



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Judančio objekto pozicijos detekcija naudojant plačiajuosčio ryšio (UWB) ir inercijos matavimo (IMU) technologijas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tomas Bliūdžius**

Projekto autorius

**asist. dr. Vygandas Vaitkus**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Judančio objekto pozicijos detekcija naudojant plačiajuosčio ryšio (UWB) ir inercijos matavimo (IMU) technologijas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Tomas Bliūdžius**

Projekto autorius

**asist. dr. Vygandas Vaitkus**

Vadovas

**doc. dr. Leonas Balaševičius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Tomas Bliūdžius

## **Judančio objekto pozicijos detekcija naudojant plačiajuosčio ryšio (UWB) ir inercijos matavimo (IMU) technologijas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Tomas Bliūdžius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Tomas Bliūdžius. Judančio objekto pozicijos detekcija naudojant plačiajuosčio ryšio (UWB) ir inercijos matavimo (IMU) technologijas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Vygandas Vaitkus; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: judančio objekto pozicijos nustatymas, plačiajuostis ryšys, objekto inercijos matavimas, Išplėstinis Kalmano filtras.

Kaunas, 2024. 49 p.

### **Santrauka**

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas išanalizuoti ir pritaikyti plačiajuosčio ryšio ir objekto inercijos matavimo technologijas judančio objekto tikslios pozicijos numatymui. Darbe pristatomi ir analizuojami belaidžio ryšio objektų pozicionavimo būdai pritaikant laiko atvykimo (ToA), atvykimo kampo (AoA), atvykimo laiko skirtumo (TdoA) ir dvipusio nuotolio nustatymo (TWR) metodus. Taip pat analizuojami koordinačių išskaičiavimo (ang. *Dead Reckoning*), Išplėstinio Kalmano filtro bei Dalelių filtro arba Nuoseklusiojo Monte Carlo (ang. *Particle Filter*, *Sequential Monte Carlo method*) duomenų filtravimo metodai, siekiant patikslinti gautus pirminius koordinačių duomenis. Tyrimo rezultatams gauti realizuojama eksperimentinė erdvė bei joje atliekami stacionarios sistemos UWB modulių tarpusavio atstumo nustatymo tyrimas, nejudančio ir judančio objektų pozicionavimo tikslumo nustatymo tyrimas bei palyginami gauti rezultatai pritaikius pasirinktus duomenų filtravimo metodus.

Tomas Bliūdžius. Position detection of a moving object using *Ultra-wideband* (UWB) and inertial measurement (IMU) technologies. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Vygandas Vaitkus; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electronics engineering, engineering science.

Keywords: positioning of moving object, *Ultra-wideband* technology, measurement of object inertia, Extended Kalman filter.

Kaunas, 2024. 49 pages.

### **Summary**

The aim of this master thesis is to research and analyse Ultra-wideband and object inertia measurement technologies to predict the exact position of a moving object. The thesis presents and analyses wireless object positioning techniques by applying Time of Arrival (ToA), Angle of Arrival (AoA), Time Difference of Arrival (TDoA), and Two-Way Range (TWR) methods. The methods of Dead Reckoning, Extended Kalman Filter and Particle Filter or Sequential Monte Carlo method data filtering are also analysed in order to refine the original coordinate data. To obtain the results of the study, an experimental space is implemented and the results of the study are carried out in it, including the study of the distance between the UWB modules of the stationary system, the study of the accuracy of the positioning of the stationary and the moving objects, and the comparison of the results obtained by the application of the selected data filtering methods.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas.....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas.....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Analitinė literatūros apžvalga .....</b>	<b>11</b>
1.1. Vietos nustatymo belaidžiu ryšiu metodai.....	11
1.1.1. Atvykimo laikas (ang. <i>Time of Arrival, ToA</i> ).....	11
1.1.2. Atvykimo kampas (ang. <i>Angle of Arrival, AoA</i> ) .....	13
1.1.3. Dvipusis nuotolio nustatymas (ang. <i>Two-way Ranging, TWR</i> ).....	14
1.1.4. Atvykimo laiko skirtumas (ang. <i>Time Difference of Arrival, TDoA</i> ).....	16
1.2. Plačiajuosčio ryšio (UWB) technologija .....	17
1.3. Giroskopo ir akcelerometro duomenų (IMU) panaudojimas.....	18
1.4. Matavimų numatymo ir optimizavimo metodai .....	20
1.4.1. Koordinačių išskaičiavimo metodas (ang. <i>Dead Reckoning</i> ).....	20
1.4.2. Išplėstinis Kalmano filtras (ang. <i>Extended Kalman Filter, EKF</i> ) .....	21
1.4.3. Dalelių filtras arba Nuoseklusis Monte Carlo metodas (ang. <i>Particle Filter, Sequential Monte Carlo method</i> ).....	22
<b>2. Pozicionavimo algoritmų sudarymas.....</b>	<b>25</b>
2.1. Koordinačių išskaičiavimas .....	25
2.2. Išplėstinis Kalmano filtras .....	26
2.3. Dalelių filtras .....	28
<b>3. Tiriamosios aplinkos ir įrangos paruošimas .....</b>	<b>29</b>
3.1. Aparatūrinės įrangos pasirinkimas .....	29
3.1.1. UWB modulis DW1000 .....	29
3.1.2. Mikrovaldiklis ESP32 .....	30
3.2. Eksperimentinės programinės įrangos, komunikacijų paruošimas.....	31
3.2.1. Plačiajuosčio ryšio modulių tarpusavio komunikacijos realizavimas .....	31
3.2.2. Plačiajuosčio ryšio imtuvo/siūstuvo antenų kalibravimas.....	33
3.2.3. Akcelerometro ir giroskopo duomenų sintezė (ang. <i>fusion</i> ).....	34
3.2.4. Koordinačių dvimatėje erdvėje apskaičiavimas .....	36
3.2.5. Komunikacijos ir informacijos persiuntimo tarp įrenginių realizavimas .....	37
<b>4. Tyrimo rezultatų analizė.....</b>	<b>38</b>
4.1. UWB TWR statinės pozicijos nustatymo tikslumo analizė.....	38
4.2. Pozicijos apskaičiavimo tikslumo analizė statiniam objektui dvimatėje erdvėje.....	41
4.3. Pozicijos apskaičiavimo tikslumo analizė dinaminiam objektui dvimatėje erdvėje .....	44
<b>Rezultatai ir išvados .....</b>	<b>47</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>48</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>50</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė</b> Santykinės ir absoliutinės atstumo matavimo paklaidos keičiant UWB modulio aparatūrinę delsą .....	38
<b>2 lentelė</b> Vidutinių kvadratinių nuokrypių rezultatai taikant skirtingus duomenų optimizavimo ir numatymo metodus.....	45

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Pozicionavimo sistema naudojant ToA metodą, kai $BS_i$ - stacionarios antenos, MS - judantis objektas.....	11
<b>2 pav.</b> Atvykimo kampo (AoA) metodo realizavimo vizualizacija (šaltinis Kelleher, Lorcan. (2021). Passive Radiometry and Estimation in SAR Interferometry).....	13
<b>3 pav.</b> CC-TWR vizualinė reprezentacija laike.....	15
<b>4 pav.</b> Pozicionavimo sistemos konfigūracijos diagrama [3].....	16
<b>5 pav.</b> Tipinė UWB pozicionavimo sistemos konfigūracija [5].....	18
<b>6 pav.</b> IMU vidinio kalibravimo schema [10].....	19
<b>7 pav.</b> Bendroji Kalmano filtro pritaikymo diagrama [14].....	21
<b>8 pav.</b> Tiriamas ryšys tarp išmatuotos, išfiltruotos ir tikrosios verčių.....	23
<b>9 pav.</b> DWM1000 modulio aparatūrinė blokinė diagrama (Decawave Ltd, 2017).....	29
<b>10 pav.</b> DW1000 modulis (Qorvo Inc., 2024).....	30
<b>11 pav.</b> ESP32-Wrover Esspresif mikrovaldiklis su DW1000 moduliu (makerfabs.cc, 2023).....	30
<b>12 pav.</b> UWB komunikacijos veiksmų seka atstumo matavimui tarp dviejų modulių remiantis TWR metodu.....	32
<b>13 pav.</b> DWM1000 palaikomi UWB kanalai ir rekomenduojami dekodavimo numeriai (Decawave Ltd, 2017).....	33
<b>14 pav.</b> Siųstuvo ir imtuvo antenos delsa (makerfabs.cc, 2022).....	34
<b>15 pav.</b> Akselerometro ir giroskopo duomenų apjungimas tikslesniems posūkio matavimams gauti (Romain JL Fetick, 2021).....	34
<b>16 pav.</b> Komplementarusis filtras bendruoju atveju [22].....	35
<b>17 pav.</b> Schematinė diagrama trilateracijos principui [23].....	36
<b>18 pav.</b> MQTT konfigūracija Node-RED aplinkoje.....	37
<b>19 pav.</b> Santykinės ir absoliutinės atstumo paklaidos priklausomybė nuo UWB modulio aparatūrinės delsos kompensacijos.....	39
<b>20 pav.</b> Faktinis ir apskaičiuotas atstumas, kompensuojant UWB aparatūrinę delną.....	39
<b>21 pav.</b> Apskaičiuotas atstumas su 16502 ns aparatūrine delsa UWB moduliui Nr. 1, kai faktinis atstumas lygus 4.00 m.....	40
<b>22 pav.</b> Santykinės ir absoliutinės atstumo paklaidos priklausomybė nuo UWB modulio aparatūrinės delsos kompensacijos NLOS sistemoje.....	40
<b>23 pav.</b> tyrimo eksperimentinis realizavimas KTU konvejerinių sistemų laboratorijoje.....	41
<b>24 pav.</b> Faktinė MS pozicija statinio tyrimo metu (1.60, 3.60) dvimatėje koordinatinių sistemoje.....	42
<b>25 pav.</b> Apskaičiuotų statinės MS koordinatinių grafinis atvaizdavimas dvimatėje koordinatinių sistemoje.....	43
<b>26 pav.</b> Apskaičiuotos x ir y koordinatės, objektui judant pastoviu greičiu nustatyta trajektorija.....	44
<b>27 pav.</b> Pradinių (nefiltruotų) duomenų vidutinis kvadratinis nuokrypis.....	44
<b>28 pav.</b> Vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai pritaikius skirtingus tyrimo analizuojamus duomenų optimizavimo metodus.....	45
<b>29 pav.</b> Gauti judančio objekto pozicijos rezultatai, pritaikius EKF metodą.....	46

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

UWB – plačiajuostis ryšys (ang. *Ultra-wideband*)

IMU – inercijos matavimo įrenginys (ang. *Inertial Measurement Unit*)

TWR – dvipusis atstumo nustatymas (ang. *Two-Way Ranging*)

AoA – atvykimo kampas (ang. *Angle of Arrival*)

ToA – atvykimo laikas (ang. *Time of Arrival*)

TDoA – atvykimo laiko skirtumas (ang. *Time Difference of Arrival*)

LoS – tiesioginis matotumas (ang. *Line of Sight*)

NLoS – tiesioginis nematomumas (ang. *Non Line of Sight*)

BS – bazinė stotis

MS – mobili stotis

Trilateracija - (lot. *trilaterus* – trikraštis), dvimatės sistemos punktų padėties radimas iš trikampių sistemų, matuojant visas jų kraštines ir apskaičiuojant kampus.

## Išvadas

GPS, GLONASS, BDS ir GNSS sprendimai dabar gali suteikti pasaulines, bet kokiomis oro sąlygomis, didelio tikslumo pozicionavimo ir navigacijos paslaugas, kurios iš esmės atitinka įprastų vartotojų poreikius daugeliu scenarijų ir yra plačiai naudojamos. Tačiau pozicionavimui patalpose reikalinga naudoti kitas technologijas, norint gauti tikslias objekto koordinates erdvėje. Vienas iš tiksliausių, literatūros šaltiniuose, pateikiamų pavyzdžių yra plačiajuosčio ryšio (*Ultra-wideband, UWB*) technologija. Tai yra trumpojo nuotolio belaidžio ryšio technologija, sukurta septintajame dešimtmetyje ir naudojanti nanosekundžių ne sinusoidinius trumpųjų bangų impulsus, kad perduotų duomenis nuo 3,1 iki 10,6 GHz spektre, kurio didžiausias diapazonas yra 7,5 GHz. Tai leidžia sumažinti išorinių signalų, trukdžių poveikį ir pasiekti itin objekto pozicijos aukštą tikslumą erdvėje.

Pasitelkiant vien UWB pozicionavimo metodus esamais tyrimais nustatyta, kad galima pasiekti pozicionavimo tikslumą su 10 cm paklaida. Norint sumažinti paklaidą, būtina į sistemą įvesti papildomus sekamo objekto duomenis ir pozicijos optimizavimo metodus.

Tyrimas orientuotas į objekto sekimą uždaroje erdvėje siekiant išlaikyti sistemos greitaveiką darbui realiu laiku.

Tyrime analizuojama vieno judančio objekto pozicionavimo sistema, pasitelkiant Qorvo UWB modulius bei eksperimentiškai realizuojami pasirinkti duomenų optimizavimo metodai.

Projekto tikslas - atlikti dvimatėje erdvėje judančio objekto pozicijos nustatymo tyrimą pasitelkiant plačiajuosčio ryšio ir objekto inercijos matavimo technologijas

Projekto uždaviniai:

1. parengti programinį kodą UWB tarpusavio komunikacijai ir nustatyti stacionarios sistemos UWB modulių tarpusavio atstumo nustatymo tikslumą;
2. nustatyti nejudančio objekto pozicionavimo tikslumą, naudojant tris UWB bazines stotis;
3. nustatyti judančio objekto pozicionavimo tikslumą, išlaikant sistemos greitaveiką;
4. parengti pasirinktų duomenų filtravimo metodų programinį kodą ir pritaikyti pirminiams objekto pozicionavimo duomenims;
5. palyginti gautus tyrimo rezultatus ir pateikti išvadas.

## 1. Analitinė literatūros apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiami literatūroje pateikiami atstumo ir vietos nustatymo metodai belaidžiu ryšiu, pateikiami jų trūkumai ir privalumai, įtakoiantys metodų pasirinkimą šio projekto taikymui. Taip pat pristatoma ir plačiau jos technologijos taikymo pozicionavimui metodika bei objekto inercijos perskaičiavimas vietos patikslinimui. Tolimesniam pozicionavimo duomenų patikslinimui ir optimizavimui pateikiami apžvelgti literatūroje pristatyti duomenų filtravimo metodai.

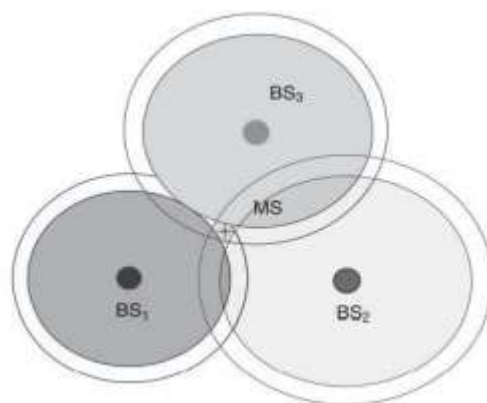
### 1.1. Vietos nustatymo belaidžiu ryšiu metodai

Šiame poskyryje apžvelgiami jau pristatyti ir praktikoje naudojami objekto (-ų) vietos nustatymo sprendimai ir taikomi metodai naudojant UWB ir/ar IMU technologijas, pasirenkant tinkamiausius metodus šio magistrinio baigiamojo darbo tyrimui atlikti.

#### 1.1.1. Atvykimo laikas (ang. *Time of Arrival, ToA*)

Terminas „atvykimo laikas“ apibūdina trukmę, per kurią signalas ar banga turi nukeliauti nuo šaltinio iki imtuvo. Jis dažnai naudojamas daugelyje skirtingų pramonės šakų, įskaitant navigaciją, telekomunikacijas ir kitas laidines komunikacijas. Matuojant laiką, per kurį signalas perduodamas tarp dviejų bendraujančių įrenginių, ToA naudojamas telekomunikacijose atstumui tarp jų apskaičiuoti. Remiantis išmatuota ToA, atstumas gali būti apskaičiuotas, jei yra žinomas signalo greitis (dažniausiai prilyginamas šviesos greičiui, jei signalas sklinda oro terpe).

ToA pagrįstos sistemos matuoja atstumą tarp imtuvo ir siųstuvo, įvertindamos signalo sklidimo delną, kurią išskirtinai įtakoja daugiatakieiai kanalai ir su jais susiję vėlavimo profiliai [1].



**1 pav.** Pozicionavimo sistema naudojant ToA metodą, kai  $BS_i$  - stacionarios antenos, MS - judantis objektas

Pagal pateiktą iliustraciją (1 pav.) ToA mobilios stoties (MS) reikšmės įvertinamos mažiausiai trijų bazinių stočių (BS). Šviesos greitis naudojamas apskaičiuojant atstumą tarp kiekvienos BS ir MS. Kiekvieno BS signalo diapazonas teoriškai yra apskritimas, o taškas, kuriame apskritimai susikerta, nustato MS padėtį.

Apskaičiuojant atstumą nuo kiekvienos BS iki MS gaunami 3 ar daugiau atstumų, kurių kiekvieną galima aprašyti remiantis Pitagoro teorema:

$$d_i = \sqrt{(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2} \quad (1.1)$$

, čia  $d_i$  – atstumas nuo  $i$ -tosios BS iki MS,  $x_T$  ir  $y_T$  – MS  $xy$  koordinatės, o  $x_i$  ir  $y_i$  –  $i$ -tosios BS  $xy$  koordinatės. Teoriškai imant  $d_i$  kaip kiekvienos BS išmatuotą atstumą iki MS,  $d_i$  spindulių susikirtimo taškus galima apskaičiuoti remiantis trilateracijos principu:

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_A - x_C) & 2(y_A - y_C) \\ 2(x_B - x_C) & 2(y_B - y_C) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_A^2 - x_C^2 + y_A^2 - y_C^2 + d_C^2 - d_A^2 \\ x_B^2 - x_C^2 + y_B^2 - y_C^2 + d_C^2 - d_B^2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

ToA metodo privalumai:

- ToA iš esmės gali suteikti labai tikslią informaciją apie objekto vietą. Padėtį galima tiksliai nustatyti pagal laiką, per kiek laiko signalas nukeliauja iš įvairių žinomų šaltinių iki imtuvo.
- ToA yra gana paprasta technika, kuriai nereikia sudėtingų įrangos komponentų ar sudėtingų skaičiavimų. Tam galima naudoti paprastą aparatinę įrangą, ją lengva suprasti ir pritaikyti įvairioms programoms.
- ToA taikomas įvairiose situacijose ir kontekstuose, įskaitant radarus, GPS, belaidį ryšį ir povandenines lokacines sistemas. Dėl savo pritaikomumo jis gali būti naudojamas daugelyje kitų sričių.
- lyginant su kitais padėties nustatymo metodais, tokiais kaip atvykimo laiko skirtumas (TDoA) arba atvykimo kampas (AoA), atvykimo laikas yra mažiau pažeidžiamas signalų sklaidos interferencijos.

