

Miika Kaltio

AIKADILAATIOPAIKANMÄÄRITYS

Merenkulun koulutusohjelma

2018

AIKADILAATIO PAIKANMÄÄRITYS

Kaltio, Miika

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Merenkulun koulutusohjelma, Merikapteeni

Maaliskuu 2018

Ohjaaja: Ahvenjärvi, Sauli

Sivumäärä: 25

Kuvat: 8

Asiasanat: paikanmääritys, aikadilaatio

Tämän tutkimuksen tavoite oli tutkia aikadilaation aikaansaamaa efektiä yhteistyössä satelliittijärjestelmän kanssa, ja luoda tältä pohjalta teoreettisesti toimiva menetelmä, sekä funktiot minkä avulla voidaan laskea havaitsijan paikka maapallon pinnalla. Tämä tutkimus keskittyy eritoten atomikellon aikadilaatioon suhteessa toiseen atomikelloon, mitä kautta saadaan tarvittavat tiedot havaitsijan paikan määrittämiseen.

Tutkimus on pääosiltaan suoritettu vuosina 2016 - 2018 satakunnan ammattikorkeakoulussa, sekä seilatessani suomen kauppalaivastossa kansimiehenä. Tutkimuksen pohjana olen käyttänyt Albert Einsteinin suhteellisuusteoriaa.

Tärkein havainto tutkimuksessa oli että havaitsijan rotaationopeus maapallon pinnalla voidaan määrittää aikadilaation avulla. Funktio laskee havaitsijan latitudin ja tämän jälkeen metodi yhteistoiminnassa vain yhden satelliitin kanssa kykenee määrittämään havaitsijan paikan muutaman asteen desimaalin tarkkuudella. Tulokset osoittavat että yhden paikanmäärityksen tekemiseen ei tarvita neljää satelliittia, kun käytetään tätä metodia.

Tulokset osoittavat että järjestelmä toimii teoreettisella tasolla ja sillä on kyky parantaa laivastomme elektronisen navigoinnin toimintavarmuutta.

TIME DILATION POSITIONING

Kaltio, Miika

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree programme in maritime management, sea captain

March 2018

Supervisor: Ahvenjärvi, Sauli

Number of pages: 25

Pictures: 8

Keywords: time dilation, positioning

The purpose of this study was to investigate the effects of time dilation in correlation with the GPS-system to create algorithms in order to reduce the dependence on the existing satellites. This study is specifically concentrating at the effect of time dilation on atomic clocks on our planet's surface in relation to each other's position from which the position of the observer can be calculated.

The empirical part of this study was conducted in 2016 and 2017. This study was conducted at Satakunta University of Applied Sciences and during voyages at sea by myself. The principle of the method is based on the theory of relativity by Albert Einstein.

The most important finding was that time dilation can be used to determine the rotational speed of the observer, and if the rotational speed is known the latitude of the observer can be calculated. The results show that using these small differences in the rate of passage of time due to time dilation by velocity we do not need multiple GPS satellites for positioning.

These results suggest that we could create a more cost effective and reliable system for maritime positioning by using this method.

SISÄLLYS

1. JOHDANTO.....	6
1.1 Opinnäytetyön taustaa, tarkoitus ja tavoitteet.....	6
1.2 Käsitteet.....	6
2. AIKADILAATIO.....	7
2.1 Historia.....	7
2.2 Nopeuden vaikutus aikaan.....	7
2.3 Gravitaation vaikutus aikaan.....	9
2.4 Matemaattinen teoriatausta.....	10
3. MAAPALLON OMINAISUUDET.....	11
3.1 Pyörimisnopeus.....	11
3.2 Kehänopeus.....	11
3.3 Elliptisyys.....	12
3.4 Gravitaatio.....	12
4. MENETELMÄ.....	13
4.1 Toimintaperiaate.....	13
4.2 Funktio.....	14
4.2.1 Yhtälön rakentaminen.....	15
4.2.2 Ellipsoidin huomiointi.....	16
4.2.3 Esimerkkilasku.....	17
4.2.4 Virhelähteet.....	17
4.3 Merenkulun sovellukset.....	18
4.3.1 Vauhtivirhe.....	18
4.3.2 Latitudin muuttuminen mittauksen aikana.....	19
4.3.3 Ekvaattorin ylitys.....	20
4.4 Satelliitti.....	20
4.4.1 Latitudi.....	21
4.5 Longitudin määrittäminen ilman satelliittia.....	22
5. KÄYTTÖTARKOITUKSET.....	23

5.1 Hyödyt.....	23
5.2 Merenkulun käytännön sovellukset.....	23
6. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET.....	25

1 JOHDANTO

Tärkein informaatio merimiehelle navigoitaessa on aluksen paikka maapallon pinnalla. Navigointityö pohjautuu paikanmääritykseen. Ilman tätä tietoa ei turvallista merenkulkua voida harjoittaa. Moderni paikanmääritys tapahtuu tyypillisesti satelliittien avulla, USA:n hallinnoimaa GPS-järjestelmää ja muita kansainvälisiä satelliittinavigointijärjestelmiä hyödyntäen. (Yhdysvaltain viralliset www-sivut koskien GPS-järjestelmää 2018). Suomi ei ole näiden palveluiden suhteen omavarainen.

