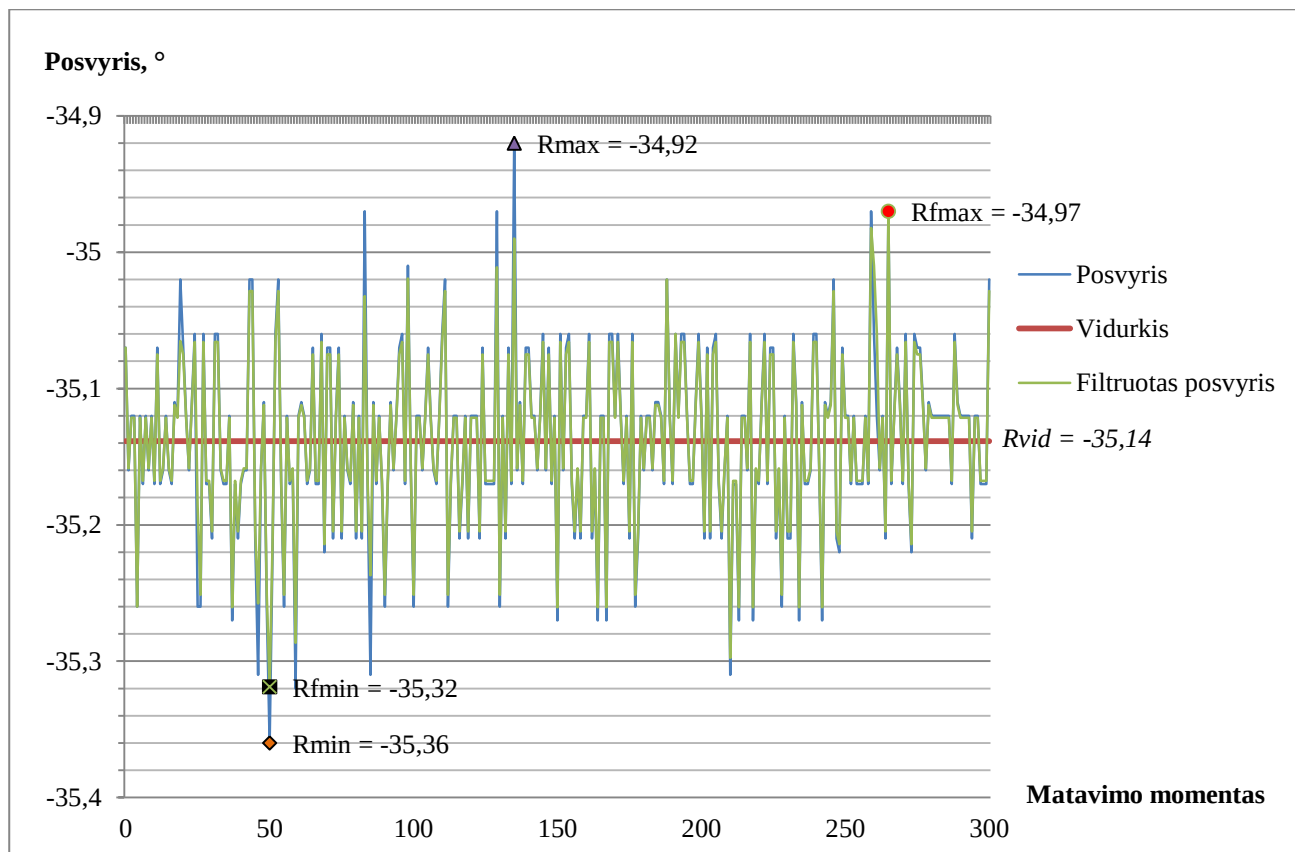
13 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 1 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$R_{\max}, ^\circ$	-4,76	-4,76
$R_{\min}, ^\circ$	-5,06	-5,04
$R_{\text{vid}}, ^\circ$	-4,89	-4,89
$\Delta R, ^\circ$	0,39	0,37
$D_{R_{\max}}, ^\circ$	0,22	0,22
$D_{R_{\min}}, ^\circ$	0,17	0,15
$SE_R, ^\circ$	0,058	0,053

$$\frac{SE_{RF}}{SE_R} \times 100 \% = \frac{0,053}{0,058} \times 100 \% = 91,4 \%$$

Lentelėje matoma, kad skrydžio krypties rodmenų vidurkis (R_{vid}) bei maksimali posvyrio deviacija $D_{R_{\max}}$ išliko apytiksliai tokios pačios reikšmės, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_R) sumažėjo iki 91,4 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus posvyrio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (35 pav.)



35 pav. Pirminė ir filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai posvyrio duomenys.