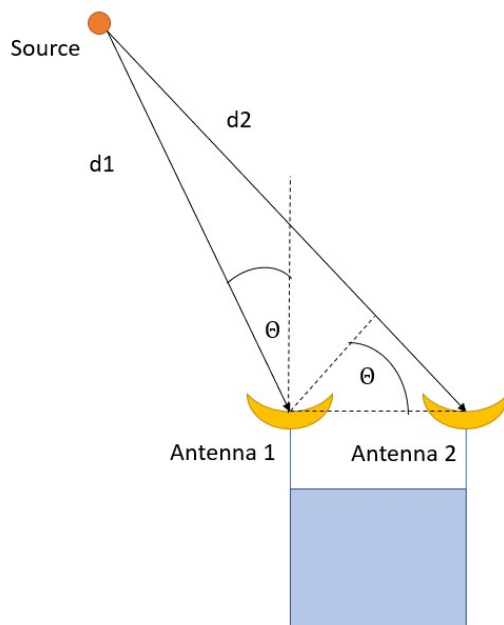
ToA metodo trūkumai:

- kad ToA veiktų tinkamai, tarp siųstuvo ir imtuvo turi būti aiškus matomumas (ang. Line of Sight, LoS). Sienos, ar kita įranga gali trukdyti signalui ir lemti netikslų padėties įvertinimą.
- Norint atlikti tikslus ToA matavimus, reikalingas tikslus siųstuvo ir imtuvo sinchronizavimas. Reikšmingi padėties netikslumai gali atsirasti dėl neteisingo laikrodžio sinchronizavimo keliuose šaltiniuose arba imtuvuose.
- Didėjant atstumui tarp siųstuvo ir imtuvo, nukenčia atvykimo laiko tikslumas ir patikimumas. Signalui sklindant didesniais atstumais gali atsirasti klaidų dėl kintamųjų, tokių kaip signalo slopinimas, triukšmas ir sklaidimo vėlavimas.
- norint pasiekti kuo tikslesnį atvykimo laiką, gali prireikti sinchronizuotų laikrodžių, kelių siųstuvų ir imtuvų. Tokią infrastruktūrą sukurti ir prižiūrėti gali būti brangu.

### 1.1.2. Atvykimo kampas (ang. *Angle of Arrival, AoA*)

Matavimas, vadinamas atvykimo kampu (AoA), tiksliai nustato kryptį, iš kurios signalas ar banga artėja prie priėmimo antenos arba jutiklio. Jis dažnai naudojamas daugelyje skirtingų kontekstų, tokių kaip vietos nustatymas, radarų sistemos ir belaidis ryšys.

AoA gali būti naudojamas belaidžio ryšio sistemose, kad būtų galima numatyti radijo dažnio perdavimo atvykimo kryptį. Sistema gali iširti įvairių antenų gaunamo signalo fazių ir amplitudės skirtumus naudodama kelias antenas arba antenų matricas. Tada, naudojant šiuos skirtumus, nustatomas kampas, iš kurio gaunamas signalas priėmimo antenų atžvilgiu.



**2 pav.** Atvykimo kampo (AoA) metodo realizavimo vizualizacija (šaltinis Kelleher, Lorcan. (2021). *Passive Radiometry and Estimation in SAR Interferometry*).

Fazinis lokalizacijos metodas, vadinamas atvykimo kampo (AoA) įvertinimu, pasirodė labai perspektyvus ir parodė didesnius pranašumus, palyginti su laiko metodais, tokiais kaip dvipusis nuotolio nustatymas (ang. Two-way Ranging) ir atvykimo laiko skirtumas (TDoA). Tačiau kadangi AoA yra pagrįstas vieno signalo, gauto iš dviejų atskirų antenų, fazių skirtumo apskaičiavimu, imtuvas paprastai turi turėti keletą antenų, o tai padidina aparatinės ir programinės įrangos projektavimo sudėtingumą ir sąnaudas.

Dėl būtinybės diegti daugybę antenų, sistemos projektavimo sudėtingumas ir susijusios gamybos sąnaudos yra pagrindinės kliūtys, neleidžiančios UWB AoA pagrįstoms sistemoms tapti plačiau naudojamoms. Didelio masto pozicionavimo sistemoms didelę įtaką daro pridėtinės išlaidos [2].

AoA metodo privalumai:

- AoA užtikrina tikslus lokalizacijos duomenis, ypač tais atvejais, kai būtinas teisingas krypties numatymas. Tai leidžia tiksliai sekti objektą ir nustatyti jo padėtį.
- AoA yra atsparesnis signalų sklaidos interferencijai nei tokie metodai kaip atvykimo laikas (ToA) arba atvykimo laiko skirtumas (TDoA). Sutelkdamas dėmesį į atvykimo kryptį, jis gali sumažinti klaidas, atsirandančias dėl signalo difrakcijos ar atspindžių.

- c) AoA leidžia atskirti signalus, gaunamus iš įvairių krypčių, o tai leidžia efektyviai pakartotinai panaudoti belaidžius išteklius. Tai ypač naudinga sistemose ar aplinkoje su tankiais tinklais, kur kartu egzistuoja keli signalai.

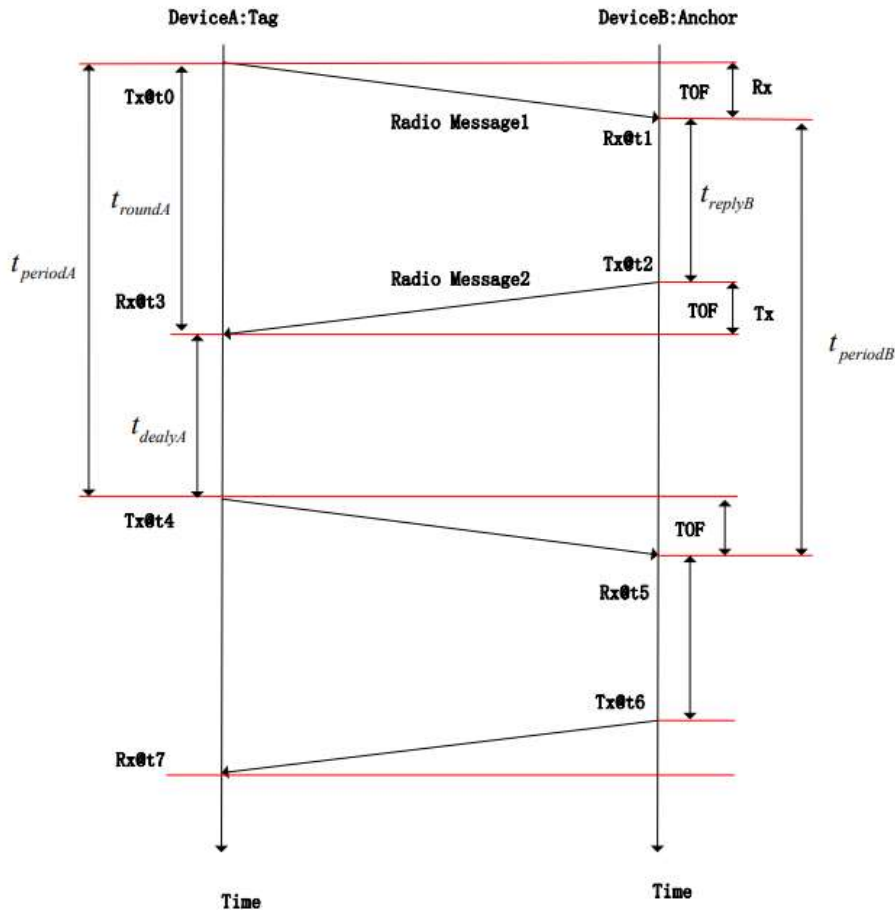
AoA metodo trūkumai:

- a) Palyginti su įprastiniais padėties nustatymo metodais, įgyvendinant AoA dažnai reikia specializuotos aparatinės įrangos, tokios kaip antenų matricos arba fazinės matricos sistemos, kurios gali būti sudėtingesnės ir brangesnės. Norint tiksliai įvertinti gaunamų duomenų kampus, reikalingi sudėtingi signalo apdorojimo metodai.
- b) AoA matavimų tikslumą gali paveikti aplinkos veiksniai, tokie kaip signalo trukdžiai arba sklidimo charakteristikų kitimai. Padėties nustatymo tikslumą gali paveikti kliūtys arba atspindintys paviršiai.
- c) Diapazonas, kuriuo gaunami signalai, gali apriboti AoA matavimų tikslumą. Didėjant atstumui tarp siųstuvo ir imtuvo, nedidelės matavimo klaidos arba kampo įvertinimo neapibrėžtumas gali turėti didelės įtakos vietos tikslumui.
- d) Norint gauti patikimus AoA matavimus, dažnai reikia kruopščiai kalibruoti ir sureguliuoti antenos matricą arba jutiklių sistemą. Klaidos gali atsirasti dėl techninės įrangos savybių pasikeitimų arba nesutapimų, dėl kurių gali sumažėti kampo įvertinimo tikslumas.

### 1.1.3. Dvipusis nuotolio nustatymas (ang. *Two-way Ranging, TWR*)

Radijo technologijoje dvipusis nuotolio nustatymas (TWR) yra nuotolio nustatymo metodas, kuris naudoja du vėlavimus, kurie natūraliai atsiranda perduodant signalą, kad būtų nustatytas nuotolis tarp dviejų – dažniausiai bazinės ir mobilios - stočių.

Įprasto TWR metodo atstumo paklaida atsiranda dėl laikrodžio ir dažnio dreifo, dėl kurio paklaida tarp apskaičiuoto atstumo ir tikrojo atstumo keičiasi kintant laikui. Tyrėjų pristatyta keletas patobulintų dvipusio nuotolio nustatymo metodų, įskaitant SDS-TWR. Tokiu būdu sumažinama laikrodžio įtaka diapazono paklaidai. Tačiau, palyginti su CC-TWR (*Clock Compensation TWR*) metodu, šis metodas turi mažesnę diapazono efektyvumą ir vis dar turi didelę paklaidą [3].



3 pav. CC-TWR vizualinė reprezentacija laike

TWR metodo privalumai:

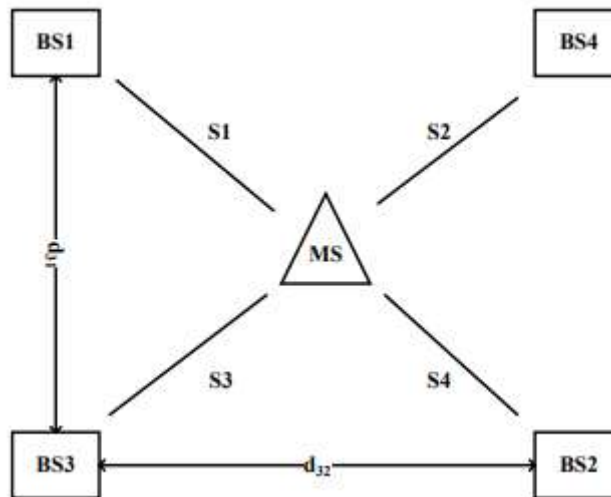
- TWR gali tiksliai išmatuoti atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo. Jis gali tiksliai nustatyti atstumą, matuodamas signalo kelionės pirmyn ir atgal trukmę, ypač esant mažai trukdžių.
- TWR yra gan paprastas realizavimo požiūriu.
- Priklausomai nuo konkrečios paskirties, TWR gali būti naudojamas tiek trumpais, tiek dideliais atstumais.

TWR metodo trūkumai:

- norint tiksliai išmatuoti kelionės pirmyn ir atgal laiką, TWR priklauso nuo tikslaus laiko sinchronizavimo tarp siųstuvo ir imtuvo. Dviejų įrenginių sinchronizavimo problemos gali lemti netikslų atstumo įvertinimą.
- Signalų sklaidimo delsos, kurias gali sukelti tokie dalykai kaip aplinkos sąlygos, signalo atspindžiai ar signalų sklaidos interferencija, gali turėti įtakos TWR matavimams. Ypač tais atvejais, kai sklaidimo charakteristikos yra sudėtingos, dėl šių vėlavimų gali atsirasti klaidų apskaičiuojant atstumą.
- Norint tiksliai įvertinti atstumus, TWR reikalingas kliūčių neapribotas signalo kelias tarp siųstuvo ir imtuvo. Netikslus atstumo įvertinimas gali atsirasti dėl kliūčių arba signalo blokadų, trukdančių signalui.

#### 1.1.4. Atvykimo laiko skirtumas (ang. *Time Difference of Arrival, TDoA*)

Padėties nustatymo algoritmas TDoA (atvykimo laiko skirtumas) yra dažnai naudojamas ypač kai susiduriama su greitai judančiais objektais arba didele erdve. Idėja yra ta, kad signalo šaltiniai, kaip ir palydovai, šiuo metu transliuoja pranešimus naudodami sinchronizuotus laikrodžius ir nustatytas palydovų trajektorijas, todėl imtuvai aptinka esamus laikrodžių skirtumus. Žinant atstumą tarp imtuvų ir kiekvieno imtuvo ir objekto ToA galima apskaičiuoti atstumą iki objekto naudojant TDoA. Norint užtikrinti visišką sistemos tikslumą, kiekvienas signalo šaltinis pirmiausia turi nustatyti tikslų laiko sinchronizavimą. Didelio tikslumo laikrodžių sinchronizavimui GNSS palydovai dabar naudoja atominius laikrodžius, tarppalydovinius ryšius ir palydovo-žemės ryšius.



4 pav. Pozicionavimo sistemos konfigūracijos diagrama [3]

Be to, centrinė stotis dažnai naudojama signalų stebėjimui arba transliavimui į netoliese esančias bazines stotis/antenas, o tai gali apriboti kiekvieno valdiklio greitaveiką. Komercinių 802.15.4z SoC lustų galimybė stebėti laiką labai tiksliai itin patobulina belaidę sinchronizuotą UWB TDoA padėties nustatymo sistemą, pagrįstą IEEE 802.15.4z. Priimdama, nustatydamą ir pristatydamą nuotolio pranešimus tarp netoliese esančių bazinių stočių, kiekviena šios sistemos padėties nustatymo bazinė stotis iš karto sinchronizuotųsi su kaimyninėmis stotimis. Teoriškai minimalų sinchronizavimo tinklą galėtų sukurti trys bazinės stotys ir tai galėtų užtikrinti padėties pranešimų transliavimą [3].

TDoA metodo privalumai:

- Palyginti su atvykimo laiku (ToA), TDoA yra atsparesnis ne tiesioginio matymo (NLOS) aplinkybėms. Jis gali veikti tokiose patalpose, kur tarp siųstuvo ir imtuvų yra tiesioginio matomumo kliūtis.
- galima nesunkiai padidinti siųstuvų ir imtuvų, kurie gali palaikyti TDoA, skaičių. Dėl to jis tinkamas naudoti, pavyzdžiui, belaidžiuose jutiklių tinkluose arba pagal vietą pagrįstos paslaugos, kurioms reikalinga plati aprėptis.
- TDoA nereikalauja tikslaus laikrodžio sinchronizavimo tarp siųstuvų ir imtuvų, kaip tai daro ToA. Tai sumažina infrastruktūros, reikalingos tiksliam padėties nustatymui, įrengimo sunkumus ir išlaidas.

- d) Signalo sklaidimo ypatybės, tokios kaip signalo slopinimas, atspindys ir difrakcija, turi mažesnę poveikį TDoA. Jis yra atsparesnis įvairiose situacijose, nes pirmiausia priklauso nuo santykinio laiko skirtumų tarp įvairių imtuvų gaunamų signalų.

TDoA metodo trūkumai:

- a) Įgyvendinimas gali būti sudėtingesnis nei ToA. Būtinai tikslus bazinių stočių laiko skirtumo matavimas. Norint gauti tikslų padėties įvertinimą, dažnai reikalingi sudėtingi algoritmai ir signalų apdorojimo metodai.
- b) Tais atvejais, kai atstumas tarp siųstuvo ir imtuvų yra nedidelis, gali nukentėti TDoA tikslumas. Tokios situacijos gali sukelti rimtų padėties klaidų net ir dėl nedidelių matavimo klaidų laiko neatitikimų.
- c) Panašiai kaip ir ToA ar AoA, TDoA tikslumas mažėja, kai siųstuvas ir imtuvai perkeliama toliau. Dideliais atstumais signalo sklaidimo delsos, triukšmas ir signalų sklaidos interferencija gali pakenkti TDoA matavimų tikslumui ir patikimumui.
- d) TDoA vis dėlto yra jautrus laikrodžio dreifavimui, net jei tam nereikia tikslaus laikrodžio sinchronizavimo. Laikrodžiai imtuvų viduje kintant laikui gali nukrypti ir sukelti laiko skirtumo skaičiavimo klaidų, kurios turi įtakos vietos nustatymo tikslumui.

## 1.2. Plačiajuosčio ryšio (UWB) technologija

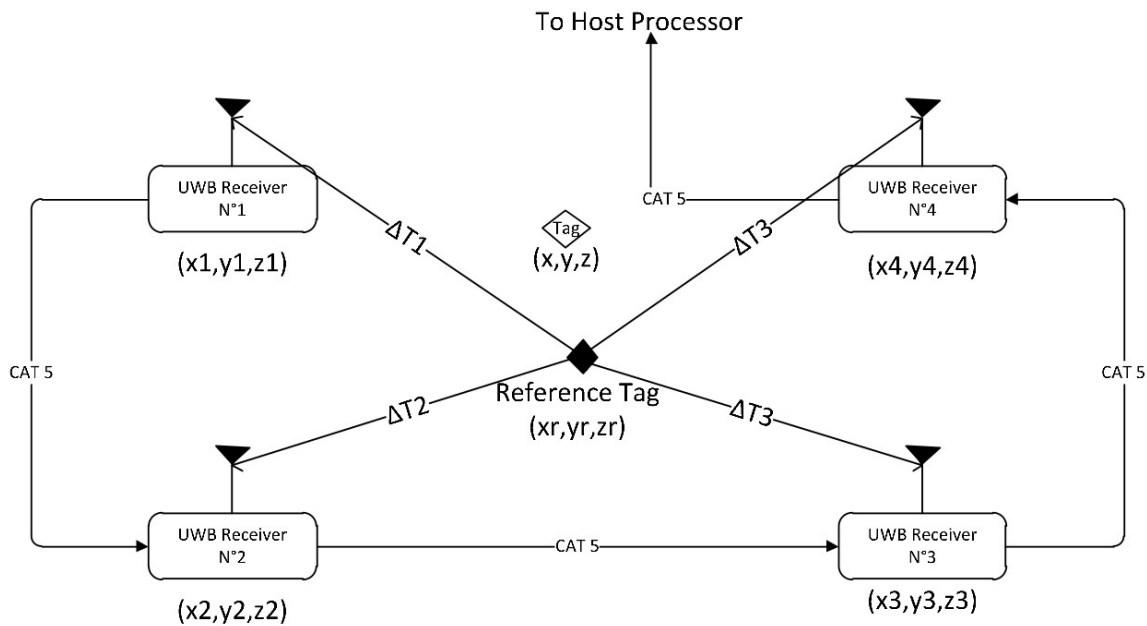
Radio ryšio technologija, vadinama plačiajuosčiu ryšiu (ang. *Ultra-wideband, UWB*), leidžia perduoti duomenis dideliu dažniu (daugiau nei 500 MHz). Tame pačiame dažnių diapazone tai leidžia perduoti nemažą signalo energijos kiekį, netrukdant tradiciniam siaurajuosčiui ir nešančiosios bangos perdavimui. UWB yra naudingas vietos nustatymo sistemoms realiuoju laiku, o dėl savo tikslumo ir mažo energijos suvartojimo jis puikiai tinka aplinkoje, kur radio dažnių kiekis erdvėje itin svarbus. Dėl mažų energijos sąnaudų, didelės kelių krypčių skiriamosios gebos ir decimetro lygio padėties nustatymo tikslumo UWB tampa vis svarbesnis nustatant padėtį patalpose. Robotika, radarų sistemos, gamyklos, sandėliai ir logistika bei oro uostai yra tik keli pavyzdžiai iš daugelio pramonės šakų, kuriose UWB gali būti naudojamas kaip padėties nustatymo technologija [5].