1.1 Opinnäytetyön taustaa, tarkoitus ja tavoitteet

Lähdin tutkimaan aihetta sillä ymmärsin että modernin fysiikan aikadilaatio-ilmiötä voidaan hyödyntää siten, että emme tarvitsisi GPS-järjestelmää paikanmääritykseen. Tarkoitukseni on kehittää paikanmääritysmenetelmä hyödyntäen maapallon fyysisiä ominaisuuksia, tässä tapauksessa eri latitudien kehänopeuksia ja gravitaatiokenttien muutoksia. Huomasin, että mikäli nämä ominaisuudet olisivat jotenkin mitattavissa havaitsijan paikalla, niin täten voisin näistä arvoista päätellä missä havaitsija on. Tavoitteeni tässä opinnäytetyössä on näitä faktoja hyödyntämällä kehittää teoreettisella tasolla toimiva paikanmääritysmenetelmä merenkulun tarpeisiin, ja esitellä se sellaisella tavalla, että kuka tahansa voi sen helposti ymmärtää.

1.2 Käsitteet

- GPS: Global positioning system
- STR: Special theory of relativity (erityinen suhteellisuusteoria)
- GALILEO: Euroopan satelliittijärjestelmä
- GSA: Global navigation satellite system agency

2 AIKADILAATIO

Tässä luvussa käydään läpi teoriataustaa tutkimukseen liittyen. Tutkimuksessa käytettävä ilmiö on aikadilaatio ja avaan sitä tässä luvussa sellaisella tavalla, että se on kenen tahansa ymmärrettävissä.

2.1 Historia

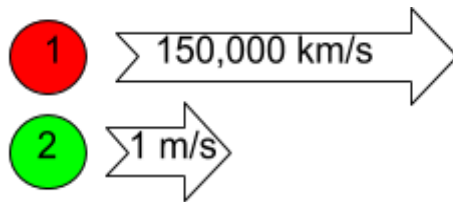
Alber Einstein kehitti suhteellisuusteorian 1900-luvun alussa. Einstein tunnetaan useimmiten massan ja energian välisen suhteen löytämisestä ja historiallisen kaavan $e = mc^2$ kehittämisestä. Alkuperäisessä STR julkaisussa Albert Einstein käsitteli kuitenkin monia muitakin asioita, kuten pituuden kontraktiota, universaalia nopeuden rajaa, ja eritoten aikadilaatiota. (Missisipin yliopiston www-sivut 2018.)

2.2 Nopeuden vaikutus aikaan

Ajankulun nopeus eri aika-avaruuden pisteissä suhteessa toiseen pisteeseen ei ole vakio. (Missisipin yliopiston www-sivut 2018). Tämä tarkoittaa sitä, että kokemasi ajankulun nopeus omassa paikassasi on aina sama, mutta kun sitä verrataan johonkin muuhun pisteeseen, niin havaitset toisen paikan ajankulun olevan nopeampaa tai hitaampaa riippuen vallitsevista olosuhteista. Teoria vaikuttaa ensisilmäyksellä vaikealta ymmärtää, sillä ihminen ei koskaan päivittäisessä elämässään koe ilmiön vaikutusta. Täten asian ymmärtämiseksi on tarpeen poistua ajatuksissa hetkeksi pois maan pinnalta.

Mitä tarkoittaa aikadilaatio? Ilmiön ymmärtämiseksi kuvitellaan kaksi atomia tyhjiään avaruuteen. Täten huomataan heti että nopeus ei ole mitään muuta kuin suhteellinen käsite. Mikäli toista atomia ei olisi olemassa, niin ei yksittäinen atomi liikkuisi millään nopeudelle mihinkään suuntaan. Atomi numero 1 liikkuu nopeudella 150,000 km/s (puolet valon nopeudesta [c]), ja atomi numero 2 liikkuu nopeudella 1 m/s samaan

suuntaan. Kun atomin 2 paikasta tarkastellaan atomia numero 1, niin huomataan jotain erittäin kummallista. Nopeammin liikkuvan atomin kello näyttää käyvän hitaammin kuin hitaammin liikkuvan atomin kello. Toisaalta nopeammin liikkuvan atomin näkökulmasta tämän kello näyttää kulkevan normaalisti, mutta hitaammin liikkuvan atomin kello käy nopeammin. Jos hetken päästä otettaisiin molempien atomien kellot samaan paikkaan, niin huomattaisiin että nopeammin liikkuvan atomin kello on jättänyt hitaammin liikkuvaan atomiin nähden. Olennaista on ottaa huomioon että aikadilaatio tapahtuu kaikilla nopeuksilla, olivatpa ne sitten pieniä tai suuria. Pienillä nopeuksilla aikadilaatiosta johtuvat muutokset ovat erittäin pieniä, mutta ne ovat mitattavissa jo olemassa olevilla laitteilla. (Scitechdaily:n www-sivut 2018).