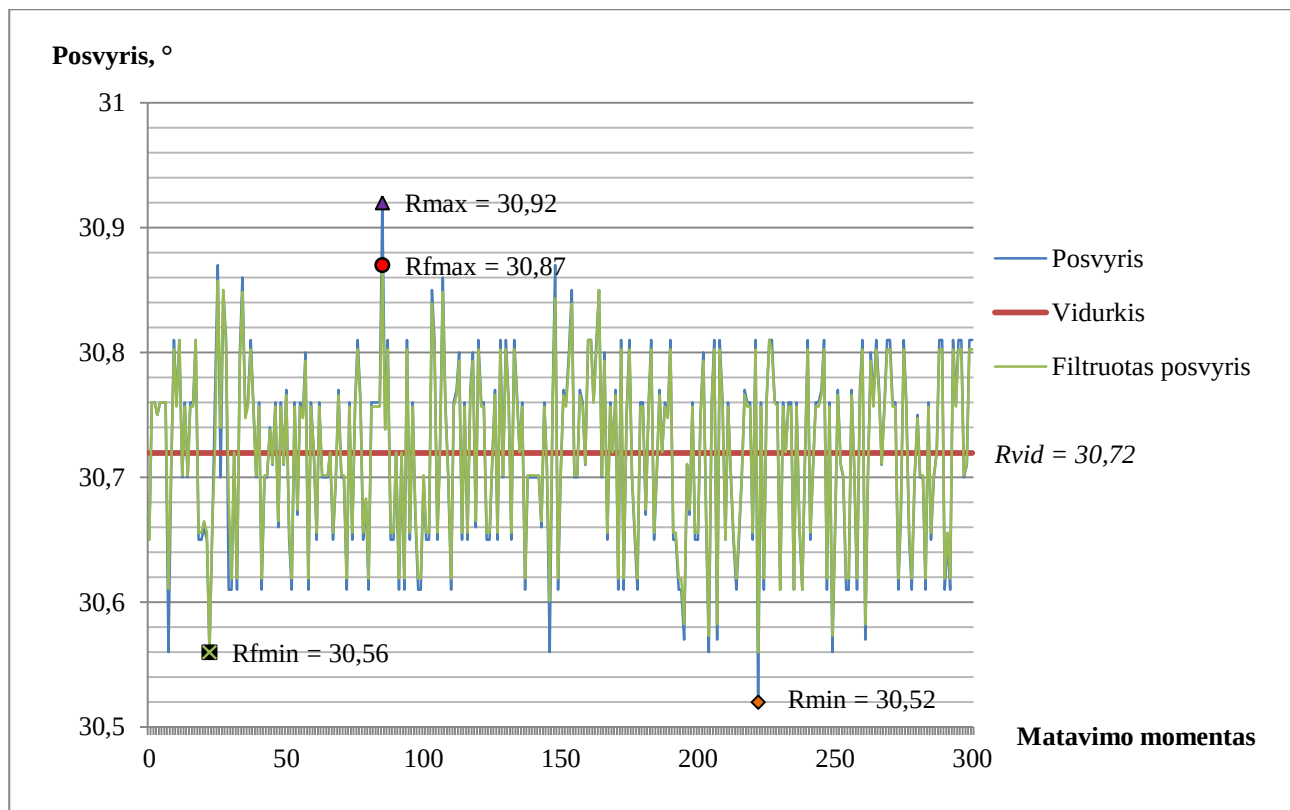
14 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 2 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$R_{\max}, ^\circ$	-34,92	-34,97
$R_{\min}, ^\circ$	-35,36	-35,32
$R_{\text{vid}}, ^\circ$	-35,14	-35,14
$\Delta R, ^\circ$	0,44	0,35
$D_{R_{\max}}, ^\circ$	0,22	0,17
$D_{R_{\min}}, ^\circ$	0,22	0,18
$SE_R, ^\circ$	0,066	0,060

$$\frac{SE_{RF}}{SE_R} \times 100 \% = \frac{0,060}{0,066} \times 100 \% = 90,9 \%$$

Lentelėje matoma, kad posvyrio rodmenų vidurkis (R_{vid}) išliko apytiksliai tokios pačios reikšmės, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_R) sumažėjo iki 90,9 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus posvyrio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (36 pav.)



36 pav. Pirminė ir filtruota posvyrio deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai posvyrio duomenys.

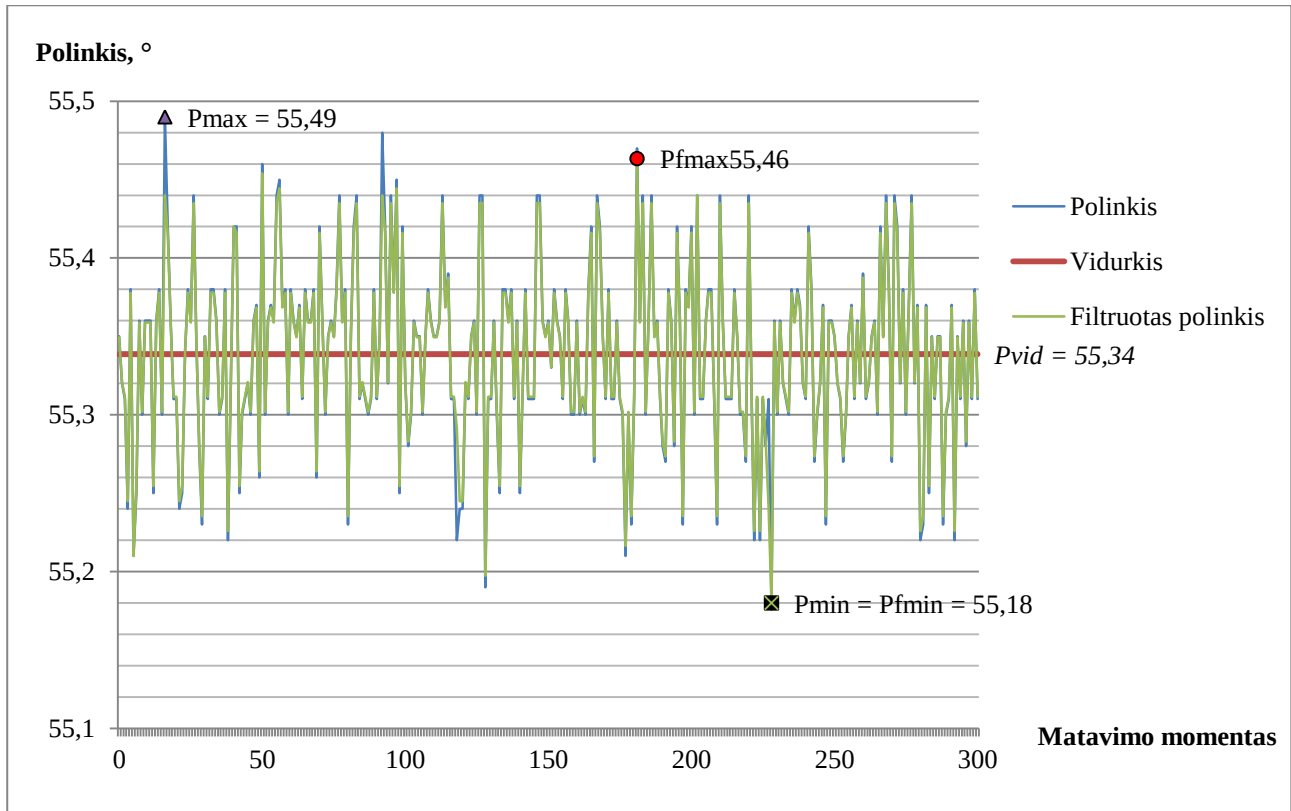
15 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 3 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$R_{max}, ^\circ$	30,92	30,87
$R_{min}, ^\circ$	30,52	30,56
$R_{vid}, ^\circ$	30,72	30,72
$\Delta R, ^\circ$	0,40	0,31
$D_{Rmax}, ^\circ$	0,20	0,15
$D_{Rmin}, ^\circ$	0,20	0,16
$SE_R, ^\circ$	0,073	0,066