UWB radio schemeje [15] yra labai trumpos trukmės bangos, vadinamos impulsais (keleto nanosekundžių eilės), naudojant plačią juostą ir mažos galios spektrinį tankį. Tarp daugybės šios technologijos teikiamų pranašumų galima paminėti tai, kad impulso atvykimo laiką galima nustatyti gana tiksliai, suteikiant galimybę išmatuoti atstumą tarp dviejų bendraujančių įrenginių įvertinant signalo kelionės laiką.

UWB padėties nustatymo sistemos turi didesnę aprėptį (daugiau nei 100 m), tačiau, kaip pristatyta įvairiuose tyrimuose, UWB diapazonas yra labai jautrus kliūtims. Nuokrypiam tiesioginiam matomumui (NLOS) gali būti didesni nei vienas metras [16]

UWB padėties nustatymo principas daugiausia naudoja padėties nustatymo metodą, pagrįstą laiko skirtumu (TDOA) [6]. Sistemos aparatinę įrangą sudaro bazinės stotys (antenos) ir sekamas objektas, norint nustatyti vietą, būtina tiksliai sinchronizuoti bazinių stočių laiką. Trimačiui padėties nustatymui reikalingos bent keturios bazinės stotys, tačiau dviejų dimensijų nustatymui minimaliai pakanka trijų bazinių stočių. Sekamas objektas siųs pranešimus, kai bazinės stoties laikas bus sinchronizuotas. Kiekviena bazinė stotis registruoja laiko žymą gavusi atsaką. Tada galima gauti belaidžio signalo sklaidimo

tarp skirtingų bazinių stočių laiko skirtumą  $\Delta t$ , o naudodami atstumo formulę galite gauti atstumo skirtumą  $\Delta d = c \times \Delta t$  tarp bazinės stoties, kur  $c$  yra šviesos greitis [5].



5 pav. Tipinė UWB pozicionavimo sistemos konfigūracija [5]

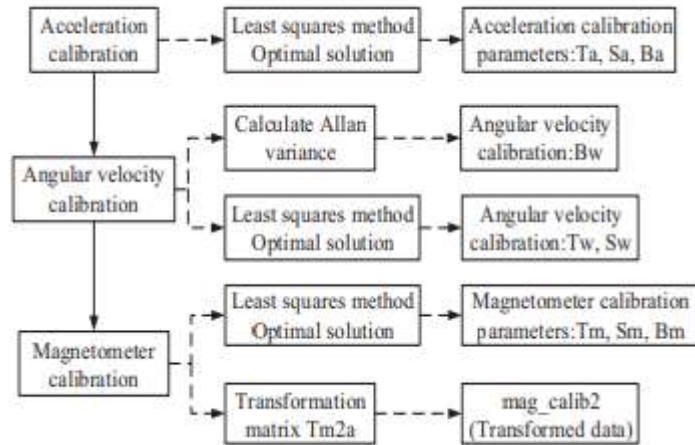
### 1.3. Giroskopo ir akcelerometro duomenų (IMU) panaudojimas

Nematomumo zona (ang. *Non-Line-of-Sight, NLOS*) daro neigiamą įtaką siekiant nustatyti objekto poziciją erdvėje naudojantis UWB. IMU pozicionavimo rezultatuose yra susikaupusių paklaidų (dreifavimų, matuojamos ne absoliučios, bet santykinės vertės). Pagrindinis greito padėties nustatymo technologijos paklaidų šaltinis yra inercinis matavimo įrenginys (IMU), turintis koordinatinių ašies paklaidą ir fiksuotą paklaidą. Siekiant padidinti padėties nustatymo tikslumą, koordinatinių ašies nuokrypis ir fiksuotas pradinės vertės nuokrypis gali būti sumažintas arba pašalintas. Šiuo atžvilgiu naudingas metodas yra IMU vidinis kalibravimas.

Triukšmas, mastelio paklaida ir ašies nuokrypis yra trys pagrindiniai IMU klaidos šaltiniai [7]. Gaunamą triukšmą pagrinde sukelia Gauso baltasis triukšmas. Baltuoju Gauso triukšmu vadinamas išorinis triukšmas, kurį sukelia analoginio-skaitmeninio (ang. *Analog-Digital, AD*) signalo konversija. Kvantavimo žingsnis AD transformacijoje iš dalies yra atsakingas už skaliavimo netikslumą. Dėl ašies nuokrypio iš dalies kalta netačiakampė triašio pagreičio, triašio kampinio greičio ir triašio magnetometro koordinatinių sistema. IMU matavimo duomenys kalibruojami ištaisius pirmiau minėtus trūkumus, kaip parodyta formulėje (1.3):

$$\begin{aligned}
 acc\_calib &= Ta * Sa * (acc + Ba + Na) \\
 w\_calib &= Tw * Sw * (W + Bw + Nw) \\
 mag\_calib &= Tm * Sm * (mag + Bm + Nm) \\
 mag\_calib2 &= Tm2a * mag\_calib
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Pirma, sumuojamas pradinis pagreičio, nulinio poslinkio kompensavimo ir baltojo triukšmo kompensavimo matavimo vektorius, o tada kalibruotas trijų ašių pagreičio vektorius gali būti gautas naudojant mastelio korekcijos matricos ir ašies nuokrypių korekcijos matricos transformaciją. Panašiai formulėse (1.3) triašis kampinis greitis ir triašė magnetinė jėga po kalibravimo gali būti gauti panašiais metodais. Magnetometro koordinačių sistemoje esantys magnetinės jėgos duomenys transformuojami į pagreičio koordinačių sistemą, o transformacijos metu gauti duomenys naudojami pagreičio/magnetometro duomenims sulieti.



6 pav. IMU vidinio kalibravimo schema [10]

Pagreičio kalibravimo parametrai  $T_a$ ,  $S_a$  ir  $B_a$  optimizuojami taikant mažiausio kvadrato metodą. Mažiausių kvadratų metodas naudojamas kampinio greičio kalibravimo parametrams  $T_w$  ir  $S_w$  optimizuoti, apskaičiavus Allan dispersiją [8], kad būtų gautas kampinio greičio kalibravimo parametras  $B_w$ . Magnetometro kalibravimo parametrai  $T_m$ ,  $S_m$  ir  $B_m$  optimizuojami mažiausio kvadrato metodu, o magnetometro magnetinio matavimo vertė transformuojama į pagreičio koordinačių sistemą naudojant transformacijos matricą  $T_{m2a}$ . 6 pav. pavaizduota IMU vidinio kalibravimo schema.

## 1.4. Matavimų numatymo ir optimizavimo metodai

Siekiant realizuoti dinamiškai judančio objekto pozicionavimo sistemą sunku išvengti įvairių triukšmų, prarastų duomenų paketų belaidžiu ryšiu, laiko sinchronizacijos dreifų ir santykinų skaičiavimų. Visa tai lemia poreikį filtruoti duomenis ir siekiant kuo tikslesnių rezultatų bandyti nuspėti sistemos būseną sekančiu laiko momentu. Šiai dienai pateikiama eilė skirtingų tyrimų analizuojančių ir pateikiančių įvairius duomenų filtravimo metodus netiesioginiam ar tiesioginiam objekto pozicijos nustatymui erdvėje. Turint omenyje, kad šio projekto apimtyje svarbi greitaveika, nedidelis atstumas iki objekto ir matuojami trys atstumai iki sekamo objekto bei gaunama IMU informacija, buvo pasirinkta išanalizuoti ir pritaikyti keli iš galimų metodų.

### 1.4.1. Koordinačių išskaičiavimo metodas (ang. *Dead Reckoning*)

Koordinačių išskaičiavimo metodas yra neatsiejama dedamoji realizuojant judančių objektų lokalizacijos sistemas. Situacijose, kuriose prarandama ar neturima realaus laiko objekto pozicijos informacija, tačiau žinomas objekto linijinis greitis bei absoliutusias posūkio kampas, koordinačių išskaičiavimas tampa vieninteliu galimu sprendimu numatyti būsimą ar esamą objekto poziciją tam tikru laiko momentu.

Išskaičiuojant koordinates pagal objekto judėjimo greitį ir posūkio kampą įprastai kyla neapibrėžtumų dėl apvalinimo ir greičio ar posūkio paklaidų. Ilginant imties laiką, per kurį matuojamas sąlyginis momentinis objekto greitis, apvalinimo paklaida tampa didesnė.

Koordinačių išskaičiavimas naudojamas ir Kalmano filtro būsenos perėjimo aprašyme nuspėjimo (ang. *prediction*) etapui, o matavimo atnaujinimo (ang. *update*) etapui naudojamos išskaičiuotos koordinatės pakoreguojant jas nustatytomis kovariacijos matricomis ir išorės triukšmų kompensavimu ir neužtikrintumais. [11]

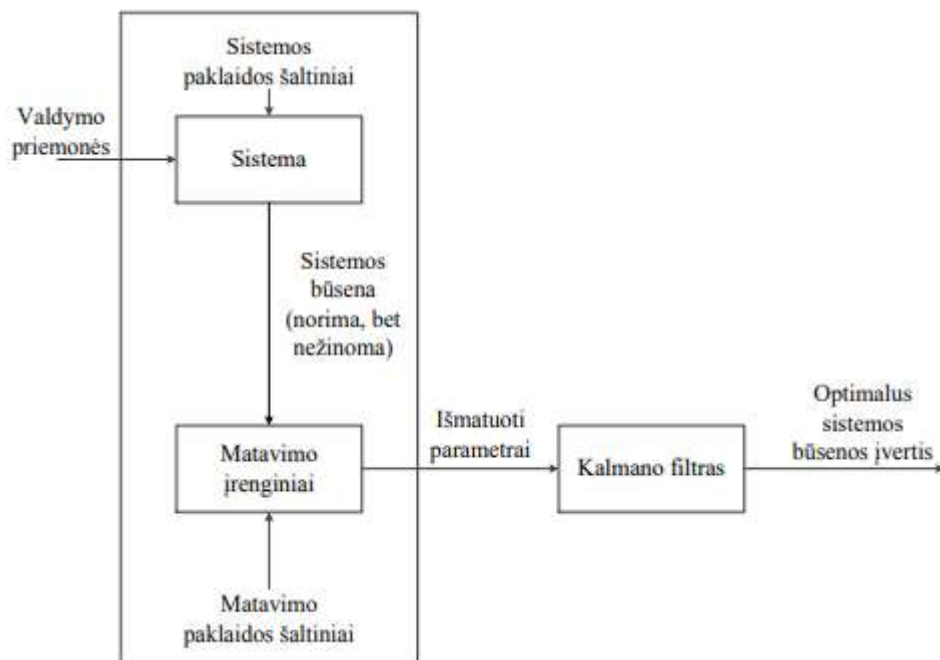
$$P_t = P_0 + V_0T + \frac{1}{2}A_0T^2 \quad (1.4)$$

Koordinačių išskaičiavimas paremtas elementariu pozicijos apskaičiavimu žinant momentinį objekto greitį bei pagreitį. Rezultato tikslumas tiesiogiai priklauso nuo matavimo laiko nustatant objekto greitį, pagreitį bei nuo  $P_0$  pozicijos praėjusio laiko momentu tikslumo.

#### 1.4.2. Išplėstinis Kalmano filtras (ang. *Extended Kalman Filter, EKF*)

Bendrai Kalmano filtras (toliau – KF) tai matematinių lygčių sistema, naudojama apskaičiuoti labiausiai tikėtiną proceso būseną, kuri nustatoma remiantis diskretinių matavimų duomenimis ir dinaminiais sistemos modeliu. Paprastas Kalmano filtras naudojamas tiesinėms sistemoms, tačiau šio darbo apimtyje turime netiesinę sistemą, tad privalu rinktis metodus netiesinėms sistemoms. Pagrindinis Išplėstinio Kalmano filtro (toliau – EKF) skirtumas nuo įprasto Kalmano filtro – netiesinės sistemos ištiesinimo žingsnis. KF palaiko praeities, dabarties ir ateities būsenų įvertinimą.

KF veikia dviem pagrindiniais etapais: spėjimo ir atnaujinimo. Spėjimo etape KF apskaičiuoja esamos būsenos prognozes ir jų neapibrėžtumus. Atnaujinimo etape šie būsenos įverčiai yra atnaujinami. Atlikus perskaičiavimus, perskaičiuoti ir išmatuoti būsenos įverčiai yra sumuojami naudojant svorio koeficientus. Didžiausias svorio koeficientas yra priskiriamas labiausiai patikimiems įverčiams, kurie priklauso nuo jų klaidos, inversiškai proporcingos apskaičiuotai klaidai. Svarbu pažymėti, kad KF efektyvumas priklauso nuo klaidos kovariacijos ir triukšmo, kuris turi atitikti Gauso pasiskirstymą.



7 pav. Bendroji Kalmano filtro pritaikymo diagrama [14]

EKF pirmą sykį buvo realizuotas Apollo programoje kapsulės pozicijos nustatymui bei plačiai naudojamas ir šiandien radarų sistemose, robotikoje siekiant tiksliai nustatyti objektų poziciją dvimatėje ar trimatėje erdvėje.

EKF dažnai sutinkamas netiesinių sistemų būsenų aproksimavimo realiu laiku užduotyse, tačiau kai sistemos galimos sąlygos sunkiai apibrėžiamos ir pasitaiko neapibrėžtų triukšmų ir matavimų, sistemos ištiesinimas (linearizacija) gali būti neefektyvus ir tikėtina gauti netikslius rezultatus ir netgi esminius filtro nukrypimus, išsibalansavimus, privedančius prie laikui bėgant augančių paklaidų. [13]

Iš esmės EKF yra pradinė netiesinio objekto aproksimacija ir yra pirmosios eilės Taylor serijos išplėtimas pradinei sistemai ir matavimui. Linearizavimo (arba sistemos ištiesinimo) procedūra tinka silpnai

netiesinėms sistemoms, nes tai sukels didelių papildomų klaidų ir filtravimo skirtumų stiprioms netiesinėms sistemoms. Šis metodas yra tiesinis minimalios dispersijos įvertinimas [11].

EKF aprašomas iš dinaminio diskretinio laiko netiesiškumo dėsnio (ang. dynamical discrete time nonlinear law) formoje:

$$\mathbf{x}_{n+1} = f(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n) + \mathbf{w}_n \quad (1.5)$$

, kur  $\mathbf{x}_n$  numatomą sistemos būseną,  $\mathbf{u}_n$  – sistemos įėjimus (matuojamas vertes) ir  $\mathbf{w}_n$  – proceso triukšmas, kuris prilyginamas Gauso triukšmui su nuline mediana ir kovariancijos matrica  $\mathbf{Q}_n$ . [12]

Numatomas kovariacijos įvertinimas aprašomas forma

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (1.6)$$

, čia  $\mathbf{P}$  – kovariacijos matrica,  $\mathbf{F}$  – Jacobian matrica.

Kalmano stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas remiantis apskaičiuota kovariacijos matrica  $\mathbf{P}$  bei matavimų likutine kovariacijos matrica  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1} \quad (1.7)$$

, čia  $\mathbf{H}_k$  – vienetinė matrica, o  $\mathbf{S}_k$  gaunama pagal formulę:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \quad (1.8)$$

, čia  $\mathbf{R}_k$  – jutiklių matavimų triukšmų kovariacijos matrica.

Dėl fakto, kad EKF yra paremtas Gauso (ang. Gaussian) pasiskirstymu, šis metodas nėra visiškai tinkamas ir validus bet kokiai realiai sistemai, kadangi ne visada galima teigti, jog jutiklių ir proceso perskaičiavimų triukšmai ar paklaidos gali būti apibrėžiami Gauso pasiskirstymu.

### 1.4.3. Dalelių filtras arba Nuoseklusis Monte Carlo metodas (ang. *Particle Filter, Sequential Monte Carlo method*)

Monte Karlo metodai arba Monte Karlo eksperimentai yra plati skaičiavimo algoritmų klasė, kuri remiasi pakartotine atsitiktine atranka, kad būtų gauti skaitiniai rezultatai. Pagrindinė koncepcija yra atsitiktinumo naudojimas sprendžiant problemas, kurios iš esmės gali būti deterministinės. Pavadinimas kilęs iš Monte Karlo kazino Monake, kur pagrindinis šio metodo kūrėjas fizikas Stanislovas Ulamas buvo įkvėptas dėdės lošimo įpročių. [18]

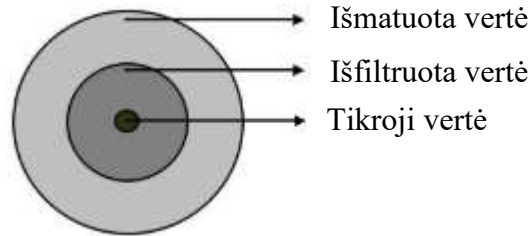
Dalelių filtras yra apytikslis Bajeso filtravimo algoritmas, pagrįstas Monte Karlo modeliavimu, naudojamas apytiksliams netiesinių būsenos erdvės sistemų filtravimo problemų sprendimams rasti. PF naudoja dalelių rinkinį, taip pat vadinamą mėginiais (ang. samples), kad pavaizduotų stochastinio proceso tolimesnį pasiskirstymą, atsižvelgiant į triukšmingus ir (arba) dalinius stebėjimus.[20] Būsenos ir erdvės modelis gali būti netiesinis, o pradinės būsenos ir triukšmo pasiskirstymas gali būti bet kokios formos. Dalelių filtrų metodai suteikia nusistovėjusią metodiką, kaip generuoti mėginius iš reikiamo skirstinio,

nerikalaujant prielaidų apie būsenos-erdvės modelį arba būsenų skirstinius. Tačiau šie metodai neveikia gerai, kai jie taikomi labai didelių matmenų sistemoms.[19]

Aprašant PF algoritmą apsirąšoma matavimo arba stebėjimo lygtis, kuriai galioja paklaida, palyginti su tikrąja matuojama verte:

$$Z(k) = h(X(k), V(k)) \quad (1.9)$$

, čia  $Z(k) \in R^n$  yra matavimo duomenys laiko momentu  $k$ ,  $X(k) \in R^n$  – sistemos būsena, o  $V(k) \in R^n$  – matavimo triukšmai, laiko momentu  $k$ . Bet kurioje matavimo sistemoje yra trys reikšmės: tikroji būsena, išmatuota būsena ir išfiltruota būsena. Akivaizdu, tikroji būsena yra absoliučioji, bet jos negalima tiksliai išmatuoti; išmatuota vertė turi paklaidą, palyginti su tikrąja verte. Išfiltruota vertė yra optimizuojama apdorojant pritaikomu filtru, o filtro apdorojimo tikslas yra sumažinti triukšmo trukdžius, kad filtro rezultatai būtų artimi tikrosioms vertėms. Ryšys tarp trijų reikšmių parodytas pav.