Kuva 1. Aikadilaation havainnollistaminen

2.3 Gravitaation vaikutus aikaan

Ajankulun suhteelliseen nopeuteen vaikuttaa kappaleiden nopeuden eron lisäksi kappaleisiin vaikuttavat gravitaatiokentän voimakkuuden erot. Tämä tarkoittaa sitä, että voimakkaammassa gravitaatiokentässä oleva kappale suhteessa toiseen kappaleeseen, joka on heikommassa gravitaatiokentässä näkee heikommassa gravitaatiokentässä olevan kappaleen ajan kulkevan nopeammin. Toisinaan heikommassa gravitaatiokentässä oleva kappale havaitse voimakkaammassa gravitaatiokentässä olevan kappaleen ajankulun olevan hitaampaa. Aikadilaation kokonaisvaikutus on nopeudesta johtuvan aikadilaation ja gravitaatiosta johtuvan aikadilaation summa. (Missisipin yliopiston www-sivut 2018.)



Kuva 2. Gravitaatiokentän voimakkuuden vaikutus ajan kulkuun.

2.4 Matemaattinen teoriatausta

Aikadilaatio yhtälönä on mallia: $d = v(d) + g(d)$, jossa $v(d)$ tarkoittaa nopeuden aiheuttamaa aikadilaatiota ja $g(d)$ gravitation aiheuttamaa aikadilaatiota. Nopeuden muutoksesta aiheutuva dilaatio voidaan laskea kaavalla:

$$t_v = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 128).

Jossa:

t_v = tarkastelu-aika + aikadilaation määrä [s].

t_0 = Tarkastelu-aika [s].

v = Kappaleen nopeus suhteessa verrattavaan kohteeseen [m/s].

c = Valonnopeus [m/s].

Gravitaatiokentän voimakkuuden eroista aiheutuva dilaatio voidaan laskea kaavalla

$$t_g = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{2gR}{c^2}}}$$

(Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 128).

Jossa:

t_g = Tarkastelu-aika + aikadilaation määrä [s].

t_0 = Tarkastelu-aika [s].

g = Gravitaatiosta aiheutunut kiihtyvyys [m/s²].

R = Maapallon säde [m].

c = Valonnopeus [s].

3 MAAPALLON OMINAISUUDET

Tässä luvussa käydään läpi tämän tutkimuksen kannalta olennaisia maapallon ominaisuuksia.

3.1 Pyörimisnopeus

Tärkein elementti aikadilaation havainnollistamiseksi maapallon ominaisuuksien kannalta on sen pyöriminen. Maapallon rotaationopeus on tasaista ja se pyörähtää akselinsa ympäri kerran 23 tunnissa 56 minuutissa ja neljässä sekunnissa. Tämä tarkoittaa että yhteen rotaatioon kuluu 86,164 sekuntia. Yhteen päivään ei kulu siis 24 tuntia. Mikäli tätä ei huomioida niin virhearvio siirtyisi suoraan myös funktioon. Ympyrässä on 360° ,joten näiden tietojen avulla voidaan laskea maapallon rotaation kulmanopeudeksi 0.0042° sekunnissa. (Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 112.)

3.2 Kehänopeus

Maapallon rotaation kulmanopeus on vakio, mutta kehänopeus maapallon pinnalla vaihtelee riippuen havaitsijan etäisyydestä pyörähdysakseliin. Tämä tarkoittaa että havaitsijan kehänopeus kasvaa sitä suuremmaksi mitä kauempana havaitsija on pyörimisakselia, eli mitä lähempänä havaitisa on ekvaattoria, missä kehänopeus saavuttaa maksimiarvonsa 465.1 m/s. Toisekseen mitä lähempänä havaitsija on pyörimisakselia, eli maapallon tapauksessa pohjoisnapaa tai etelänapaa, sitä pienemmäksi käy kehänopeus. Navoilla kehänopeus saa arvon 0 m/s.(Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 112.)

3.3 Elliptisyys

Maapallo ei ole täysin pyöreä, vaan navoiltaan litistynyt ellipsi. Pyörimisen aiheuttama keskipakoisvoima aiheuttaa maan massan pakkautumisen ekvaattorin seudulle.

Maapallon säde ekvaattorilla on 6 378 137.0 m ja navoilla 6 356 752.3142 m.(Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 112). Täten ekvaattorisen ja polaarisen säteen ero on 21 385 m. Tästä laskemalla maapallon litistymisen arvoksi saadaan 0,3353%.