$$\frac{SE_{RF}}{SE_R} \times 100 \% = \frac{0,066}{0,073} \times 100 \% = 90,4 \%$$

Lentelėje matoma, kad posvyrio rodmenų vidurkis (R_{vid}) išliko apytiksliai tokios pačios reikšmės, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_R) sumažėjo iki 90,9 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus polinkio duomenis. (37 pav.)



37 pav. Pirminė ir filtruota polinkio deviacija stacionarioje 1 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai posvyrio duomenys.

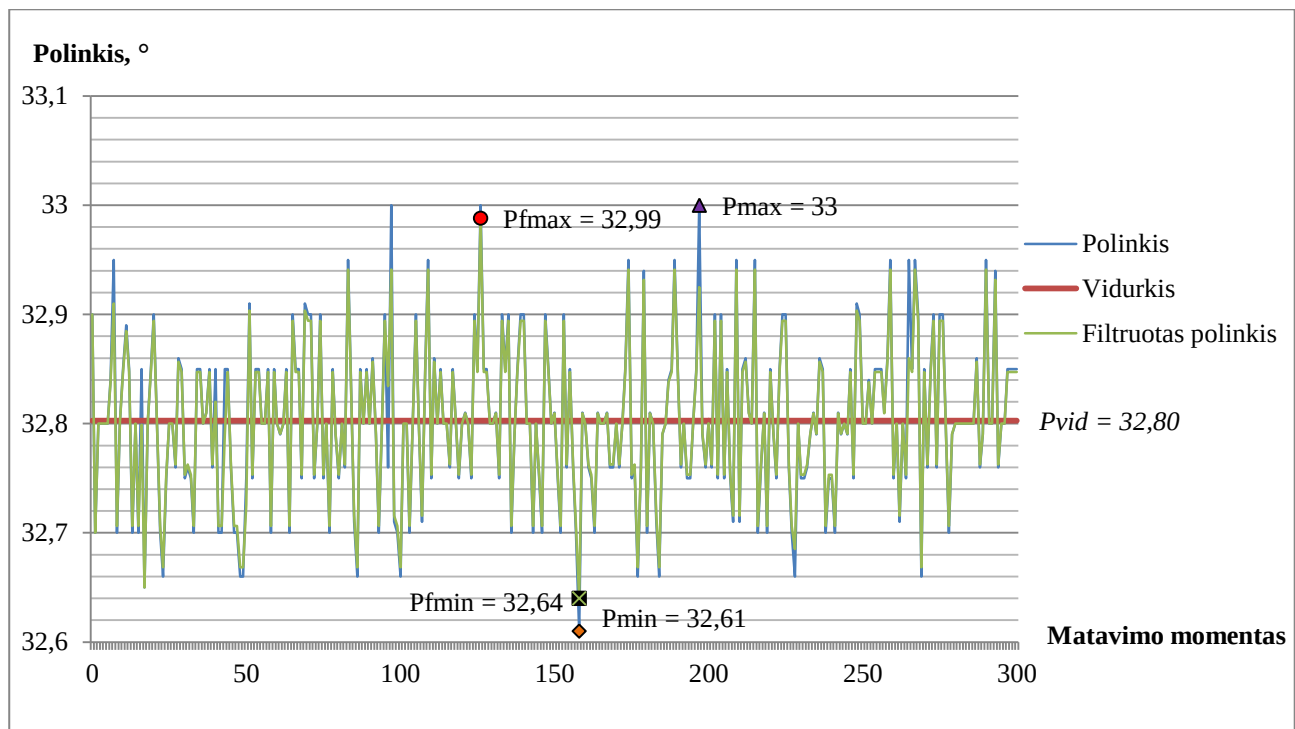
15 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 1 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$P_{\max}, ^\circ$	55,49	55,46
$P_{\min}, ^\circ$	55,18	55,18
$P_{\text{vid}}, ^\circ$	55,34	55,34
$\Delta P, ^\circ$	0,31	0,28
$D_{P_{\max}}, ^\circ$	0,15	0,12
$D_{P_{\min}}, ^\circ$	0,16	0,16
$SE_P, ^\circ$	0,057	0,054

$$\frac{SE_{PF}}{SE_P} \times 100 \% = \frac{0,054}{0,057} \times 100 \% = 94,7 \%$$

Lentelėje matoma, kad poslinkio rodmenų vidurkis (P_{vid}) bei minimalios polinkio reikšmės ($P_{\min}$) išliko apytiksliai tokios pačios, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, o išfiltruotų duomenų paklaida (SE_P) sumažėjo iki 90,9 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus polinkio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (38 pav.)