**8 pav.** Tiriamas ryšys tarp išmatuotos, išfiltruotos ir tikrosios verčių

PF paremtas dviejų žingsnių sistemos būsenos numatymu, kaip ir KF metodas: spėjimo ir atnaujinimo. Numatomas dalelių rinkinys  $\{x_{t-1}^i\}_{i=1}^{N_p}$  sukuriamas dalelių rinkinį perskaičiuojant remiantis sistemos dinaminio modeliu. Gauso skirstinys  $N(\bar{\mu}_t, \bar{\Sigma}_t)$  sudarytas iš šio dalelių rinkinio, kurio mediana ir kovariacija:

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_t &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} x_{t|t-1}^i, \\ \bar{\Sigma}_t &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (x_{t|t-1}^i - \bar{\mu}_t)(x_{t|t-1}^i - \bar{\mu}_t)^T. \end{aligned} \quad (1.10)$$

, čia  $x_t$  – sistemos būsena laiko momentu  $t$ ,  $\bar{\mu}_t$  – Gauso skirstinio mediana,  $\bar{\Sigma}_t$  – kovariacija.

Atnaujinimo žingsnyje matavimai  $x_t^i$  pasirenkami iš apskaičiuoto pasiskirstymo spėjimo žingsnyje. Siekiant atsižvelgti į tikrosios būsimos būsenos ir spėjamo pasiskirstymo skirtumą, kiekvienai dalelei priskiriami svarbos (stiprinimo) svoriai:

$$w_t^i \propto \frac{p(x_t^i | z_{0:t-1})p(z_t | x_t^i)}{\pi(x_t^i | z_{0:t})}, \quad (1.11)$$

čia  $p(x_t|z_{0:t-1})$  yra spėjimo pasiskirstymas,  $p(z_t|x_t)$  - tikimybė, o  $\pi(x_t|z_{0:t})$  svarbos imčiai pasiskirstymas. Kadangi spėjimo pasiskirstymas apytiksliai apskaičiuotas remiantis Gauso skirstiniu  $N(\bar{\mu}_t, \bar{\Sigma}_t)$ , svoriai apskaičiuojami:

$$w_t^i \propto \frac{\mathcal{N}(x_t^i; \bar{\mu}_t, \bar{\Sigma}_t) p(z_t|x_t^i)}{\pi(x_t^i|z_{0:t})}. \quad (1.12)$$

Sekantis imties pasiskirstymas apskaičiuojamas iš Gauso skirstinio  $N(\bar{\mu}_t, \bar{\Sigma}_t)$  kai mediana ir kovariacija apskaičiuojama empiriškai iš dalelių ir normalizuotų svorių:

$$\begin{aligned} \mu_t &= \sum_{i=1}^{N_p} w_t^i x_t^i, \\ \Sigma_t &= \sum_{i=1}^{N_p} w_t^i (x_t^i - \mu_t)(x_t^i - \mu_t)^T. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Šios lygtys numato, kad  $\mu_t$  ir  $\Sigma_t$  konverguoja asimptotiškai (pvz. kai  $N_p \rightarrow \infty$ ) iki minimalios vidutinės kvadratinės paklaidos (MMSE).

## 2. Pozicionavimo algoritmų sudarymas

Šiame skyriuje detalizuojami tyrime realizuojamų metodų – koordinacių išskaičiavimo, Išplėstinio Kalmano filtro ir Dalelių filtro – programinio realizavimo žingsniai ir matematinės išraiškos.

### 2.1. Koordinacių išskaičiavimas

Koordinacių išskaičiavimo arba *Dead Reckoning* metodo realizavimas, palyginti su kitais šio projekto apimtyje naudojamais sprendimais, yra paprasčiausias, tačiau reikalauja tam tikrų matematinių skaičiavimų. Koordinacių išskaičiavimo metodas pagrįstas dviem žingsniais – spėjimo ir atnaujinimo, tačiau visų pirma privalu apibrėžti pradinę sistemos būseną ir modelį. Pradinę sistemos būseną galima apibrėžti:

$$X_0 = [x_0, y_0, \theta_0]^T, \quad (2.1)$$

o sistemos modelį lygtimis:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= x_t + v \cos(\theta_t) \Delta t, \\ y_{t+1} &= y_t + v \sin(\theta_t) \Delta t, \\ \theta_{t+1} &= \theta_t + \omega \Delta t, \end{aligned} \quad (2.2)$$

čia  $v$  – linijinis greitis, o  $\omega$  -kampinis greitis.

Spėjimo skaičiavimus atliekame remiantis sekančia lygtimi:

$$X_{t+1} = f(X_t, v, \omega, \Delta t), \quad (2.3)$$

čia  $f$  apibrėžia sistemos judesio modelio funkciją.

Atnaujinimo žingsnyje nuskaitomi matavimų duomenys ir implementuojamos išskaičiuotos vertės spėjimo žingsnyje:

$$X_{t+1} = X_{t+1} + z, \quad (2.4)$$

čia  $z$  – matavimų duomenys.

## 2.2. Išplėstinis Kalmano filtras

Realizuojant Išplėstinį Kalmano filtrą bendruoju ir mūsų atveju reikia apibrėžti sistemos būseną  $X_t$ , jos kintamuosius, sistemos būsenos pokyčio matricą  $A_t$ , proceso kovariacijos bei matavimų kovariacijos matricas  $Q_t$  ir  $R_t$ , Sekant šiuos žingsnius galima apibrėžti reikalingas filtro dedamąsias.

Sistemos būsenos kintamieji:

$$X_t = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

čia  $x$  – išmatuota (apskaičiuota) MS koordinatė  $x$  ašyje (m),  $y$  – koordinatė  $y$  ašyje (m), o  $\theta$  – posūkio kampas (rad), kai  $\frac{\pi}{2}$  atitinka teigiamą  $x$  ašį mūsų sistemoje.

Remiantis pagrindine būsenos numatymo lygtimi:

$$X_t = AX_{t-1} + Bu_t + w_t, \quad (2.6)$$

Apsirašome reikalingus narius  $A, B, u_t, w_t$ , kur  $A$  – sistemos būsenos pokyčio matrica,  $B$  – būsenos poveikio priklausomybės matrica,  $u$  – būsenos poveikio matrica,  $w$  – proceso triukšmo matrica:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\Delta t * v_t * \sin(\theta_t) \\ 0 & 1 & \Delta t * v_t * \cos(\theta_t) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_t = \begin{pmatrix} \cos(\theta) * \Delta t & 0 \\ \sin(\theta) * \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

$$u_t = \begin{pmatrix} v_t \\ \theta_t \end{pmatrix},$$

tačiau šiam darbui prilyginsim poveikio matricos dedamąją – linijinį greitį – realios kinetinės sistemos greičio konstantai.

Proceso triukšmas atnaujinamas kiekviena filtro iteracija, tad apirašome pradinę matricos formą:

$$w_t = \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.01 \\ 0.003 \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Būsenos kovariacijos matrica nusako matavimo paklaidą ir apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_t = AP_{t-1}A^T + Q, \quad (2.9)$$

čia  $Q$  – proceso triukšmo kovariacijos matrica.

$$Q = \begin{pmatrix} \delta_x^2 & \delta_x \delta_y & \delta_x \delta_\theta \\ \delta_y \delta_x & \delta_y^2 & \delta_y \delta_\theta \\ \delta_\theta \delta_x & \delta_\theta \delta_y & \delta_\theta^2 \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

kai matricos dedamosios - variacija  $\delta_x^2$ , standartinis nuokrypis  $\delta_x$  ir kovariacija  $\delta_x\delta_y$  - aprašomos atitinkamai:

$$\begin{aligned}\delta_x^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N}, \\ \delta_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N}}, \\ \delta_x\delta_y &= \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i)}{N}.\end{aligned}\tag{2.11}$$

Kai  $Q$  vertės didelės – Kalmano filtras reaguoja į didelius matavimų pasikeitimus tarp dviejų laiko momentų palyginti su mažomis  $Q$  vertėmis.

Kalmano filtro stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_t = \frac{P_t H^T}{H P_t H^T + R}\tag{2.12}$$

čia  $R$  – matavimų kovariacijos matrica, savo forma atitinkanti  $Q$  matricą. Kai esame tikri matavimų tikslumu,  $R$  matricos vertės bus artimos nuliui.

Norint rasti tiriamajai sistemai optimalias  $Q$  ir  $R$  matricų vertes iš eksperimentinių duomenų, reikalinga iš pasirinkto duomenų reikalingas verčių perrinkimas pasirinktu žingsniu siekiant mažiausios paklaidos nuo tikrosios vertės. Verčių perrinkimas gali būti atliekamas pasirinktame intervale, išvengiant bereikalingų perskaičiavimų, kai paklaida pradeda tendencingai didėti.

$H$  matrica šiuo atveju atitinka vienetinę matricą, kadangi numatoma sistemos būseną tiesiogiai konvertuojama į sistemos matavimus  $x$ ,  $y$  ir  $\theta$ :

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.\tag{2.13}$$

Kaip minėta praeitame skyriuje, EKF sudaro du žingsniai – spėjimo ir atnaujinimo. Spėjimo žingsnyje apskaičiuojama sistemos būsenos matrica  $X_t$  bei būsenos kovariacijos matrica  $P_t$ . Atnaujinimo žingsnyje pirmiausia apskaičiuojama matavimo nuo numatytos vertės paklaida  $y_t$ :

$$y_t = z_t - H X_t + w_t,\tag{2.14}$$

čia  $z_t$  matavimo kintamųjų vektorius.

Apskaičiuojamos matavimo nuo numatytos vertės paklaidos kovariacija  $S_t$ :

$$S_t = H_t P_t H_t^T + R_t\tag{2.15}$$

Skaičiavimams panaudojant turimas matricas, galima apskaičiuoti Kalmano stiprinimo koeficientą  $K_t$ :

$$K_t = \frac{P_t H^T}{H P_t H^T + R} = \frac{P_t H^T}{S_t},\tag{2.16}$$

Paskutiniai atnaujinimo žingsnio perskaičiavimai – atnaujinti numatyta būseną  $X_t$  pagal  $y_t$  ir atnaujinti numatomos būsenos kovariaciją  $P_t$ .

### 2.3. Dalelių filtras

Realizuojant dalelių filtrą objekto pozicionavimui, kai turimos matuojamos vertės  $x$  ir  $y$  koordinatės bei posūkio kampas  $\theta$ , pirmiausia apsibrėžiame dalelių pradinę būseną  $p_i$  su pradinėmis svorių vertėmis  $\omega_i$ :

$$\begin{aligned} p_i &= (x_i, y_i, \theta_i), \\ \omega_i &= \frac{1}{N}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

čia  $N$  – dalelių skaičius.

Sekantys dalelių filtro taikymo žingsniai – spėjimo, svorių atnaujinimo ir numatymo žingsniai.

Spėjimo žingsnyje, kiekvienai modelio dalelei pritaikome judesio modelį:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + v \Delta t \cos(\theta_i), \\ y'_i &= y_i + v \Delta t \sin(\theta_i), \\ \theta'_i &= \theta_i + \Delta\theta_i. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Matavimų atnaujinimo žingsnyje perskaičiuojame svorių reikšmes:

$$\omega_i \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x_{meas} - x_i)^2}{\delta_x^2} + \frac{(y_{meas} - y_i)^2}{\delta_y^2} + \frac{(\theta_{meas} - \theta_i)^2}{\delta_\theta^2}\right)\right), \quad (2.19)$$

čia  $\delta_x^2$  – standartinis  $x$  koordinatės nuokrypis, o  $x_{meas}$  – išmatuota  $x$  koordinatės vertė. Apskaičiavus svorius kiekvienai dalelei, svoriai normalizuojami – apskaičiuojamas jų vidurkis. Dalelėms  $p_i$  pritaikomi naujai apskaičiuoti svoriai.

Numatymo žingsnyje apskaičiuojama numatoma sistemos būseną  $(x_t, y_t, \theta_t)$  iš dalelių su svoriais vidurkio reikšmių.

$$\begin{aligned} \bar{x}_t &= \sum \omega_i x_i, \\ \bar{y}_t &= \sum \omega_i y_i, \\ \bar{\theta}_t &= \text{atan2}\left(\sum \omega_i \sin(\theta_i), \sum \omega_i \cos(\theta_i)\right). \end{aligned} \quad (2.20)$$

### 3. Tiriamosios aplinkos ir įrangos paruošimas

Atstumo matavimo naudojant plačiajuosčių ryši pritaikomumas ir tikslumas bei pozicionavimo algoritmai šia tyrime realizuojami ne simuliacinėje erdvėje, tačiau eksperimentiškai Kauno technologijos universiteto konvejerinės sistemos laboratorijoje.

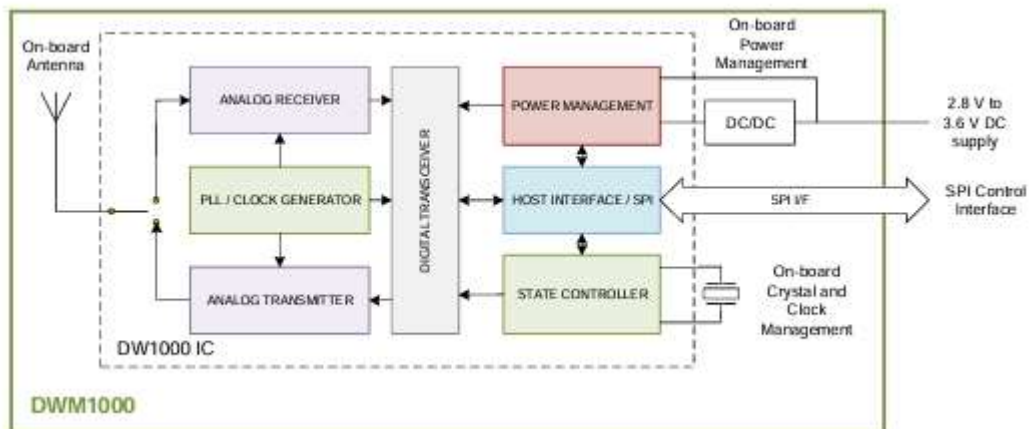
#### 3.1. Aparatūrinės įrangos pasirinkimas

Eksperimentui atlikti parenkami mažmeninėje rinkoje prieinami komponentai, kurių teorinės specifikacijos atitinka tyrimo tikslus. Šio tyrimo eksperimentiniam realizavimui reikalingi DWM1000 UWB moduliai, ESP32 mikrovaldikliai, *Raspberry Pi 3B+* valdiklis. Taip pat eksperimente naudojamas *Siemens 1516F-3 PN/DP* bei *KingDrive V3* valdiklis, tačiau šio projekto apimtyje į tyrimo dalį neįeina.

##### 3.1.1. UWB modulis DW1000

Plačiajuosčio ryšio realizavimui pasirinktas Qorvo DW1000 modulis dėl savo prieinamumo (kainos ir pasiūlos atžvilgiu) bei gamintojo pateikiamos išsamios dokumentacijos.

DW1000 susideda iš analoginės priekinės dalies (ir RF, ir bazinės juostos), kurioje yra imtuvas ir siųstuvas bei skaitmeninė galinė dalis, kuri yra sąsaja su pagrindiniu procesoriumi, priima duomenis iš pagrindinio procesoriaus, kad būtų galima perduoti gautus duomenis į pagrindinį procesorių per standartinę SPI (*Serial Peripheral Interface*) sąsają.



9 pav. DWM1000 modulio aparatūrinė blokinė diagrama (Decawave Ltd, 2017)

DW1000 modulis palaiko 110kbps, 850kbps arba 6.8Mbps duomenų perdavimo spartas, anot gamintojo užtikrinamas mažesnis kaip 10 cm pozicionavimo tikslumas. Palaiko radijo ryšio dažnių juostą nuo 3.5GHz iki 6.5GHz.

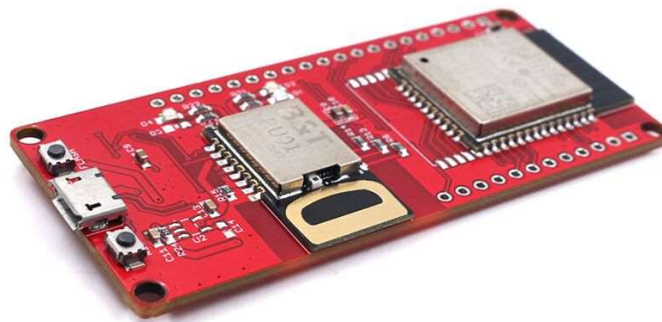


10 pav. DW1000 modulis (Qorvo Inc., 2024)

### 3.1.2. Mikrovaldiklis ESP32

Kaip mikroprocesorius komunikacijai su UWB moduliu buvo pasirinktas ESP32 mikrovaldiklis kartu įgalinantis WiFi sąsają, kuri šio tyrimo eksperimentinei daliai puikiai tinka dėl savo paprasto konvertavimo į laidinę Ethernet komunikaciją remiantis tuo pačiu TCP/IP protokolu.

ESP32 procesorius turintis du branduolius leidžia išskirstyti atskiras užduotis skirtingiems branduoliams su priskirtais prioritetais – taip išlaikant realaus laiko sistemą.