3.4 Gravitaatio

Maapallon gravitaatiokentän voimakkuuden arvot vaihtelevat alueittain erittäin vähän ja tämän tutkimuksen tarkoituksiin käytän niiden keskiarvoa $9,81 \text{ m/s}^2$. (Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 112). Gravitaation muutoksista johtuvan aikadilaation efektin ottaminen huomioon tutkimuksessa on mahdollista, mutta ylivoimaisen vaikeaa yksityishenkilölle jolla on rajoitettu pääsy tietoihin gravitaatiokentän alueellisista vaihteluista. Suurin mahdollinen ero gravitaatiokentän voimakkuudessa verrattuna arvoon $9,81 \text{ m/s}^2$ on prosentuaalisesti suuruudeltaan 0,27%. Virheen kompensoiminen on mahdollista oikeanlaisella tietokannan integroinnilla.

4 MENETELMÄ

Tässä luvussa esittelen, miten kehitin aikadilaatio paikannusmenetelmän. Menetelmän rakentamiseen olen käyttänyt aikaa noin kolme vuotta ja kaiken osaamiseni matematiikasta, fysiikasta sekä merenkulusta. Vaikein ja pitkäkestoisin prosessi menetelmän kehittämisessä oli kokonaisuuden hahmottaminen ja funktioiden rakentaminen. Tämä tapahtui pääosin laivoilla, kotona ja koulussa.

4.1 Toimintaperiaate

Koska havaitsijan kehänopeus maapallon pinnalla kasvaa sitä mukaa mitä lähemmäs havaitsija kulkee ekvaattoria, niin mikäli havaitsijan kehänopeuden arvo saadaan selville, niin saadaan selville myös havaitsijan latitudin arvo, sillä jokaiselle latitudin arvolle on olemassa sille ominainen kehänopeuden arvo. Kun havaitsijalla on tiedossa latitudin arvo, niin yhdestä satelliitista saatu signaali mahdollistaa longitudin määrittämisen, sillä satelliitista saatu signaali kattaa satelliitin paikkatiedon, sekä signaalin lähettämisaikajankohdan. Signaalin saapumisajankohta voidaan määrittää atomikellolla joka on tahdistettu satelliitin kanssa samaan aikaan. Kun latitudi on tiedossa ja nämä satelliitista saadut tiedot otetaan huomioon, niin on olemassa vain yksi paikka missä havaitsija voi näiden faktojen puitteissa maapallon pinnalla olla.

Metodin ongelmaksi jää siis kysymys siitä miten kehänopeus voidaan selvittää. Tässä kohtaa peliin tulee mukaan aikadilaatio; asetetaan havaitsijan paikkaan erittäin tarkka ajanmittauslaite kuten atomikello. Tämän jälkeen asetetaan vertailukohteeksi toinen atomikello pohjoisnavalle missä kehänopeus on arvoltaan 0 m/s. Koska havaitsijan paikassa kehänopeuden arvo on suurempi kuin 0 m/s, niin tämä atomikello alkaa välittömästi aikadilaation takia jättämään suhteessa pohjoisnavan kelloon. Annetaan aikadilaation vaikuttaa muutaman sekunnin ajan, jonka jälkeen verrataan kellojen jätätystä toisiinsa saman satelliitin kautta jota käytetään longitudi arvon määrittämiseen. Aikadilaation aikaansaama efekti on erittäin pieni, mutta se on atomikelloilla

havaittavissa. Koska tiedossa tämän jälkeen on ajan jätätyksen arvo havaitsijan paikassa suhteessa pohjoisnapaan, ja tarkasteluajanjakson kesto, niin perinteisen geometrian ja suhteellisuusteorian mukaisten yhtälöiden avulla voidaan selvittää havaitsijan latitudin arvo.

4.2 Funktio

Käyttämällä Albert Einsteinin suhteellisuusteorian yhtälöitä yhdessä perinteisen geometrian kanssa pystytään päättämään havaitsijan paikan maapallon pinnalla. Näiden faktojen pohjalta olen kehittänyt yhtälön joka laskee havaitsijan latitudin maapallon pinnalla käyttäen pelkkää aikadilaatitietoa. Ensimmäinen yhtälö on käytännössä sama kuin seuraava, mutta siitä näkee helpommin, miten päädyin lopputulokseen.

$$d = \frac{t}{\sqrt{\frac{(\frac{\cos(\alpha) \times P}{S})^2}{c}}} - t$$

Jossa:

t = Tarkasteluaika [s].

P = Maapallon piiri ekvaattorilla [m].

S = Maapallon pyörähdysaika akselinsa ympäri [s].

c = Valonnopeus [m/s]

α = Kulman suuruus ekvaattorin ja mitattavan kohteen välillä (joka on sama asia kuin latitudi). [°] (Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 128.)