38 pav. Pirminė ir filtruota polinkio deviacija stacionarioje 2 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai posvyrio duomenys.

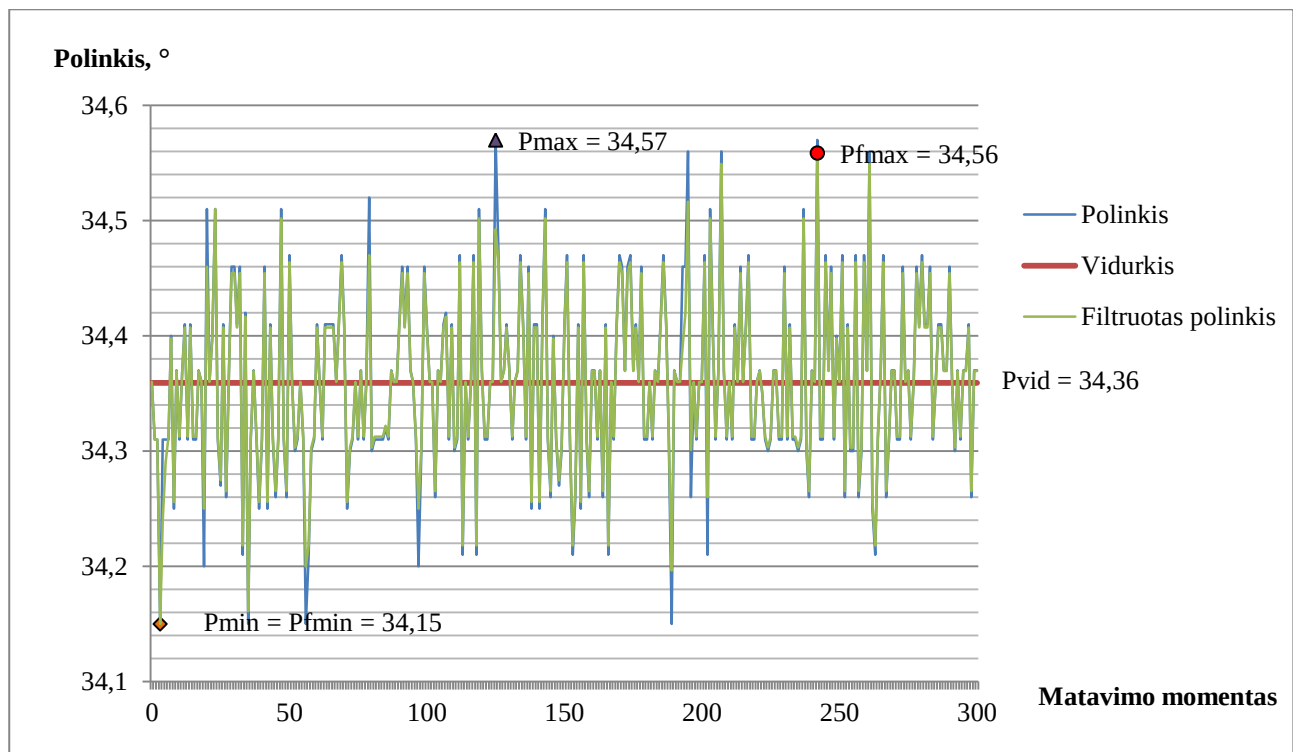
17 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 2 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$P_{\max}, ^\circ$	33,00	32,99
$P_{\min}, ^\circ$	32,61	32,64
$P_{\text{vid}}, ^\circ$	32,80	32,80
$\Delta P, ^\circ$	0,39	0,35
$D_{P_{\max}}, ^\circ$	0,20	0,19
$D_{P_{\min}}, ^\circ$	0,19	0,16
$SE_P, ^\circ$	0,072	0,066

$$\frac{SE_{PF}}{SE_P} \times 100 \% = \frac{0,066}{0,072} \times 100 \% = 91,7 \%$$

Lentelėje matoma, kad posvyrio rodmenų vidurkis (P_{vid}) išliko apytiksliai tokios pačios reikšmės, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, išfiltruotų duomenų paklaida (SE_P) sumažėjo iki 91,7 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

Pateikiama schema, lyginanti pirminius ir filtruotus polinkio duomenis, AHRS esant kitoje padėtyje. (39 pav.)



39 pav. Pirminė ir filtruota polinkio deviacija stacionarioje 3 padėtyje

Iš schemos nustatomi ir palyginami pagrindiniai filtruoti ir pirminiai posvyrio duomenys.