11 pav. ESP32-Wrover Espressif mikrovaldiklis su DW1000 moduliu (makerfabs.cc, 2023)

### **3.2. Eksperimentinės programinės įrangos, komunikacijų paruošimas**

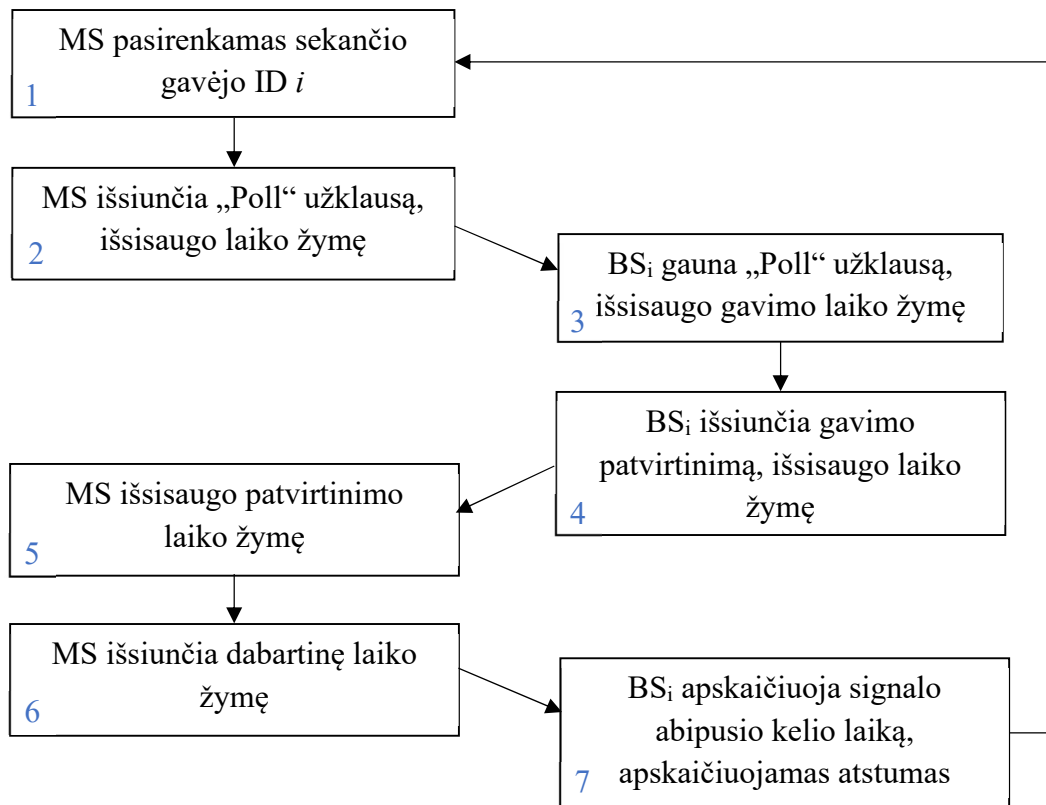
Šiame poskyryje pristatomi žingsniai tyrimo eksperimentinei daliai realizuoti – UWB komunikacijos realizavimas, UWB antenų kalibravimo principas, akselerometro ir giroskopo duomenų apjungimas posūkio kampui apskaičiuoti, MS koordinacijų apskaičiavimas dvimatėje erdvėje bei komunikacijos ir duomenų apsikeitimo tarp skirtingų tyrime naudojamų įrenginių realizavimas.

#### **3.2.1. Plačiajuosčio ryšio modulių tarpusavio komunikacijos realizavimas**

Plačiajuosčio ryšio modulių tarpusavio komunikacija paremta užklauso-atsako principu, kai MS ir BS gali ir veikia imtuvo ar siųstuvo režimu, priklausomai nuo modulio būsenos.

Siekiant realizuoti sistemą veikiančią realiu laiku būtina realizuoti pertraukčių logiką UWB komunikacijai – perduodant duomenų paketą išsiuntimui ar jį priimant pertraukiamas procesoriaus darbas ir apdorojamas siunčiamas ar gaunamas paketas. Pertrauktys leidžia pasiekti didesnę UWB komunikacijos greitaveiką (šiuo darbe ~200 Hz) ir sumažinti prarastų paketų tikimybę. Tačiau kartu tai lemia ir didesnę sistemos kompleksumą. Kartu su UWB komunikacijos palaikymu kuo didesne sparta, bazinės ir mobilios stoties mikrovaldikliai privalo lygiagrečiai atlikti ir kitas – IMU duomenų nuskaitymo ar duomenų persiuntimo į RPI – užduotis. ESP32 mikrovaldikliai naudoja 2 branduolių *Xtensa 32-bit LX6* procesorių ir tai galima išnaudoti programiškai paskirstant programos užduotis atitinkamiems branduoliams, siekiant išlaikyti užduočių lygiagretumą ir prioritetų paskirstymą tarp jų. Darbe naudojami UWB moduliai kartu su ESP32 mikrovaldikliu paruošiami atitinkamai pagal jų – mobilios ar bazinės stoties – funkciją remiantis algoritmu pateiktu 12 pav.

Realizuojama komunikacija aktyvi tik tarp dviejų UWB modulių vienu metu, nors visi UWB moduliai veikia vienoje dažnių juostoje. Duomenų paketo gavėjas apsprendžiamas MS prieš pradėdamas naują užklauso iteraciją pasirenkant gavėjo ID (žr pav. 12, 1 žingsnis). Kiekvienas UWB modulis turi unikalų ID. Visos aplinkoje esančios BS gavę užklauso ir patikrinę užklauso numatyto gavėjo ID ją priima arba praleidžia. Priėmus užklauso (3 žingsnis) BS išsisaugo pirminės „Poll“ užklauso laiko žymę pagal savo laiko matavimą (tai svarbu tik dėl vienai iteracijai skirto laiko matavimo). BS išsiunčia užklauso patvirtinimo pranešimą MS, išsisaugo laiko žymę (4 žingsnis). Tai pirmoji laiko žymė naudojama TWR laiko matavimui.



**12 pav.** UWB komunikacijos veiksmų seka atstumo matavimui tarp dviejų modulių remiantis TWR metodu

MS gavusi užklauso patvirtinimą iš tos pačios BS, išsisaugo laiko žymę ir išsiunčia savo atsaką BS. BS gavusi galutinį atsaką išsisaugo gavimo laiko žymę ir pagal 3.1 lygtį apskaičiuoja atstumą iki MS (7 žingsnis). Tuo pat metu MS išsiunčia užklausa sekančiai BS<sub>i+1</sub>.

Komunikacija galėtų būti supaprastinta ir realizuota su mažiau persiunčiamų pranešimų tarp MS ir BS, tačiau šioje realizuojamoje sistemoje buvo neišvengiama pradėti komunikacijos užklausa iš MS pusės, kitu atveju keli BS siųsdami užklausa į MS pertraukinėtų MS ir kitų BS procesorių darbą lygiagrečiai taip trukdydami sklandžiai komunikacijai ir reikalingų lygiagrečių užduočių atlikimui.

ToA sprendimui trukdo MS ir BS laikrodžių sinchronizacijos problema, kurios puikiai nepavyko įgyvendinti dėl pernelyg didelių laikrodžių dreifavimų.

Remiantis UWB modulio gamintojo Qorvo pateiktomis specifikacijomis (13 pav.) ir signalo stiprumu atitinkamose dažnių juostose (žr. 2 priedą) siekiant kuo aukštesnės signalo kokybės, mažiau prarastų paketų, kuo didesnės stabilios komunikacijos greitaveikos, pasirinktas UWB kanalas nr. 5, kurio centrinis juostos dažnis 6489.6 MHz, dažnių juostos plotis 499.2 MHz, komunikacijos impulsų dažnis 64MHz. Bendrai komunikacijos impulsų dažnio pasirinkimą riboja persiunčiamų duomenų baitų kiekis, tačiau šiame darbe persiunčiama tik iki 18 baitų laisvai pasirenkamų duomenų (laiko žymės, posūkio kampas, ID ir pan.) – gamintojas rekomenduoja rinktis 64 MHz dažnį.

Channel number	Centre frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Preamble Codes (16 MHz PRF)	Preamble Codes (64 MHz PRF)
1	3494.4	499.2	1, 2	9, 10, 11, 12
2	3993.6	499.2	3, 4	9, 10, 11, 12
3	4492.8	499.2	5, 6	9, 10, 11, 12
4	3993.6	1331.2 *	7, 8	17, 18, 19, 20
5	6489.6	499.2	3, 4	9, 10, 11, 12
7	6489.6	1081.6 *	7, 8	17, 18, 19, 20
<b>N.B.</b> For correct operation of the DW1000 the software must take care to only allow selection of those preamble codes appropriate for the configured PRF.				
* The DW1000 has a maximum receive bandwidth of 900 MHz.				

13 pav. DWM1000 palaikomi UWB kanalai ir rekomenduojami dekodavimo numeriai (Decawave Ltd, 2017)

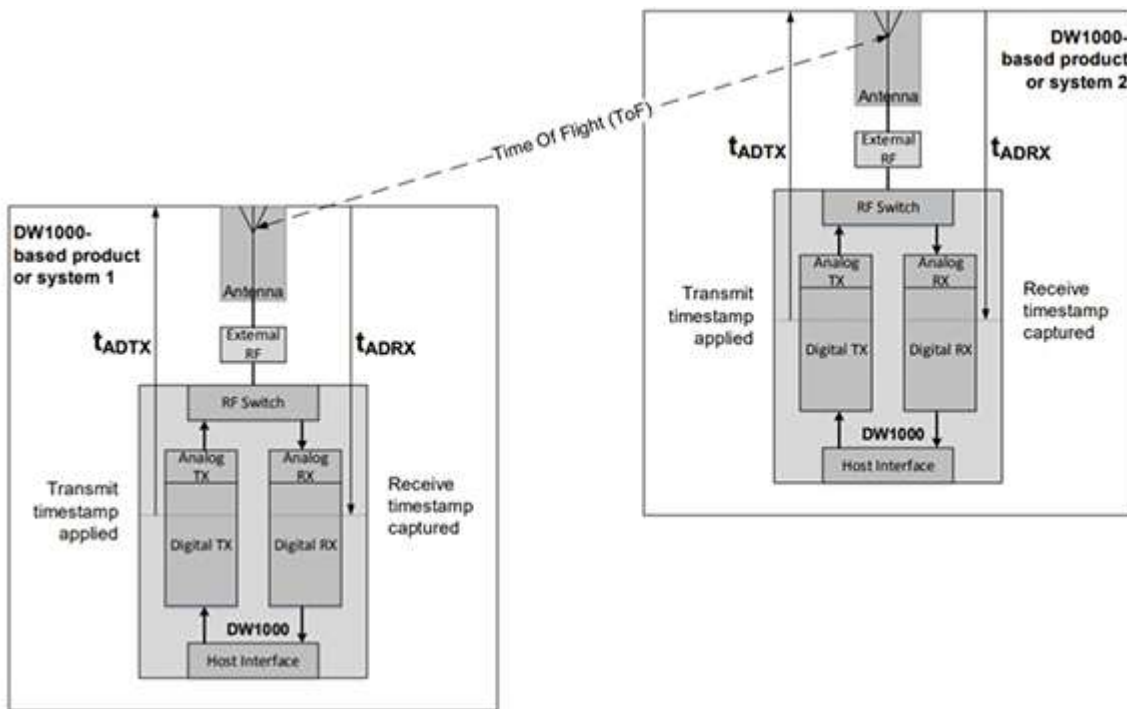
### 3.2.2. Plačiajuosčio ryšio imtuvo/siūstuvo antenų kalibravimas

Nepriklausomai nuo plačiajuosčio ryšio komunikacinių modulių ir antenų gamintojo bei jų gamybos sprendimų, praktiškai yra neįmanoma pagaminti identiškų mikroschemų, kad komunikacijos delsa tarp mikroprocesoriaus ir UWB antenos būtų identiška dešimčių nanosekundžių tikslumu. Delsa milisekundžių ar net nanosekundžių eilėje turi svarbią įtaką ToA laiko skaičiavimams norint realizuoti atstumo skaičiavimus. UWB modulių gamintojai, tokie kaip Qorvo, NXP ar Microchip Technology, delsos kalibracijos aparatūriškai atlikti negali, tad tai privalu atlikti naudotojui programiniu lygmeniu.

Bendrai modulio delsa atsiranda tarp signalo aptikimo antena ir gauto duomenų paketo perskaitymo mikroprocesoriuje ar paketo suformavimo mikroprocesoriuje ir signalo perdavimo į anteną duomenų išsiuntimui. Šis laikas gali variuoti, priklausomai nuo modulio gamintojo sprendimų ir naudojamų komponentų bei gamybos proceso, kelių šimtų nanosekundžių ribose. Antenos delsa turi būti atimama iš apskaičiuoto laiko tarp išsiūsto ir gauto paketo:

$$t_{meas} = t_{ADTX} + ToA + t_{ADRX}, \quad (3.1)$$

Kur  $t_{meas}$  bendrasis laikas tarp išsiūsto ir gauto paketų,  $t_{ADTX}$  – siūstuvo antenos delsa,  $t_{ADRX}$  – imtuvo antenos delsa, o  $ToA$  – atvykimo laikas.

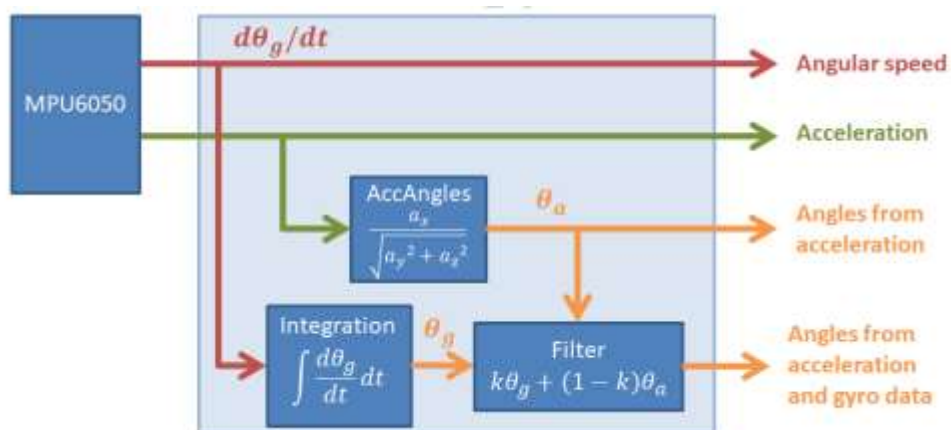


14 pav. Siųstuvo ir imtuvo antenos delta (makerfabs.cc, 2022)

Šiam tyrimui atlikti, ruošiant tyrimo eksperimentinę erdvę, parengiamas algoritmas surasti mažiausią paklaidą nuo tikrojo atstumo tarp dviejų UWB modulių, abiejų veikiančių imtuvo ir siųstuvo režimais.

### 3.2.3. Akselerometro ir giroskopo duomenų sintezė (ang. *fusion*)

Siekiant įtraukti ir akselerometro bei giroskopo duomenis apskaičiuoti sekamo objekto posūkio kampą xy koordinatių sistemoje naudojamas MPU6050 IMU modulis. Modulis per I2C komunikaciją gali perduoti linijinį pagreitį  $m/s^2$  ir kampinį greitį  $rad/s$ , tačiau norint gauti posūkio kampą reikia pirminius matavimus perskaičiuoti.



15 pav. Akselerometro ir giroskopo duomenų apjungimas tikslesniems posūkio matavimams gauti (Romain JL Fetick, 2021)

Posūkio kampai apskaičiuoti tik iš akcelerometro duomenų yra paveikti triukšmų ir yra netikslūs, tačiau tikslesnius rezultatus galima gauti apjungus akcelerometro ir giroskopo duomenis (ang. sensor fusion).

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

, čia  $\alpha$  pasisukimo kampas apie modulio Y ašį, o  $\beta$  pasisukimo kampas pagal modulio X ašį. Galima prilyginti  $\beta = \theta_x$ , kadangi pasisukimo kampas pagal X ašį atitinka pagrindinę MPU6050 ašį, tad gravitacijos vektorių galima aprašyti:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = -g \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \theta_x \\ \cos \alpha \cos \theta_x \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Posūkio kampus galima išreikšti kaip akcelerometro matavimų funkcijas:

$$\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} = \frac{\sin \alpha}{|\cos \alpha|} \quad (3.4)$$

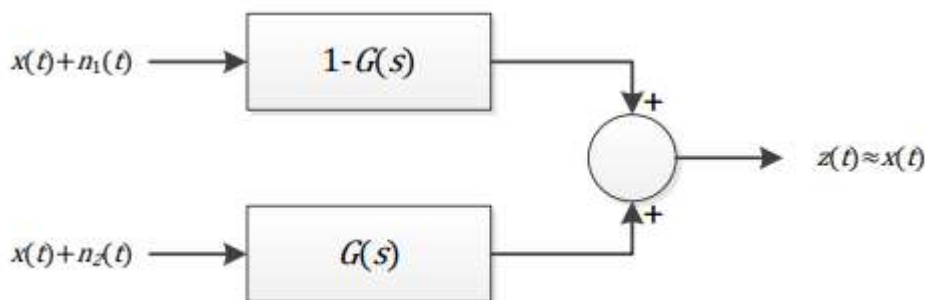
$$\frac{a_y}{a_z} = -\tan \theta_x$$

Bei posūkio kampas pagal Y ašį:

$$\tan \phi_x = \operatorname{sgn}(a_z) \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \quad (3.5)$$

$$\tan \phi_y = \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}$$

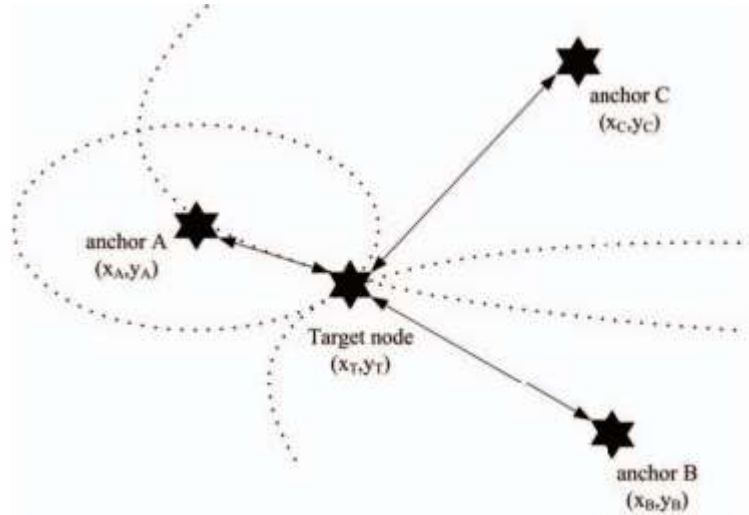
Kad galėtume apjungti giroskopo ir akcelerometro duomenis naudojame komplementarųjį filtrą – vienam matavimui pritaikius žemo dažnio filtrą, o kitam – aukšto dažnio, galutinis rezultatas gaunamas sudėjus filtrų rezultatus. Kai akcelerometro ir giroskopo matavimai  $x(t)$ , kiekvienas jų turi savąjį triukšmą  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ . Filtrų dažninės charakteristikos  $G_1(s)$  ir  $G_2(s)$  teoriškai sudaro visą dažnių spektrą.



16 pav. Komplementarusis filtras bendroju atveju [22]

### 3.2.4. Koordinačių dvimatėje erdvėje apskaičiavimas

Apskaičiavus atstumus  $d_i$  tarp  $BS_i$  ir MS, galima apskaičiuoti MS koordinatės dvimatėje erdvėje. Šiame tyrime pasitelkiamas triliteracijos principas, paremtas geometrinio koordinačių apskaičiavimu. Žinant BS absoliučias koordinatės ir turint bent 3 atstumus iki MS remiantis Pitagoro teorema galima gauti MS  $x$  ir  $y$  koordinatės.