Kun yhtälöä ratkaistaan alphan (α) suhteen ja vakiokertoimien paikoille sijoitetaan niille ominaiset arvot niin saadaan funktio, jonka avulla voidaan ratkaista latitudin arvo sijoittamalla d :n ja t :n arvoiksi mitatut arvot. Ongelmana kyseisessä yhtälössä on, että se

ei kykene määrittämään onko havaitsija eteläisellä vai pohjoisella pallonpuoliskolla. Oletuksena on, että havaitsija tietää tämän mittausta aloittaessaan.

$$\alpha = 0,996647 \times \arccos\left(\frac{911565 \times \sqrt{d \times (t + 0,5 \times d)}}{t + d}\right)$$

Jossa:

d = aikadilaation määrä [s]

t = tarkastelu aika [s]

4.2.1 Yhtälön rakentaminen

$$t_v = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \implies \frac{\cos(\alpha) \times P}{S} \implies d = \frac{t}{\sqrt{\frac{(\frac{\cos(\alpha) \times P}{S})^2}{c^2}}} - t$$

$$\implies \alpha = 0,996647 \times \arccos\left(\frac{911565 \times \sqrt{d \times (t + 0,5 \times d)}}{t + d}\right)$$

Yhtälön pää rakenne koostuu suhteellisuusteorian aikadilaatio funktiosta. Tämän jälkeen olen alkuperäiseen yhtälöön sijoittanut nopeuskomponentin (v) kohdalle funktion maapallon kulmanopeudesta kullakin latitudilla, jota kuvaa alpha (α). Tämän jälkeen olen sijoittanut vakiokertoimien paikoille niiden arvot ja ratkaissut yhtälön alphan suhteen, joka on tässä tapauksessa sama asia kuin latitudi. Nyt latitudi saadaan sijoittamalla havaitsijan mittaaman aikadilaation arvo (d) ja sen määrittämiseen käytetyn ajanjakson arvo (t) kaavaan.

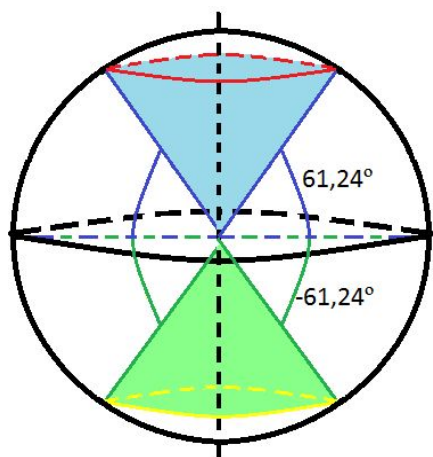
4.2.2 Ellipsoidin huomiointi

Erittäin haasteelliseksi, mutta silti ratkaistavissa olevaksi ongelmaksi metodin kannalta osoittautui maapallon litistyneisyyden huomioiminen funktiossa, sillä alkuperäinen kaava olettaa maapallon täysin pyöreäksi. Maa on navoiltaan litistynyt ellipsoidi, joka johtuu rotaation aiheuttamasta keskipakoisvoimasta. (Seppänen, Kervinen, Parkkila & Karkela & Meriläinen 2005, 112). Tämä aiheuttaa massan pakkautumisen ekvaattorin alueelle. Pitkän pohdinnan tuloksena löysin ongelmaan lopulta erittäin yksinkertaisen ratkaisun. Kun maapallon litistyneisyyttä kuvataan arvolla joka kertoo polaarisaiteen suhteen ekvaattorisäteeseen, niin tätä vakiokerrointa voidaan käyttää funktiossa siten, että sillä kerrotaan edellä esitetyn kaavan antama latitudiarvo. Funktio toimii, sillä vakiokerroin vaikuttaa lineaarisesti latitudin arvoon. Alkuperäinen funktio laskee kaiken ekvaattorisäteeseen perusteella, eli se antaa määritettävälle latitudille hieman liian suuren arvon. Mikäli latitudin arvoksi saadaan 0, eli mittaus on tehty ekvaattorilla, niin kertoimella ei ole siihen myöskään vaikutusta. Ekvaattorisädearvon virhe kasvaa navoilta mentäessä suhdearvolla 0,3353%, joten kertomalla alkuperäisen kaavan antama latitudi arvolla $(1-0.003353)$ saadaan tuloksesta tarkempi.

4.2.3 Esimerkkilasku

Havaitsija istuu Rauman merikoululla ja tekee 60 sekunnin ajan aikadilaatiomittausta atomikellolla verraten sitä pohjoisnavan atomikelloon. Mittauksen päätyttyä hän saa aikadilaation arvoksi 1.65×10^{-11} sekunnin jätätyksen. (Olen laskenut aikadilaation arvon käyttäen aikadilaatioyhtälöitä MAOL-taulukkokirjasta ja laskenut kyseisen koordinaatin kehäopeuden.) Sijoitetaan kaavaan kyseiset arvot ja funktio tekee kaiken muun. Otettakoon huomioon että Rauman merikoulun latitudin arvo todellisuudessa on 61.12° .

$$\alpha = 0,996647 \times \arccos\left(\frac{911565 \times \sqrt{1.65 \times 10^{-11} \times (60 + 0,5 \times 1.65 \times 10^{-11})}}{60 + 1.65 \times 10^{-11}}\right) = 61.2372^\circ$$



Kuva 3. Tuloksen havainnollistaminen.