18 lentelė. Pirminių ir filtruotų polinkio duomenų rodikliai 3 padėtyje

	Nefiltruoti	Filtruoti
$P_{\max}, ^\circ$	34,57	34,56
$P_{\min}, ^\circ$	34,15	34,15
$P_{\text{vid}}, ^\circ$	34,36	34,36
$\Delta P, ^\circ$	0,42	0,41
$D_{P_{\max}}, ^\circ$	0,21	0,20
$D_{P_{\min}}, ^\circ$	0,21	0,21
$SE_P, ^\circ$	0,078	0,071

Nustatomas filtruotų ir nefiltruotų standartinių paklaidų santykis procentais:

$$\frac{SE_{PF}}{SE_P} \times 100 \% = \frac{0,071}{0,078} \times 100 \% = 91,0 \%$$

Lentelėje matoma, kad poslinkio rodmenų vidurkis (P_{vid}) bei minimalios polinkio reikšmės ($P_{\min}$) išliko apytiksliai tokios pačios, t. y. pasikeitė mažiau nei $0,01^\circ$. O visi kiti rodikliai išfiltravus duomenis tapo patikimesni, o išfiltruotų duomenų paklaida (SE_P) sumažėjo iki 91,0 % nefiltruotų duomenų paklaidos.

3.8. Pirminių ir išfiltruotų duomenų lyginimo apžvalga

Apžvelgiami filtruotų ir pirminių duomenų standartinių paklaidų santykiai. Kuo mažesnis santykis, išreikštas procentais, tuo efektyviau duomenys apdorojami Kalmano filtru.

19 lentelė. Filtruotų ir pirminių skrydžio krypties standartinių paklaidų santykiai procentais

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	Vidurkis
$\frac{SE_{HF}}{SE_H} \times 100 \%$	75,3	83,3	87,3	81,97 %

Iš šios lentelės matoma, kad santykis tarp filtruotų ir nefiltruotų skrydžio krypties standartinių paklaidų, išreikštų procentais, svyruoja nuo 75,3 % iki 87,3 %. O vidurkis – 81,97 %

20 lentelė. Filtruotų ir pirminių posvyrio standartinių paklaidų santykiai procentais

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	Vidurkis
$\frac{SE_{RF}}{SE_R} \times 100 \%$	91,4	90,9	90,4	90,9 %

Iš šios lentelės matoma, kad santykis tarp filtruotų ir nefiltruotų posvyrio standartinių paklaidų, išreikštų procentais, svyruoja nuo 90,4 % iki 91,4 %. O vidurkis – 90,9 %

21 lentelė. Filtruotų ir pirminių polinkio standartinių paklaidų santykiai procentais

	1 Padėtis	2 Padėtis	3 Padėtis	Vidurkis
$\frac{SE_{PF}}{SE_P} \times 100 \%$	94,7	91,7	91	92,47 %

Iš šios lentelės matoma, kad santykis tarp filtruotų ir nefiltruotų polinkio standartinių paklaidų, išreikštų procentais, svyruoja nuo 91 % iki 94,7 %. O vidurkis – 92,47 %

IŠVADOS

1. Atlikta literatūros, susijusios su AHRS, apžvalga.
2. Iš MEMS jutiklių suprojektuota bei realiai sujungta AHRS GY-85 sistema su mikroprocesorių plokšte *Arduino UNO*, trumpai apžvelgtos abi sistemos.
3. Suprojektuotas Arduino kodas, leidžiantis gauti jutiklių duomenis ir konvertuojantis juos į skaitinę informaciją. Gauta informacija pateikta grafikais.
4. Išanalizavus skirtingų Kalmano filtrų savybes pasirinktas išplėstasis Kalmano filtras (EKF) ir juo naudojantis išfiltruoti iš AHRS gauti pozicijos (skrydžio krypties, posvyrio ir polinkio) duomenys. Iš pastarųjų duomenų vėliau nubrėžti grafikai.
5. Padaryta išvada, kad mažiausios paklaidos būdingos polinkio ir posvyrio duomenims, o skrydžio krypties duomenų tikslumas pasižymėjo didžiausiomis paklaidomis.
6. Pirminiai ir filtruoti duomenys palyginti. Nustatyta, kad visais tyrimo atvejais filtruotų duomenų tikslumas yra didesnis nei pirminių, o žymiausias filtro poveikis matomas nagrinėjant skrydžio krypties duomenis, kurių standartinės paklaidos buvo didžiausios.
7. Nustatyta, kad AHRS GY-85 yra pakankamai tikslus, net ir didžiausios gautosios standartinės paklaidos neviršija pusės laipsnio.

Pasiūlymai

- Tęsti AHRS tyrimus orlaiviuose skrydžio metu, kur rezultatams gali būti didesnė įtaka dėl pašalinių jėgų veikimo.
- Nustatyti prietaiso jautrumą magnetiniams laukams.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