17 pav. Schematinė diagrama triliteracijos principui [23]

Tariant, kad MS koordinatės yra  $(x_T, y_T)$ , o  $BS_i$  atitinkamai  $(x_i, y_i)$  atstumas  $d_i$  nuo MS iki kiekvienos BS gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d_i = \sqrt{(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2} \quad (3.6)$$

Atstumas  $d_i$  iki  $BS_i$  gali būti prilyginamas kaip apskritimo spindulys, kai apskritimo centras  $BS_i$ . Teoriškai, trijų apskritimų, kai jų centrai  $BS_A$ ,  $BS_B$  ir  $BS_C$ , lankų susikirtimo taško koordinatės yra MS koordinatės. Trilateracijos principas išreiškiamas formulėmis:

$$\begin{cases} (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = d_A^2 \\ (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = d_B^2 \\ (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = d_C^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Transformuodami šias formules, galima tiesiogiai apskaičiuoti MS koordinatės  $(x_T, y_T)$ :

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_A - x_C) & 2(y_A - y_C) \\ 2(x_B - x_C) & 2(y_B - y_C) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_A^2 - x_C^2 + y_A^2 - y_C^2 + d_C^2 - d_A^2 \\ x_B^2 - x_C^2 + y_B^2 - y_C^2 + d_C^2 - d_B^2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

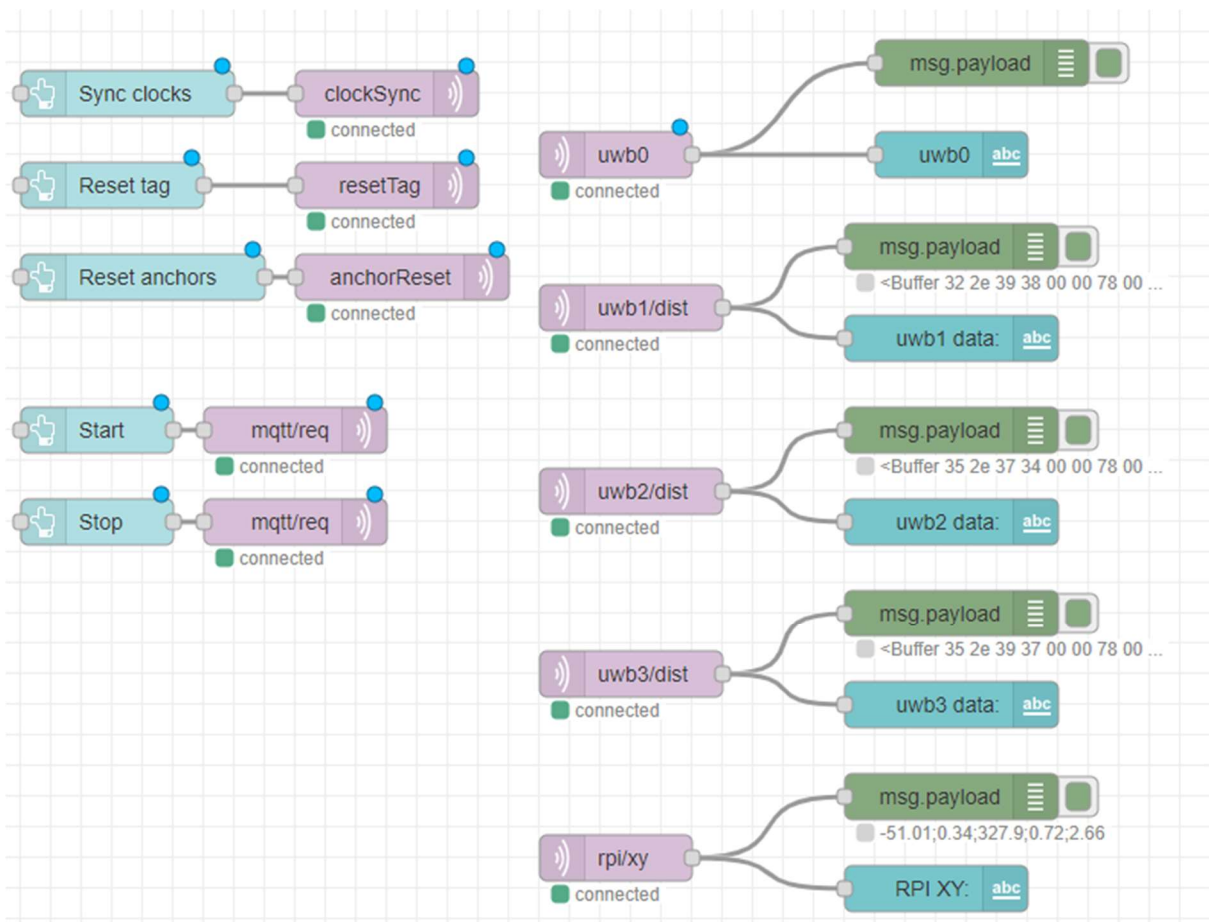
Realiose situacijose, dėl matavimo paklaidų, triukšmų geometrinio požiūriu šie trys apskritimų lankai ne visada susikerta – iš to gaunamos apskaičiuotų MS koordinatų paklaidos.

### 3.2.5. Komunikacijos ir informacijos persiuntimo tarp įrenginių realizavimas

Apskaičiavus atstumus  $d_i$  nuo kiekvienos  $BS_i$  iki MS bei žinant posūkio kampą, šiuos duomenis reikalinga perduoti į pagrindinį valdiklį (šiuo metu Raspberry Pi) MS koordinatų apskaičiavimui bei tolimesniam duomenų numatymui ir optimizavimui. Šiam tikslui pasirinktas MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) standartas pranešimų apsikeitimui tarp kelių įrenginių TCP/IP protokolu. Standartas paremtas „publish/subscribe“ principu ir serverio bei kliento struktūra. Šio tyrimo atveju klientai – UWB moduliai ir Siemens valdiklis, o RPI veikia kaip ir kaip klientas ir kaip serveris.

MQTT paremta paprastu pranešimų pagal atitinkamą temą principu. Kliento pusėje pasirenkama tema ar temos, kurias norima „prenumeruoti“ ir gauti įeinančius pranešimus pagal atitinkamą temą. Lygiai taip pat, pagal pasirinktą temą galima išsiųsti pranešimą į MQTT serverį, iš kurio kiti klientai šį pranešimą gali nuskaityti.

Tokiu principu šiame tyrime kiekviena BS perduoda savo laiko žymę, apskaičiuotą atstumą iki MS bei iš MS gautą posūkio kampą tuo laiko momentu. Lygiagrečiai RPI nuskaityto gautus duomenis bei atlikus reikiamus duomenų perskaičiavimus išsiunčia MS koordinatas į MQTT serverį, tolimesniam jų naudojimui Siemens valdiklio pusėje. MQTT serveris perduoda MS koordinatas Siemens valdikliui.



18 pav. MQTT konfigūracija Node-RED aplinkoje

#### 4. Tyrimo rezultatų analizė

Šiame skyriuje pristatomi tyrimo metu eksperimentiškai gauti UWB tarpusavio atstumo nustatymo rezultatai, objekto pozicijos statinėje ir dinaminėje sistemose nustatymo rezultatai, pritaikius skirtingus duomenų optimizavimo metodus.

##### 4.1. UWB TWR statinės pozicijos nustatymo tikslumo analizė

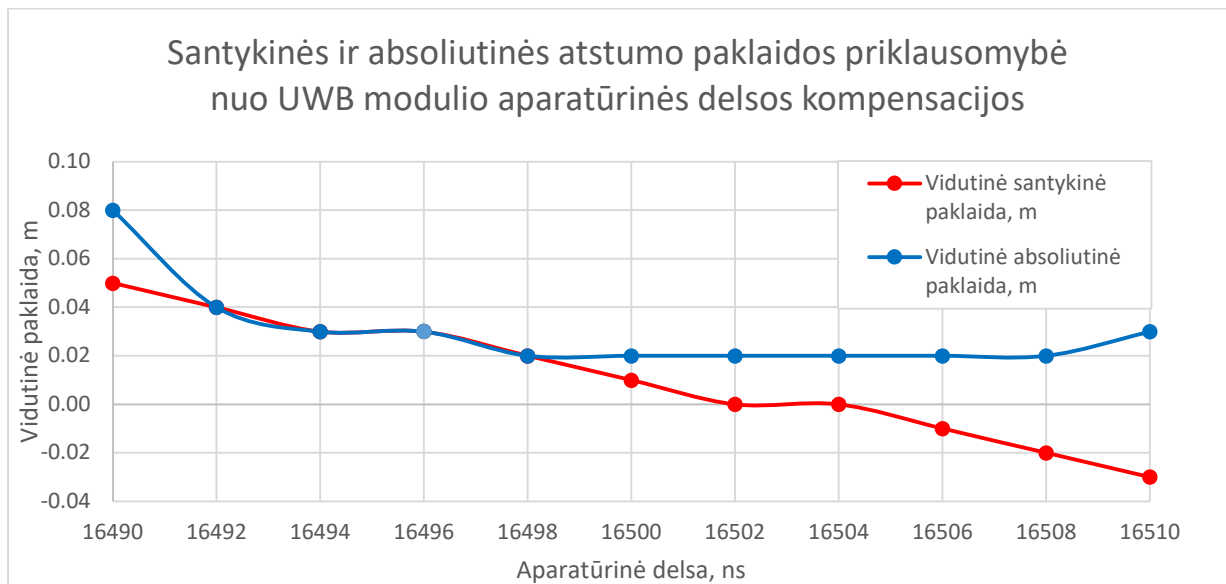
Ekperimentui realizuoti pirmiausia atlikta UWB modulių kalibracija ir statinio objekto pozicijos tikslumo nustatymo analizė.

Kalibruojant UWB modulių antenų delšą realizuotu minimalios absoliutinės paklaidos algoritmu surasti optimalios antenų delsos kiekvienam naudojamam UWB moduliui. Toliau pateikiami duomenys atitinka vieno iš UWB modulio kalibravimo metu gautas reikšmes.

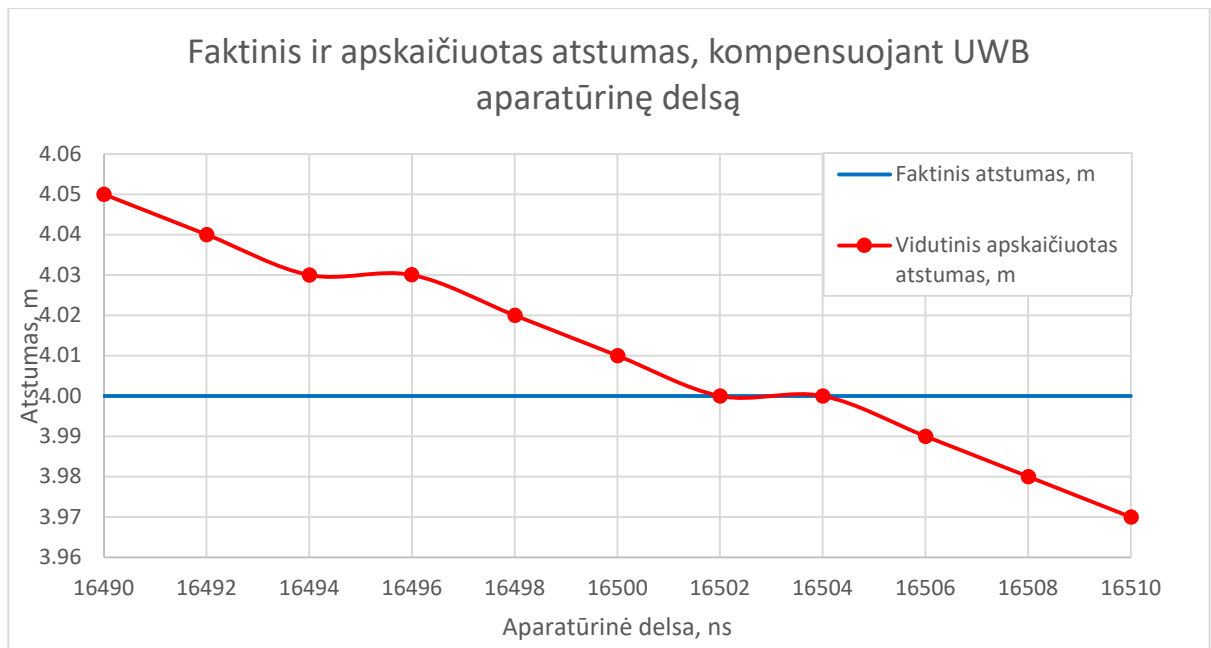
Keičiant antenos delšą proporcingai kinta ir perskaičiuotas atstumas tarp dviejų UWB modulių – didinant delsos dydį didėja ir perskaičiuotas atstumas.

**1 lentelė** Santykinės ir absoliutinės atstumo matavimo paklaidos keičiant UWB modulio aparatūrinę delšą

Eilės Nr.	Aparatūrinė delsa, ns	Vidutinis apskaičiuotas atstumas, m	Vidutinė santykinė paklaida, m	Vidutinė absoliutinė paklaida, m	Faktinis atstumas, m
1	16480	4.05	0.05	0.06	4.00
2	16482	4.04	0.04	0.06	
3	16484	4.05	0.05	0.05	
4	16486	4.03	0.03	0.04	
5	16488	4.02	0.02	0.03	
6	16490	4.01	0.01	0.03	
7	16492	4.01	0.01	0.02	
8	16494	3.99	-0.01	0.03	
9	16496	3.99	-0.01	0.02	
10	16498	3.98	-0.02	0.03	
11	16500	3.97	-0.03	0.04	

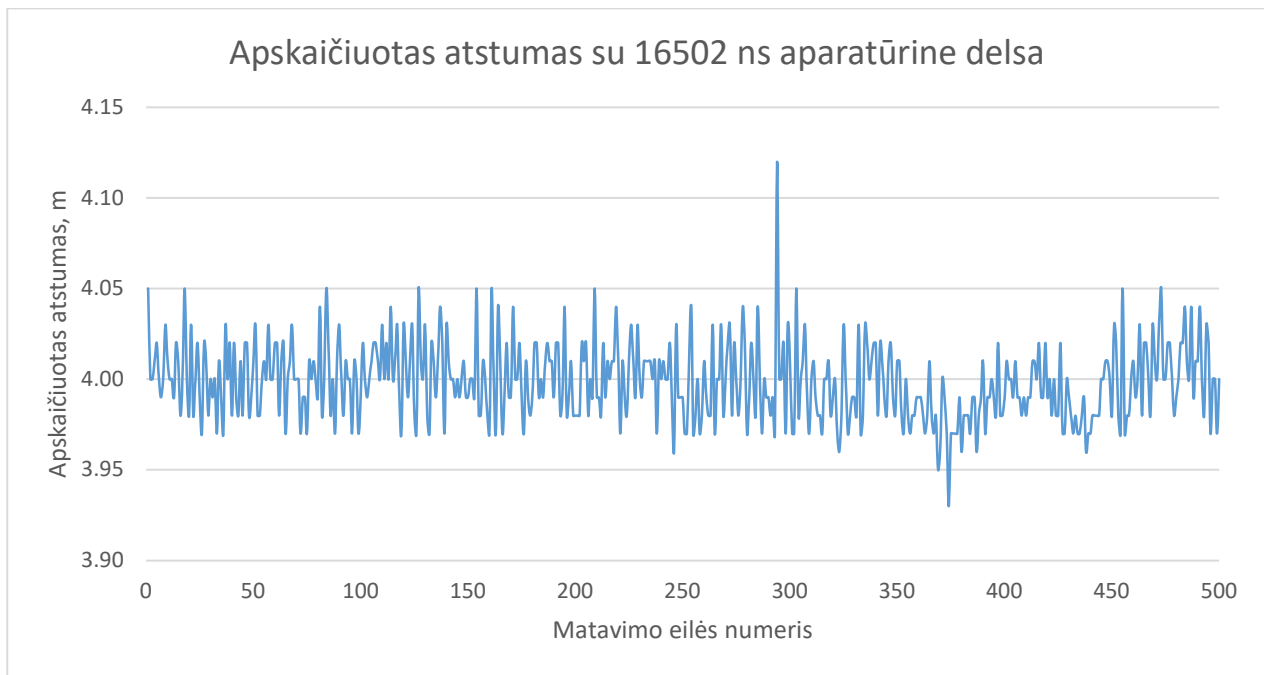


**19 pav.** Santykinės ir absoliutinės atstumo paklaidos priklausomybė nuo UWB modulio aparatūrinės delsos kompensacijos



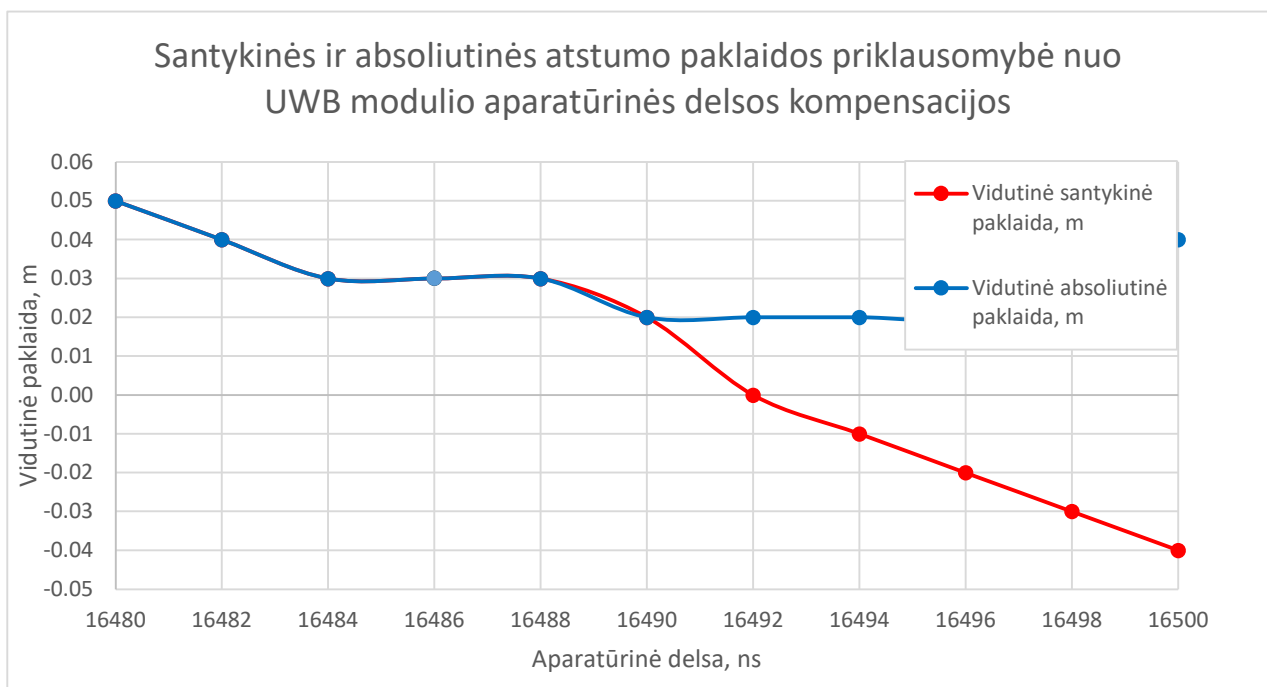
**20 pav.** Faktinis ir apskaičiuotas atstumas, kompensuojant UWB aparatūrinę dellą

Atliekant optimalios delsos paiešką, kalibruojamam moduliui rasta optimali aparatūrinė delsa lygi 16502 ns. Šią vertę naudojant atstumo perskaičiavimui gauti matavimai pavaizduoti grafike:



**21 pav.** Apskaičiuotas atstumas su 16502 ns aparatūrine delsa UWB moduliui Nr. 1, kai faktinis atstumas lygus 4.00 m

Aukščiau pateikti duomenys gauti tiriant sistemą, kurioje nėra fizinių kliūčių ar kitų išorinių trukdžių signalo sklidimui (ang. *Line of Sight, LOS*). Darbo apimtyje plačiau neanalizuojama sistema su kliūtimis signalui (*Non Line of Sight, NLOS*), tačiau atlikti tyrimai rodo, kad matavimo tikslumas krenta ir apskaičiuotos vidutinės optimalios aparatūrinės delsos vidutiniškai 10 ns mažesnės nuo LOS sistemos apskaičiuotos delsos.