4.2.4 Virhelähteet

Tuloksessa esiintyvä 0.12 asteen virhe johtuu siitä, että funktio ei huomio gravitaatiokentän muutoksesta aiheutuvaa aikadilaatiota. Gravitaatiokentän muutokset ovat huomioitavissa, mutta aiheen käsittely ei rajallisten resurssien ja ongelman haastavuuden vuoksi ole tässä yhteydessä mahdollista.

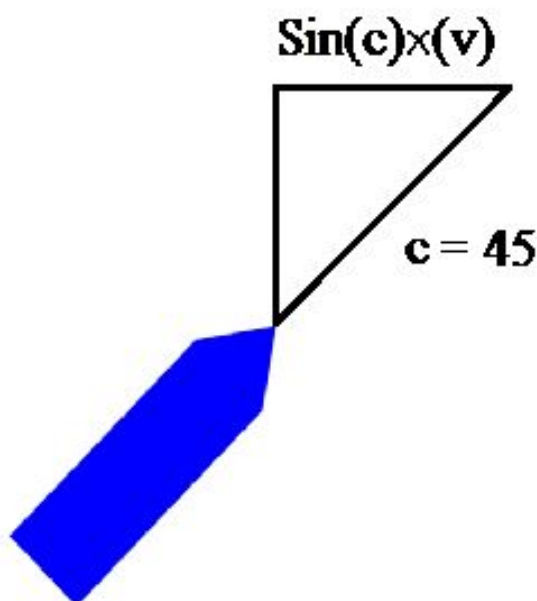
4.3 Merenkulun sovellukset

Aluksen ominaisuudet tuovat omat haastena metodille. Laiva ei ole paikallaan oleva kappale ja tästä aiheutuvat aikadilaation virheet on myös otettava huomioon.

Aikadilaatioon vaikuttaa havaitsijan nopeus suhteessa toiseen kappaleeseen. Mikäli laiva liikkuu, on tämä otettava aikadilaation määrittämisessä huomioon.

4.3.1 Vauhtivirhe

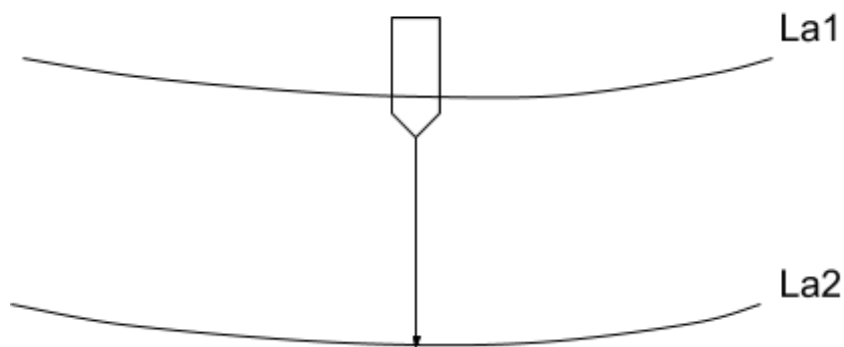
Laivan liike on otettava huomioon, jotta metodi antaa oikean tuloksen. Tähän vaaditaan tieto aluksen nopeudesta ja suunnasta. Metodin kannalta olennainen tieto on aluksen nopeus itä-länsi suunnassa. Täten nopeutta tulee tarkastella ainoastaan vaaka-akselin suuntaisena komponenttina. Tämä onnistuu helposti jakamalla aluksen vauhtivektori pohjois-etelä -ja itä-länsi -suuntaisiin komponentteihin. Itä-länsi suuntainen komponentti saadaan selville käyttämällä yhtälöä: $\sin(C) \times v$ missä (C) on aluksen suunta ja (v) on aluksen nopeus. Aluksen nopeus voidaan selvittää esimerkiksi akustisella doppler-lokilla.



Kuva 4. Aluksen suunnan huomiointi.

4.3.2 Latitudin muuttuminen mittauksen aikana

Mikäli aluksella on nopeutta myös longitudin suuntaisesti, niin latitudin suuntainen kehänopeuden suuruus muuttuu jatkuvasti mittauksen aikana. Järjestelmä ei kykene määrittämään aluksen liikkeen suuntaa mittauksen aikana, vaan se tarkastelee ainoastaan aikadilaation suuruutta. Täten mittauksen päätyttyä metodi antaa keskiarvon latitudeista, joilla alus liikkui. Tämä ei ole ongelma, mutta vaatii sen, että ensimmäinen mittaus suoritetaan aina ennen aluksen liikkeelle lähtöä. Seuraavan mittauksen loppupiste voidaan määrittää keskiarvo yhtälöllä: $\frac{La_1 + La_2}{2} = La_K$, missä (La_1) on mittauksen alkupiste (La_2) on mittauksen loppupiste, ja La_K on aikadilaatiomittauksen tulos. Kaavassa on vain yksi tuntematon. Todellinen mittauksen loppupiste voidaan ratkaista yhtälöstä, ja näin saadaan selville aluksen todellinen paikka mittauksen päättyessä. Kyseinen toimintaperiaate pätee vain aluksen kulkiessa vakiosuunnalla.