- Adiprawita, W; Ahmad, A. S; Sembiring, J; 2007, Development of AHRS (Attitude and Heading Reference System) for Autonomous UAV (Unmanned Aerial Vehicle), School of Electric Engineering and Informatics, Bandung Institute of Technology.
- Einicke, G. A. 2012, Smoothing, Filtering and Prediction: Estimating the Past, Present and Future, Rijeka, Croatia: Intech. ISBN 978-953-307-752-9.
- Guerrero-Castellanos, J. F; *et al.* 2011, Design and implementation of an Attitude and Heading Reference System (AHRS), Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011 8th International Conference
- Hayward, R. C; *et al.*; 1997, Inertially Aided GPS Based Attitude Heading Reference System (AHRS) for General Aviation Aircraft, Stanford University
- Hwang, P. Y; Young, S; 2002, Method of deriving ground speed for descending aircraft, Patent NO.: US 6,492,934 B1, Date of Patent: Dec. 10, 2002
- Yuchnovicz, D; Burgess, M; 1999, An Assessment of Technical and Production Risks of Candidate Low-Cost Attitude/Heading Reference Systems (AHRS), Research Triangle Institute
- Jang, J. S; Liccardo, D; 2006, Automation of small UAVs using a low cost MEMS sensor and embedded computing platform, 25th Digital Avionics Systems Conference.
- Jianye, L; Yanhua, Z; Jizhou, L; Yongjun, Y; 2010, Inner Attitude Integration Algorithm Based on Fault Detection for Strapdown Inertial Attitude and Heading Reference System, Chinese Journal of Aeronautics 23(2010) 68-74
- Kingston, D. B; Beard, R. W; 2004, Real-Time Attitude and Position Estimation for Small UAVs Using Low-Cost Sensors, American Institute of Aeronautics and Astronautics
- Kleeman, L; 2012, Understanding and Applying Kalman Filtering, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, Clayton
- Li, Y; *et al.* 2009, Performance Evaluation of AHRS Kalman Filter for MojoRTK System International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2009
- Mahmood1, A; Kim, Y; 2015, Leader-following formation control of quadcopters with heading synchronization, Aerospace Science and Technology 47 (2015) 68–74
- Naidoo, Y; Stopforth, R; Bright, G; 2011, Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Helicopter Modelling & Control, International Journal of Advanced Robotic Systems, ISBN: 1729-8806, InTech, DOI: 10.5772/45710
- Palkovič, L; *et al.* 2014, Remote Laboratory with Modular Inertial Measuring Unit Platform, Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems MMS 2014
- Pourtakdoust, S.H; Ghanbarpour, H; 2007 Adaptive unscented Kalman filter, Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal Volume 79 Number 5 · 2007 · 485–493

Rios, J. A; White, E; 2000, Fusion Filter Algorithm Enhancements For a MEMS GPS/IMU, Proceedings of the Institute of Navigation Conference

Rudinskas, D; 2011, Bepiločių orlaivių skrydžio parametrų matavimų duomenų perdavimo saugos metodikos sukūrimas, ISBN 978-609-457-067-4

Sheng, H; Zhang, T; 2015 MEMS-based low-cost strap-down AHRS research, Measurement 59 (2015) 63–72

Sun, G; *et al.* 2013, Implementing quaternion based AHRS on a MEMS multisensor hardware platform, International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2013

Townsend, K; 2015, AHRS for Adafruit's 9-DOF, 10-DOF, LSM9DS0 Breakouts, Adafruit Industries

Wan, E. A; Merwe, R.; 2000, The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation, Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000

Wang, Y; Hussain, A; Soltani, M; 2015, A MEMS-based Adaptive AHRS for Marine Satellite Tracking Antenna, IFAC-PapersOnLine 48-16 (2015) 121–126

Wang, K; Liu, Y; Li, L; 2014, A Simple and Parallel Algorithm for Real-Time Robot Localization by Fusing Monocular Vision and Odometry/AHRS Sensors, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on (Volume:19, Issue: 4) P. 1447 – 1457

White, E; Rios, J. A; 2002, FAA Certification of a MEMS Attitude and Heading Reference System, Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 2002, pp. 158-169.

Xia, L; Wang, J; Yan, G; 2009, RBFNN Aided Extended Kalman Filter for MEMS AHRS/GPS, 2009 International Conferences on Embedded Software and Systems

Zhong-Yu, G; Xiao-Ji, N; Mei-Feng, G; 2002, Quaternion-Based Kalman Filter for Micro-machined Strapdown Attitude Heading Reference System, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 15 No3

Žurauskas, V; 2010, Programa lėktuvo leidimosi trajektorijos numatymui pagal Kalmano filtrą, Vilniaus Universitetas

Arduino and GY-85 9DOF (Accelerometer ADXL345, Gyroscope ITG3200 and Magnetometer HMC5883) + Angle Information Comparison [interaktyvus], 2015, Vilnius [žiūrėta: 2016-04-01], elektroninė prieiga < <http://www.himix.lt/arduino/arduino-and-gy-85-9dof-accelerometer-adxl345-gyroscope-itg3200-and-magnetometer-hmc5883-angle-information-comparison/>>

PRIEDAI

1 Priedas - Arduino programinė sintaksė

1. Nurodomas prietaiso jungimas:

```
/* Arduino   MARG GY-85
```

```
A5      SCL
```

```
A4      SDA
```

```
3.3V    VCC
```

```
GND     GND */
```

2. Nurodomos prietaisų bibliotekos, kuriomis naudojamosi atpažįstant prietaisus:

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <ADXL345.h>
```

```
#include <HMC5883L.h>
```

```
#include <ITG3200.h>
```

```
ADXL345 acc;
```

```
HMC5883L compass;
```

```
ITG3200 gyro = ITG3200();
```

3. Parašomas kodas duomenims imti – ašys priskiriamos skirtingiems davikliams:

```
float gx,gy,gz;
```

```
float gx_rate, gy_rate, gz_rate;
```

```
int ix, iy, iz;
```

```
float anglegx=0.0, anglegy=0.0, anglegz=0.0;
```

```
int ax,ay,az;
```

```
int rawX, rawY, rawZ;
```

```
float X, Y, Z;
```

```
float rollrad, pitchrad;
```

```
float rolldeg, pitchdeg;
```

```
int error = 0;
```

```
float aoffsetX, aoffsetY, aoffsetZ;
```

```
float goffsetX, goffsetY, goffsetZ;
```

```
unsigned long time, looptime;
```

4. Nustatomas duomenų perdavimo greitis (angl. *baud rate*), kuris šioje sistemoje yra 9600 b/s,

Nurodoma išduoti atsakymą „error“, jei skaičiavime įvyksta klaida