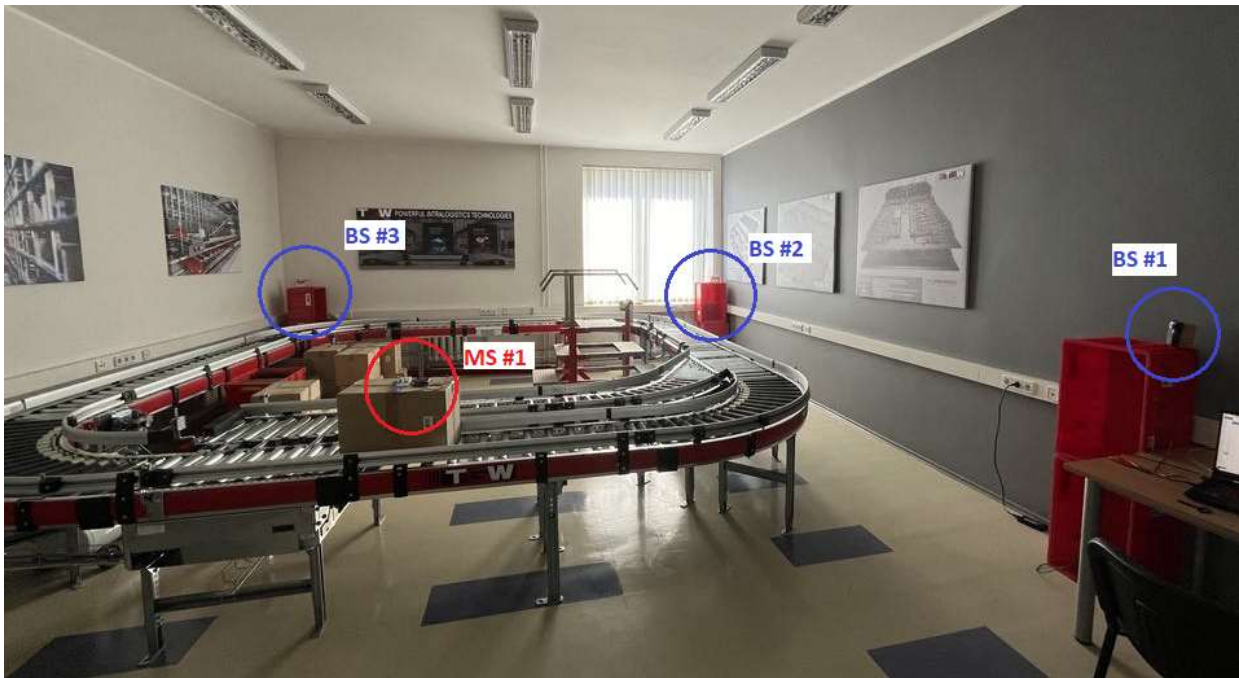


**22 pav.** Santykinės ir absoliutinės atstumo paklaidos priklausomybė nuo UWB modulio aparatūrinės delsos kompensacijos NLOS sistemoje

## 4.2. Pozicijos apskaičiavimo tikslumo analizė statiniam objektui dvimatėje erdvėje

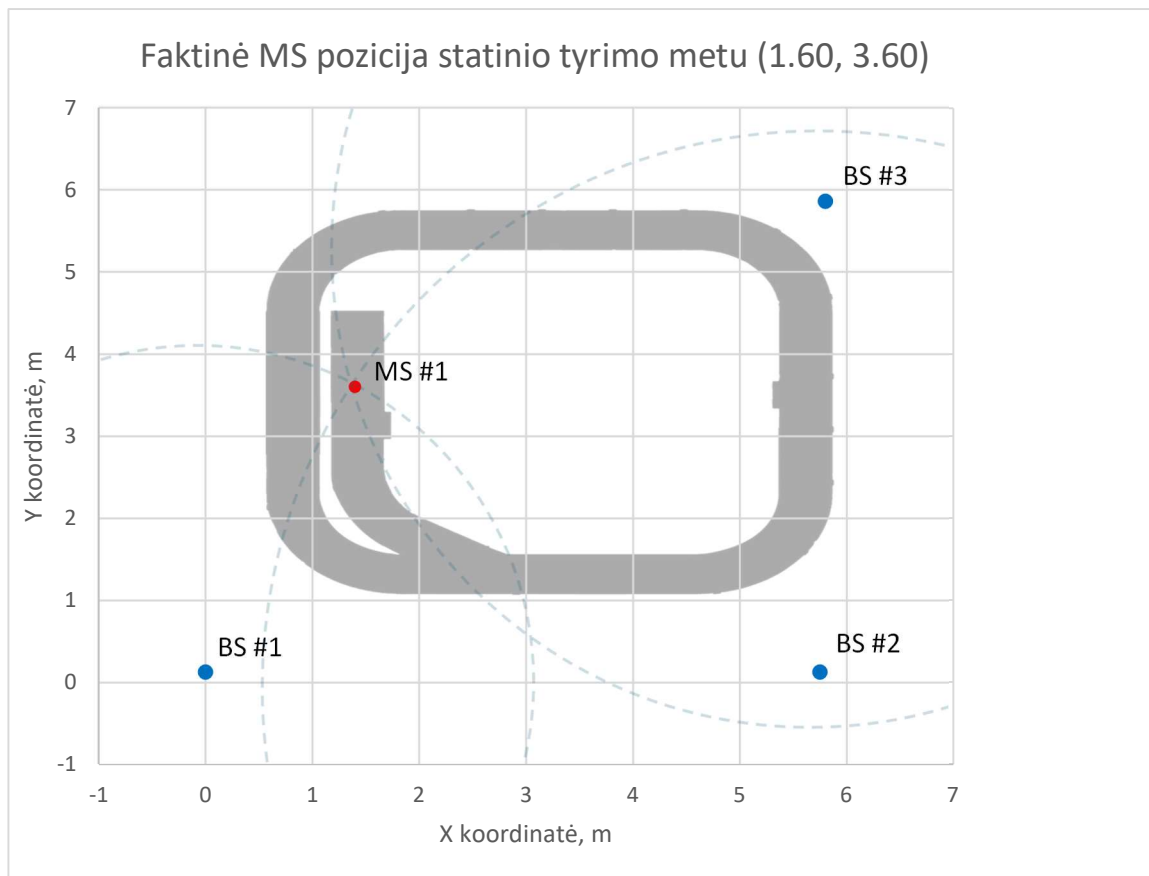
Suradus optimalias aparatūrinės UWB antenų delfas kiekvienam UWB moduliui, atliktas pozicijos tikslumo tyrimas statinėje sistemoje (nekeičiant objekto pozicijos).

Tyrimas atliekamas eksperimentiškai Kauno technologijos universiteto patalpose, konvejerinių sistemų laboratorijoje. Trys bazinės UWB stotys (BS #1-3) atitinkamai išdėstomos patalpos kampuose, tiksliai išmatuojamos jų santykinės koordinatės erdvėje, pasirinkus vieną tašką patalpoje, kaip koordinatų atskaitos tašką  $(0, 0)$ .



23 pav. tyrimo eksperimentinis realizavimas KTU konvejerinių sistemų laboratorijoje.

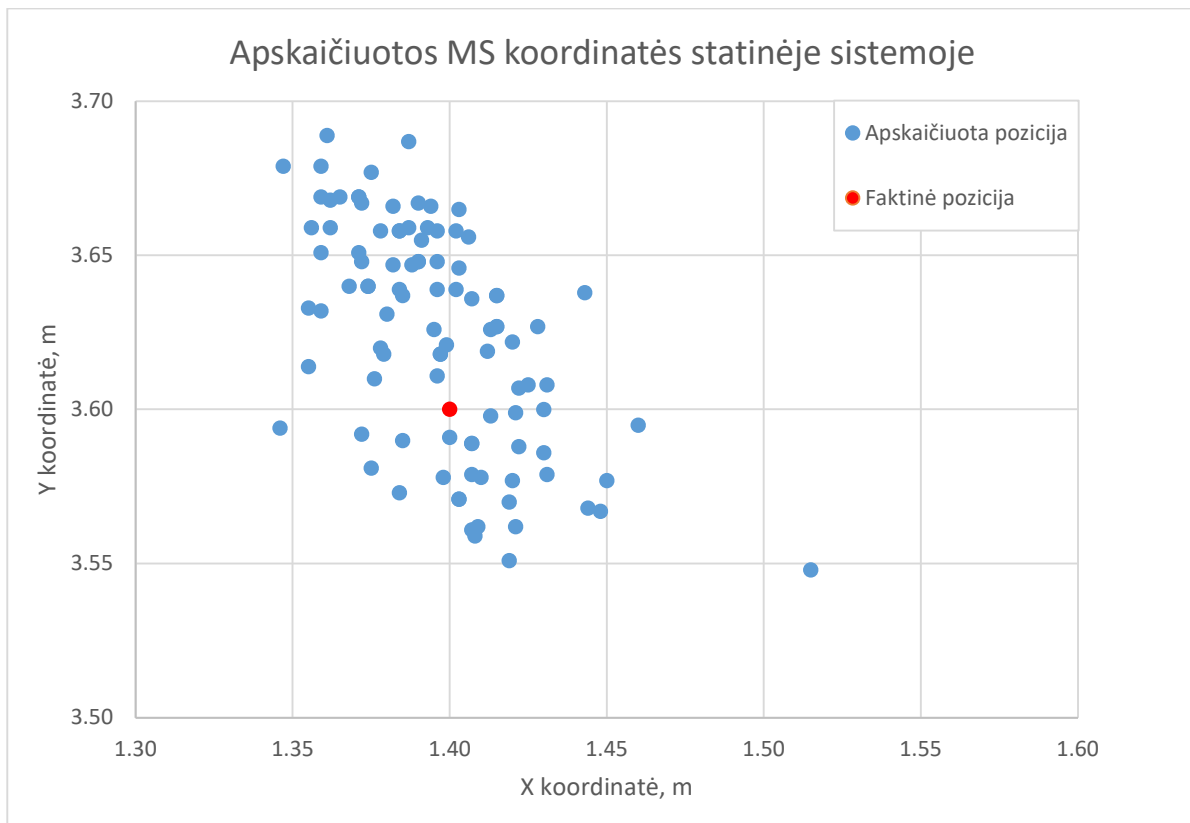
Bazinių stočių BS #1, BS #2 ir BS #3 santykinės koordinatės eksperimento metu nekinta ir yra atitinkamai lygios  $(0, 0.13)$ ,  $(5.75, 0.13)$  ir  $(5.80, 5.86)$ , o statiniam tikslumo tyrimui atlikti mobilios stoties MS #1 pozicijai pasirenkamos koordinatės lygios  $(1.40, 3.60)$ .



**24 pav.** Faktinė MS pozicija statinio tyrimo metu (*1.60, 3.60*) dvimatėje koordinatinių sistemoje

24 pav. pavaizduotos santykinės bazinių ir mobilios stoties pozicijos bei atstumą nuo  $BS_i$  iki MS apibrėžiantis spinduliai, pažymėti punktyrine linija.

Siekiant įvertinti dvimatėje sistemoje pozicijos nustatymo tikslumą, atliekamas pakartotinis tyrimas kaskart atliekant 100 iteracijų, kai kiekvienas matavimas atliekamas kas 10 ms. Vieni iš gautų rezultatų pavaizduoti 25 pav. Atstumas matuojamas nuo kiekvienos BS iki MS ir triliteracijos principu kaskart apskaičiuojamos MS  $xy$  koordinatės.



**25 pav.** Apskaičiuotų statinės MS koordinatėjų grafinis atvaizdavimas dvimatėje koordinatėjų sistemoje

Iš apskaičiuotų pozicijų gauname vidutinę reikšmę x ašimi lygią 1.40 m (paklaida 0.00 m), o y ašimi – 3.62 m (paklaida 0.02 m). Tačiau turint, omeny jog atlikta 100 atskirų matavimų kas 10 ms, suminis matavimų laikas (1s) yra per ilgas realaus laiko sistemai, tad turime vertinti mažesniame laiko intervale gautus duomenis. Tai sąlygoja maksimalaus matavimų nuokrypio svarbą. Iš atvaizduoto duomenų rinkinio žinomas didžiausias 0.12 m nuokrypis x ašimi ir 0.09 m y ašimi. Kaip pagrindinis matavimų tikslumo rodiklis apskaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis (ang. Root mean square deviation, RSMD) pagal formulę:

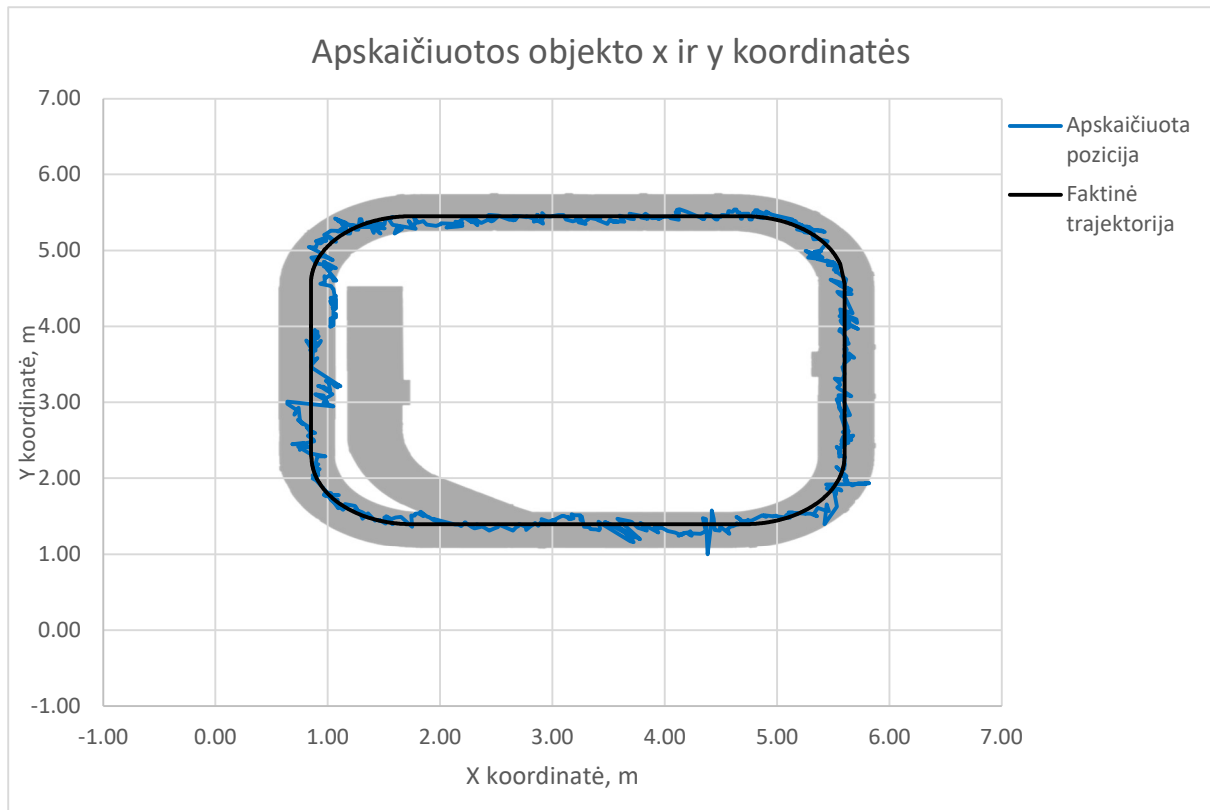
$$RSMD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2)}{n}}, \quad (4.1)$$

čia  $x$  ir  $y$  – x ir y koordinatės,  $n$  – matavimo iteracijos.

Remiantis pateikiamais duomenimis vidutinis kvadratinis nuokrypis gautas lygus 0.051. Teoriškai RSMD rodiklis lygus 0 sąlygoja idealiai išmatuotus duomenis, šiuo atveju galima teigti, jog nuokrypis santykinai mažas, tačiau didžiausi išmatuotų duomenų nuokrypiai stipriai sąlygoja duomenų tikslumą dinaminėje sistemoje.

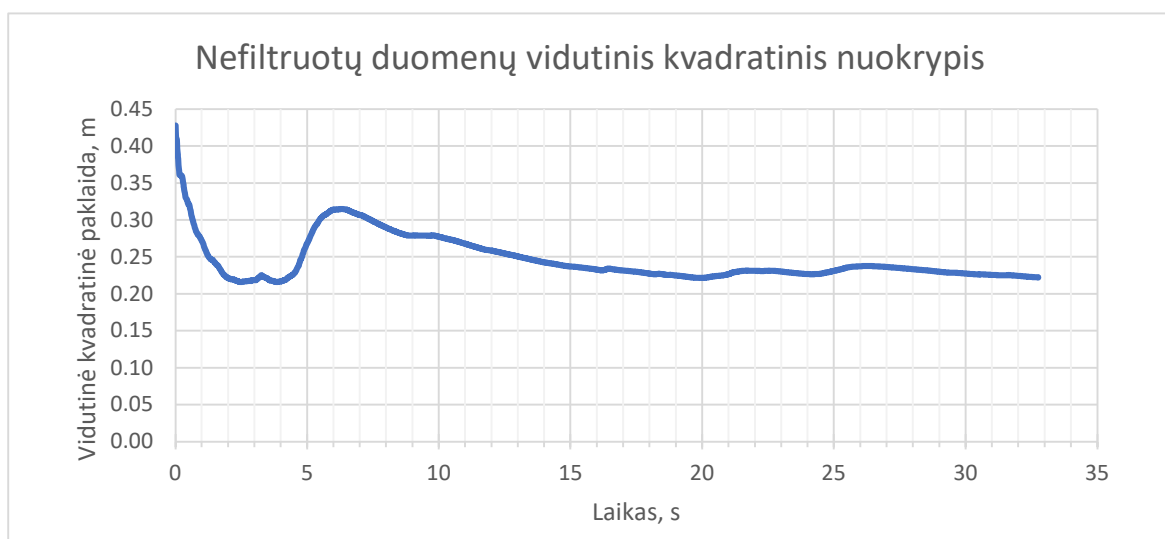
### 4.3. Pozicijos apskaičiavimo tikslumo analizė dinaminiam objektui dvimatėje erdvėje

Judančio objekto pozicijos nustatymui naudojama KTU konvejerinių sistemų laboratorijoje esanti konvejerių linija, transportuojant MS cikliškai ratu pastoviu 0.6 m/s linijiniu greičiu. Bazinių stočių išdėstymas erdvėje nekinta.