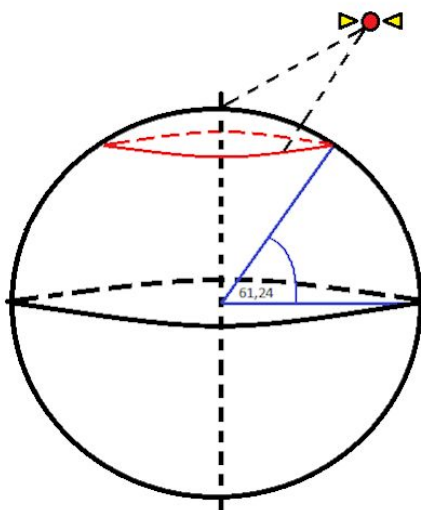
Kuva 5. Alus latitudien välillä mittauksen aikana.

4.3.3 Ekvaattorin ylitys

Järjestelmä ei kykene määrittämään millä pallonpuoliskolla havaitsija on. Täten aluksen ensimmäisen mittauksen yhteydessä käyttäjän tulee ilmoittaa järjestelmälle onko alus pohjoisella vai eteläisellä pallonpuoliskolla. Kun alus ylittää ekvaattorin niin rotaationopeus alkaa pienenemään. Metodi ei kykene määrittämään sellaisenaan ylittikö alus ekvaattorin, vai sivusiko se ekvaattoria ja kääntyi tämän jälkeen välittömästi takaisin. Tämä voidaan määrittää käyttämällä muita aluksen elektronisia navigointijärjestelmiä. Kun alus navigoi ekvaattorin alueella, niin järjestelmä vaatii aluksen suunta- ja nopeustiedot. Niiden avulla voidaan määrittää ylittikö alus ekvaattorin, vai kääntyikö se takaisin samalle pallonpuoliskolle josta tuli.

4.4 Satelliitti

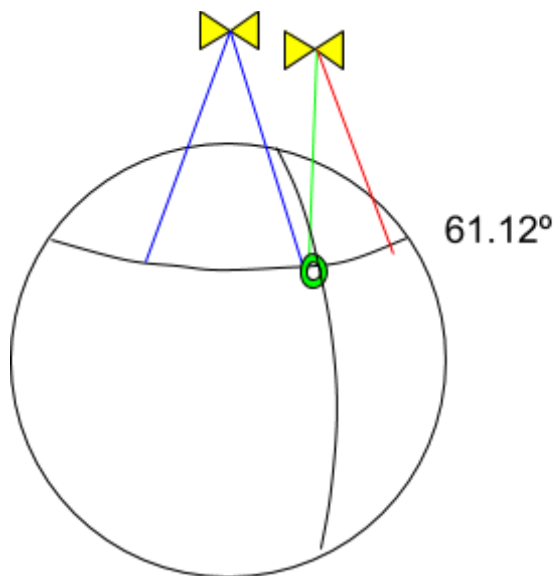
Järjestelmä vaatii vähintään yhden satelliitin toimiakseen. Atomikellojen välinen kommunikointi voidaan mahdollistaa satelliitilla, sillä ne kaartuvat toistensa ulottumattomiin horisontin taakse. Satelliitilla on kaksi työtehtävää: atomikellojen välisen kommunikoinnin ylläpitäminen sekä havaitsijan longitudin määrittäminen.



Kuva 6. Satelliitti.

4.4.1 Latitudi

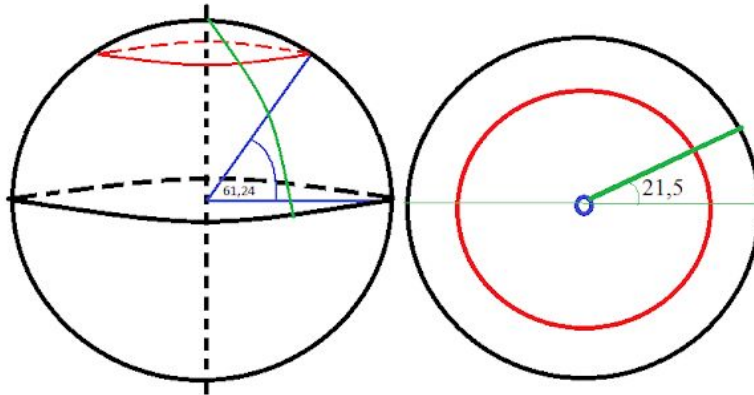
Aikadilaatio mittauksen jälkeen havaitsijalla on tiedossa ainoastaan korkeusaste. Tämä tarkoittaa että järjestelmällä on tieto ainoastaan siitä millä latitudilla havaitsija on (katso kuva 7). Jotta havaitsijan paikan longitudi voidaan määrittää vaaditaan satelliitilta signaali, joka ilmoittaa signaalin lähtöajan, ja tiedon siitä missä satelliitti oli kiertoradallaan signaalin lähtöhetkellä. Koska signaali etenee valonnopeudella, niin signaalin kulkema matka, eli etäisyys satelliittiin voidaan määrittää. Tämä antaa kaksi mahdollista paikkaa havaitsijalle. Toinen niin sanottu harhapaikka voidaan poistaa, kun vastaanotetaan seuraava paikannussignaali samalta satelliitilta. Kun satelliitti on liikkunut ja tämä liikerata on tiedossa (tässä tapauksessa kohti havaitsijaa), niin on olemassa vain yksi paikka, jossa ensimmäisen signaalin antama sijoittaja ja toisen signaalin sijoittaja kohtaavat. Kuvassa alkutilanteen signaalit ovat havainnoitu sinisinä ja seuraavan mittauksen signaali on havainnoitu vihreänä ja punaisena. Mittaus antaa aina kaksi mahdollista paikkaa, mutta riippuen satelliitin kiertoradasta ja sen paikasta, niin menetelmällä voidaan virheellinen paikka määrittää pois yhtälöstä.