```
void setup()
```

```

{ Serial.begin(9600);
  acc.powerOn();
  compass = HMC5883L();
  error = compass.SetScale(1.3);
  if(error != 0) // If there is an error, print it out.
    Serial.println(compass.GetErrorText(error));
  error = compass.SetMeasurementMode(Measurement_Continuous);
  if(error != 0) // If there is an error, print it out.
    Serial.println(compass.GetErrorText(error));
  for (int i = 0; i <= 200; i++)
  {   acc.readAccel(&ax, &ay, &az);
      if (i == 0)
  {   aoffsetX = ax;
      aoffsetY = ay;
      aoffsetZ = az;   }

      if (i > 1)
  {   aoffsetX = (ax + aoffsetX) / 2;
      aoffsetY = (ay + aoffsetY) / 2;
      aoffsetZ = (az + aoffsetZ) / 2;   }

      for (int i = 0; i <= 200; i++)
  {   gyro.readGyro(&gx,&gy,&gz);
      if (i == 0)
  {   goffsetX = gx;
      goffsetY = gy;
      goffsetZ = gz;   }

      if (i > 1) {
      goffsetX = (gx + goffsetX) / 2;
      goffsetY = (gy + goffsetY) / 2;
      goffsetZ = (gz + goffsetZ) / 2;   } }

      delay(1000);
      gyro.init(ITG3200_ADDR_AD0_LOW); }

```

5. Parašomas kodas x , y bei z ašių duomenims nuskaityti:

```

void loop()
{   time = millis();
    acc.readAccel(&ax, &ay, &az); //read the accelerometer values and store them in variables x,y,z
    rawX = ax - aoffsetX;
    rawY = ay - aoffsetY;
    rawZ = az - (255 - aoffsetZ);
    X = rawX/256.00; // used for angle calculations
    Y = rawY/256.00; // used for angle calculations
    Z = rawZ/256.00; // used for angle calculations
    rollrad = atan(Y/sqrt(X*X+Z*Z)); // calculated angle in radians

```

```

pitchrad = atan(X/sqrt(Y*Y+Z*Z)); // calculated angle in radians
rolldeg = 180*(atan(Y/sqrt(X*X+Z*Z)))/PI; // calculated angle in degrees
pitchdeg = 180*(atan(X/sqrt(Y*Y+Z*Z)))/PI; // calculated angle in degrees

```

```

// Code fragment for Magnetometer heading (yaw)
MagnetometerRaw raw = compass.ReadRawAxis();
MagnetometerScaled scaled = compass.ReadScaledAxis();
int MilliGauss_OnThe_XAxis = scaled.XAxis; // (or YAxis, or ZAxis)
float heading = atan2(scaled.YAxis, scaled.XAxis);
float declinationAngle = 0.0457;
heading += declinationAngle;
if(heading < 0)
    heading += 2*PI;
if(heading > 2*PI)
    heading -= 2*PI;
float headingDegrees = heading * 180/M_PI;

```

```

// Code fragment for Gyroscope (roll, pitch, yaw)
gyro.readGyro(&gx,&gy,&gz);
looptime = millis() - time;
gx_rate = (gx-goffsetX) / 14.375;
gy_rate = (gy-goffsetY) / 14.375;
gz_rate = (gz-goffsetZ) / 14.375;
delay(100);
anglegx = anglegx + (gx_rate * looptime);
anglegy = anglegy + (gy_rate * looptime);
anglegz = anglegz + (gz_rate * looptime);

```

6. Kodo dalis, išduodanti pokrypio (angl. – roll), polinkio (angl. – pitch) ir skrydžio krypties (angl. – heading) reikšmes.

```

Serial.print(rolldeg);
Serial.print(",");
Serial.print(pitchdeg); // calculated angle in degrees
Serial.print(",");
Serial.print(headingDegrees);
Serial.println(","); }

```

2 Priedas – Kalmano filtro kodas:

Apibrėžiami skaičiavimo nustatymai ir įtraukiami duomenys iš failo:

```
classdef EKF_QBg < handle
    properties (SetAccess = public, GetAccess = public)
        x = [1 0 0 0 0 0 0]';
        P = diag([0.1 0.1 0.1 0.1 10 10 10]);
        Q_w = diag([0.5 0.5 0.5]);
        Q_bw = diag([0.0005 0.0005 0.0005]);
        Q = diag([0.5 0.5 0.5 0.0005 0.0005 0.0005]);
        R = diag([0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]);
        grav = [0 0 9.81]';
        mag = [0 0 0]';
        dx = [0 0 0 0 0 0 0]';
    end

    filename = 'C:\Users\Paulius\Desktop\arduino\Darbas\New_folder\data';
    sheet = 1; xlRange = 'A:B';
    [num,txt] = xlsread(filename,sheet,xlRange);
    In_x = num(:,1);
```

Nustatomos kintamųjų reišmės bei funkcijos:

```
methods (Access = public)
function obj = EKF_QBg(in_x, in_P, in_Q_w, in_Q_bw, in_R, in_grav, in_mag)
    obj.x = in_x;
    obj.P = in_P;
    obj.Q_w = in_Q_w;
    obj.Q_bw = in_Q_bw;
    obj.Q = blkdiag(obj.Q_w, obj.Q_bw);
    obj.R = in_R;
    obj.grav = in_grav;
    obj.mag = in_mag;
    obj.dx = [0 0 0 0 0 0]';
end
function obj = set_x(obj, in_x)
    obj.x = in_x;
end
function obj = set_P(obj, in_P)
    obj.P = in_P;
end
function obj = set_Q_w(obj, in_Q_w)
    obj.Q_w = in_Q_w;
end
function obj = set_Q_bw(obj, in_Q_bw)
    obj.Q_bw = in_Q_bw;
end
function obj = set_Q(obj, in_Q)
    obj.Q = in_Q;
end
function obj = set_R(obj, in_R)
    obj.R = in_R;
end
function obj = set_grav(obj, in_grav)
    obj.grav = in_grav;
end
function obj = set_earth_magn_vec(obj, in_mag)
    obj.mag = in_mag;
end
```

Aprašomos funkcijos duomenų gavimui:

```
function out_x = get_x(obj)
    out_x = obj.x;
end
function out_dx = get_dx(obj)
    out_dx = obj.dx;
end
function out_P = get_P(obj)
    out_P = obj.P;
end
function out_Q_w = get_Q_w(obj)
    out_Q_w = obj.Q_w;
end
function out_Q_bw = get_Q_bw(obj)
    out_Q_bw = obj.Q_bw;
end
function out_Q = get_Q(obj)
    out_Q = obj.Q;
end
function out_R = get_R(obj)
    out_R = obj.R;
end
function out_grav = get_grav(obj)
    out_grav = obj.grav;
end
function out_mag = get_mag(obj)
    out_mag = obj.mag;
end
```

Pradedama filtro nuspėjimo fazė (angl. - prediction phase)²:

```
function predict(obj, control_in, in_dt)
    obj.Q = blkdiag(obj.Q_w, obj.Q_bw)/in_dt;
    [obj.x, obj.P] = predictekf(obj, control_in, in_dt);
end
```

Pradedama filtro tikslinimo fazė (angl. - correction phase)³:

```
function correct(obj, in_meas)
    [obj.x, obj.P] = correctekf(obj, in_meas);
end
```

Gauti duomenys išsaugomi į excel failą.

```
Xlswrite (data1,obj.x,'Duomenys','A2');
end
```

² Filtro nuspėjimo fazė – Priedas nr. 3

³ Filtro tikslinimo fazė – Priedas nr. 4

3 Priedas - nuspėjimo fazė:

```
function [x,P] = predictekf(obj,w,dt)

    phi = norm((w - obj.x(5:7))*dt);
    u = ((w - obj.x(5:7))*dt) / phi;
    qd = [cos(phi/2); u*sin(phi/2)];

    dfdq = quat_mult(qd, eye(4));

    dphidb = 1/(2*phi)*((2*obj.x(5:7)-2*w)*dt^2);
    dqddphi2 = [-sin(phi/2); cos(phi/2); cos(phi/2); cos(phi/2)];

    dqddb = dqddphi2 * 1/2 * dphidb';

    dudb = [[0, 0, 0]; -dt * phi * eye(3) - dt*(w-obj.x(5:7))*dphidb']/phi^2;

    si = blkdiag(cos(phi/2), sin(phi/2), sin(phi/2), sin(phi/2));
    dfidb = si * dudb + blkdiag(1,u(1),u(2),u(3)) * dqddb;

    dfdb = quat_mult(dfidb, obj.x(1:4));

    F = [dfdq, dfdb; zeros(3,4), eye(3)];
    L = [-dfdb, zeros(4,3); zeros(3,3), dt*eye(3)];

    x(1:4,1) = quat_mult(qd, obj.x(1:4));
    x(5:7,1) = obj.x(5:7,1);
    P = F*obj.P*F' + L*obj.Q*L';
end
```

4 Priedas - patikslinimo fazė:

```
function [x,P] = correctekf(obj,in_meas)
    QuatLength =quat_length(obj.x(1:4));
    H_q = zeros(1,4);
    H_q(1,1) = obj.x(1)/QuatLength;
    H_q(1,2) = obj.x(2)/QuatLength;
    H_q(1,3) = obj.x(3)/QuatLength;
    H_q(1,4) = obj.x(4)/QuatLength;

    Htg = quat_mult(quat_mult(obj.x(1:4), [0;obj.grav]), blkdiag(1,-1,-1,-1))...
        + quat_mult(eye(4), quat_mult([0;obj.grav], quat_conj(obj.x(1:4))));

    Htm = quat_mult(quat_mult(obj.x(1:4), [0;obj.mag]), blkdiag(1,-1,-1,-1))...
        + quat_mult(eye(4), quat_mult([0;obj.mag], quat_conj(obj.x(1:4))));

    H = [H_q zeros(1,3);
        Htg(2:4,:), zeros(3,3);
        Htm(2:4,:), zeros(3,3)];

    sri.type = '()';
    sri.subs = {2:4, ':'};

    h = @(x) [quat_length(x(1:4));
        subsref(quat_mult(quat_mult((x(1:4)),...
            [0;obj.grav]), quat_conj(x(1:4))), sri); ...
        subsref(quat_mult(quat_mult((x(1:4)),...
            [0;obj.mag]), quat_conj(x(1:4))), sri)];

    K = obj.P*H'/(H*obj.P*H' + blkdiag(0.00001,obj.R));
    x = obj.x + K * ([1;in_meas] - h(obj.x));
    x(1:4,1) = x(1:4) / norm(x(1:4));

    P = (eye(size(K*H)) - K*H)*obj.P*(eye(size(K*H)) - K*H)' +
    K*blkdiag(0.001,obj.R)*K';
end
```