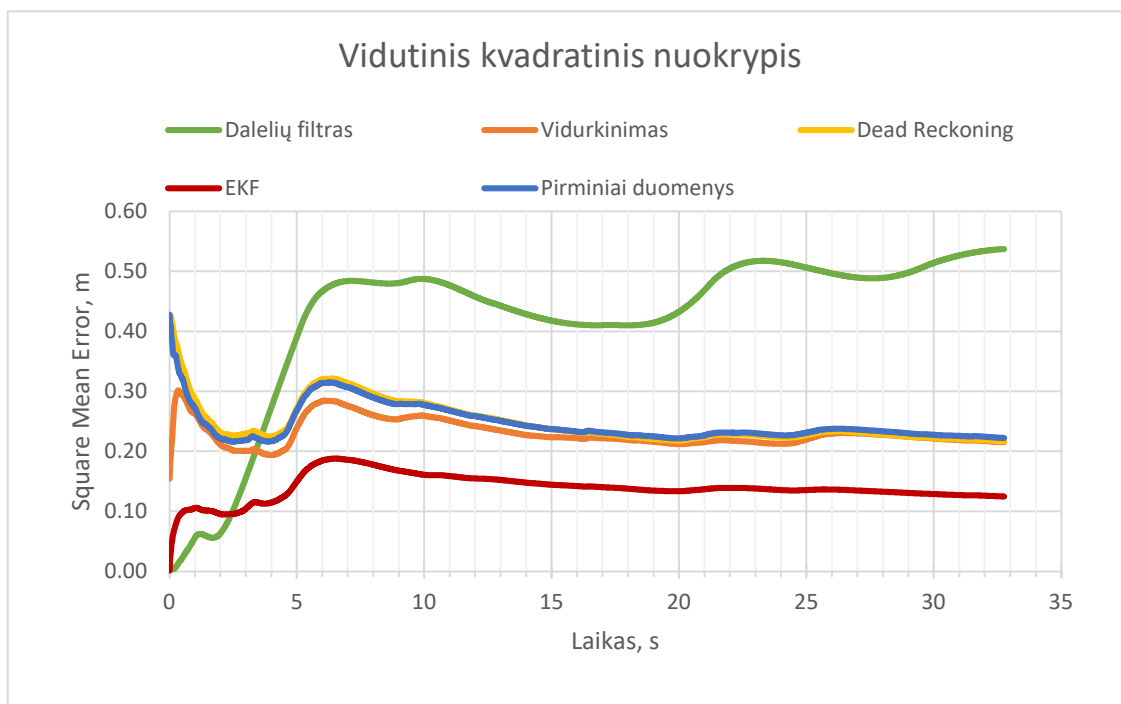
26 pav. Apskaičiuotos x ir y koordinatės, objektui judant pastoviu greičiu nustatyta trajektorija

Grafike pateikiami nefiltruoti duomenys, iš kurių pastebima nemažai netikslumų, paklaidų. Matavimo ciklo gale (trajektorijos pabaigos taške) suminis vidutinis kvadratinis nuokrypis lygus 0.22 m.



27 pav. Pradinių (nefiltruotų) duomenų vidutinis kvadratinis nuokrypis

Siekiant optimizuoti duomenis ir patikslinti objekto pozicijos numatymą, pritaikomi tyrime analizuojami metodai – koordinacių išskaičiavimo (*Dead Reckoning*), Išplėstinio Kalmano filtro ir Dalelių filtro metodai. Kartu, palyginimui, pritaikytas ir elementarus matavimų vidurkinimo metodas. Gauti rezultatai pateikiami grafike:



**28 pav.** Vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai pritaikius skirtingus tyrime analizuojamus duomenų optimizavimo metodus.

**2 lentelė** Vidutinių kvadratinių nuokrypių rezultatai taikant skirtingus duomenų optimizavimo ir numatymo metodus

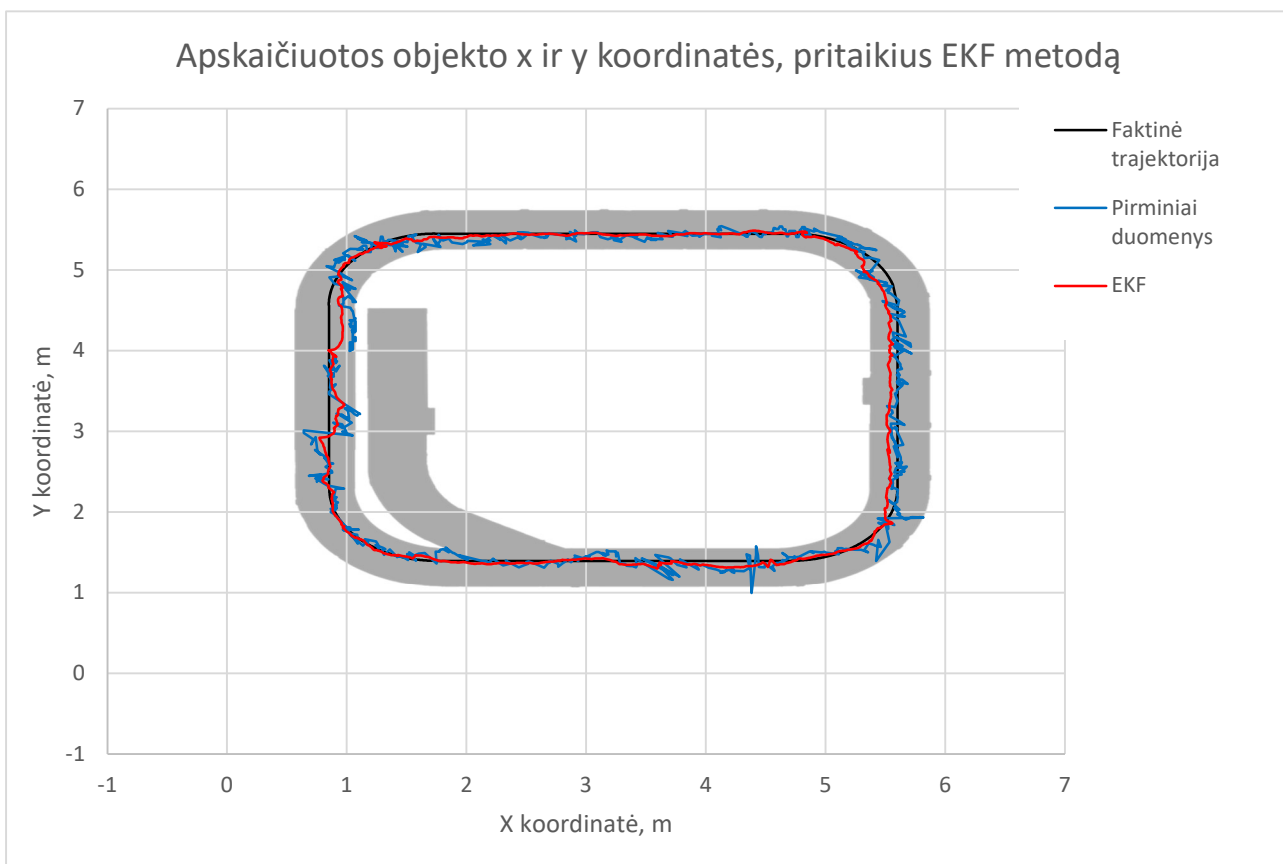
Vidutinis kvadratinis nuokrypis					
Metodas	Pirminiai duomenys	Duomenų vidurkinimas	Koordinacių išskaičiavimas	Išplėstinis Kalmano filtras	Dalelių filtras
RSMD, m	0.222	0.215	0.217	0.125	0.537

28 pav. grafike ir 2 lentelėje matyti, jog išskirtinai netikslūs ( $\text{RMSD} \approx 0.537$  m) ir netgi prastesni rezultatai gauti pritaikius Dalelių filtrą – šių rezultatų priežastis gautos objekto posūkio kampo paklaidos ir triukšmai bei apskaičiuoto objekto linijinio greičio paklaidos dėl netikslų pirminių matavimų.

28 pav. grafike laiko atskaitos pradžioje pastebimas nuokrypio skirtumas tarp skirtingu pritaikytų metodų paaiškinamas tuo, jog pritaikant EKF ir Dalelių filtrą būtina apibrėžti pradinę sistemos būseną – šio tyrimo atveju buvo pasirinkta faktinė objekto pozicija, laiko atskaitos pradžioje. Tuo tarpu, pritaikant vidurkinimo ar koordinacių išskaičiavimo (*Dead Reckoning*) metodus, pradinė sistemos būseną neapibrėžiama ir pasikliaujama pirminiais gautais duomenimis laiko momentu  $t_0$ .

Duomenų vidurkinimo būdu, kai kaskart vedamas vidurkis šiuo atveju 5 matavimų, proporcingai prarandama sistemos greitaveika. Siekiant objekto pozicijos nustatymo realiu laiku, šis metodas tampa nevalidus, tad buvo pritaikytas tik dėl tikslo palyginti gautus pozicijos rezultatus su pirminiais ir kitais

metais optimizuotais rezultatais. Duomenų vidurkinimo metodu gauti rezultatai savo tikslumu artimi koordinatžių išskaičiavimo metodu gautiems rezultatams, jų vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo pirminių duomenų skiriasi tik apie 2 – 3%.



**29 pav.** Gauti judančio objekto pozicijos rezultatai, pritaikius EKF metodą

Geriausi rezultatai ( $RSMD \approx 0.125$  m) gauti pritaikius Išplėstinį Kalmano filtrą. Iš pateikiamo grafiko (29 pav.) matyti, kad EKF ganėtinai sklandžiai išfiltruoja pirminių duomenų triukšmus ir numatytų pozicijų koordinatės sąlyginai arti faktinės trajektorijos. Gautų rezultatų vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo pirminių duomenų skiriasi 44.7 %, t.y. EKF metodu gauti rezultatai yra 44.7 % tikslesni, nei pirminiai duomenys ir vidutinė kvadratinė paklaida lygi 12.5 cm (2 lentelė).

## Rezultatai ir išvados

1. Paruoštu UWB trilateracijos algoritmu pasiekta minimali pozicionavimo paklaida nejudančio objekto sistemoje lygi 5.1 cm (tyrime naudotų UWB modulių gamintojo specifikacijoje nurodomas ~10 cm pozicionavimo tikslumas).
2. Rezultatai su didžiausia paklaida gauti pritaikius Dalelių filtro metodą (vidutinis kvadratinis nuokrypis 53.7 cm) dėl darbe pristatytų eksperimentą įtakančių veiksnių, sąlyginai neefektyvūs duomenų optimizavimo rezultatai gauti pritaikius ir vidurkinimo bei koordinacių išskaičiavimo metodus (vidutinis kvadratinis nuokrypis 21.5 – 21.7 cm).
3. Eksperimentinio tyrimo metu palyginus skirtingus – koordinacių išskaičiavimo, Išplėstinio Kalmano filtro, Dalelių filtro – duomenų filtravimo metodus mažiausią paklaidą judančio objekto pozicionavimo sistemoje užtikrino realizuotas Išplėstinis Kalmano filtras. Pasiektas minimalus vid. 12.5 cm kvadratinis nuokrypis (pozicionavimas 44.7% tikslesnis nei pirminiai, nefiltruoti duomenys).
4. Pirminių duomenų paklaidas sąlygoja keletas svarbių veiksnių – pamesti UWB komunikacijos paketai, matavimo triukšmai, akcelerometro ir giroskopo matavimų dreifas ir triukšmai bei ribota eksperimente naudojamų UWB modulių greitaveika. Norint pasiekti geresnius rezultatus, pirmiausia svarbu užtikrinti UWB komunikacijos stabilumą į sistemą įvedant daugiau bazinių UWB stočių bei didesnę UWB antenų spinduliuotės stiprį, t.y. pasirinkti galingesnes antenas priklausomai nuo eksperimentinės aplinkos ir siekiamo uždengti ploto. Tęsiant pristatytą tyrimą būtų svarbu ištirti kelių judančių objektų pozicionavimo problematiką, pasiekiamą sistemos greitaveiką bei šių objektų pozicionavimo tikslumą.
5. Pasiektas pozicionavimo tikslumas (12.5 cm) ir sistemos greitaveika (10 ms) leistų atlikti tolimesnius tyrimus siekiant realizuoti objektų sekimo ir transportavimo sistemas remiantis žinomomis objektų pozicijomis, neapsiribojant fiksuotos trajektorijos konvejerinėmis sistemomis, tačiau ir neapibrėžtų trajektorijų transportavimo sistemomis, kaip magnetinės levitacijos stalai ar mobilios robotinės sistemos, taip pat įvairiose kasdienėse ar pramonės srityse, pavyzdžiui darbuotojų ar mobilios technikos srautų ir judėjimo trajektorijų erdvėje optimizavimui ar siuntų sekimui logistikos sandėliuose.

## Literatūros sąrašas

1. B. V. Krishnaveni, K. S. Reddy and P. R. Reddy, "An Introduction to the TOA measurement for UWB indoor localization Systems," *2021 5th Conference on Information and Communication Technology (CICT)*, Kurnool, India, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CICT53865.2020.9672423.
2. N. Smaoui, M. Heydariaan and O. Gnawail, "Single-Antenna AoA Estimation with UWB Radios," *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Nanjing, China, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCNC49053.2021.9417526.
3. Z. Yang, X. Zhu, W. Yang and Z. Zhao, "Wireless Synchronized UWB TDoA Positioning System based on IEEE 802.15.4z," *2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium*, Chengdu, China, 2021, pp. 1-2, doi: 10.23919/ACES-China52398.2021.9581566.
4. S. Lan, C. Yang, B. Liu, J. Qiu and A. Denisov, "Indoor real-time multiple moving targets detection and tracking using UWB antenna arrays," *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, TAS, Australia, 2015, pp. 1-4.
5. Yuekui Zhang, Yunxia Chu, Yunfang Fu, Zhixiang Li, Yufei Song, „UWB Positioning Analysis and Algorithm Research“, *Procedia Computer Science*, Volume 198, 2022, Pages 466-471, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.271>.
6. W. Fu, Q. Fu et al. (2020) “An UWB indoor location algorithm for location services.” *Journal of Chongqing University* 43(07):84-90
7. K. Yang et al., "Research on UWB/IMU location fusion algorithm based on GA-BP neural network," *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, Shanghai, China, 2021, pp. 8111-8116, doi: 10.23919/CCC52363.2021.9549463.
8. Molodyakov, Sergey & Lavrov, Alexander. (2015). An optoelectronic processor for registration of radiation of pulsars. *Instruments and Experimental Techniques*. 58. 132-140. 10.1134/S0020441214060074.
9. S. Lan, C. Yang, B. Liu, J. Qiu and A. Denisov, "Indoor real-time multiple moving targets detection and tracking using UWB antenna arrays," *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, TAS, Australia, 2015, pp. 1-4.
10. Z. Liu, J. Li, A. Wang, X. Cheng and A. Wang, "Design and Implementation of UWB/MIMU Tightly-coupled System for Indoor Positioning," *2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS)*, Wuhan, China, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/UPINLBS.2018.8559945.
11. D. B. Jeong and N. Y. Ko, "Dead Reckoning of a Mobile Robot in 2-Dimensional Special Euclidean Group," *2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 1069-1071, doi: 10.23919/ICCAS55662.2022.10003795.
12. M. Brossard, A. Barrau and S. Bonnabel, "AI-IMU Dead-Reckoning," in *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 5, no. 4, pp. 585-595, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIV.2020.2980758.
13. R.V. Garcia, P.C.P.M. Pardal, H.K. Kuga, M.C. Zanardi, Nonlinear filtering for sequential spacecraft attitude estimation with real data: Cubature Kalman Filter, Unscented Kalman Filter and Extended Kalman Filter, *Advances in Space Research*, Volume 63, Issue 2, 2019, Pages 1038-1050, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.003>.
14. Pileckas, E. 2011. Aviaciniai skrydžio valdymo prietaisai ir sistemos : mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2011. 308 p.

15. M. Z. Win and R. A. Scholtz. Impulse radio: how it works. *IEEE Communications Letters*, 2:36–38, 1998.
16. I. Guvenc, C.-C. Chong, F. Watanabe, and H. Inamura. NLOS identification and weighted least-squares localization for UWB systems using multipath channel statistics. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008(1), Aug 2007.
17. Tanguy Risset, Claire Goursaud, Xavier Brun, Kevin Marquet, Fabrice Meyer. UWB Ranging for Rapid Movements. *IPIN 2018*, Sep 2018, Nantes, France. pp.1-8, 10.1109/IPIN.2018.8533820. hal01951454
18. Monte Carlo method, wikipedia.org
19. Del Moral, Pierre (1996). "Non Linear Filtering: Interacting Particle Solution". *Markov Processes and Related Fields*. 2 (4): 555–580.
20. Y. Xu, K. Xu, J. Wan, Z. Xiong and Y. Li, "Research on Particle Filter Tracking Method Based on Kalman Filter," *2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Xi'an, China, 2018, pp. 1564-1568, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469578.
21. K. Comandur, Y. Li and S. Nannuru, "Particle Flow Gaussian Particle Filter," *2022 25th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, Linköping, Sweden, 2022, pp. 1-6, doi: 10.23919/FUSION49751.2022.9841354.
22. P. 2011. *Kalman Filter for Beginners: with MATLAB Examples*. Translated by Chae, G. H. 1- oji vertimo laida. Lexington. 233 p. ISBN: 978-1463648350.
23. W. Liu, Y. Xiong, X. Zong and W. Siwei, "Trilateration Positioning Optimization Algorithm Based on Minimum Generalization Error," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, Ukraine, 2018, pp. 154-157, doi: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525748.
24. Romain JL Fetick, MPU6050 library documentation, January 2021

## Priedai

1 priedas. Qorvo DWM1000 modulio antenos spinduliuotės stiprio priklausomybė nuo posūčio kampo