Kuva 7. Satelliitin työtehtävän havainnollistaminen

4.5 Longitudin määrittäminen ilman satelliittia

Longitudi voidaan vaihtoehtoisesti määrittää lähettämällä pohjoisnavan atomikellolle MF/HF signaali. Signaalin tulosuunnasta voidaan tällöin päätellä havaittajan longitudin arvo.



Kuva 8. Longitudin määrittäminen ilman satelliittia.

5 KÄYTTÖTARKOITUKSET

Tässä luvussa käyn läpi menetelmän mahdollisia käyttötapoja merenkulun sovelluksissa.

5.1 Hyödyt

Menetelmä kykenisi teoriassa tekemään paikanmäärytyksestä kustannustehokkaampaa, sillä se vaatii toimiakseen vain yhden satelliitin neljän satelliitin sijaan. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi Euroopan satelliittijärjestelmä Galileo saataisiin teoriassa toimimaan ilman suuria investointeja yhteistoiminnassa menetelmän kanssa. (Euroopan GSA:n [www-sivut](http://www.gsa.europa.eu) 2018). Koska järjestelmä ei ole riippuvainen GPS-järjestelmästä, joka on täysin USA:n kontrolloitavissa, niin Eurooppa voisi taata laivaston toimintavarmuutensa konfliktitilanteissa, tai tilanteissa, joissa tällainen uhka olisi olemassa.

Toimintavarmuutta takaavat järjestelmät ovat erittäin tärkeitä myös puolustusvoimille, ja uskon että tällä taholla voisi olla kiinnostusta menetelmää kohtaan.

5.2 Merenkulun käytännön sovellukset

Menetelmän käytännön soveltamiseen laivalla tarvittaisiin atomikello sekä anturi, joka mittaa gravitaatiokentän voimakkuutta. Gravitaatiota mittaava anturi ei kykene erottamaan laivan heilumisesta aiheutuvia kiihtyvyyksiä gravitaatiosta, niin heilumisesta aiheutuvat kiihtyvyydet tulisi kompensoida pois algoritmeista niihin tarkoitetuilla antureilla. Näillä investoinneilla alus kykenisi tulevaisuudessa soveltamaan paikanmäärytystä aikadilaatiomenetelmällä. Kyseisten laitteiden hinnat ovat tulleet alas ja jatkavat edullistumistaan jatkossakin.

6 YHTEENVETO

Aikadilaatiopaikannus saattaisi olla hyödyntämiskelpoinen menetelmä merenkulussa. Menetelmä on teoreettisella tasolla toimiva ja sen absoluuttinen tarkkuus on parhaimmillaan vain muutaman asteen desimaalin luokkaa. Totesin, että gravitaatiokentän muutoksista aiheutuvat aikadilaaton virheet ovat kompensoitavissa, mutta opinnäytetyön yhteydessä menetelmän kehittäminen on mahdotonta. Menetelmä on matematiikan harrastajan tekemä ja huomataan, että siihen suhteutettuna menetelmällä saattaa olla käyttöä tulevaisuudessa.

LÄHTEET:

Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkina, I., Karkela, L. & Meriläinen, P. 2005. maol taulukot. Helsinki: Syys.

Einstein, A. 1905. Special theory of relativity.

Yhdysvaltain viralliset www-sivut koskien GPS-järjestelmää. Viitattu 25.9.2018
<https://www.gps.gov/>

Missisipin yliopiston www-sivut. Viitattu 25.9.2018. <https://www.phy.olemiss.edu/>

Scitechdailyn www-sivut. Viitattu 25.9.2018. <https://scitechdaily.com/>

Euroopan GSA:n www-sivut. Viitattu 25.9.2018. <https://www.gsa.europa.eu/>